

MO-1
532.51
Z44d
TES/UFU

60

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
LABORATÓRIO DE ENERGIA E DINÂMICA DOS FLUIDOS

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE FOTOGRAFIA PARA O
ESTUDO DE FENÔMENOS DE ALTAS FREQUÊNCIAS EM ASPERSORES
JATO-PLACA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por:

JORGE LUIS ZEGARRA TARQUI

como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Banca examinadora:

- Prof. Dr. Aristeu da Silveira Neto (orientador) - UFU
- Prof. Dr. Ricardo Fortes de Miranda - UFU
- Prof. Dr. Luís Fernando Alzuguir Azevedo - PUC/RJ
- Prof. Msc. Thomaz William Mendoza-Harrell - UFU

DIRBI/UFU 532.51 Z44d /TES/FU
00412/96



1000022829

Uberlândia, 08 de Março de 1996

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Biblioteca

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
 LBRB: DIRETORIA DE BIBLIOTECAS

Procedência _____

Assunto D. Saçari

Faculdade 96

C.F.D. _____

N.º de Reg. _____

Reg. 00412/96 Data 26/04/96

Vol. _____ Ex. 1

FU-00005794-4

A mis padres, hermanos y a los que me rodean. Los que
 quando mi mundo tiembla no me dejam caer y me aferran a la vida.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Dr. Ricardo Fortes e Dr. Gilmar Guimarães, pelos conhecimentos transmitidos nas aulas e pela amizade.

Ao Prof. Thomaz, que me ensinou parte do mundo da fotografia.

Ao CNPq e à Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica pelo apoio financeiro.

Aos companheiros Clever, Rigoberto, Aurilo, Sandro, Arlindo, Paulo, Cláudio, Idalberto e aos demais colegas do mestrado pela amizade sincera e ajuda constante.

Ao Prof. Dr. Aristeu da Silveira Neto por sua orientação, oferecendo-me sua paciência e compreensão no processo da orientação. Em especial por transmitir-me o espírito da pesquisa.

Desenvolvimento de um Método de Fotografia Para o Estudo de Fenômenos de

Altas Frequências em Aspersores Jato-Placa

RESUMO: Neste trabalho, foi desenvolvido um estudo visando o domínio do método de fotografia e sua aplicação para a compreensão dos fenômenos físicos hidrodinâmicos de altas frequências envolvidos no processo de formação de gotas emaspersores jato-placa. Para tanto, fez-se provas sobre as diferentes técnicas de iluminação aplicadas no método de fotografia. Desenvolveu-se um equipamento de iluminação especial baseado em uma lâmpada estroboscópica acionada por um circuito gerador de um pulso eletrônico de disparo. O processo de formação de gotas neste tipo de aspersores é composto de quatro fases: a) Jato livre incidente sobre uma placa cônica; b) filme líquido sobre a placa; c) Lençol livre formado após placa e d) frente de gotas. No jato livre observou-se a presença de diferentes ordens de instabilidades, cada uma se manifestando de maneira mais ou menos acentuada de acordo com a variação do número de Reynolds. Um estudo comparativo da variação do comprimento do "breakup" quebra do jato, para condições de funcionamento similares em dois modelos de injetores oferecidos no mercado, permitiu conferir a influência do desenho do injetor no desenvolvimento das instabilidades. Os resultados fotográficos das fases b, c e d permitiram visualizar a dinâmica do processo de formação de gotas. Ressalta-se a presença de descontinuidades do lençol livre em forma de lacunas e seus desenvolvimentos ao longo do lençol determina a formação de frentes de gotas descontínuas e de oscilações tridimensionais. A quantificação de gotas pelo método de fotografia apresentou bons resultados mas não foi possível um maior aprofundamento devido a limitações do software empregado para tal fim.

PALAVRAS-CHAVES: ASPERSÃO, FOTOGRAFIAS, INSTABILIDADES HIDRODINÂMICAS, GOTAS, COMPRIMENTO DE QUEBRA, FENÔMENOS DE ALTA FREQUÊNCIA.

Development of a Photography Method for Study of High Frequency Phenomena in Spray Systems

ABSTRACT: In this work, a photograph method has been developed for studying of hydrodynamic physical phenomena of high frequencies of drop formation in jet-plate sprays. Experimental tests have been done using various kinds of illumination techniques. Illumination equipment has been developed using a strobe lamp triggered by a pulse signal. The formation of drops in a jet-plate spray consists of 4 phases: a) a free jet impinging on the conic plate, b) a liquid film on the conic plate, c) a free sheet formed downstream of the plate and d) a front of drops.

On the free jet, various sorts of instabilities have been observed; where the combined presence of these instabilities depended on the Reynolds number. A comparative study has been done, comparing the break-up distance for various types of nozzles. This confirmed the dependence of spray pattern on nozzle geometry. The results permit the visualisation of the dynamic process of drop formation. Free sheet instabilities in the form of gaps were observed, and these influenced the formation of drop fronts and three dimensional oscillations. The quantification of drops by the photographic method presented good results, but a more profound study was limited by the software used.

KEY-WORDS: Spray, photography; hydrodynamic instabilities; drops; breakup length; High Frequencies Phenomena.

**DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE FOTOGRAFIA PARA O
ESTUDO DE FENÔMENOS DE ALTAS FREQUÊNCIAS EM ASPERSORES
JATO-PLACA**

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Objetivos do Trabalho	1
1.2 - Revisão Bibliográfica	2
1.3 - Justificativas para Realização do Trabalho	12
1.4 - Características deste Trabalho	13

2 - MÉTODO DE FOTOGRAFIA

2.1 - Método de Fotografia	14
2.2 - Filme Preto e Branco	15
2.3 - Sensibilidade, Grão e Contraste	16
2.4 - Velocidade do Filme	17
2.5 - Contraste	17
2.6 - Focalização	18
2.7 - Abertura e Focalização	19
2.8 - Obturador	20
2.9 - Profundidade de Foco	20

2.10 - Profundidade de Campo	21
2.11 - Câmaras	22
2.12 - Acessórios de Fotografia	23
2.12.1 - Tubo de Extensão, Foles e Lentes Close-up	23
2.13 - Flashes	24
2.14 - Técnicas de Iluminação	24
2.14.1 - Iluminação Oblíqua	24
2.14.2 - Back Lighting	25
2.14.3 - Iluminação Indireta Refletida	26
2.15 - Técnica de Fotografia	28
3 - EQUIPAMENTOS E MATERIAIS	29
3.1 - Equipamentos	29
3.1.1- Banca Experimental	29
3.1.2 - Equipamento de Fotografia	32
3.1.3 - Equipamento de Iluminação	33
3.2 - Materiais	34
3.2.1 - Materiais Fotográficos	34
3.2.2 - Materiais auxiliares de Iluminação	34
3.2.3 - Materiais de Revelação do Filme e Cópia de Fotografia	34

4 - METODOLOGIA	35
4.1 - Considerações Gerais	35
4.2 - Provas Preliminares	36
4.2.1 - Considerações Iniciais	36
4.2.2 - Seleção da Técnica de Iluminação	36
4.2.3 - Seleção do Flash	37
4.2.4 - Abertura Ótima do Diafragma	37
4.3 - Jato Livre	39
4.3.1 - Teste Piloto	39
4.3.2 - Visualização das Instabilidades no Jato Livre na saída do bico	40
4.3.3 - Visualização das Instabilidades ao Longo do Jato	40
4.3.4 - Teste no Breakup do Jato	41
4.4 - Lençol	41
4.4.1 - Visualização do Perfil do Spray	41
4.4.2 - Visualização do Processo de Formação de Gotas	42
4.5 - Quantificação da Frente de Gotas	44
4.5.1 - Testes para a Obtenção de Imagens da Frente de Gotas	44
4.5.2 - Quantificação Preliminar de Gotas	45
4.5.2.1 - Considerações Gerais	45
4.5.2.2 - Medição de Gotas por Meio do Software GLI	45
4.6 - Efeito Suporte	48

5 - RESULTADOS	49
5.1 - Técnicas de Iluminação	49
5.2 - Visualização de Instabilidades em Jatos Livres	51
5.3 - Visualização do Desenvolvimento das Instabilidades ao longo do Jato Livre	58
5.3.1 - Considerações Gerais	58
5.3.2 - Visualização de Instabilidades Rayleigh - Primeira Ordem	58
5.3.3 - Visualização das Instabilidades Superficiais de Segunda Ordem	63
5.3.4 - Visualização das Instabilidades de Terceira Ordem	69
5.3.5 - Transição entre Instabilidades de Terceira Ordem e Regime Spray	73
5.4 - Visualização do Breakup do Jato Livre	77
5.4.1 - Considerações Gerais	77
5.4.2 - Visualização do Breakup do Jato	77
5.4.3 - Visualização dos Breakup Secundários	79
5.5 - Estudo Qualitativo e Quantitativo Preliminar entre dois Modelos de Bico	83
5.5.1 - Considerações Gerais	83
5.5.2 - Análise Qualitativa Comparativa	83
5.5.3 - Análise Quantitativa Comparativa	83

5.6 - Visualização do Processo de Formação de gotas - Fenômenos Associados	89
5.6.1 - Considerações Gerais	89
5.6.2 - Visualização do Perfil	89
5.6.3 - Quantificação da Inclinação do Lençol	99
5.6.4 - Processo de Formação de Gotas - Fenômenos Físicos	102
5.6.4.1 - Considerações Gerais	102
5.6.4.2 - Visualização Global do Lençol	102
5.6.4.3 - Detalhes das Frentes das Gotas	108
5.7 - Quantificação da Frente de Gotas	121
5.7.1 - Processo de Quantificação	121
5.7.2 - Atributos das Partículas	127
5.7.3 - Tabelas de Resultados de Quantificação	128
5.8 - Efeito Suporte	135
6 - CONCLUSÃO E SUGESTÕES	139
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	142
8 - ANEXOS	147
8.1 - Dados Técnicos dos Equipamentos	148

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Aspersor jato-placa	2
Figura 1.2 Visualização do processo de formação de gotas no aspersor jato-placa	3
Figura 1.2 - Partícula e os parâmetros de interesse na caracterização do spray	11
Figura 2.1 - Camadas que compõem o filme preto e branco	16
Figura 2.2 - Distância focal	18
Figura 2.3 - Quadro da profundidade de campo	21
figura 2.4 - Iluminação oblíqua	25
Figura 2.5 - Back lighting difusa	26
Figura 2.6 - Iluminação indireta refletida	27
Figura 2.7 - Dupla iluminação na indireta refletida	27
Figura 3.1 - Sistema de alimentação	29
Figura 3.2.- Sistema de regulagem de vazão	30
Figura 3.3 - Sistema para o estudo do jato livre	31
Figura 3.4 - Sistema do estudo de aspersor jato-placa	32
Figura 3.5 - Circuito de disparo da lâmpada	33
Figura 4.1 - Instalação de equipamentos na procura de abertura ótimo de diafragma	38
Figura 4.2 - Instalação do equipamento na visualização do perfil do spray. Técnica back lighting	42
Figura 4.3 - Instalação do equipamento na visualização do lençol livre e fenômeno borda. Técnica back lighting	43

Figura 4.4 - Instalação de equipamento na visualização e quantificação de gotas. Técnica back lighting; (a) aparelho de suporte da esfera e (b) esfera padrão de medida de 3 mm.	44
Figura 4.5 - Partícula identificada pelo software, a parte escura é a área da partícula e a parte branca é o buraco	47
Figura 5.1 - Técnicas de iluminação indireta refletida; (a) usando uma lâmpada estroboscópica e (b) usando dois flashes eletrônicos sincronizados com célula fotoelétrica; Visualização do jato em queda livre; Vazão 50 l/h e bico No 11	51
Figura 5.2 - Técnica de iluminação oblíqua; Visualização do perfil do spray; Placa 44 mm, bico No 7 e vazão 350 l/h	52
Figura 5.3 - Técnica de iluminação back lighting difusa. Visualização do perfil do spray. Placa de 44 mm, bico No 7 e vazão 350 l/h	52
Figura 5.4 - Visualização das instabilidades no jato na saída do bico No 16; a) $Re_b = 1.113$ e b) $Re_b = 11.137$	55
Figura 5.5 - Visualização das instabilidades no jato na saída do bico No 16; a) $Re_b = 33.437$ e b) $Re_b = 55.696$	56
Figura 5.6 - Visualização das instabilidades no jato na saída do bico No 16; a) $Re_b = 89.113$ e b) $Re_b = 122.537$	57
Figura 5.7. Visualização das instabilidades no regime Rayleigh; a) Jato na saída do bico e b) breakup do jato, visualização de instabilidades simétricas a 40,5 cm do bico; Bico No 9 com vazão 50 l/h; $Re_b = 4.953$	60

- Figura 5.8. Visualização do regime Rayleigh. a) Jato a 50,5 cm do bico e b) jato a 60,5 cm do bico; Bico No 9; vazão de 50 l/h; $Re_b = 4.953$ 61
- Figura 5.9. Detalhes; a) Instabilidades simétricas no breakup do regime Rayleigh; b) Instabilidades simétricas sobre as gotas no regime Rayleigh 62
- Figura 5.10. Visualização do regime primeiro enrolamento induzido; a) Instabilidades no jato na saída do bico e (b) Desenvolvimento das instabilidades no jato com marca a 34,5 cm do bico; Bico No 9 com vazão de 300 l/h; $Re_b = 29.705$ 65
- Figura 5.11. Visualização das instabilidades de segunda ordem; a) Estrangulamento do jato por instabilidades desenvolvidas. Distância da marca a 54,5 cm do bico e b) Breakup do jato; Distância da marca a 64,5 cm do bico; Bico No 9 e vazão 300 l/h; $Re_b = 29.705$ 66
- Figura 5.12. Visualização das instabilidades de segunda ordem; a) Formação de blocos de jato após o breakup a 85,5 cm do bico e b) Breakup dos blocos formando gotas a 98,7 cm do bico; Bico No 9 e vazão 300 l/h; $Re_b = 29.705$ 67
- Figura 5.13. Visualização das instabilidades sobre as gotas; (a) Detalhe do breakup da figura 5.11 (b); b) detalhe do breakup da figura 5.12 (b). 68
- 5,14; Visualização das instabilidades de segunda ordem a) sobre o jato na saída do bico. b) sobre o jato a uma distância de 34,5 cm do bico; Bico No 9; vazão 630 l/h; $Re_b = 64.361$ 70
- Figura 5.15. Visualização das instabilidades de terceira ordem; a) Início do movimento

de enrolamento tridimensional no jato e distância da marca a 64,5 cm do bico; b) Breakup do jato a 91,7 cm do bico; Bico No 9; vazão 650 l/h; $Re_b = 64.361$ 71

Figura 5.16. Visualização das instabilidades de terceira ordem; Breakup das a uma distância de 110,7 cm do bico; Bico No 9; vazão 650 l/h; $Re_b = 64.361$ 72

Figura 5.17 - Visualização das instabilidades no jato livre; (a) Jato na saída do bico com presença de instabilidades de alta frequência e (b) Início de instabilidades de terceira ordem no jato a 39,5 cm do bico; Bico No 11; vazão 1.480 l/h; $Re_b = 119.915$ 74

Figura 5.18 - Visualização das instabilidades no jato livre; (a) Distância da marca a 59,5 cm do bico e (b) Distância da marca a 91,7 cm do bico. Movimento de enrolamento tridimensional com desprendimento de gotas e ligamentos líquidos nas duas figuras; Bico No 11; vazão 1.480 l/h; $Re_b = 119.915,6$ 75

Figura 5.19. e) Visualização das instabilidades no jato livre, aumento do desprendimento de ligamentos líquidos e gotas; Distância da marca a 103,7 cm; Bico No 11; vazão 1.480 l/h; $Re_b = 119.915,6$ 76

Figura 5.20. Visualização do breakup do jato livre; As quatro provas foram feitas com bico No 7 e o objeto de referência é de 1 cm; a) $Re_b = 6.400$, com objeto de referência a 43,5 cm do bico; b) $Re_b = 13.200$, com objeto de referência a 52 cm do bico; c) $Re_b = 33.300$, com objeto de referência a 72 cm do bico; d) $Re_b = 51.000$, com objeto de referência a 73,5 cm do bico. 78

Figura 5.21. Visualização do Breakup do jato livre e visualização do breakup secundário nos ligamentos formados após do breakup do jato. As quatro provas foram

feitas com bico de 2,8 mm de diâmetro e o objeto de referência e de 1 cm;

a) $Re_b = 6.315$, com o objeto de referência a 24,5 cm do bico;

b) $Re_b = 6.315$, com o objeto de referência a 35,5 cm do bico;

c) $Re_b = 22.100$, com o objeto de referência a 44,5 cm do bico.

d) $Re_b = 22.100$, com o objeto a referência a 56 cm do bico

81

Figura 5.22. Visualização do breakup do jato e visualização do segundo breakup nos ligamentos formados após o breakup do jato. As quatro provas foram

feitas com bico de 2,8 mm de diâmetro e o objeto de referência é de 1 cm;

a) $Re_b = 33.630$, com o objeto de referência a 51,5 cm do bico;

b) $Re_b = 33.630$, com o objeto de referência a 63,5 cm do bico;

c) $Re_b = 54.313$, com o objeto de referência a 57,5 cm do bico;

d) $Re_b = 54.313$, com o objeto de referência a 68,5 cm do bico

82

Figura 5.23 - Variação do comprimento do breakup do jato em função da vazão

86

Figura 5.24 - Variação do comprimento do breakup do jato em função de número de Reynolds

86

Figura 5.25 - Variação do comprimento do breakup do jato em função ao número de Weber

87

Figura 5.26 - Variação do comprimento do breakup do jato em função da vazão

87

Figura 5.27 - Variação do comprimento do breakup do jato em função do número de Reynolds

88

Figura 5.28 - Variação do comprimento do breakup do jato em função do número de Weber	88
Figura 5.29 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 75 l/h; b) Vazão 125 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro	91
Figura 5.30 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 200 l/h; b) Vazão 300 l/h. Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro	92
Figura 5.31 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 400 l/h; b) Vazão 500 l/h. Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro	93
Figura 5.32 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 50 l/h; b) Vazão 125 l/h; Bico No 7 e placa de 34 mm de diâmetro	94
Figura 5.33 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 200 l/h; b) Vazão 300 l/h; Bico No 7 e placa de 34 mm de diâmetro	95
Figura 5.34 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 400 l/h; b) Vazão 500 l/h; Bico No 7 e placa de 34 mm de diâmetro	96
Figura 5.35 - Visualização do perfil do lençol; Vazão 400 l/h; Bico 2,8 de diâmetro e placa de 44 mm de diâmetro	97
Figura 5.36 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 400 l/h; Bico de 2,8 de diâmetro e placa 34 mm de diâmetro	97
Figura 5.37 - Visualização de instabilidades sobre a placa; Vazão 290 l/h; bico 2,8 e placa de 44 mm de diâmetro.	98
Figura 5.38 - Fenômeno de declinação do lençol livre	99

Figura 5.39 - Curva da diferença do ângulo do perfil do lençol e do ângulo da placa (α) vs. Vazão	100
Figura 5.40 - Curva da diferença do ângulo do perfil do lençol e do ângulo da placa (α) vs. Vazão	100
Figura 5.41 - Curva da diferença do ângulo do perfil do lençol e do ângulo da placa (α) vs. Vazão	101
Figura 5.42 - Curva da diferença do ângulo do perfil do lençol e do ângulo da placa (α) vs. Vazão	101
Figura 5.43 - Visualização das lacunas sobre o lençol; a) Vazão 250 l/h; b) Vazão 300 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro	104
Figura 5.44 - Visualização das lacunas sobre o lençol; a) Vazão 350 l/h; b) Vazão 400 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro	105
Figura 5.45 - Visualização das lacunas sobre o lençol; a) Vazão 450 l/h; b) Vazão 500 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro	106
Figura 5.46 - Visualização das lacunas sobre o lençol; Vazão 530 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro	107
Figura 5.47 - Visualização da frente de formação de gotas; Frente de tipo colunas e a origem das gotas é devida ao breakup da borda do lençol; Bico No 7 e vazão 150 l/h	109
Figura 5.48 - Visualização da frente de formação de gotas; Ausência de lacunas perto do borde. A frente de gotas é dispersa; Bico No 7 e vazão 200 l/h.	110
Figura 5.49 - Detalhe da Frente de formação de gotas; A origem das gotas esta no	

breakup da borda do lençol; Bico No 7 e vazão 200 l/h	111
Figura 5.50 - Visualização da frente de formação de gotas; Aumento leve da frequência de lacunas e das estruturas poligonais; Frente de formação de gotas dispersa; Bico No 7 e vazão 300 l/h	112
Figura 5.51- a) Detalhes das instabilidades sobre o lençol; b) Processo de formação de gotas; Breakup da borda do lençol	113
Figura 5.52 - Visualização da frente de formação de gotas; Aumento do frequência de lacunas e variação da forma dos fragmentos de lençol em estruturas de maior tamanho; Bico No 7 e Vazão 400 l/h	114
Figura 5.53 - a) Detalhes das estruturas que dão origem à frente de formação de gotas; b) Processo de breakup sobre os enrolamentos das bordas nos fragmentos de lençol gerando parte das frentes de gotas; Bico No 7 e vazão 400 l/h	115
Figura 5.54 - Visualização da frente de formação de gotas; Estruturas poligonais de lençol; Linhas de ligamentos de liquido e frente de gotas; Vazão 470 l/h e placa de 44 mm de diâmetro	116
Figura 5.55 - Detalhes da frente formação de gotas; a) Estruturas poligonais que dão origem à frente; b) Contração das estruturas, formação de linhas de ligamentos liquido e breakup das linhas e formação da frente de gotas; Bico No 7 e vazão 470 l/h	117
Figura 5.56 - Visualização da frente de formação de gotas; Estruturas poligonais de fragmentos do lençol; Formação de linhas de ligamentos líquidos e frente de gotas; Vazão 530 l/h e placa 44 mm	118

- Figura 5.57 - Detalhes da formação de frentes de gotas; a) Estruturas poligonais que dão origem às frentes; b) Detalhe da sequência do processo de formação de linhas de ligamentos líquidos e breakup formando a frente de gotas; Vazão 530 l/h e placa 44 mm 119
- Figura 5.58 - Detalhe do breakup da linha de ligamentos líquidos; Gotas tomando direções opostas baixo fortes efeitos de inércia e de arrastre apresentando uma certa simetria; Vazão 530 l/h e Bico No 7 120
- Figura 5.59 - Detalhe das estruturas que dão origem às frentes de gotas; Visualização dos ligamentos que se interconectam com outros fragmentos de lençol; Observe-se instabilidades sobre a superfície dos fragmentos; Vazão 470 l/h e bico No 7. 120
- Figura 5.60 - Área de quantificação de gotas; Vazão 200 l/h e Bico No 7; Circunferência branca de 3 mm de diâmetro. 122
- Figura 5.61. Quantificação de uma parte da frente de gotas da figura 5.60 com o Software “GLI; Vazão 200 l/h e bico No 7. 122
- Figura 5.62 - Quantificação de uma parte da figura 5.61; O clouse up foi feito com a câmara vídeo e com o software “GLI”; Vazão 200 l/h e bico No 7; Área da gota No 9 é $1,04 \text{ mm}^2$. 123
- Figura 5.63 - Área de quantificação de gotas. Circunferência preta de 3 mm de diâmetro. Vazão 400 l/h e bico No 7. 123
- Figura 5.64 - Quantificação de uma parte da frente de gotas da figura 5.63 com o

Software “GLI; Vazão 400 l/h e bico No 7.	124
Figura 5.65 - Quantificação de uma parte da figura 5.64; O clouse up foi feito com a câmara vídeo do software “GLI”; Vazão 400 l/h e Bico No 7; Área da gota No 18 é 2.86 mm ²	124
Figura 5.66 - Fotografia mostrando área de quantificação de gotas; Vazão 530 l/h e bico No 7; Circunferência de 3 mm de diâmetro é o parâmetro de referência no processo de calibração para a medição	125
Figura 5.67 - Quantificação de uma parte da frente de gotas da figura 5.66; Vazão 530 l/h e bico No 7.	126
Figura 5.68 - Quantificação de uma parte da figura 5.67; O clouse up foi feito com a câmara de vídeo e com o software “GLI”. Vazão 530 l/h e bico No 7; Área da gota No 16 é 0,51 mm ²	126
Figura 5.69 - Visualização do efeito suporte; a) Vazão 100 l/h; b) Vazão 200 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro	136
Figura 5.70 - Visualização do efeito suporte; a) Vazão 300 l/h; b) Vazão 400 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro	137
Figura 5.71 - Visualização do efeito suporte; a) Vazão 450 l/h; b) Vazão 530 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro	138

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Letras Latinas

<i>A</i>	Área da partícula	[mm^2]
<i>D</i>	Diâmetro da partícula	[mm]
<i>d</i>	Diâmetro do bico	[mm]
<i>f</i>	Abertura de diafragma	
<i>L</i>	Distância referente ao jato	[cm]
<i>P</i>	Perímetro da partícula	[mm]
<i>Re</i>	Número de Reynolds	
<i>v</i>	Velocidade	[m/s]
<i>We</i>	Número de Weber	
<i>z</i>	Número de Ohnesorge	

Letras Gregas

ρ	densidade	[kg/m^3]
μ	micra	[10^{-6}]
μ	viscosidade	[$m/l s$]
σ	Tensão Superficial	[N/m]

Índices

a	Área da partícula
L	Líquido
g	Gás
o	Diâmetro do bico
b	Com respeito ao bico injetor
t	Com respeito ao diâmetro da tubulação $\frac{3}{4}$ " que antecede ao bico

Abreviaturas

DEEME	Departamento de Engenharia Mecânica
LEDIF	Laboratório de Energia e Dinâmica dos Fluidos
GLI	Global Lab Image

Nomenclatura

d_o = diâmetro do bico

ρ_g = densidade do gas

ρ_L = densidade líquida

μ_L = viscosidade do líquido

$Re_L = \rho_L d_o V_o / \mu_L$ Reynolds líquido

$We_g = \rho_g v_o^2 d_o / \sigma$ Weber com respeito ao gas

$We_L = \rho_L v_o^2 d_o / \sigma$ Weber com respeito ao líquido

$z = \mu_L / (\rho_L d_o \sigma)^{1/2}$ Número Ohnesorge

DESENVOLVIMENTO DE UM MÉTODO DE FOTOGRAFIA PARA O ESTUDO DE FENÔMENOS DE ALTAS FREQUÊNCIAS EM ASPERSORES JATO-PLACA

1- INTRODUÇÃO

1.1 - Considerações Gerais

A busca constante pelo aumento da produtividade agrícola tem levado o homem a utilizar sistemas mecânicos de irrigação para controlar o teor da umidade do solo e desta forma, fugir das adversidades das condições pluviométricas naturais. Neste sentido, água e energia são duas grandezas indispensáveis para a manutenção de um sistema de irrigação estável.

Com a introdução do conceito de eficiência na irrigação por Israelsen (1950), os pesquisadores orientaram seus estudos no sentido de saber que quantidade de água era aplicada e qual era a quantidade aproveitada pela planta.

Crítérios como a uniformidade de distribuição de água no solo e o tamanho das gotas (no caso de sistema de irrigação por aspersão) foram tomados em conta como uma forma de aumentar o potencial de produção de alimentos.

Para um estudo de otimização dos sistemas em conjunto se emprega os critérios de desenho, os quais consistem em focalizar o estudo numa unidade simples de aspersão em condições ideais e os resultados obtidos podem ser utilizados para a análise do desempenho do sistema em sua totalidade. Deste modo para iniciar o estudo é preciso desenvolver um método que permita visualizar os fenômenos apresentados no processo de formação de gotas

no aspersor.

Apesar de existir vários métodos tais como ultra-som, hologramas, laser, etc., aplicáveis ao estudo do sistema de aspersão, estes são geralmente caros. O método de fotografia apesar de apresentar desvantagens ao longo processo de aquisição das imagens, oferece vantagens, como baixos custos e visualização direta. Com o emprego de uma técnica de iluminação e acessórios fotográficos adequados pode-se obter imagens de alto contraste.

O desenvolvimento do método da fotografia e sua aplicação para obtenção das informações qualitativas e quantitativas dos fenômenos de altas frequências no processo de formação de gotas num sistema de aspersão tipo jato-placa é o objetivo do presente trabalho.

1.2 - Revisão Bibliográfica

Um sistema de irrigação tipo Jato-Placa é definido por Raposo (1979), como aquele que gera uma precipitação artificial obtida através da desintegração, na forma de gotas, de um jato de água emitido diretamente contra um obstáculo fixo, neste caso uma placa.

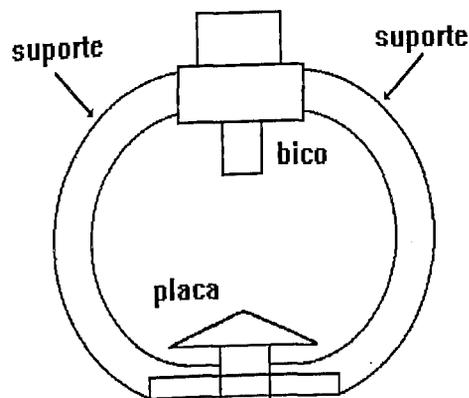


Figura 1.1 Aspersor jato-placa.

Desta forma, a partir da década de 80, começaram a surgir pesquisas visando um controle efetivo sobre o fenômeno em questão. Pesquisadores como Von Bermuth e Gilley

(1984), Kohl e Deboer (1984), Dadio e Wallender (1985), e logo Chaya e Hills (1991) se preocuparam em quantificar o tamanho médio das gotas, bem como a influência de alguns parâmetros, como a velocidade do jato de água e a rugosidade da placa.

Nestas primeiras pesquisas chegou-se à conclusão que os parâmetros geométricos e de funcionamento dos sistemas de irrigação influenciam na uniformidade do processo. Estes trabalhos geralmente foram direcionados para a quantificação das gotas precipitadas e sua correlação com os parâmetros geométricos e de funcionamento. Um entendimento qualitativo do processo de formação, foi pouco tratado.

Por este motivo, foi realizado um estudo no DEEME-UFU (Reis *et al.*, 1993), visando esclarecer a física deste problema. Este estudo preliminar permitiu identificar 4 fases que compõem o processo de transição ver figura 1.1, desde a emissão do jato até o processo de formação das gotas. Estas fases físicas são as seguintes:

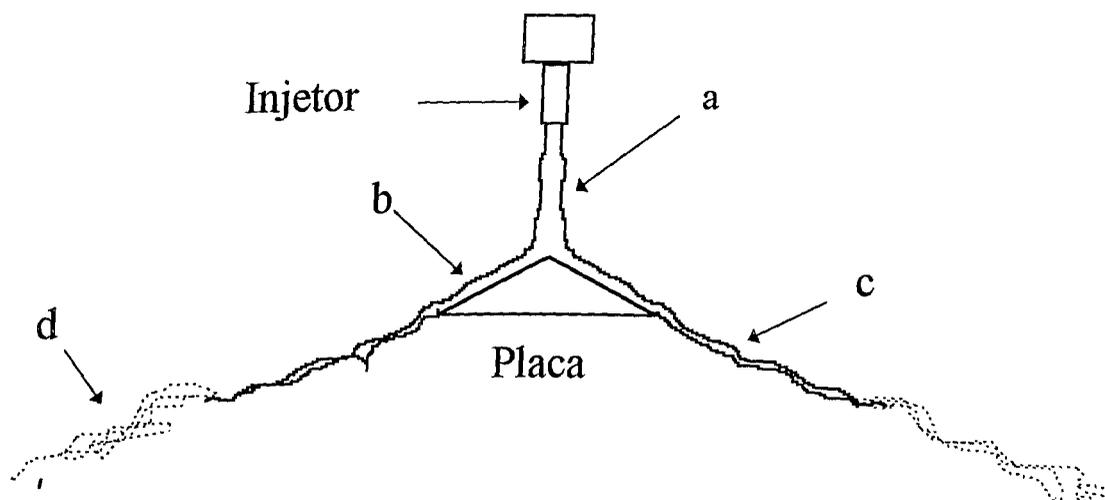


Figura 1.2 Visualização das fases que compõem o processo de formação de gotas no aspersor jato-placa.

Fase (a): Jato emitido pelo bico injetor;

Fase (b): Impacto do jato sobre a placa cônica pulverizadora e formação de um filme fino de água sobre ela;

Fase (c): Formação de um lençol contínuo livre, após a borda da placa;

Fase (d) : Formação da frente de gotas, após a ruptura do lençol contínuo.

Conforme Reis *et al.* (1993), fenômenos físicos importantes foram identificados, tais quais:

- a presença de instabilidade no jato que sai do bico e sua amplificação pela interação ar e fluxo de água na fase (a) o que varia segundo o número de Reynolds (Re);
- a formação de uma camada líquida fina sobre a placa na fase (b), com possíveis instabilidades superficiais;
- o fenômeno de borda que dá origem a declinação do raio do lençol, com maior notoriedade em Re baixos, Kistler e Scriven (1994);
- formação de um lençol oscilante livre o qual chamar-se-á contínuo (fase c);
- singularidades como a formação de lacunas sobre o lençol contínuo que têm sua origem no desequilíbrio da tensão superficial e a tensão criada pela redução da espessura do lençol com o aumento do raio;
- o lençol livre formado após da placa tem contato com o suporte do aspersor (ver figura 1.1) e devido à forma pouco hidrodinâmica do suporte, este corta o lençol, gerando uma não uniformidade na distribuição do mesmo;
- a ruptura do lençol e a formação de frentes oscilantes de gotas (fase d).

Na bibliografia referente a estes fenômenos, são encontrados de forma separada e em

diferentes situações. Com respeito à fase do jato incidente sobre a placa, os estudos são dirigidos especificamente sobre o jato e o tipo de instabilidades dominantes segundo a variação dos parâmetros de funcionamento. É de interesse o desenvolvimento destas instabilidades. Delas origina-se a quebra do jato ou breakup do jato, definido como o ponto em que ele, originalmente contínuo, se quebra em gotas.

Os mecanismos físicos envolvidos no fenômeno de Breakup do jato que sai de um bico e entra num meio estagnado são muito complexos devido a que o número de parâmetros que o influenciam, Chigier and Reitz (1995):

- forma do bico,
- turbulência e velocidade do fluxo,
- física e estado termodinâmico.

O fenômeno de breakup de um jato é dividido em regimes de breakup os quais refletem em diferenças na sua aparência quando as condições de operação são alteradas. Os regimes são devidos à ação das forças dominantes sobre o jato, produzindo o breakup, e é importante que estas forças sejam identificadas para explicar os mecanismos de cada regime.

O breakup de um líquido injetado em um gás ou meio estagnado, está sendo estudado na atualidade. Quatro regimes de breakup foram identificados os quais correspondem a diferentes combinações das forças de inércia do líquido, tensão superficial, e as forças aerodinâmicas atuando sobre o jato livre. Os regimes são chamados de "Rayleigh", "primeiro enrolamento induzido", "segundo enrolamento induzido" e "pulverização".

Em velocidades baixas, acredita-se que o crescimento das pequenas perturbações sobre a superfície do líquido, devido à interação entre o líquido e o gás ambiente, promova o início do processo de breakup. A existência de estas ondas é claramente demonstrada nas fotografias

de breakup, Chigier and Rietz (1995). O comprimento de onda mais instável de onda, o breakup e o tamanho de gota são previstos pela teoria de estabilidade do jato.

É importante notar que o processo de breakup é também influenciado pelo estado inicial do jato de saída do bico em cada um dos quatro regimes. Esta influência aparentemente cresce em importância com o incremento da velocidade do jato, mas poucos trabalhos foram feitos nesta área de processos de breakup. O jato livre de alta velocidade é entendido mais no sentido qualitativo que quantitativo.

Um método conveniente para categorizar regimes de breakup é considerando o comprimento da porção coerente do jato líquido ou seu comprimento de não quebra, L_b , como uma função de velocidade V_o de saída do jato, Grant and Middleman (1966). Além do regime de “escoamento pingado”, o comprimento do breakup aumenta com incremento da velocidade do jato, alcança um máximo e logo decresce. Gotas são formadas no final do jato. Estes dois regimes, razoavelmente entendidos, são chamados regimes “Rayleigh” e “primeiro enrolamento induzido”.

Além do regime do breakup do primeiro enrolamento induzido há confusão acerca do comprimento do breakup. Exemplo, Haemlein (1932) reportou que o comprimento do breakup do jato incrementa-se cada vez com o incremento da velocidade, e logo abruptamente reduz-se a zero. Mc Carthy e Molloy (1974) reportam que o comprimento do breakup aumenta de maneira contínua. Mais recentemente, Hiroyasu (1991) evidenciou um alongamento e diminuição descontínua do jato com a mudança da velocidade do jato. Estas anomalias aparentes foram associadas com mudanças dos padrões de escoamento interno do bico devido à separação ou fenômeno de cavitação, que também exibem efeitos de hysteresis. Jatos de bicos com cavitação têm comprimentos de breakup curtos. Jatos de escoamento separado

apresentam longos comprimentos de breakup. Este fenômeno pode ajudar a explicar as discrepâncias prévias em medidas de comprimento de breakup na literatura do spray. Só recentemente os investigadores prestaram atenção para o escoamento nos bicos e o efeito da geometria.

O efeito da geometria dos bicos são importantes para o breakup de altas velocidades. Exemplo de jatos de alta velocidade, em aplicações de jato de corte, mostraram que eles permanecem intactos para muitos diâmetros de bico. Por outro lado injetores de Diesel modernos empregam similar pressão de injetor, mas o breakup do spray Diesel inicia na saída do bico. Há diferenças na fabricação do bico internamente nestas duas aplicações, onde se deseja descrever diferentes performances. Como mostraram os estudos, regimes de breakup do jato de alta velocidade no segundo enrolamento induzido e a atomização produzem gotas pequenas. Fez-se necessário estabelecer um parâmetro adimensional para prever os diferentes regimes de breakup com respeito às condições de operação. Por exemplo Miesse (1955) propôs a relação empírica,

$$z = 100 Re_L^{-0.92} \quad (1.1)$$

(onde $z = \mu_L / (\rho_L d_o \sigma)^{1/2}$ é o número de Ohnesorge, e $Re_L = \rho_L d_o V_o / \mu_L$ é o número de Reynolds do escoamento líquido ou jato e tomando como referência o bico do injetor) para prever o regime de atomização (o breakup na saída do bico) para injetores dentro do ambiente ar. Note-se que não se considera os efeitos do fluxo interno ao bico na correlação. O alcance curto desta correlação é que também não considera o gás ambiente. Em particular, a força de inércia do gás circundante e a força normal à superfície (devido à tensão superficial σ) são importantes parâmetros no breakup do jato, Riezt and Bracco (1986). A relação entre

estas duas forças é dada pelo número de *Weber* = $\rho_g v_0^2 d_0 / \sigma$ onde d_0 é o diâmetro de saída do bico e inclui o efeito da densidade do gás ambiente. Notar que a relação $We_g =$ constante pode ser escrita como

$$z = \text{const} (\rho_L / \rho_g)^{1/2} Re_L^{-1} \quad (1.2)$$

que serve de alguma forma, aproximadamente como o critério da equação (1.1) onde se fixou a densidade do gás (isto é, por injeção dentro de ar ambiente). Comparando com a equação (1.1) tem-se que o regime de atomização pode ser alcançado quando $We_g = 40,3$.

Outros critérios para transição de regimes têm sido dados por vários autores. Considerado que o balanço de forças de inércia líquida e de tensão superficial originam uma coluna livre de líquido, Ranz (1956), e deixa de ser um regime de “escoamento pingado”. O início do regime “Rayleigh” acontece quando $\rho_L v_0^2 d_0 / \sigma = We_L > 8$. O critério $We_g < 0,4$ corresponde a um ponto onde a força de inércia do gás alcança 10% da força da tensão superficial. Ranz (1956) sugere que isto marca o início do regime de breakup do “primeiro enrolamento induzido” onde os efeitos do ar não são desprezíveis. Deste modo, o breakup Rayleigh acontece para

$$We_L > 8 \text{ e } We_g < 0,4 \text{ ou } We_g < 1,2 + 3,41z^{0,9} \quad (1.3)$$

Como um critério alternativo, o máximo comprimento de breakup acontece para $We_g = 1,2 + 3,41z^{0,9}$ (de resultados numéricos de Sterling e Sleicher, (1975)). Este resultado pode ser o mais correto indicador da transição do regime.

Ranz (1956) argumenta que a força de inércia do gás é da ordem da força da tensão superficial quando $We_g = 13$. Isto serve como uma definição do fim do regime primeiro

enrolamento induzido o que acontece quando,

$$,2 + 3,41z^{0,9} < We_g < 13 \quad (1.4)$$

Quando $We_g = 13$ tem-se o início do regime do segundo enrolamento induzido, onde a interação com o gás circundante começa ser dominante. Usando a correlação de Miesse (1955) da equação.(2), tem-se o critério para o regime segundo enrolamento induzido

$$13 < We_g < 40,3 \quad (1.5)$$

No regime do segundo enrolamento induzido, o breakup acontece logo á jusante da saída do bico e resulta em pequenas gotas, de tamanho muito menores que o diâmetro do jato. O mecanismo de breakup neste regime pode ser devido ao crescimento instável de ondas superficiais no jato. Estas ondas podem ser vistas claramente sobre a superfície do jato perto do bico, e elas dão origem á formação de gotas. Como foi previamente mencionado, os efeitos do escoamento interno são de importância para o breakup do jato de alta velocidade. Então a equação (1.5) só pode ser indicador dos limites do regime, desde que detalhes geométricos do bico não estão sendo considerados no critério.

Um estudo interessante foi realizado por Balatka *et al* (1995), sobre a visualização da instabilidade presente no escoamento dentro de uma passagem entre dois cones coaxiais. Os resultados mostraram dois padrões de escoamentos, um com um conjunto de colunas de instabilidades paralelas à direção do escoamentos e o outro com presença de vórtices toroidais sobre o cone. Nesta pesquisa sugere-se que o fluxo com instabilidades paralelas à direção do escoamento poderia melhorar o processo de atomização.

Análises de estabilidade linear foram conduzidas para a descrição do breakup de cortinas ou lençol líquidos. As instabilidades capilares de cortinas líquidas delgadas foram estudadas primeiramente por Squire (1953). Ele mostrou que as instabilidades e o breakup são

causados pelo crescimento de ondas sinoidais. Outros resultados experimentais do breakup de um fan-spray perturbado com uma oscilação suplementar externa, foram obtidos por Van Dyke (1978). A formação de filas de ligamentos do breakup da cortina é claramente vista junto com gotas grandes originárias das bordas do lençol.

No estudo do perfil do lençol, estudos têm sido dirigidos para a visualização do desenvolvimento das instabilidades, e o grau de declinação do lençol quando deixa a placa. Devido ao desequilíbrio das forças, nesta interface, o lençol sofre uma queda em sua trajetória. A utilização do método de fotografia para a visualização do ângulo do cone do spray em função da variação da vazão foi empregada por Mao *et al.* (1987). Com referência ao fenômeno apresentado pela ação do suporte sobre o lençol, o único trabalho encontrado sobre este tema foi de Reis *et al.* (1991).

O processo de quantificação de gotas é geralmente feito por um analisador de imagem. As imagens contínuas das áreas das gotas nas fotografias são armazenadas na memória do computador em forma de grupos de um número finito de bytes chamados "pixels". Um grupo de pixels representa uma "área" A a qual é equivalente à área do objeto a ser quantificado. As gotas apresentam uma cor escura contrastando com um fundo claro. Um sistema de quantificação de imagem mede a "área" A escura de cada gota e computa um diâmetro para cada uma, por meio da fórmula:

$$D_a = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (1.6)$$

Para uma forma circular, este é o diâmetro real. Para uma outra forma este é o diâmetro que resultaria se a área medida fosse formada dentro de um círculo. Enquanto a forma da gota não estiver severamente distorcida, esta é uma boa aproximação para o

diâmetro. Este diâmetro representa um parâmetro de caracterização da medida da gota, o qual aplicado de um modo estatístico sobre o conjunto de gotas, representará também um parâmetro de caracterização do spray. O diâmetro obtido deste modo pode ser chamado D_a “diâmetro da área equivalente”. Para partículas não esféricas, pode-se adotar outros algoritmos para converter uma forma geométrica em uma medida linear de tamanho. Duas destas formas são o modelo do D_p “perímetro circular equivalente” e o modelo do $D_{a/p}$ “área circular equivalente/perímetro”. Ultimamente tem-se utilizando, para a caracterização de um spray, o termo “raio de volume/área da superfície”, quando há gotas que podem ser não esféricas.

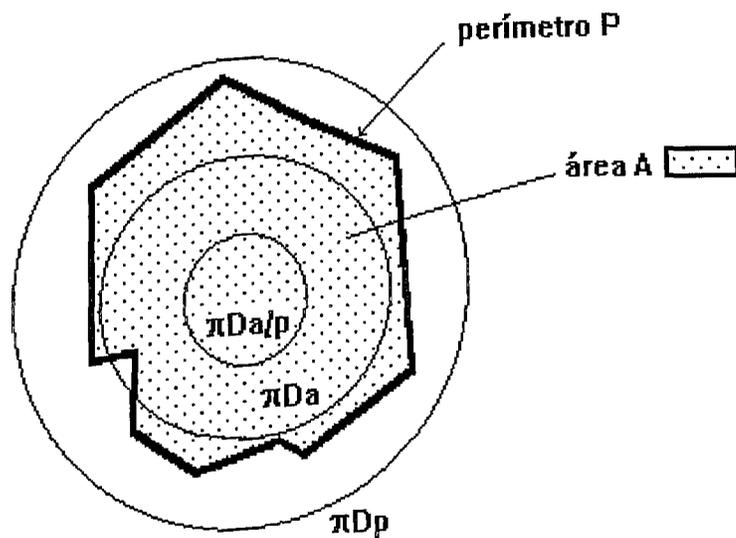


Figura 1.3 - Partícula e os parâmetros de caracterização do spray

D_p : Diâmetro do perímetro circular equivalente

D_a : Diâmetro da área circular equivalente

$D_{a/p}$: Diâmetro equivalente a área circular equivalente/perímetro

Onde

$$D_p = P/\pi \quad (1.7)$$

$$D_{a/p} = 4A/P \quad (1.8)$$

P = Perímetro;

A = Área;

A procura da compreensão dos processos físicos mencionados acima e como eles são influenciados pelos parâmetros geométricos e de funcionamento e suas influências na distribuição, tamanho e quantidade das gotas é o motivo deste trabalho.

1.3 - Justificativas para Realização deste Trabalho

O laboratório de Energia e Dinâmica dos Fluidos (LEDIF) do Departamento de Engenharia Mecânica-UFU, está desenvolvendo trabalhos orientados para a otimização de sistemas de irrigação. O primeiro trabalho feito por Reis *et al.* (1993), permitiu conhecer as fases que compõem o processo de formação de gotas por um aspersor jato-placa. A compreensão do processo é um problema de alta complexidade e portador de muitas motivações de pesquisa.

Sem dúvida, no presente trabalho, não se têm a pretensão de explicar todos os fenômenos envolvidos e sim, dar continuidade a um trabalho preliminar e gerar motivações para outros trabalhos futuros. Observe-se ainda que as ferramentas de análise disponíveis são limitadas porém suficientes para se atingir o que se espera de uma dissertação de Mestrado. Pretende-se também convencer aos órgãos financiadores, da necessidade da aquisição de outros equipamentos para avançar os estudos nesta área de tamanha importância para o País onde a produção agropecuária assume um papel muito importante. Para tanto, faz-se

necessário demonstrar, através de resultados preliminares, a importância do tema.

1.4 - Características Desde Trabalho

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos e 1 anexo. A seguir descrever-se-á, sucintamente a função de cada um deles. No capítulo 1 apresenta-se o problema que motivou o desenvolvimento deste trabalho e se faz uma breve revisão bibliográfica. No capítulo 2 descreve-se o método da fotografia. Também são dadas noções de conceitos fotográficos. No capítulo 3 descreve-se os equipamentos e materiais utilizados. No capítulo 4 descreve-se a metodologia seguida no trabalho. No capítulo 5 apresenta-se os resultados e análise. Finalmente, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões deste trabalho. No anexo 1 apresenta-se características técnicas dos equipamentos e materiais utilizados.

2 - MÉTODO DE FOTOGRAFIA

2.1 - Método de Fotografia

A fotografia é o método mais barato para obtenção de imagens de bom nível de contraste e de bom nível de resolução de fenômenos de alta frequência. No presente estudo utilizou-se este método para análise do processo de formação de gotas. Os resultados são produzidos na forma de slides ou negativos em branco e preto ou em cor. As tomadas de fotografia e a revelação dos filmes pode ser de rápida manipulação e custo barato usando-se as câmaras apropriadas e as facilidades de um ambiente escuro. Dados podem ser extraídos diretamente dos negativos ou cópias para análise ou reprodução. A imagem visual do spray completo ou uma seção do spray fornece informações sobre a estrutura e a geometria das partículas que é difícil de se obter por outros meios.

Condições de saída do bico, breakup do jato, desintegração de ligamentos, formação de gotas, aglomeração e coalescência das gotas são fenômenos que podem ser visualizados. Este método é de grande valor para a determinação da esfericidade e a transparência das partículas antes de usar as técnicas de diagnóstico Laser. Erros de medida são sérios se as partículas são não esféricas.

2.2 - Filme Preto e Branco

Um filme é constituído de duas camadas básicas: uma "emulsão" (sais de prata sensíveis à luz, suspensos em gelatina) aplicado sobre uma "base" transparente (normalmente feita de acetato). Sais como Clorato de Prata, bromato, iodato ou suas combinações são usadas, dependendo da sensibilidade ou de outras características desejadas: silver chloride é usado para emulsões de sensibilidade baixa; e Clorato de Bromo e Bromato para meias sensibilidades e Iodato de bromo para maiores sensibilidades.

O processo fotográfico está subordinado à ação da luz sobre os sais de prata ou haletos de prata. Esta afeta a estrutura básica dos haletos - cada um dos grãos - existentes no interior da camada de gelatina. Quanto maior a quantidade de luz que atinge essa camada, maior o número de grão afetados.

Até essa etapa, porém, não acontece qualquer mudança perceptível no filme; necessita-se de um agente químico - o "revelador" - para tornar visível a imagem latente, ele atua de modo a transformar os haletos de prata afetados pela luz em grãos diminutos que apresentam cor preta. Os haletos que não foram afetados pela luz - situados na área de sombra da imagem - não são modificados pelo revelador. Após a revelação, surge uma imagem em negativo no filme (negativo em virtude da prata ter sido produzida pelas áreas claras). Porém, a emulsão pode ser afetada pela luz, é necessário "fixar" a imagem, através da eliminação de todos os haletos de prata não revelados. O fixador torna-os solúveis em água, e sua remoção é feita por meio de uma lavagem. Depois desta, resta apenas a prata metálica estável sobre o filme transparente.

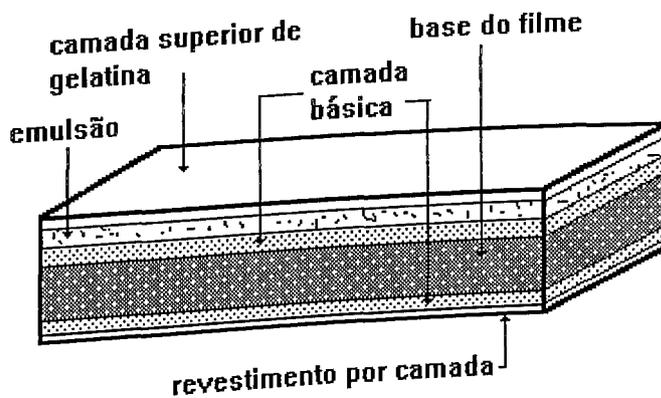


Figura 2.1 - Camadas que compõem o filme preto e branco.

2.3 - Grão

O princípio da utilização de cristais sensíveis à luz em uma emulsão, como instrumento fotográfico básico, possui uma desvantagem intrínseca: quanto menores os grãos de haleto de prata, menos sensíveis tenderão a ser. Assim, para ser capaz de registrar com pouca luz, a emulsão deve ter grãos de tamanho grande, embora isso talvez incorra em uma perda de qualidade. Os micro cristais de haletos de prata variam em tamanho e forma para varias emulsões embora dentro de qualquer emulsão Lippmann de grão fino possa ser de $0.05 \mu m$ em uma faixa de 0.03 a $0.08 \mu m$, uma emulsão de velocidade rápida o tamanho de grão pode ser da ordem de alguns μm .

Caso os detalhes sejam indispensáveis, e se pretenda usar um filme de grão fino, então a sensibilidade (sua "velocidade") será reduzida. Embora os filmes fabricados hoje minimizem essas dificuldades, a relação básica existente entre o tamanho do grão e a sensibilidade do filme em nada foi alterada. Aliado a esta relação existe um terceiro fator : o contraste.

2.4 - Velocidade do Filme

A velocidade do filme está relacionada com sua sensibilidade à luz: quanto mais "rápido" mais sensível. Uma vez conhecida a velocidade do filme, é possível determinar com exatidão a exposição correta para uma dada quantidade de luz.

Embora existam diversos sistemas para indicar a sensibilidade dos filmes, apenas dois eram os mais utilizados: o sistema ASA e o sistema DIN. Existe uma diferença básica entre ambos, pois o sistema ASA usa uma escala aritmética e o DIN uma escala logarítmica. Assim, um filme de 200 ASA é duas vezes mais rápido que outro de 100 ASA (ou seja ele necessita a metade de exposição do segundo filme, para produzir o mesmo resultado). Na escala DIN, cada aumento de três equivale à uma duplicação da velocidade, sendo 25 DIN duas vezes mais rápido que 22 DIN.

Na atualidade existe um novo sistema, que unificou estes sistemas sob o critério numérico seguinte: ISO corresponde a ASA e Graus (°) corresponde a DIN.

2.5 - Contraste

Quase imediatamente após ou início da revelação, aparece a prata metálica nas áreas de emulsão atingidas pela luz de maior intensidade (as altas luzes). Com a continuação do processo, começam a aparecer os meios tons e as áreas escuras. Caso o processo se prolongue, a prata continuará a se acumular sobre toda a área do negativo - porém, isso vai acontecer com maior rapidez nos lugares onde já existe uma imagem. Em termos mais precisos: a densidade do contraste aumenta na razão ao tempo da revelação. Por fim atinge-se

um ponto além do qual a densidade não aumenta mais, porque praticamente todos os cristais se transformaram em prata; conforme se aproxima esse estágio da revelação, as áreas de baixa densidade começam a se igualar, e o contraste a diminuir.

2.6 - Focalização

Existem seis tipos diferentes de formatos de lentes, e cada uma delas depende de suas superfícies serem côncavas ou convexas. Elas se dividem em duas categorias básicas: “positivas” e “negativas”. Uma lente positiva (convergente) forma uma imagem real atrás de si, ao passo que uma lente negativa (divergente) forma uma imagem “virtual”, e esta não pode ser projetada sobre uma tela. Pode-se entender a razão dessa importante diferença, se visualiza a luz como fragmentos de prisma e se se observa as trajetórias seguidas pelos raios de luz.

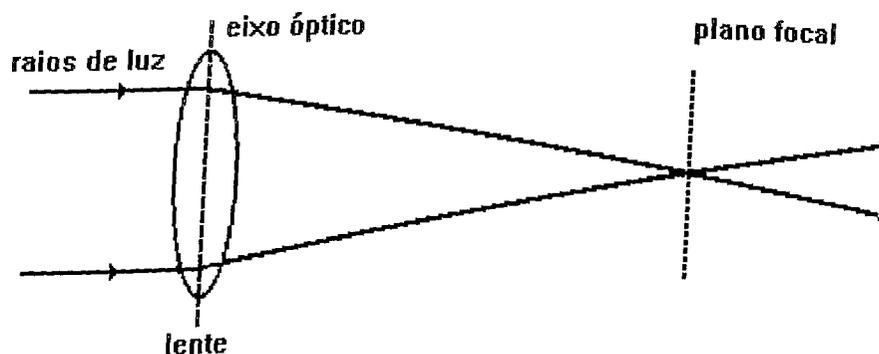


Figura 2.2 - Distância focal.

Via de regra, quanto mais espessa e curva a superfície de uma lente, maior sua capacidade de desviar a luz. Normalmente isto é medido como sua “distância focal” que é a distância do centro da lente até o ponto no qual convergem os raios paralelos que incidem nela. Quanto mais desviada é a luz, menor a distância focal da lente.

A distância focal de uma objetiva é a medida (mm ou polegadas) entre o seu eixo óptico e o ponto onde ela produz uma imagem nítida de um objeto na distância infinita. O processo de focalização implica a movimentação da lente na direção oposta à do plano focal, a fim de que os objetos mais próximos possam ser focalizados.

A distância focal também está relacionada à área da cena reproduzida sobre o filme por uma objetiva - seu ângulo de visão. Via de regra, as máquinas fotográficas são vendidas com lentes normais, sendo a distância focal de cada uma mais ou menos equivalente à diagonal do negativo utilizado com a respectiva câmara. Entretanto, quando se deseja mudar por completo a apresentação da imagem final, usa-se diversas lentes, com distâncias focais maiores ou menores.

As lentes de foco longo abraçam um ângulo menor e o negativo é preenchido por uma pequena área da cena, dando a impressão de maior distância. Por outro lado, as lentes de foco curto compreendem um amplo ângulo de visão.

2.7 - Abertura e Exposição

Uma câmara possui uma abertura, esta abre-se e fecha-se, a fim de exercer o máximo controle possível sobre a luminosidade da imagem que chega até o filme. A quantidade de luz que atinge o filme é afetada por diversos fatores: duração da exposição e o diâmetro de abertura. A fim de assegurar uma exposição correta para cada negativo, deve existir uma relação entre ambas, a qual é simples : a exposição é ajustada através de mudanças na velocidade do obturador e no tamanho da abertura.

A abertura é calibrada em "números f", ou "ponto", o qual é a relação entre a distância

focal e diâmetro efetivo, estes números em geral encontra-se assinalados em um anel existente em torno da armação da objetiva. Estes números não obedecem a uma seqüência padrão mas os mais comuns são: 1.2, 1.4, 2, 2.8, 4, 5.6, 11, 16, 22. Quanto maior o número, menor a abertura.

2.8 - Obturador

A função principal do obturador é bastante simples: quando esta fechado, o filme não é atingido pela luz, porém, quando se aciona o propulsor, ele se abre (normalmente durante uma fração de segundo), permitindo a exposição do filme à luz.

2.9 - Profundidade de Foco

Embora a profundidade de foco seja ocasionalmente confundida com profundidade de campo, há uma diferença entre ambas, pois a profundidade de foco refere-se à parte da objetiva que fica voltada para o filme e não aquela que fica voltada para o objeto. O filme deveria ser colocado no plano onde a imagem apresenta maior nitidez (o plano focal), porém nossos olhos são incapazes de detectar qualquer variação ocorrida na nitidez, dentro de uma zona situada em cada um dos lados do plano focal. Assim se define a profundidade de foco. À semelhança da profundidade de campo, ela é aumentada quando se fecha a abertura, tornando menos crítico ou exato posicionamento do filme.

2.10.- Profundidade de Campo

A extensão da zona nítida disponível quando se tira uma fotografia está subordinada à distância de focalização, ao tamanho da abertura e à distância focal da objetiva utilizada. As três primeiras colunas da figura 2.3 mostram como a profundidade de campo aumenta, conforme o modelo se afasta da câmara, e não se altera o tamanho da abertura. As duas últimas colunas indicam que a profundidade de campo sofre um aumento significativo, quando o lente é fechada, ficando a objetiva focalizada em uma determinada distância. Com uma abertura e distância constantes, as objetivas com distâncias focais maiores mais uma vez reduzem a profundidade de campo.

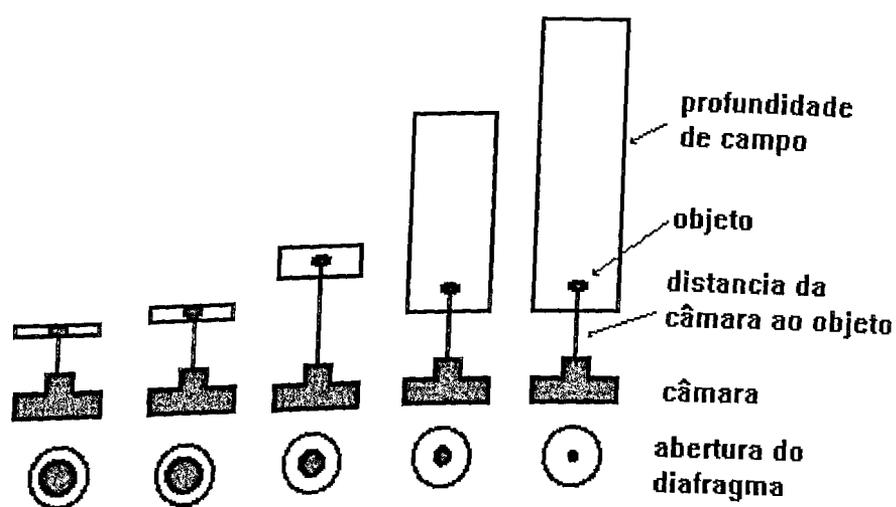


Figura 2.3 - Quadro da profundidade de campo.

2.11 - Câmaras

Câmaras de 35 mm tem as vantagens seguintes :

- Baixo custo,
- Forma conveniente,
- Sistemas extensivos com acessórios podem ser utilizados,
- Alta magnificação,
- Grande profundidade do campo.

As câmaras de 35 mm mais caras tem lentes de alta qualidade e extensões que permitem tomar fotografias sobre uma grande faixa de condições. A principal desvantagem destas câmaras é o pequeno tamanho dos negativos (24 mm x 36 mm). Para microfotografia, surgem problemas especiais, como a resolução das pequenas partículas que é regularmente limitado pelo tamanho do grão do filme.

Câmaras de placa com área do filme maior tem vantagens especiais em microfotografia: alta resolução com imagens detalhadas finamente são obtidas. Profundidades estreitas de campo podem ser alcançadas e obtem-se a isolação de "slides" delgados do campo de fluxo estudado. Uma desvantagem é o volume grande de equipamento fazendo mais difícil a manipulação. Cada camada do filme deve ser inserida e removida para cada quadro e o custo do filme é relativamente alto.

2.12 - Acessórios de Fotografia

2.12.1 - Tubo de Extensão, Foles e Lentes Close-up.

A maioria das objetivas focalizam objetos a menos de 1m de distancia. Fotos Close-up caracterizam-se pelo emprego de tubos de extensão, acessórios capazes de oferecer o máximo de flexibilidade possível para os trabalhos desse tipo. Entre outras alternativas se incluem as lentes suplementares (que podem ser encaixadas nas objetivas normais como se fossem filtros) e as lentes macro (ou de focalização próxima). Elas diferem das lentes normais por possuírem uma armação de focalização mais longa e embora muitas vezes sejam designadas como lentes “macro” para seus fabricantes, nem todas podem ser consideradas objetivas macro genuínas.

Os tubos e foles de extensão, encaixados entre a objetiva e o corpo da câmara, proporcionam uma ampliação considerável. Os tubos podem ser utilizados em unidades avulsas ou então interligados, para formar uma variedade de distancias fixas, porém os foles apresentam a vantagem de ser continuamente ajustados quanto ao tamanho: em princípio, esta é a única diferença existente entre estes dois sistemas. Por fim, as lentes macro podem ser usadas em conjunto com os tubos ou foles, permitindo o acoplamento de uma extensão maior antes do início da perda de qualidade de imagem.

A câmara reflex monobjetiva é a mais adequada para a utilização desses acessórios, em geral; elimina por completo o problema da paralaxe. Quando as diferenças são reduzidas, a profundidade do campo torna-se mínima, e o único meio de se certificar de que objeto está em foco consiste em inspecioná-lo diretamente sobre a reticula de focalização.

2.13 - Flashes

As unidades de Flashes científicos são especificamente desenhados para prover faíscas de duração curta e controlada e de alta intensidade. Neste caso utilizou-se uma lâmpada Estroboscópica que de acordo a especificações técnicas do fabricante possui um flash de 6µseg de duração e intensidade mínima. A unidade de flash recebe um pulso elétrico ligando uma lâmpada de maneira controlada.

A utilização de Flashes eletrônicos pode ser outra alternativa para estudo de sprays de velocidades moderadas. Unidades de flash fotográficos de xenón são disponíveis com duração de flash de 1/1000 e 1/5000 s.

A produção de luz decresce com a duração do flash. A baixa intensidade promove dificuldade para a obtenção de suficiente contraste. Esta é a única solução relativamente barata para sprays onde partículas podem ser congeladas nestas durações de flashes.

2.14 - Técnicas de Iluminação.

No relatório técnico de Daum e Harding (1992), eles apresentam uma série de técnicas de iluminação, entre as quais pode-se citar as seguintes:

2.14.1 - Iluminação Oblíqua

A luz incide de maneira co-linear a linha de foco, ver figura 2.4, quando se utiliza um fundo preto para criar contraste. O objeto apresenta-se de cor clara.

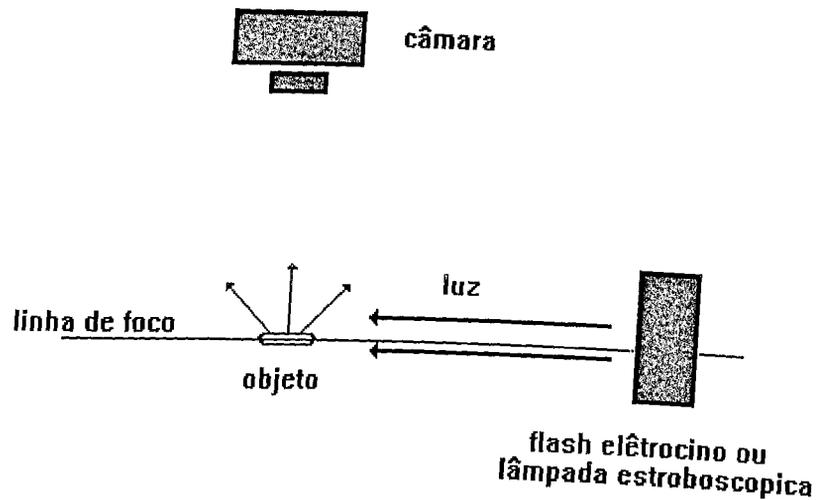


figura 2.4 - Iluminação Oblíqua

2.14.2 - Iluminação de Fundo "Back Lighting"

Esta técnica consiste em fazer incidir a luz do flash ou lâmpada estroboscópica de maneira direta à câmara mas com a fonte de luz atrás do objeto. Deste modo o objeto apresenta-se escuro e o fundo branco.

Na sua variante "back lighting" difusa incide-se a luz de forma direta, ver figura 2.5, fazendo-se uso de um filtro para diminuir a intensidade da luz. Também se fecha o diafragma de modo a regular o ingresso de luz. Esta técnica permite obter alto contraste da silhueta do objeto de estudo mas ter-se-á limitações em visualizar sua superfície.

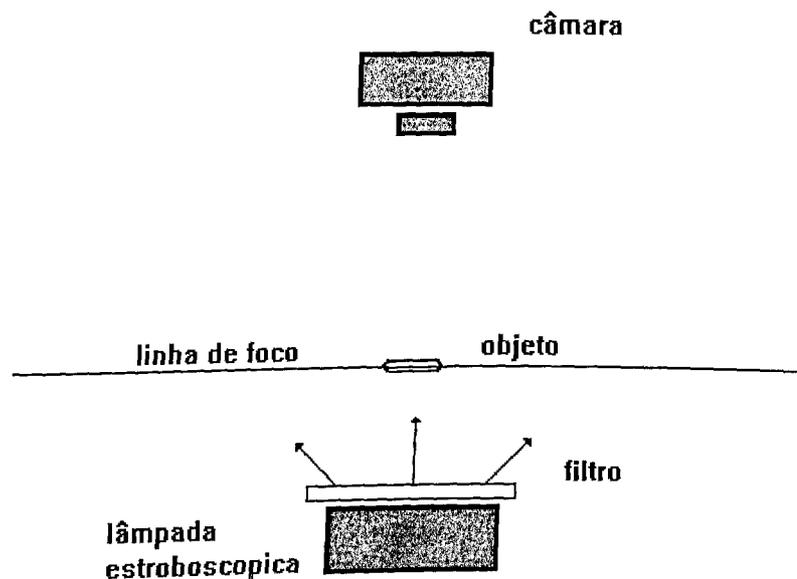


Figura 2.5 - Iluminação de fundo difusa ou "Back lighting" difusa.

2.14.3 - Iluminação Indireta Refletida

Apresenta duas variantes :

a) incidir de forma indireta, ver figura 2.6, e se utiliza uma superfície branca na qual se incide a luz e é direcionada para a câmara. Esta técnica apresenta uma vantagem que permite visualizar a superfície do objeto, mas com a desvantagem promover um baixo contraste, e em consequência se precisa de uma alta intensidade;

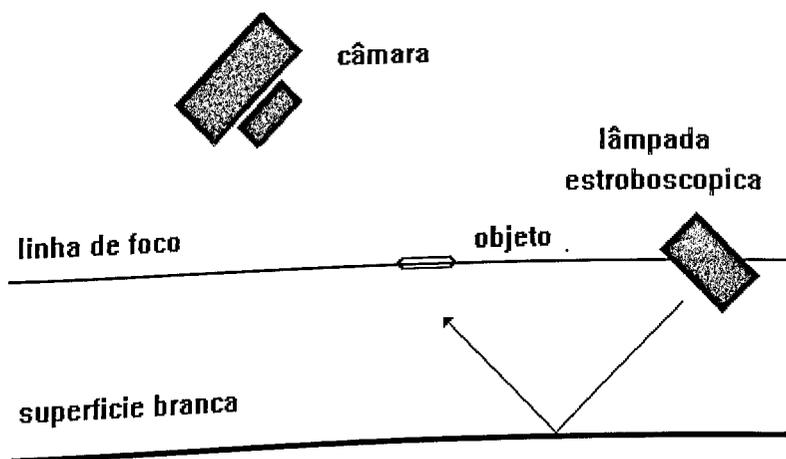


Figura 2.6 - Iluminação indireta refletida.

b) incidir de maneira indireta com dupla iluminação, emprega-se a técnica mencionada no parágrafo superior, mas com a variante do uso de dois flashes sincronizados por meio de células fotoelétricas, ver figura 2.7.

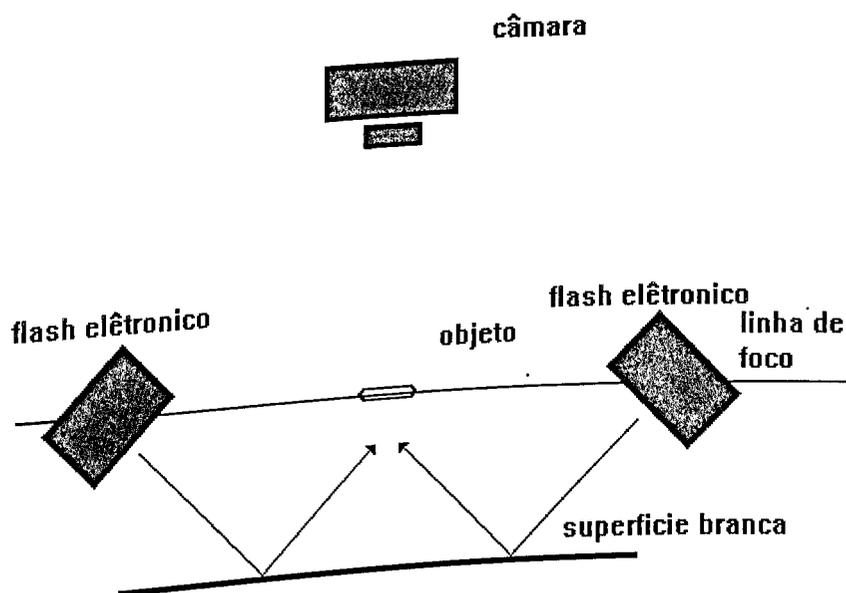


Figura 2.7 - Dupla Iluminação indireta refletida.

2.15 - Técnica Fotográfica

Esta consistiu em fotografar o objeto de estudo num quarto escuro, a escala da velocidade do obturador foi colocada nos sinais suplementares B (breve) ou T (tempo) segundo os requisitos do teste fotográfico. Quando colocado em B, o obturador permanece aberto enquanto seu propulsor for pressionado. O sinal T, por outro lado, indica que o obturador vai se abrir quando o propulsor for acionado pela primeira vez, permanecendo nessa posição até ser pressionado novamente. Assim, o fotógrafo pode se afastar da câmara. Estes dois sinais permitiu deixar o obturador aberto e o disparo do flash foi acionado de forma independente. Esta técnica, utilizando-se um flash rápido e câmara aberta é fundamental para o congelamento de imagem de alta frequência como será ilustrado em capítulo futuro.

3 - EQUIPAMENTOS E MATERIAIS.

3.1 - Equipamentos

3.1.1 - Banca Experimental

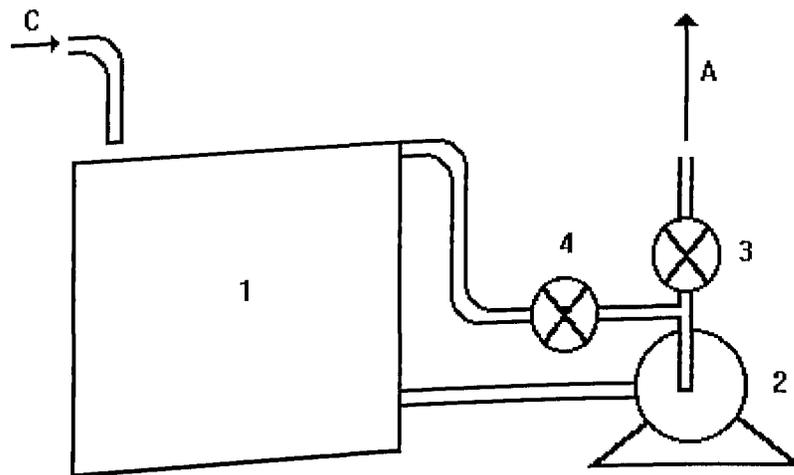


Figura 3.1 - Sistema de alimentação

O sistema de alimentação, está composto por uma bomba centrífuga (2) que fornece uma vazão máxima de 5,000 l/h e uma pressão de serviço de 60 psi. A linha de sucção está conectada a um reservatório (1) de uma capacidade de 500 l. Da bomba saem duas linhas de 1 ½", uma conectada ao sistema de regulagem de vazão de alimentação e a outra de retorno, cada linha contendo um registro (3) e (4) respectivamente.

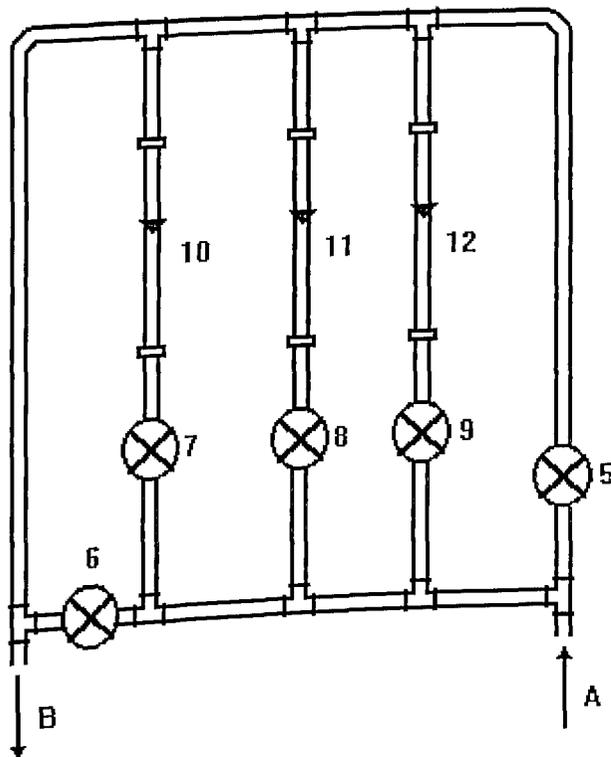


Figura 3.2.- Sistema de regulagem de vazão.

O sistema de Regulagem de vazão está composto por três rotômetros (10), (11) e (12) colocados de forma paralela, cada um com seu respectivo registro (7), (8) e (9) para o controle da vazão. A presença dos registros (5) e (6) tem como finalidade eliminar as bolhas de ar.

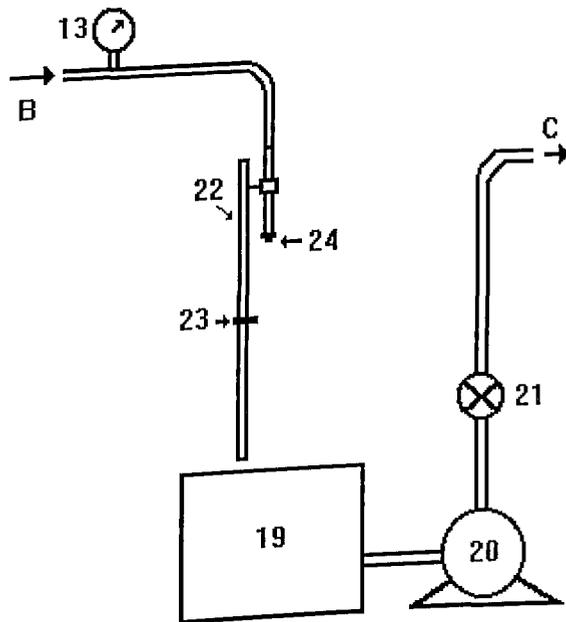


Figura 3.3 - Sistema para o estudo do jato livre

O sistema para estudo do jato foi composto por uma linha simples proveniente do sistema de regulação de vazão, na qual se instalou um medidor de pressão (13), instalou-se uma régua paralela (22) com um objeto de referencia de metal (23) sobre ela, o objeto permite determinar o comprimento do jato de água.

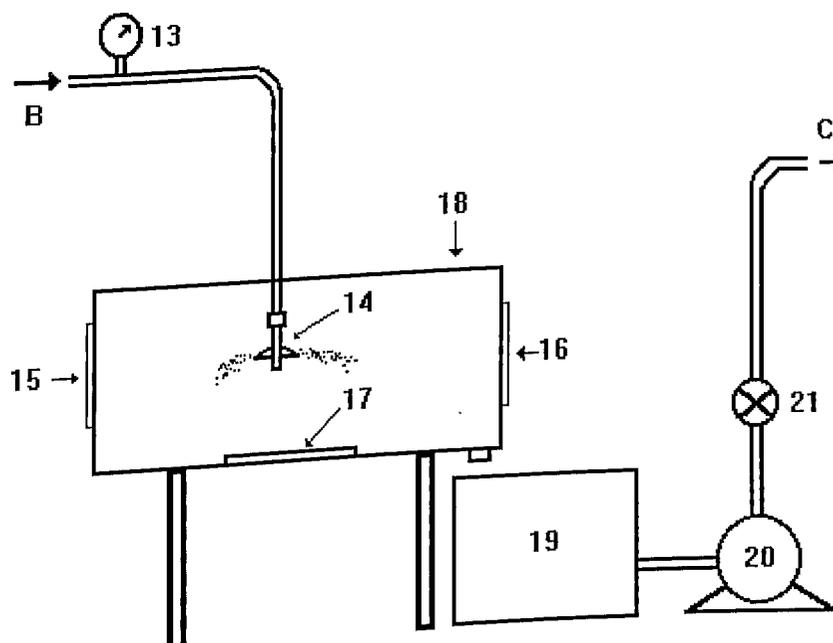


Figura 3.4 - Sistema para estudo de aspersor jato-placa

O sistema para o estudo do aspersor jato-placa (14), é composto por uma câmara coletora (18), de madeira, na qual colocou-se três vidros (15), (16) e (17), dois nas partes laterais e um na parte inferior. Em ambos sistema se instalou um reservatório auxiliar (19) de 100 l, conectado com uma bomba (20) de retorno ao sistema de alimentação. O registro (21) é para regulagem da vazão.

3.1.2 - Equipamento de Fotografia

- Câmara Fotográfica Pratika de 35 mm,
- Lente 75 mm,
- Jogo de tubos de extensão, com No 1, No 2 e No 3,
- lente filtro.

3.1.3 - Equipamento de Iluminação

O equipamento de iluminação está composto por uma lâmpada estroboscópica com duração de falca de 6 μ s, dado fornecido pelo fabricante. Esta consta de três botões os quais mudam a intensidade da luz e permitem trabalhar em varias faixas de freqüências de iluminação. O equipamento possui uma entrada de sinal externa a qual foi empregada para o envio de um pulso eletrônico.

O circuito eletrônico gerador de pulso (ver figura 3.5) desenvolvido no LEDIF, produz um pulso de onda quadrada de amplitude de 30 v. , com duração de 1 nsec.

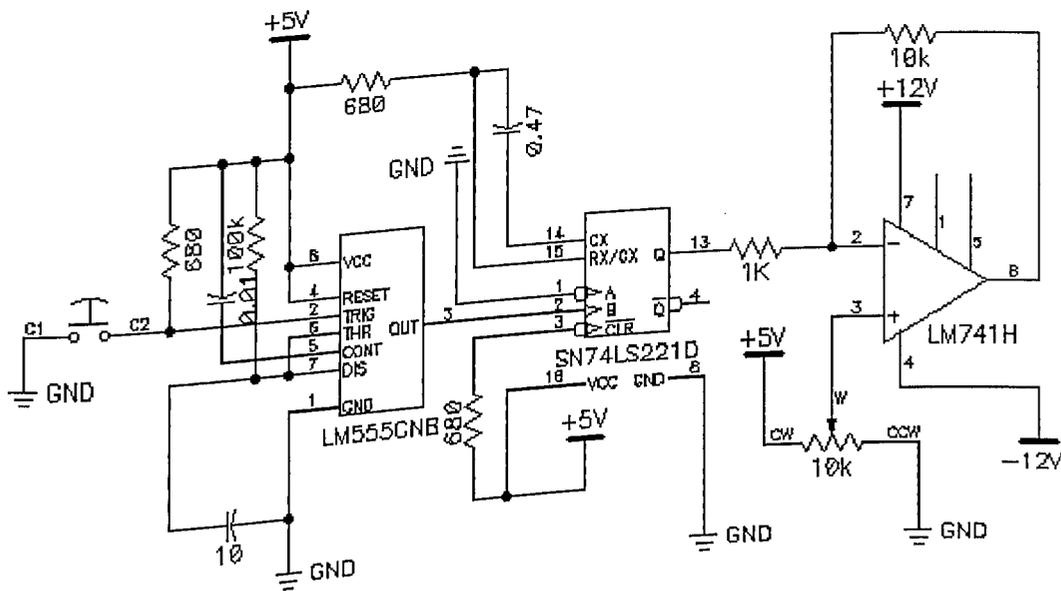


Figura 3.5 - Circuito de disparo da lâmpada

3.2 - Materiais

3.2.1 - Materiais Fotográficos

- Filme de 3200 ASAS
- Papel Polimax

3.2.2 - Materiais Auxiliares de Iluminação

- Cones de cartolina para direcionamento da luz da lâmpada estroboscópica,
- Papel vegetal usado como filtro.

3.2.3 - Materiais de Revelação do Filme e Cópia de Fotografia

O processo de revelação foi feito no Laboratório de Fotografia do Departamento de Artes da UFU e o material empregado foi o seguinte:

- Revelador Polimax para cópia de papel,
- Dektol para revelação do filme,
- Ácido Acético Gélido 29%,
- Fixador.

4 - METODOLOGIA

4.1 - Considerações Gerais

Como foi manifestado no capítulo 1, o processo de formação de gotas por um aspersor jato placa, está composto de uma série de fenômenos hidrodinâmicos: jato livre, formação de camada de líquido sobre a placa, um lençol livre com a presença de lacunas e oscilações, e uma frente de formação de gotas.

Por tal motivo objetiva-se no estudo separado de cada fenômeno. No estudo do jato tem-se um problema devido ao espaço curto entre o bico e a placa: dificultando a visualização e a identificação dos tipos de instabilidades hidrodinâmicas apresentadas no jato é difícil. Por outro lado, sabe-se que no caso de um jato livre as perturbações apresentadas na saída do bico sofrem um processo de amplificação ao longo do jato, permitindo a aparição das instabilidades. Por este motivo, planejou-se o estudo do jato livre como uma maneira de visualizar e identificar as instabilidades presentes na saída do bico. Os demais fenômenos presentes no sistema de aspersão foram estudados de forma direta dentro das vantagens e limitações de aplicação do método de fotografia. Para realização de todos os testes, empregou-se a técnica fotográfica descrita no item 2.14 e utilizou-se os equipamentos e materiais apresentados no capítulo 3.

4.2 - Provas Preliminares

4.2.1 - Considerações Iniciais

As provas preliminares tiveram como finalidade: o domínio da técnica fotográfica, a seleção de equipamento de iluminação que permitisse a captura dos detalhes dos fenômenos de alta frequência em estudo e uma técnica de iluminação que permitisse obter o máximo contraste e nitidez possível nas imagens destes fenômenos.

4.2.2 - Seleção da Técnica de Iluminação

Para o estudo do jato livre, nesta seção fotografou-se um jato com uma vazão de 50 l/h e bico No 11 (ver anexo 1), utilizando-se as técnicas de iluminação descritas no item 2.14. Na técnica oblíqua, ver figura 2.4 do item 2.14.1, utilizou-se flash eletrônico e a lâmpada estroboscópica acionada por um circuito gerador de um pulso eletrônico. Na técnica de iluminação back lighting difusa, ver figura 2.5 do item 2.14.2, utilizou-se a lâmpada estroboscópica, um cone para direcionar a luz da lâmpada e um papel vegetal como filtro o qual tem um efeito difusor da luz. Na técnica de iluminação indireta refletida, na variante (a), ver figura 2.6 do item 2.14.3, utilizou-se o flash eletrônico e a lâmpada estroboscópica, a luz foi refletida sobre uma parede branca de plástico. Na técnica de iluminação indireta refletida, na variante (b), ver figura 2.7 do item 2.14.3, utilizou-se dois flashes eletrônicos sincronizados por uma célula fotoelétrica. Outras provas, de caráter comparativo de contraste e fundo entre

as técnicas back lighting e indireta refletida na variante (a), utilizando lâmpada estroboscópica foram realizadas em bicos finos (No 7 e No 5), elas se descrevem mais adiante na seção 4.3.1.

Por outra parte, testaram-se para o estudo de visualização de instabilidades no lençol as técnicas de iluminação oblíqua e back lighting, as únicas técnicas aplicáveis, do ponto de vista técnico de instalação na bancada. No aspersor, montou-se um bico No 7, uma placa de 44 mm de diâmetro e uma vazão de 350 l/h. Em ambas técnicas, utilizou-se a lâmpada estroboscópica, e a montagem dos equipamentos foi feita de maneira similar como se mostrará mais adiante na figura 4.2, uma única diferença foi a posição da lâmpada.

4.2.3 - Seleção do Flash

Fez-se provas para delimitar o nível de congelamento do Flash eletrônico e da lâmpada estroboscópica acionada pelo pulso eletrônico, usando a técnica de iluminação indireta refletida em sua variante (a), (ver item 2.14.3), e com o bico No 12. Fotografou-se o jato livre com vazões, variando de modo crescente. O nível de congelamento do flash eletrônico só atingiu baixas vazões e no caso da lâmpada estroboscópica o nível de congelamento atingiu até a vazão máxima fornecida pela bomba.

4.2.3 - Abertura ótima do Diafragma

A técnica tem como finalidade a determinação de uma abertura ótima de diafragma que ofereça uma profundidade de campo tal que partes do objeto a fotografar não fique fora de foco e tenha um contraste adequado.

A instalação do equipamento foi feita como se mostra na figura 4.1

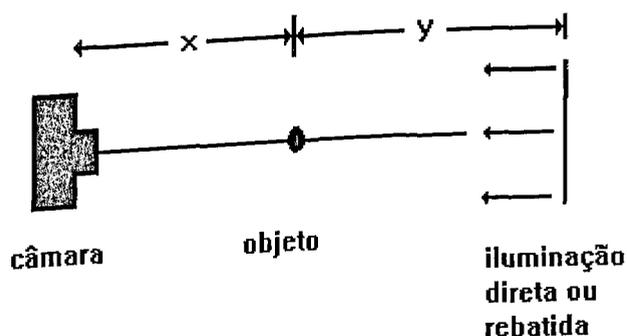


Figura 4.1 - Instalação de equipamentos na procura de abertura ótima de diafragma.

A distancia x é determinada pelo tamanho da parte do objeto a fotografar, no caso de um clouse-up necessitou-se do uso de tubos de extensão.

A distancia y é determinada pelo tamanho do fundo da fotografia no caso da técnica back lighting e pelo o nível de contraste desejado. Deve-se considerar que para uma distância menor y o diafragma deverá ser fechado para que a luz que atinge a câmara não queime o filme. Isto oferece maior profundidade de campo, mas devido ao grau refratário da água, tem-se menor contraste em consequência do aumento da intensidade da luz. No caso de uma distância maior y o diafragma deverá ser aberto no máximo, oferecendo menor profundidade de campo e um fundo menor. No caso da técnica back lighting tem-se maior contraste.

A seleção do diafragma é feita da maneira seguinte:

- determina-se uma distancia x segundo o tamanho do objeto a fotografar,
- determina-se a distancia y segundo o fundo desejado no caso back lighting,
- realiza-se uma serie de fotografias nas quais o diafragma é fechado gradualmente de

- revela-se o filme e analisa-se o negativo contra luz vermelha, e observa-se qual negativo apresenta melhor performance (nitidez e contraste),
- no caso de obter melhor performance com diafragma aberto, pode-se diminuir a intensidade da luz na lâmpada estroboscópica ou colocar filtros que diminuam a intensidade da luz,
- no caso de melhor performance com diafragma fechado, pode-se diminuir a distância y ou aumentar a intensidade da luz.

4.3 - Jato livre

4.3.1 - Teste piloto

Nesta seção se fizeram testes comparativos entre as técnicas de iluminação back lighting difusa e iluminação indireta refletida na variante (a). Procurou-se delimitar as vantagens e desvantagens de cada técnica, deste modo, facilitando, assim, a seleção de uma técnica de iluminação adequada para a visualização de um determinado fenômeno dentro do estudo do jato livre. Utilizando-se bicos finos (No 7 e No 5), realizou-se uma série de fotografias sobre um jato livre, com diferentes vazões e intensidades de iluminação da lâmpada. A primeira técnica testada apresentou melhor resultado, maior contraste, maior profundidade de campo e um fundo de tamanho aceitável. A segunda técnica teve baixo contraste, a abertura do diafragma foi $f 1.8$ mas o fundo foi maior do que a primeira técnica. Chama-se de fundo, à parte de cor clara atrás do objeto. Um fundo maior representa uma maior área do objeto a visualizar. A intensidade máxima de iluminação oferecida pela lâmpada apresentou

melhores resultados em ambas técnicas. A utilização de ambas técnicas será de caráter alternado e de acordo com os requerimentos do estudo.

4.3.2 - Visualização das Instabilidades do jato Livre na saída do Bico.

Tem como finalidade a visualização das instabilidades sobre o jato livre na saída do bico. Aplicou-se a técnica de iluminação indireta refletida na variante (a), ver item 2.14.3. A abertura ótima de diafragma foi de $f\ 2.8$ e a vazão variou de 20 l/h a 2.220 l/h, as fotografias foram tomadas a cada 100 l/h, a parede branca foi colocada a uns 60 cm do jato, a câmara foi colocada a uns 40 cm do jato e utilizou-se a máxima intensidade de luz oferecida pela lâmpada.

4.3.3 - Visualização das Instabilidades ao Longo do Jato

Neste experimento, se procurou visualizar o desenvolvimento das instabilidades ao longo do jato, tomando como referência os quatro regimes de breakup do jato encontrados na literatura e que foram descritos na introdução, então para regime Rayleigh trabalhou-se com 50 l/h, no regime "primeiro enrolamento induzido" com 300 l/h, no regime do "segundo enrolamento induzido" com 690 l/h e para regime "spray" com 1480 l/h. Como foi comentado anteriormente, estas instabilidades dependem da intensidade dos efeitos envolvidos. Como eles não serão quantificados neste trabalho, estas instabilidades serão aqui reclassificadas como de primeira ordem, segunda ordem, terceira ordem e regime spray.

A série de fotografias para cada regime permite visualizar o escoamento desde a saída do bico descendo a cada 10 cm aproximadamente até o final da régua vertical. Os bicos

utilizados foram No 9 para os três primeiros regimes e No 11 no último, a abertura foi de $f 4$, técnica de iluminação back lighting difusa, a câmara foi colocada a 35 cm do jato, a lâmpada foi colocada a uns 40 cm do jato e utilizou-se uma folha de papel vegetal como filtro.

4.3.4 - Testes no breakup do jato

Este experimento teve como finalidade a medição do comprimento do breakup e a variação dela com diferentes vazões. Foram utilizados os bicos No 7 e No 2.8 de diâmetro. Como referência na medição do breakup foi usado um objeto metálico de 1 cm de comprimento o qual foi montado sobre uma régua paralela ao jato livre. A abertura ótima do diafragma foi $f 4$ e a técnica de iluminação back lighting difusa. A luz foi direcionada por um cone e um papel vegetal foi utilizado como filtro. Os afastamentos da câmara e a lâmpada foram 35 cm e 40 cm respectivamente. As vazões variaram no bico No 7 de 470 l/h a 20 l/h e para o bico No 2.8 de 490 l/h a 20 l/h. O intervalo de variação foi baseado na pressão de serviço dos bico proporcionada pelos fabricantes.

4.4 - Estudo do Lençol

4.4.1 - Visualização do perfil do spray

Nesta parte procurou-se visualizar a camada líquida sobre a placa, o fenômeno apresentado na borda da placa, e as instabilidades sobre o perfil do lençol livre. A câmara fotográfica e a lâmpada estroboscópica foram montadas como se ilustra na figura 4.2. A

abertura ótima do diafragma foi $f 3.2$ e o direcionamento da luz foi feito com um cone e como filtro foi utilizado um papel vegetal na lâmpada. Ademais utilizou-se um filtro polarizado na câmara.

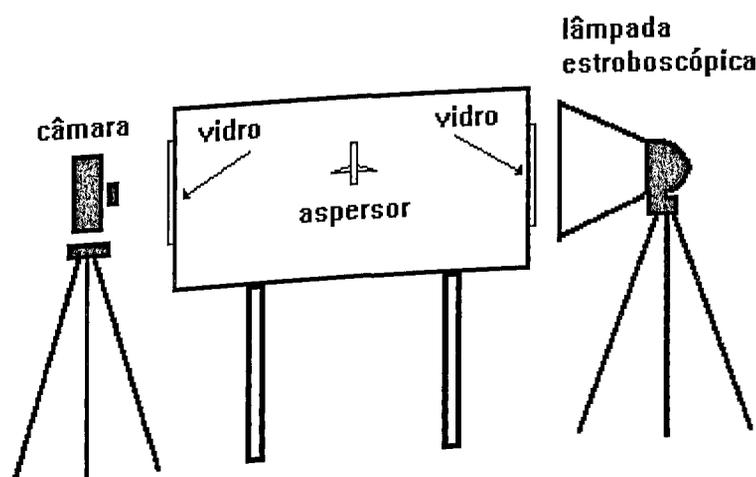


Figura 4.2 - Instalação do equipamento na visualização do perfil do spray. Técnica back lighting.

Os aspersores estudados foram de dois tipos encontrados no mercado e em cada um testou-se placas de aspersão de 44 mm e 34 mm de diâmetro. As vazões variaram no bico No 7 de 20 l/h a 470 l/h e para o bico No 2.8 de 20 l/h a 490 l/h.

4.4.2 - Visualização do Processo de Formação das gotas

Procurou-se visualizar as lacunas e as instabilidades apresentadas no lençol assim como a frente de formação de gotas e suas frequências, com diferentes vazões. A câmara foi colocada no mesmo ângulo de inclinação do lençol livre observado nas fotografias do perfil do

spray. Esta medição foi feita utilizando-se o software GLI "Global Lab Image". Dois grupos de fotografias foram feitos, um no lençol propriamente e outro na frente de formação de gotas. Neste último procurou-se visualizar os detalhes do processo de formação de gotas por tal motivo foi necessário o uso de um tubo de extensão No 1, como foi explicado no item 2.12. O aspersor estudado foi do fabricante Senninger e o tipo de placa foi de 44 mm com bico de No 7. A vazão foi variada de 20 l/h a 530 l/h. O equipamento foi instalado como se mostra na figura 4.3.

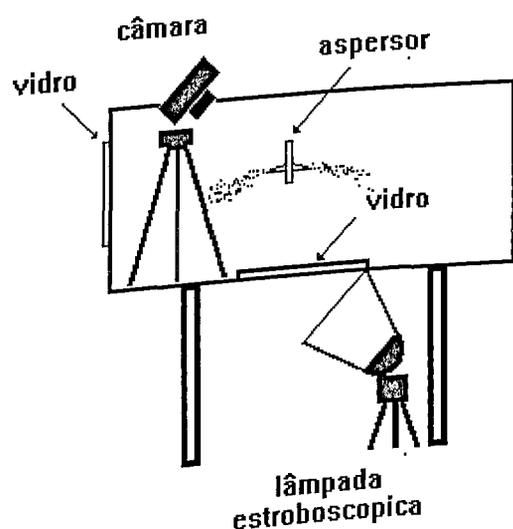


Figura 4.3 - Instalação do equipamento na visualização do lençol livre e efeito suporte.
Técnica back lighting.

4.5 - Quantificação da Frente de Gotas

4.5.1 - Testes para a obtenção de Imagens da Frente de Gotas

A câmara foi focalizada no grupo de gotas originadas pelo breakup do lençol. O equipamento de iluminação e fotográfico permaneceu inalterado, sendo a única variante, a utilização de um dispositivo mecânico, como mostra a figura 4.4, que permitiu colocar sobre a frente de gotas uma esfera de 3 mm de diâmetro a qual serviu como padrão de medida na calibração do software de análise de imagem. A placa de 44 mm com bico No 7 foram utilizados, a vazão variou de 150 l/h até 530 l/h.

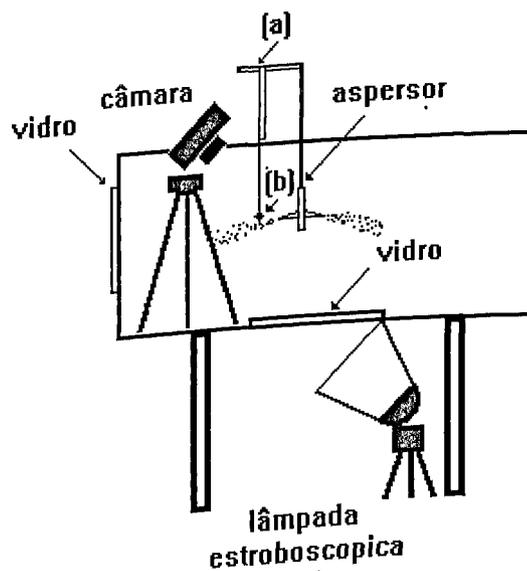


Figura 4.4 - Instalação de equipamento na visualização e quantificação de gotas. Técnica back lighting; (a) suporte da esfera e (b) esfera padrão de 3 mm de diâmetro.

4.5.2 - Quantificação Preliminar de Gotas

4.5.2.1 - Considerações Gerais

No processo de quantificação de gotas utilizou-se o Software 'Global Lab Image' (GLI) que trabalha no ambiente Windows com uma placa de aquisição de imagens (Vision-EZ DT-55), este software é empregado na análise de imagens de partículas na área de soldagem, permitindo medir arcos, comprimentos e as áreas de partículas, buracos, seções geométricas, etc. Apesar das excelentes ferramentas no tratamento da imagem, este depende muito da nitidez da fotografia a ser adquirida.

4.5.2.2 - Medição de Gotas por Meio do Software GLI

O processo de aquisição das imagens fotograficas das gotas foi feito mediante uma câmara de vídeo. A imagem monocromática pode ser tratada pelas diferentes ferramentas do software, permitindo alterar os 256 níveis da escala de cinza e mudar o brilho e o contraste da imagem.

O processo prévio da quantificação consistiu nos 2 passos seguintes:

- tratamento da imagem mediante a utilização das ferramenta "Display" que permite variar o contraste e o brilho. O ideal é procurar o contraste máximo que permite delimitar as silhuetas das gotas;

- A calibração é feita mediante a utilização da ferramenta "Calibration", tomando-se como um padrão de medida a esfera de 3 mm de diâmetro. O padrão pode ser salvo como

um arquivo de extensão '.cal' e pode ser chamado para a medição de outras seções da imagem.

Utilizando a ferramenta "Particle", delimita-se uma área de estudo ROI (região de interesse). Neste modo, os atributos (áreas, centroides, etc.) são fornecidos estatisticamente através de seus valores médios 'Mean', mínimo "Min", máximo "Max" e o desvio padrão "StdDev".

Na tela do monitor apresenta-se mediante linhas circundantes de cores o número de partículas reconhecidas pelo software com sua respectiva numeração. No caso de precisar apenas dos dados de uma partícula elege-se "Select", e os atributos selecionados pelo usuário são apresentados na janela. Os dados podem ser salvados como arquivos de extensão ".par" e utilizados após para a respectiva análise.

Considerações com respeito à ferramenta "Particle": uma partícula é um grupo de "pixels" dentro de uma determinada faixa de escala de cinza e um buraco (hole) é um grupo de pixels que se encontra fora desta faixa e está rodeada por um grupo de pixels dentro da faixa. Esta faixa pode ser variada manualmente mediante o atributo "threshold range", variando assim o número de partículas identificadas.

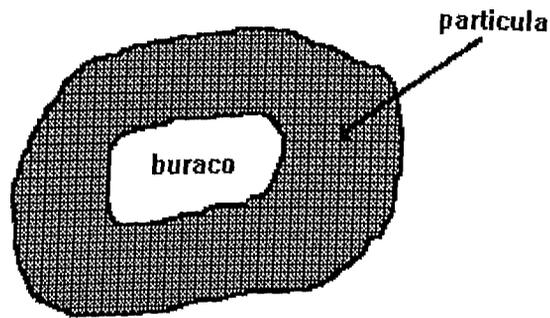


Figura 4.5 - Partícula identificada pelo Software, a parte escura é a área da partícula e a parte branca é o buraco.

Na figura 4.5 mostra-se um buraco dentro de uma partícula. Neste caso o Software só considera como área da partícula a parte preta e a parte branca inscrita é considerada como um buraco.

Os atributos oferecidos pela ferramenta "Particle", estão orientados para fornecer ao usuário do software dados referentes aos buracos e partículas por separado. Por exemplo no atributo "area" aplicado na partícula mostrada na figura 4.5 se fornece a área da partícula, excluindo o área dos buracos inscrito nela. Então os valores estatísticos das partícula num ROI são referentes ao grupo de pixels dentro da faixa. Isto produz um erro na quantificação das gotas porque estas, devido ao fato de refletir a luz, apresenta uma figura de silhueta preta com uma parte central branca desta forma as gotas são identificadas como partícula com um buraco inscrito e não é considerada a gota em sua totalidade.

Para poder reverter este problema da quantificação das gotas, afastou-se a fotografia a uma distancia da câmara de vídeo de maneira que o software não considere os buracos das partículas. O único problema é que perdeu-se em qualidade na nitidez da imagem que gera um erro na medição da área das partículas.

Outro problema apresentado é que o software não calcula os parâmetros de caracterização do spray: D_a , D_p e $D_{a/p}$. Para isto sugere-se a elaboração de um programa que trabalhe com os dados dos atributos "area total" e "Perimeter".

O processo de quantificação de gotas por meio do Software GLI, foi feito de maneira resumida, para maiores detalhes consultar o manual Global Lab Image (1994) ou o relatório de Rezende e Scotti (1995).

4.6 - Testes sobre o Efeito Suporte

Procurou-se visualizar como a forma hidrodinâmica do suporte do aspersor corta o lençol livre, o equipamento fotográfico e de iluminação foram mantidos como mostra a figura 4.3, mas a máquina fotográfica foi focalizada no setor de interação suporte e lençol. Os dois tipos de aspersores comerciais foram testados, com os bicos No 7 e No 2.8 respectivamente. Foram utilizadas para ambos casos as placas 44 mm e 34 mm. As fotografias foram tomadas com a variação da vazão.

5. - APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 - Técnicas de Iluminação

Nas figuras 5.1 (a) e 5.1 (b), ilustra-se a técnica de iluminação indireta refletida, sendo a figura 5.1 (a) obtida com uma lâmpada estroboscópica disparada por um circuito eletrônico e a figura 5.1 (b) obtida com iluminação de dois flashes eletrônicos sincronizados via célula fotoelétrica. Em ambas pode-se observar a propriedade refratária da água, a qual gera uma imagem de jato com bordas escuras e um centro de cor clara. O fundo se apresenta de cor clara. Este detalhe é de importância na seleção da abertura ótima do diafragma. A procura de uma imagem onde a silhueta do objeto esteja bem definida assim como o grau de contraste, tem muito a ver com o grau de refração da água e a intensidade de iluminação da luz incidente. Ambas imagens apresentaram boa qualidade de contraste e nitidez para a vazão de operação escrita na legenda. Mas para fotografias correspondentes a vazões maiores, observou-se que o flash eletrônico deixou a desejar em termos de poder de congelamento de imagem. Isto significa que o tempo de iluminação do flash eletrônico é superior ao tempo da lâmpada estroboscópica. Uma desvantagem da técnica da figura 5.1 (a) é que devido ao alto grau difusivo da parede onde a luz reflete esta perde intensidade e resulta muito fraca, obrigando a abrir o diafragma, o que traz como consequência a diminuição da profundidade de campo e baixo contraste, em especial para jatos de bico fino. Mas como uma vantagem, oferece uma maior área de fundo ou seja uma maior área de objeto a fotografar.

Nas figuras 5.2 e 5.3, utilizou-se a lâmpada estroboscópica e duas técnicas de iluminação: iluminação oblíqua (90° entre as direções de foco e iluminação), ver figura 2.4, no item 2.14, e a técnica de iluminação back lighting, ver figura 2.5 do item 2.14.

Na figura 5.2, obtida com a técnica de iluminação oblíqua aplicada sobre o aspersor, tem-se um fundo escuro e a superfície do objeto iluminada. Um problema apresentado nesta técnica é a perda de contraste e de nitidez, devido ao alto nível de reflexão da luz sobre o lençol e sobre as gotas. Na figura 5.3, obtida com a técnica de iluminação back lighting difusa, aplicada também sobre o aspersor, o fundo apresenta-se de cor clara, contrastando com a silhueta do aspersor de cor escura. O grau de contraste e nitidez é bom.

Na análise fotográfica, no que tange às técnicas de iluminação, observou-se que as quatro técnicas testadas deram bons resultados. No entanto tomando-se em conta as limitações de congelamento de imagem dos flashes eletrônicos e do reduzido campo de profundidade, baixo contraste e nitidez de outras técnicas, a técnica de melhor performance foi a back lighting difusa utilizando a lâmpada estroboscópica. No entanto, conforme será explicado nos próximos resultados, dependendo das situações a ser analisadas, pode-se utilizar, com melhores resultados, técnicas alternativas.

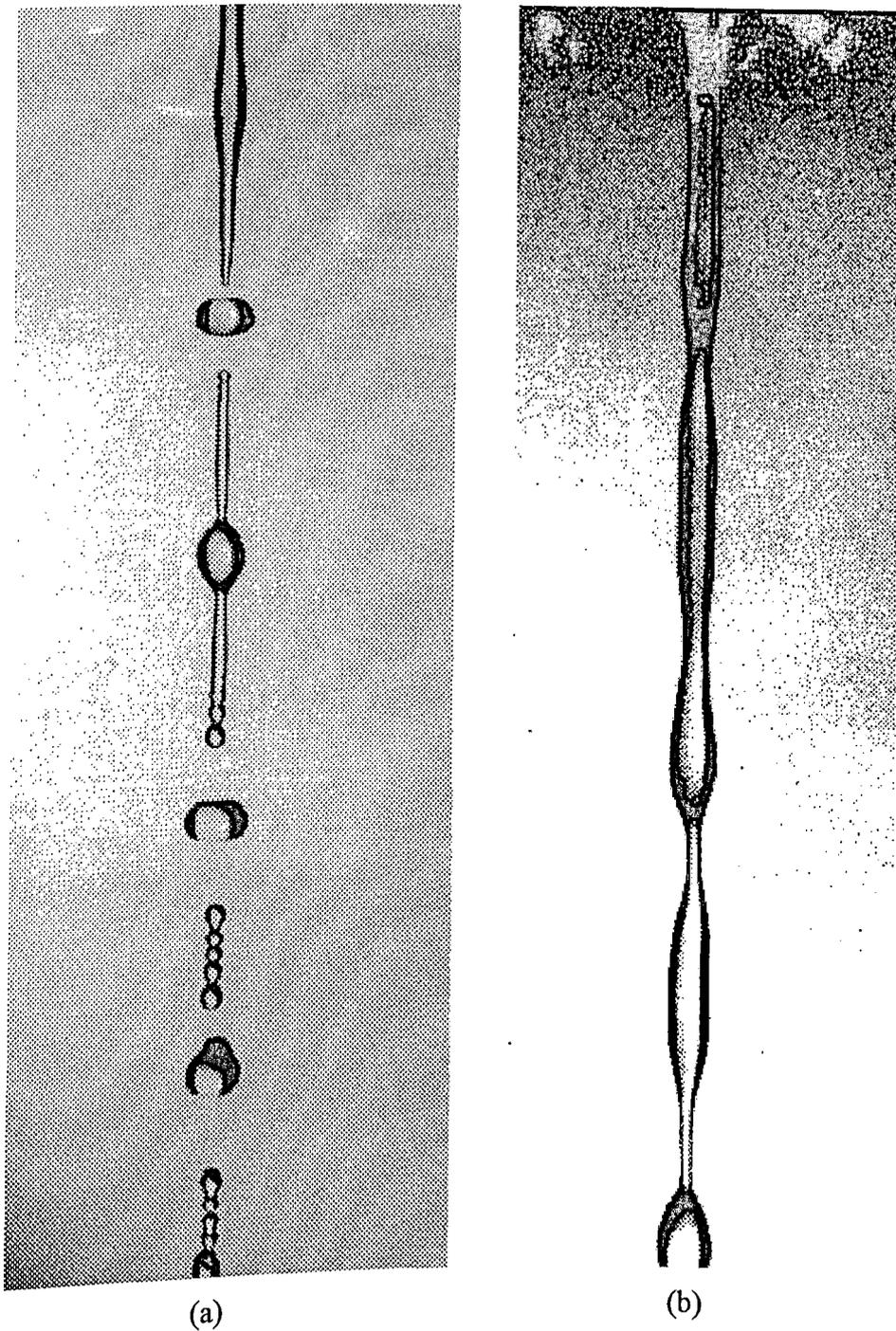


Figura 5.1 - Técnicas de iluminação indireta refletida; (a) usando uma lâmpada estroboscópica e (b) usando dois flashes eletrônicos sincronizados com célula fotoelétrica. Visualização do jato em queda livre. Vazão 50 l/h e bico No 11.

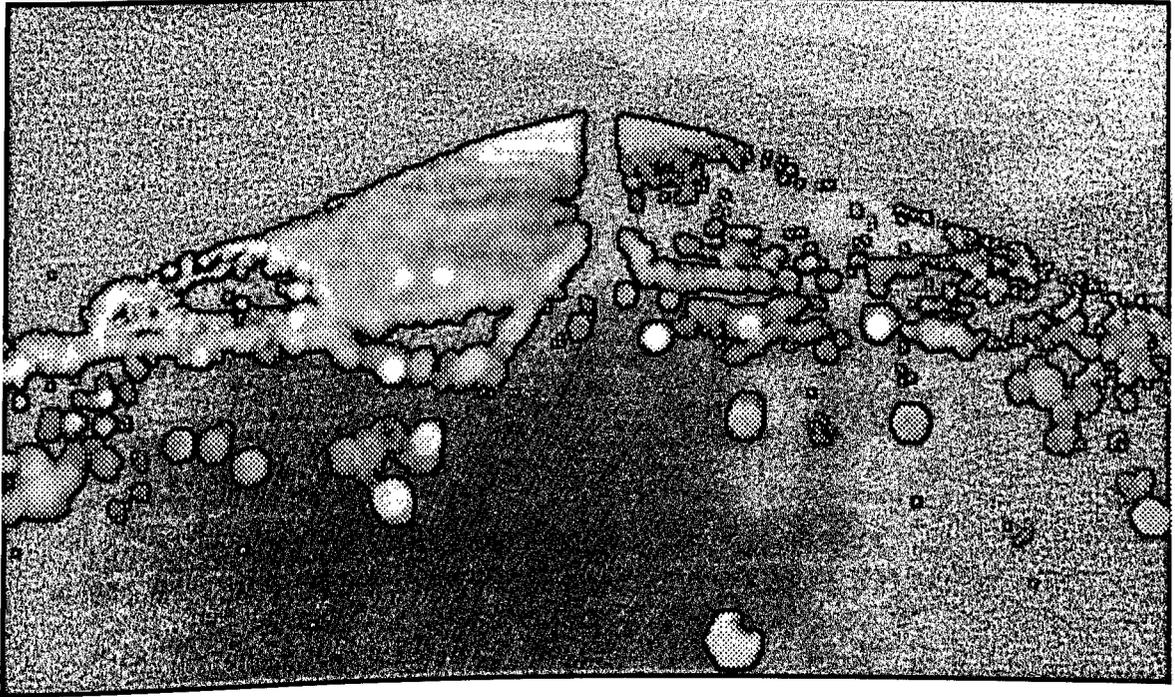


Figura 5.2 - Técnica de iluminação oblíqua. Visualização do perfil do spray. Placa 44 mm, bico No 7 e vazão 350 l/h.

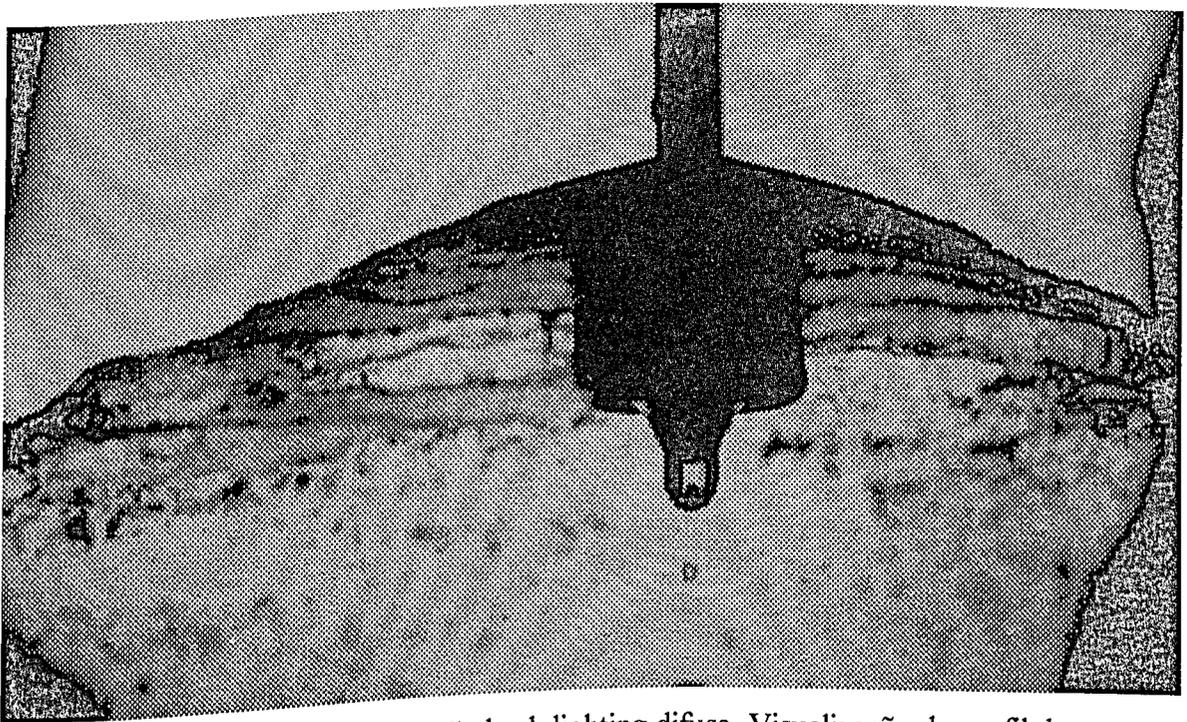


Figura 5.3 - Técnica de iluminação back lighting difusa. Visualização do perfil do spray. Placa de 44 mm, bico No 7 e vazão 350 l/h.

5.2 - Visualização de instabilidades em Jatos Livres

Nos resultados apresentados neste item procurou-se visualizar o comportamento dinâmico de jatos livres, nas proximidades do bico injetor No 16 (ver anexo 1), em função do número de Reynolds, baseado no bico injetor. Neste caso objetivou-se visualizar um comprimento máximo possível de jato e devido ao tamanho do objeto a fotografar, utilizou-se a técnica de iluminação indireta refletida porque ela permite uma maior área de objeto a fotografar assim como uma profundidade de campo aceitável. A técnica de iluminação back lighting difusa se descartou, devido a sua menor área do objeto a fotografar.

Nas figuras 5.4 a 5.6 mostra-se o comportamento do jato livre para diferentes números de Reynolds. Na figura 5.4 (a), $Re_b = 1.113$ (baseado no bico) e $Re_t = 930$ (baseado na tubulação de diâmetro de 3/4" que antecede ao bico), observa-se um comportamento laminar do jato. Isto era de se esperar pois o escoamento no interior do tubo deve ser laminar. É interessante observar a redução da área do jato na parte inferior da imagem. Este fenômeno é consequência da aceleração das partículas de fluido submetidas à gravidade. Desta forma a conservação da massa fica garantida.

Na figura 5.4 (b) tem-se $Re_b = 11.137$ e $Re_t = 3700$. A pesar do escoamento no interior ser possivelmente turbulento observa-se um jato livre laminar, porém, já com a presença de pequenas instabilidades. Possivelmente, a relaminarização do escoamento (bico-jato) foi devida à ação redutora criada pelo bico injetor. Observe-se uma menor redução da área do jato livre devido a que sua energia cinética inicial é maior e o efeito da gravidade se torna menos importante.

Na figura 5.5 (a) tem-se $Re_b = 33.437$ e $Re_t = 11.100$. Observa-se que o escoamento no interior do tubo já é altamente turbulento. No entanto o jato livre ainda se encontra em transição, com a presença de instabilidades mais amplificadas que o caso anterior. Nas figuras 5.5 (b), e 5.6(a) e 5.6 (b) tem-se Reynolds elevados e observa-se a nítida transição do escoamento e sua natureza turbulenta para posições mais avançadas. Nota-se, qualitativamente, instabilidades cada vez mais amplificadas e uma banda de frequências cada vez mais larga. Nota-se também o forte efeito relaminizador do bico injetor, pois, mesmo a altos números de Reynolds, tem-se junto ao bico escoamento de natureza aparentemente laminar. Na sequência as perturbações injetadas no jato livre, pelo próprio sistema, são amplificadas, sob o forte efeito do cisalhamento entre o jato e o meio em repouso, dando origem à transição e dependendo do número de Re_b , conduzindo ao jato a um regime turbulento tridimensional.

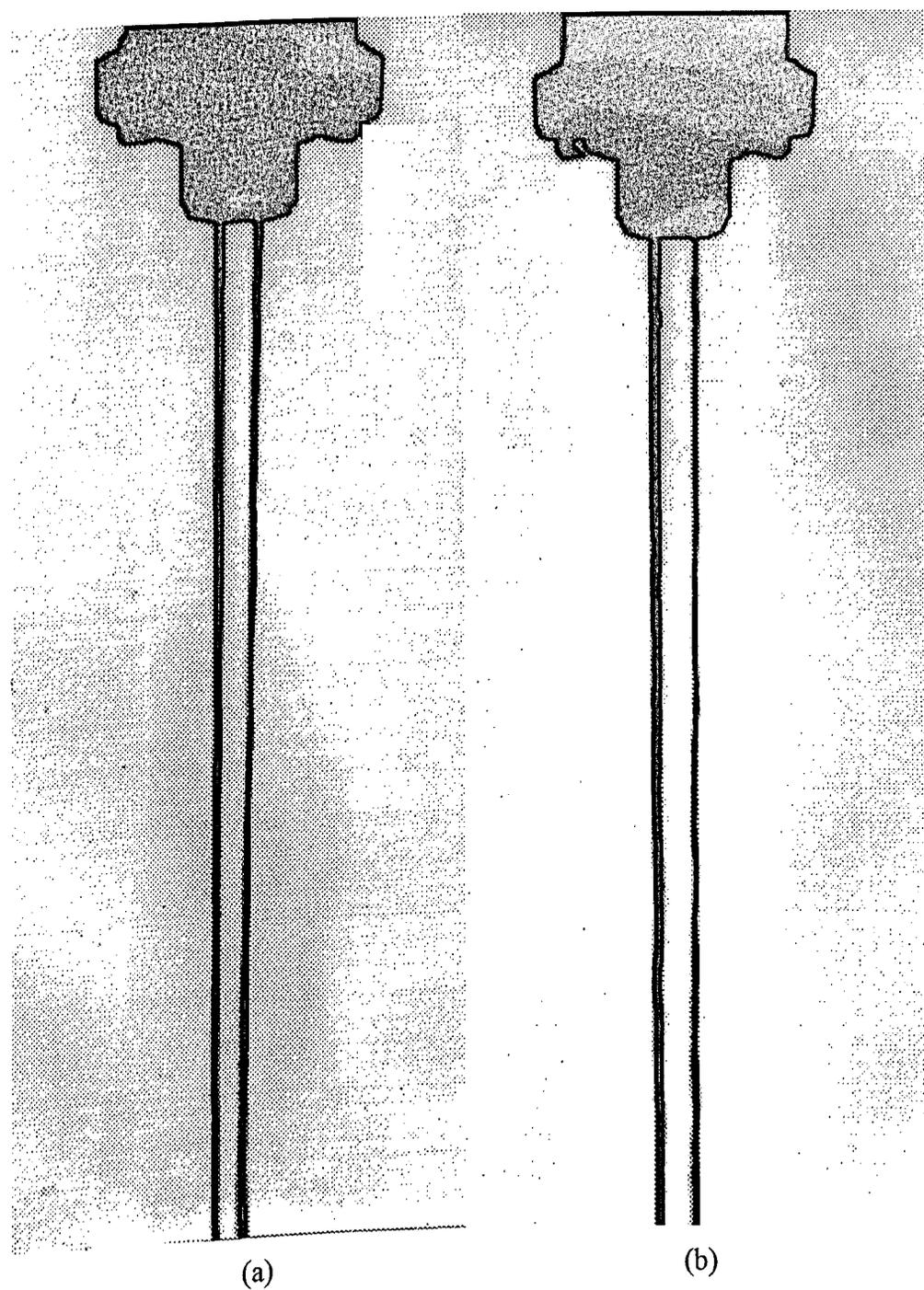


Figura 5.4 - Visualização das instabilidades no jato na saída do bico No 16; a) $Re_b = 1.113$ e b) $Re_b = 11.137$.

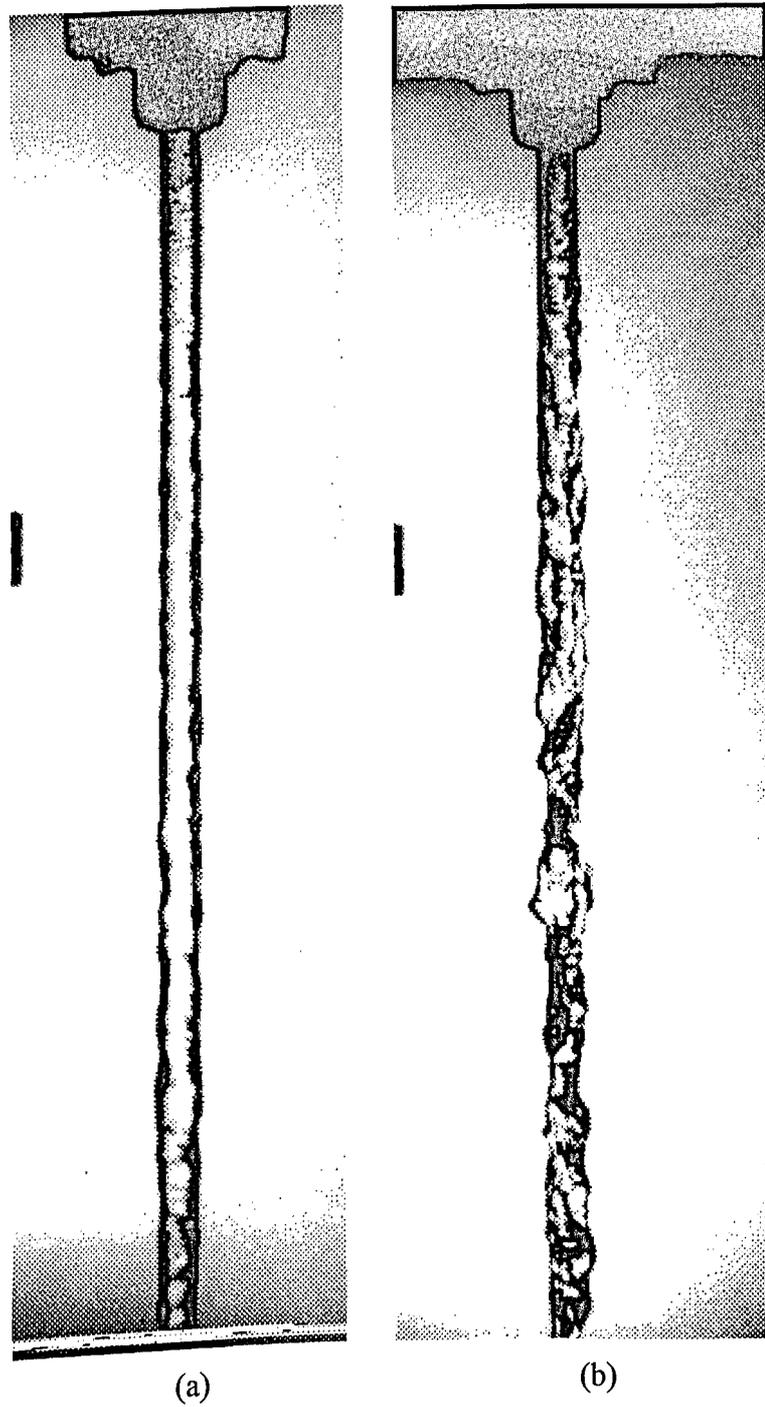


Figura 5.5 - Visualização das instabilidades no jato na saída do bico No 16; a) $Re_b = 33.437$ e b) $Re_b = 55.696$.

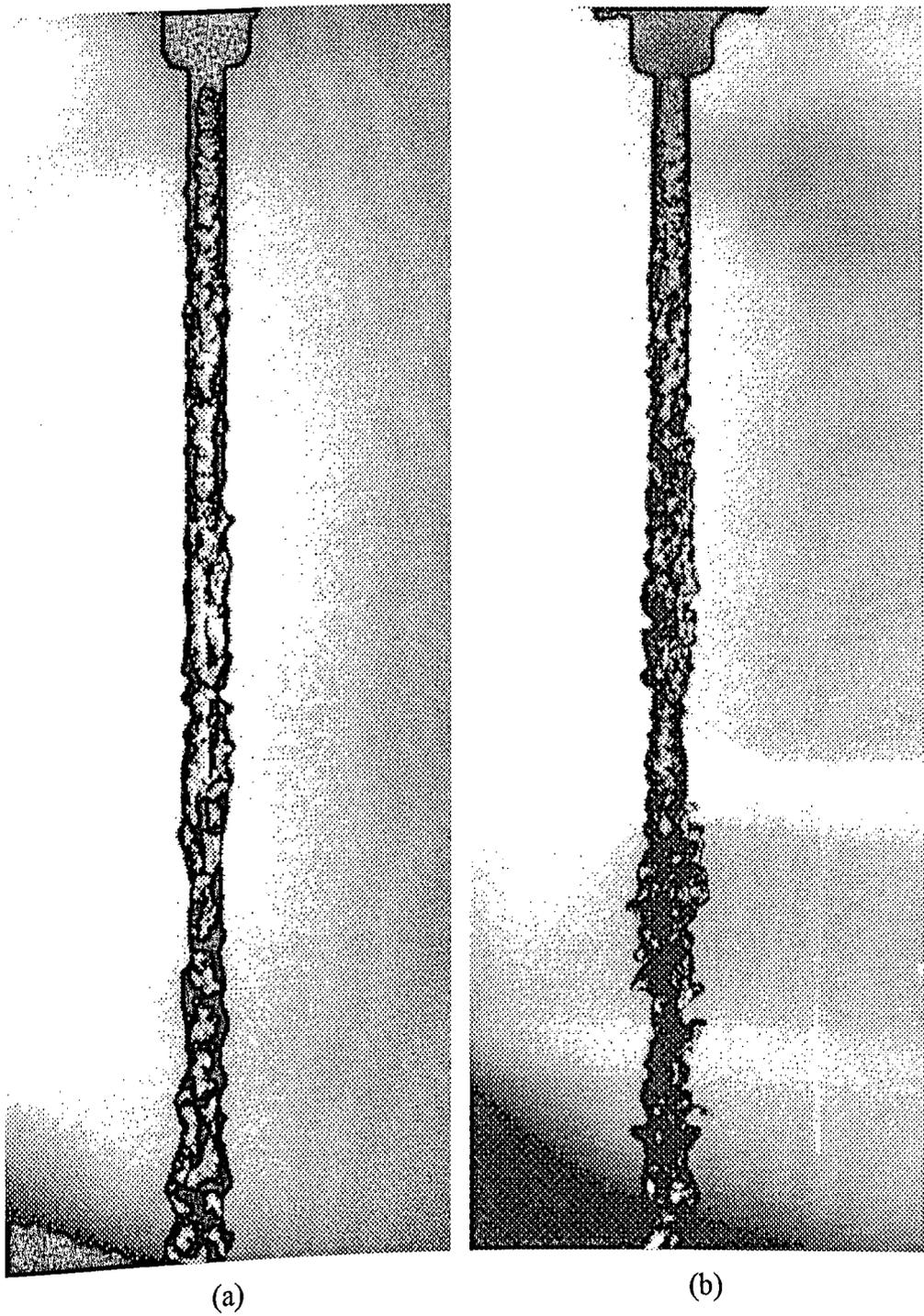


Figura 5.6 - Visualização das instabilidades no jato na saída do bico No 16; a) $Re_b = 89.113$ e b) $Re_b = 122.537$.

5.3 Visualização do Desenvolvimento das Instabilidades ao Longo do Jato Livre

5.3.1 - Considerações Gerais

Na seção precedente analisou-se o comportamento do jato nas proximidades do bico injetor. Neste item será visualizado o comportamento do jato em todo seu comprimento através de diversas fotografias focalizadas em diferentes posições verticais do mesmo. Os experimentos foram programados de tal forma a se ter uma sequência de configurações com complexidade física progressiva. Vários números de Reynolds foram selecionados e os resultados são apresentados a seguir.

5.3.2 - Visualização das Instabilidades de Rayleigh - Primeira Ordem

A primeira configuração estudada é relativa a $Re_b = 4.900$, bico No 9 (ver anexo I). Na figura 5.7 (a) visualizou-se fase inicial do jato e percebe-se que se trata de um regime laminar. Na figura 5.7 (b) começa-se a observar as primeiras instabilidades simétricas varicosas (Reis e Silveira Neto, 1993), também chamadas instabilidades do tipo Rayleigh(1879). Neste texto elas também serão denominadas de Primeira Ordem. São elas que serão amplificadas para dar origem as gotas observadas nesta figura, assim como nas figuras 5.8 e 5.9. O ponto de breakup está assinalado na figura 5.7 (b) e determina a posição onde o jato deixa de ser contínuo para formar uma sequência de gotas. Na figura 5.8 (a) observa-se a presença de filamentos de líquido intermediários às gotas. É interessante observar que estes filamentos apresentam instabilidades de Rayleigh que darão origem a outra família de gotas menores e

intermediárias às precedentes conforme pode ser visualizado. Observa-se, tanto nas gotas quanto nos filamentos, a ação simultânea dos efeitos de inércia e de tensão superficial que conduzem à formação de fragmentos do jato na forma de discos ou na forma de cilindroides. A tendência é de se chegar a um equilíbrio conduzindo-se a gotas esféricas, cuja geometria permite se chegar a um estado de energia mínima da gota. As figuras 5.9 (a) e 5.9 (b) permitem ver em detalhe o que foi explicado no que tange ao processo secundário de formação de gotas menores.

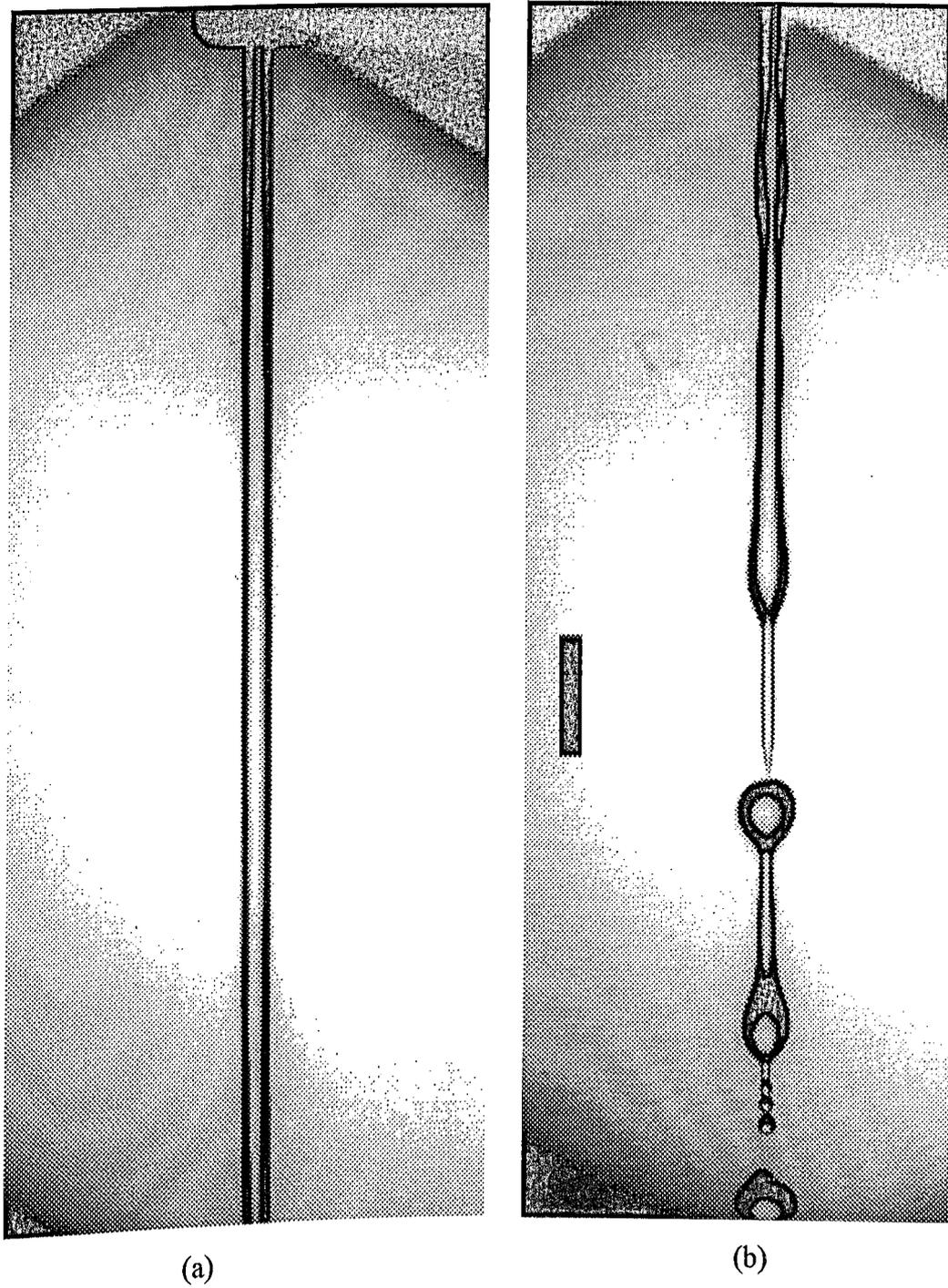


Figura 5.7. Visualização das instabilidades no regime Rayleigh; a) Jato na saída do bico e b) Breakup do jato, visualização de instabilidades simétricas a 40,5 cm do bico; Bico No 9; Vazão 50 l/h; $Re_b = 4.953$.

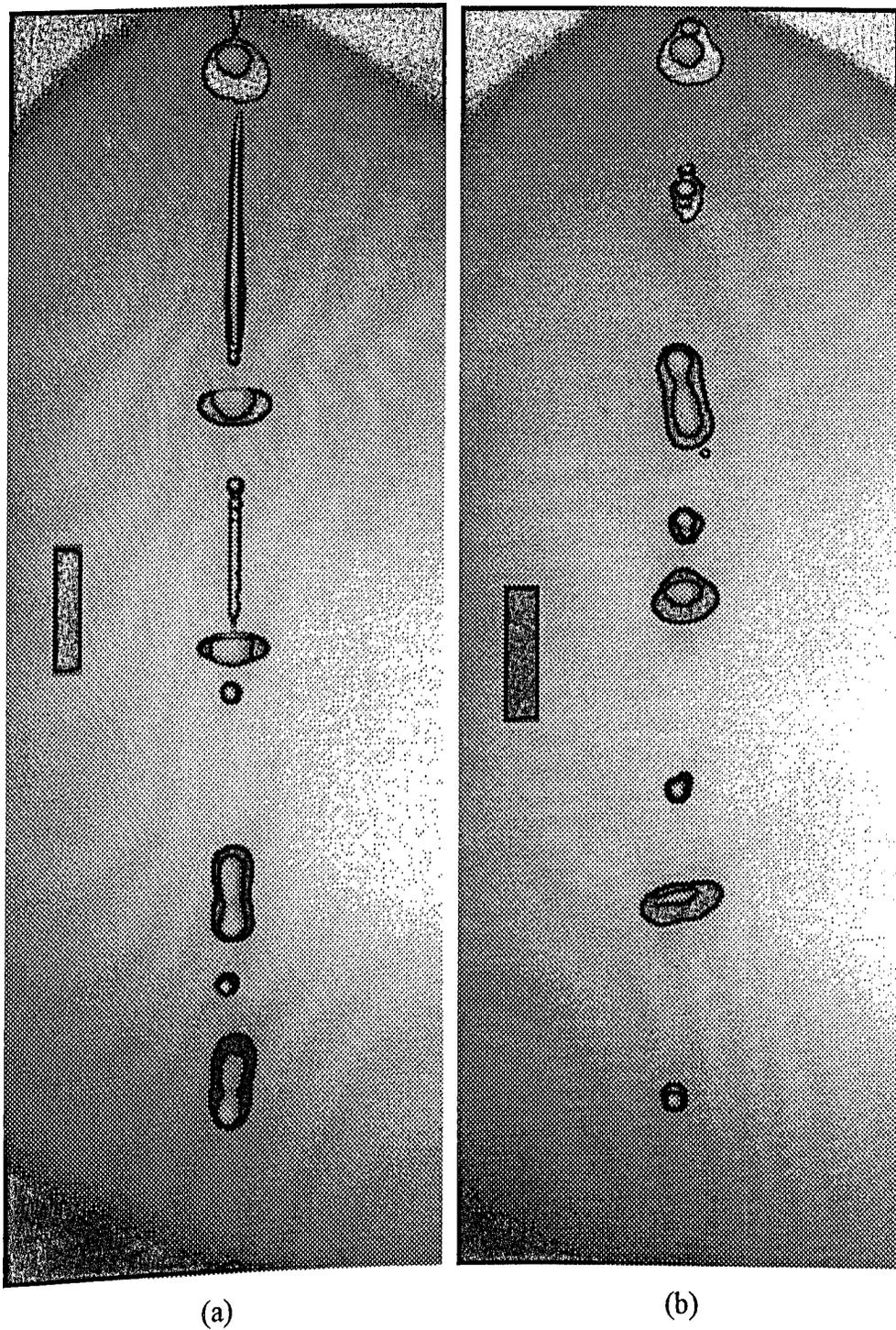
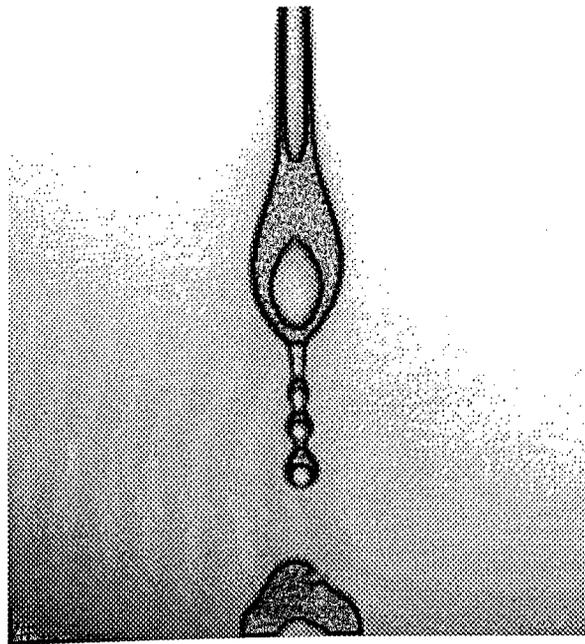
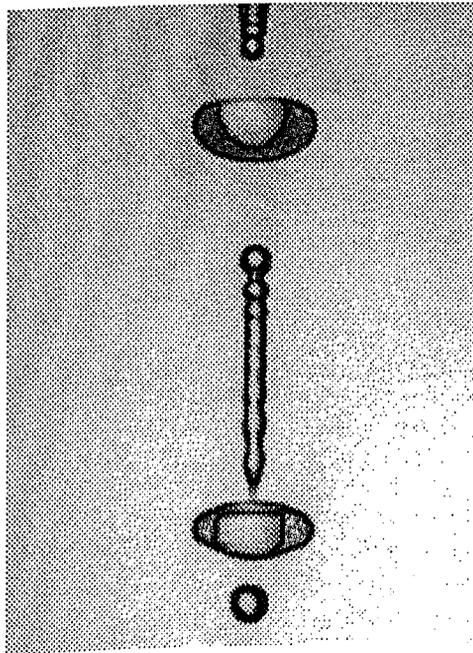


Figura 5.8. Visualização do regime Rayleigh; a) Jato a 50,5 cm do bico e b) jato a 60,5 cm do bico; Bico No 9; vazão de 50 l/h; $Re_b = 4.953$.



(a)



(b)

Figura 5.9. Detalhes; a) Instabilidades simétricas no breakup do regime Rayleigh; b) Instabilidades simétricas sobre as gotas no regime Rayleigh.

5.3.3 - Visualização das Instabilidades Superficiais ou de Segunda Ordem

Nas figuras 5.10 a 5.12 visualiza-se a sequência espacial do jato para $Re_b = 29.700$. Observa-se neste caso instabilidades de alta frequência, ver figura 5.10 (a). Sobre elas sobrepõem-se instabilidades de Rayleigh (figura 5.10 (b)). Esta nova família de instabilidades, que neste trabalho serão classificadas como instabilidades de segunda ordem, têm suas origens ligadas ao cisalhamento entre o jato e o ar circundante. A base para esta afirmação está no fato de que estas instabilidades se intensificam à medida que se aumenta o número de Reynolds. Além disto observa-se na figura 5.7 completa ausência destas instabilidades devido ao fraco nível de cisalhamento.

É interessante observar nas figuras 5.11 (a) e 5.11 (b) que as instabilidades de Rayleigh ainda predominam sobre as instabilidades superficiais, dando origem a uma região de breakup e formação de gotas como no caso precedente de baixo Reynolds. Observa-se no entanto, a pesar da predominância das instabilidades de Rayleigh, uma influência das instabilidades superficiais no processo de interrupção do jato. De fato na figura 5.11 (b) acontece o breakup numa posição intermediária do jato mantendo à sua frente um ligamento importante de fluido, como já foi observado por Chigier (1995). Observa-se ainda um aumento da frequência de formação e do tamanho das gotas.

Na figura 5.12 (a) é possível observar a presença de uma oscilação global, envolvendo gotas e ligamentos, com um comprimento de onda da ordem de três comprimentos de onda de Rayleigh, mostrando o nascimento de um novo tipo de instabilidades que será claramente evidenciado nos resultados subsequentes, relativos a maiores números de Reynolds. Este tipo de instabilidades será neste texto denominado instabilidades de terceira ordem.

As figuras 5.13 (a) e 5.13 (b) representam detalhes extraídos das figuras precedentes (ver legenda) e permitem se visualizar pequenas instabilidades circunferências sobre as gotas maiores. Atribui-se suas presenças às instabilidades superficiais encontradas na figura 5.10 (a). Percebe-se ainda a potencialidade da técnica de iluminação utilizada para o congelamento de fenômenos de altas frequências. De fato, trata-se da captura de pequenas ondas sobre a superfície de uma gota em movimento.

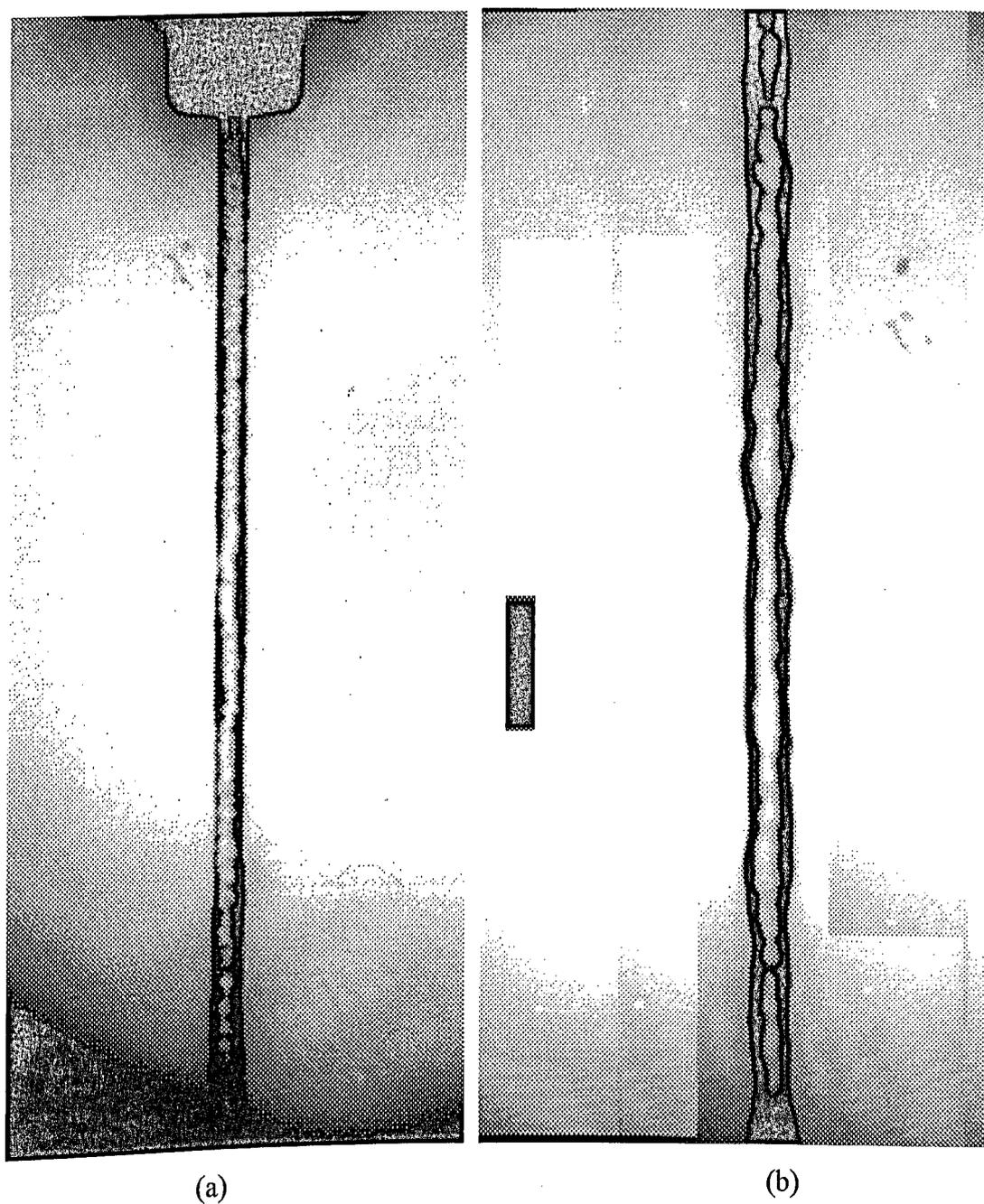


Figura 5.10. Visualização das instabilidades superficiais ou de segunda ordem; a) no jato na saída do bico e (b) no jato na posição 34,5 cm do bico; Bico No 9; Vazão de 300 l/h; $Re_b = 29.705$.

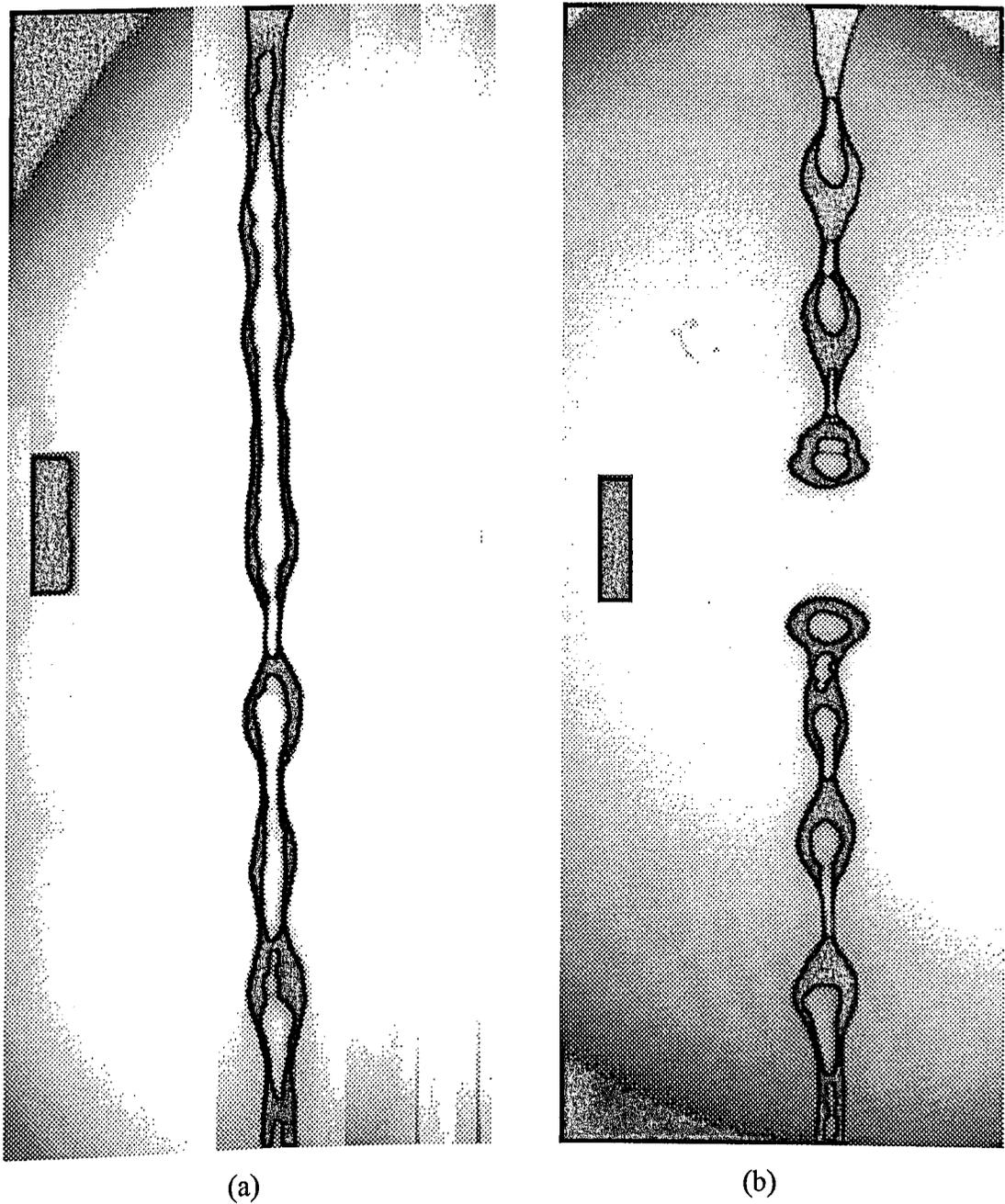


Figura 5.11. Visualização das instabilidades de segunda ordem; a) Estrangulamento do jato por instabilidades de primeira ordem; Distância da marca a 54,5 cm do bico; b) Breakup do jato; Distância da marca a 64,5 cm do bico; Bico No 9; Vazão 300 l/h; $Re_b = 29.705$.

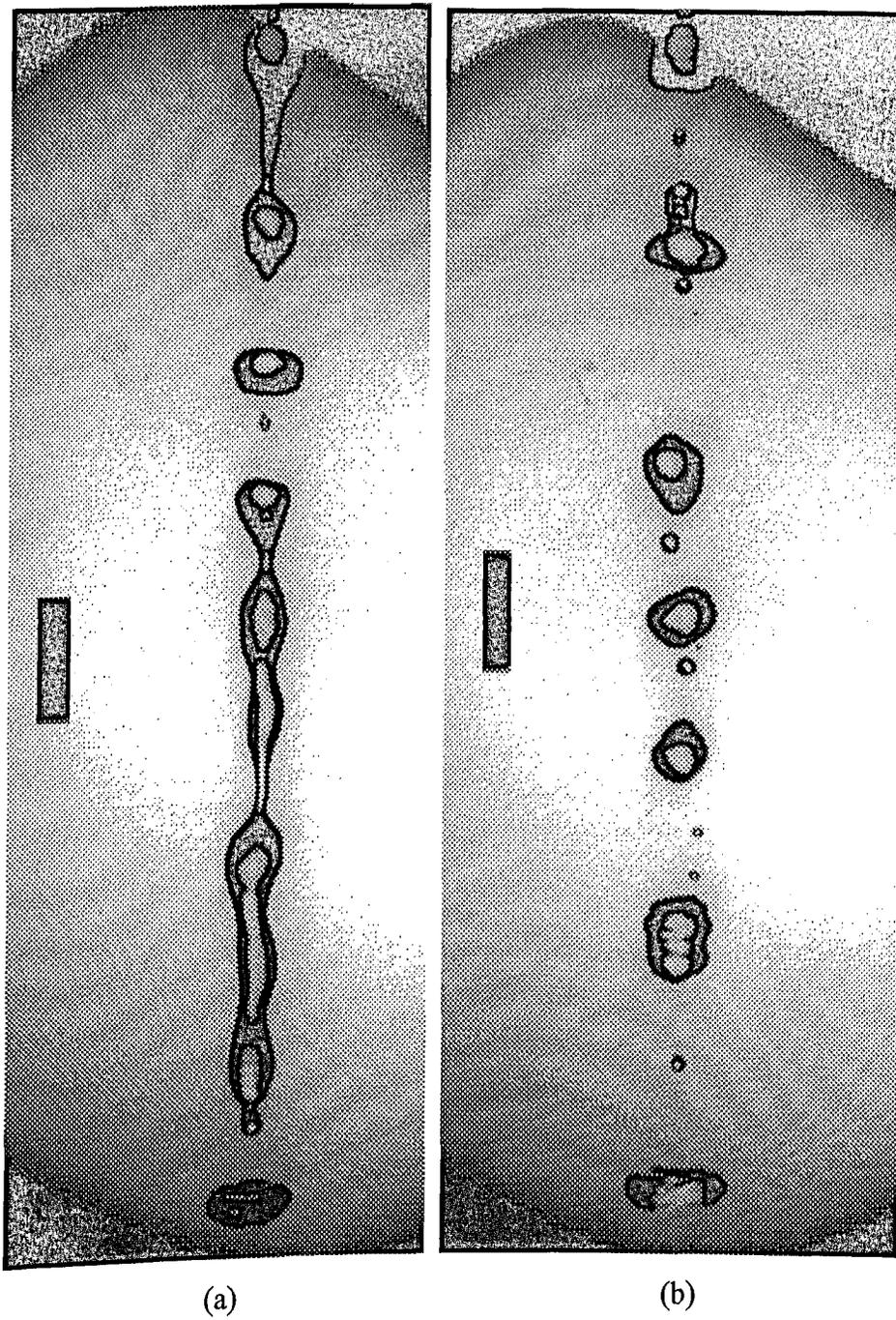


Figura 5.12. Visualização das instabilidades de segunda ordem; a) Formação de ligamentos de jato após o breakup a 85,5 cm do bico e b) Breakup dos ligamentos formando gotas a 98,7 cm do bico; Bico No 9; Vazão 300 l/h; $Re_b = 29.705$.

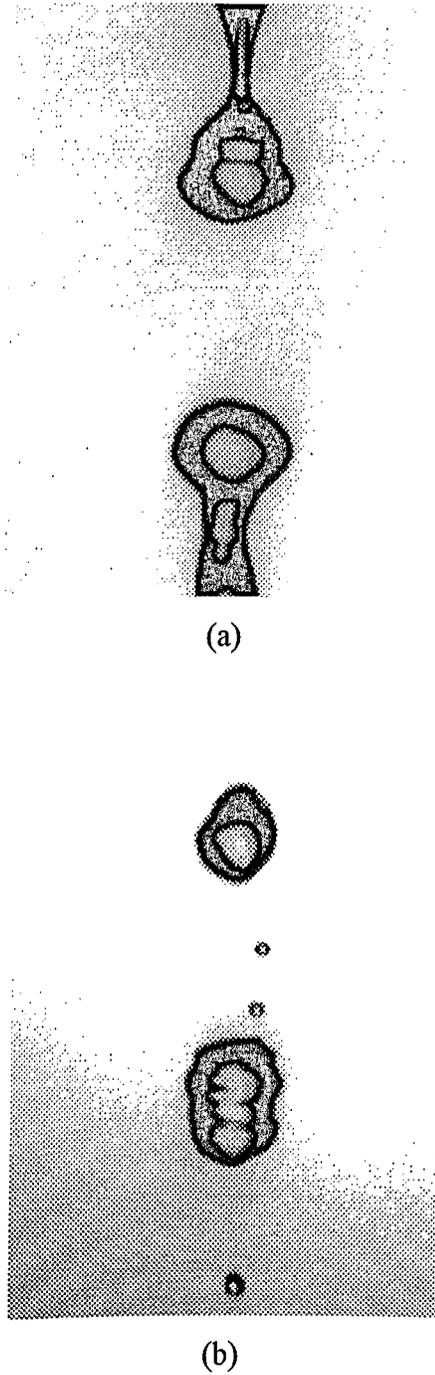


Figura 5.13. Visualização das instabilidades sobre as gotas; a) detalhe do breakup da figura 5.11 (b); b) detalhe do breakup da figura 5.12 (b).

5.3.4 - Visualização das instabilidades de Terceira Ordem

Nas figuras seguintes tem-se os resultados relativos a $Re_b = 62.311$, bico No 9. Observa-se na figura 5.14 (a) a nítida presença de instabilidades superficiais (segunda ordem) sobre os quais se superpõem uma nova família de instabilidades, que podem ser visualizadas na figura 5.14 (b). Elas se manifestam na forma de oscilações globais sobre o jato, e serão denominadas neste texto de instabilidades de terceira ordem. Nas figuras subseqüentes, 5.15 (a) e 5.15 (b), vê-se que estas novas instabilidades são fortemente amplificadas pela ação do cisalhamento entre as forças de inercia do jato e do ar circundante, dando origem a um novo mecanismo de formação de gotas. Aparentemente o primeiro mecanismo (instabilidades de Rayleigh) foi suprimido. Em particular nas figuras 5.15 (b) e 5.16 vê-se que as instabilidades de terceira ordem já se transformam em oscilações helicoidais. Este fato explica por que se visualiza, a olho nu, uma nuvem de gotas com diâmetro muito superior ao diâmetro do jato na saída do bico. Observou-se na figura 5.16 que as gotas formadas por este novo mecanismo tem formas complexas, diferenciadas do que foi observado anteriormente. Suas trajetórias são também helicoidais, devido à inércia remanescente do processo de formação.

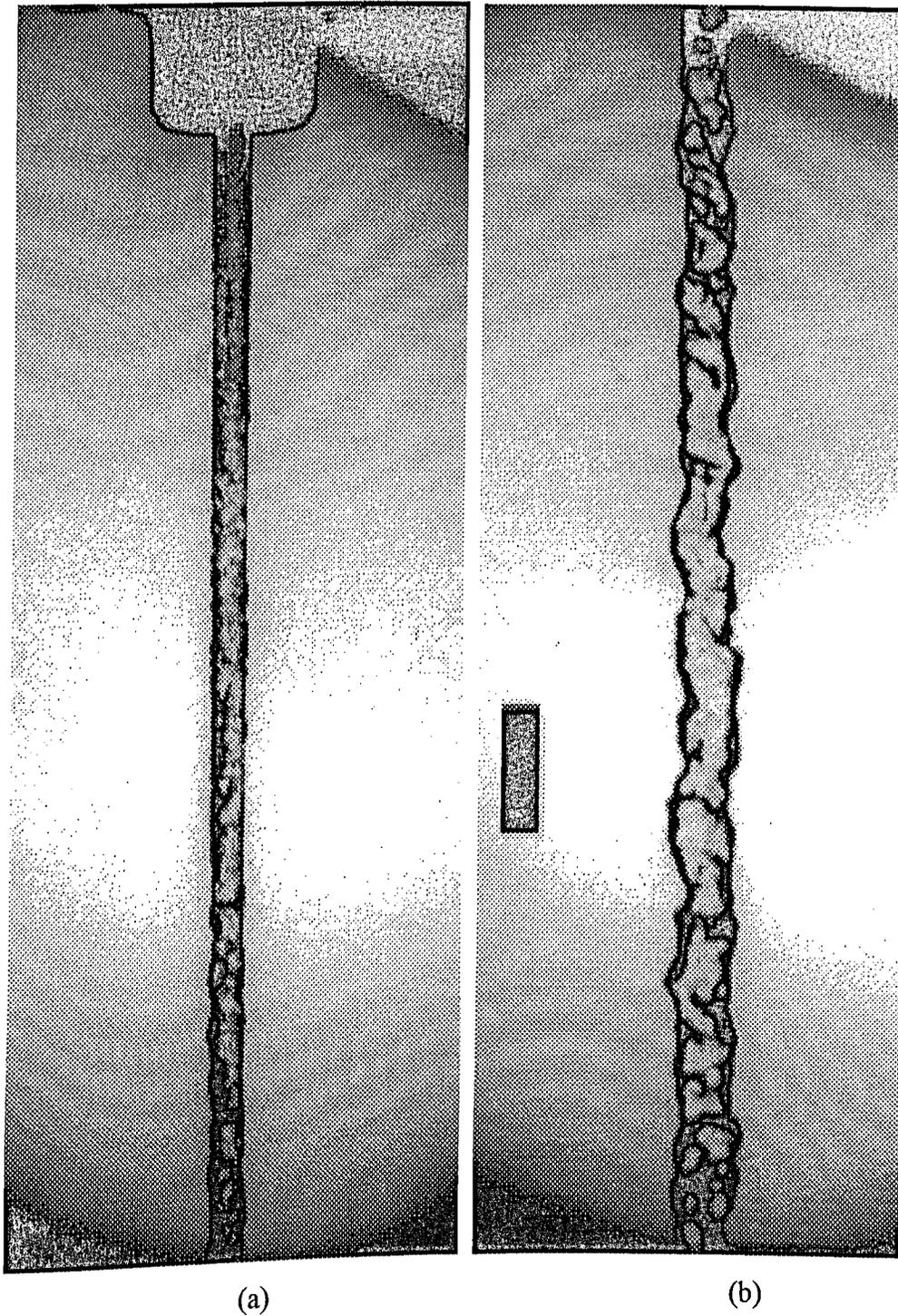


Figura 5.14. Visualização das instabilidades de segunda ordem; a) sobre o jato na saída do bico; b) sobre o jato a uma distância de 34,5 cm do bico; Bico No 9; Vazão 630 l/h; $Re_b = 62.381$.

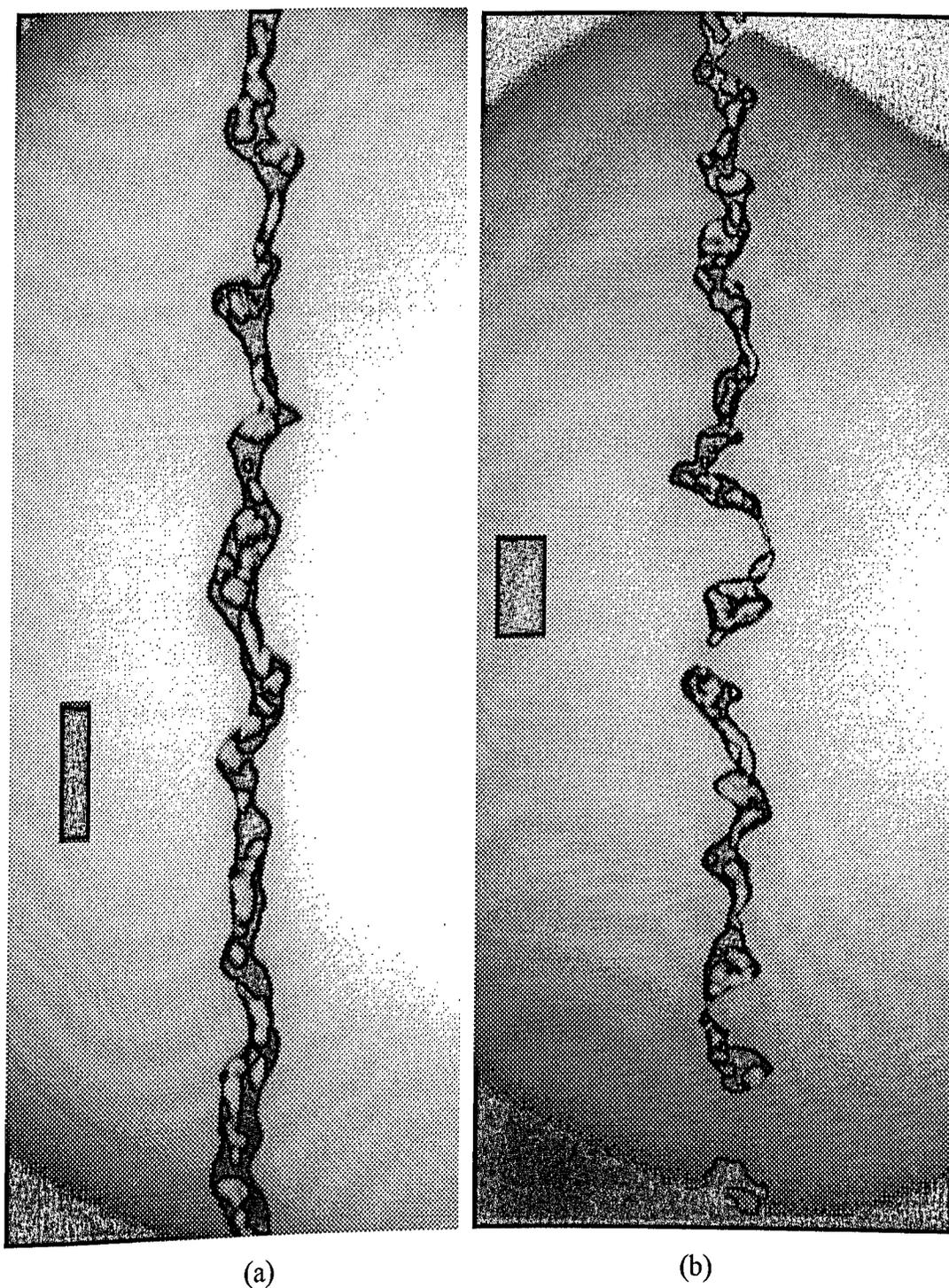


Figura 5.15. Visualização das instabilidades de terceira ordem; a) Início do movimento de enrolamento tridimensional no jato e distância da marca de 64,5 cm a partir do bico; b) Breakup do jato a 91,7 cm do bico; Bico No 9; vazão 650 l/h; $Re_b = 64.361$.

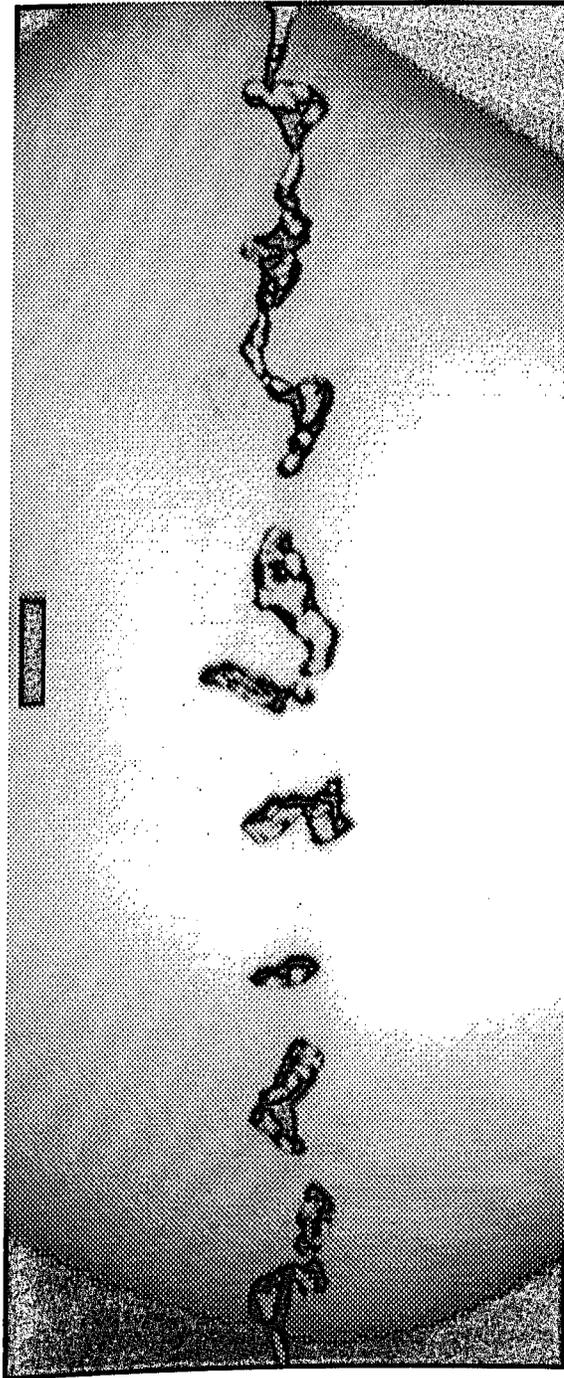


Figura 5.16. Visualização das instabilidades de terceira ordem; Breakup das a uma distância de 110,7 cm do bico; Bico No 9; vazão 650 l/h; $Re_b = 64.361$.

5.3.5 - Transição entre instabilidades de Terceira Ordem e Regime Spray

Para a visualização do desenvolvimento do processo de transição ao regime spray, escolheu-se uma vazão de 1.480 l/h a qual com o bico No 11 (ver anexo I), proporcionou um $Re = 120.000$ e $We_g = 50,3$ que, de acordo com a literatura de Spray, deveria promover um breakup na saída do bico. O conjunto de fotografias das figuras 5.17 (a) a 5.19 mostram uma performance diferente do esperado. Na figura 5.17 (a) observa-se um jato que não apresenta breakup na saída. As instabilidades de segunda ordem sobre ele são de alta frequência, caracterizando uma zona de transição à turbulência. Na figura 5.17 (b) observa-se numa posição de 39,5 cm do bico, o início da formação das instabilidades de terceira ordem, já tridimensionais, sendo mantidas no entanto, as instabilidades sobre a superfície do jato de primeira ordem. Nas figuras 5.18 (a) e 5.18 (b), a 59,5 cm e 91,7 cm com relação ao bico respectivamente, o processo de amplificação das instabilidades de terceira ordem é muito acelerado, assim como o movimento de enrolamento tridimensional. Visualiza-se ligamentos líquido e gotas que se desprenderam do jato. A origem deste fenômeno físico pode ser explicada através da superposição de três efeitos simultâneos: Tensão superficial, força de inércia e força de arraste. De fato as fortes instabilidades de terceira ordem induzem forte inércia em aglomerados de fluido para a direção externa do jato (ver figura 5.18 (a) e 5.18 (b)) as quais entram em camadas de ar a baixa velocidade, sofrendo, em consequência, um aumento respetivo na força de arraste. Estas duas forças podem vencer a tensão superficial e dar origem à formação de gotas e ligamentos (ver figura 5.19) as quais percorrem distâncias importantes para fora do jato.

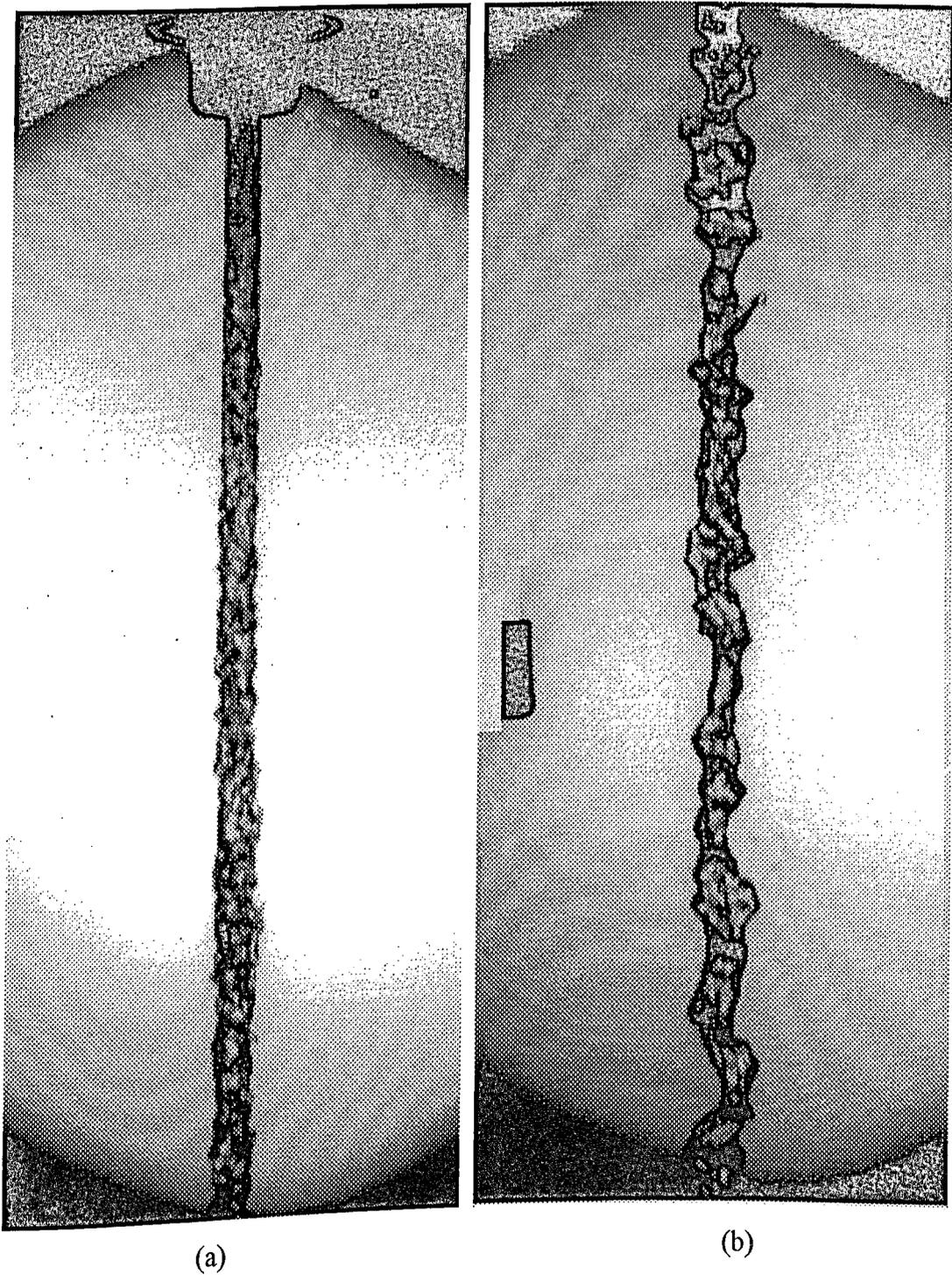


Figura 5.17 - Visualização das instabilidades no jato livre; (a) Jato na saída do bico com presença de instabilidades de alta frequência e (b) Início das instabilidades de terceira ordem no jato a 39,5 cm do bico; Bico No 11; vazão 1.480 l/h; $Re_b = 119.915,6$.

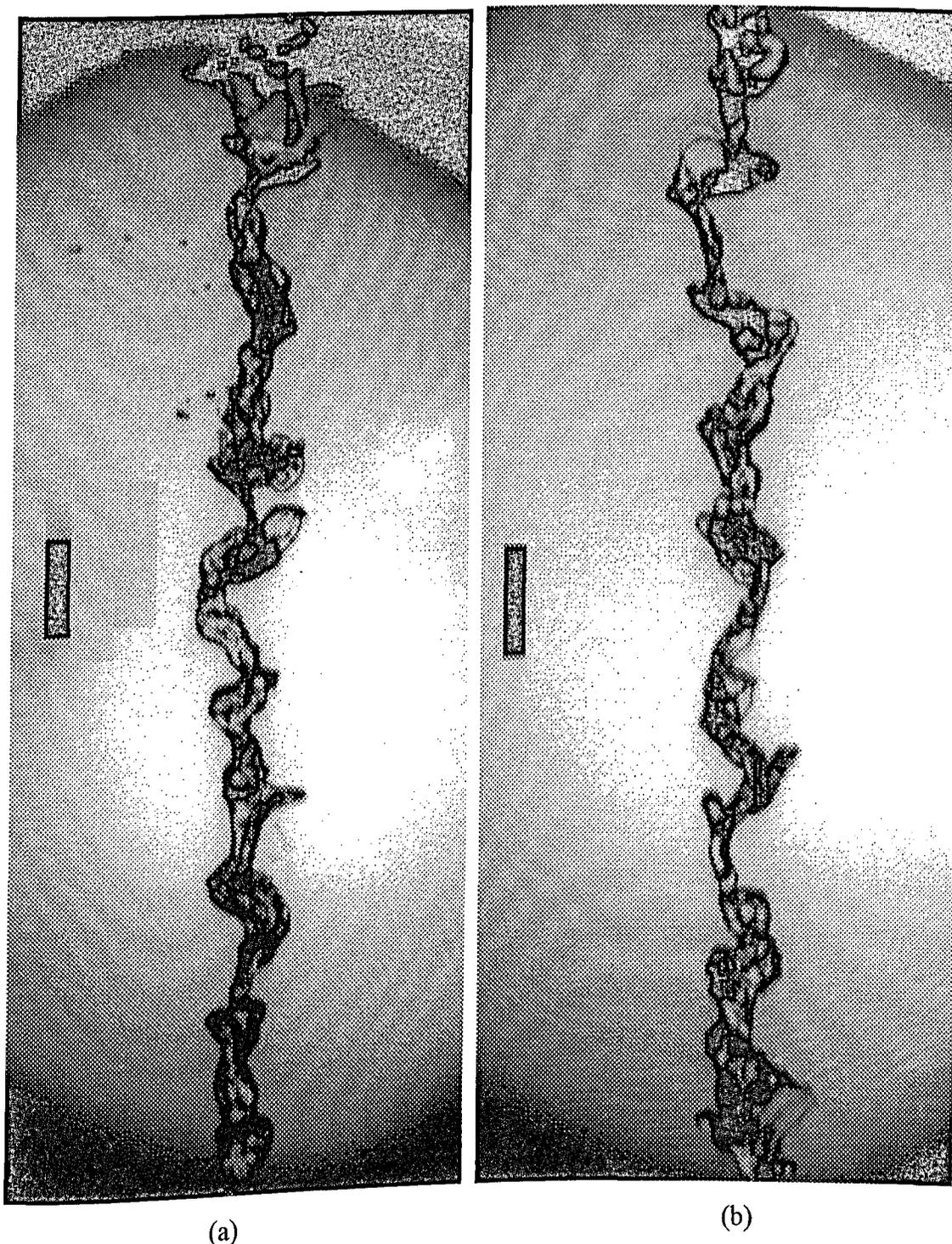


Figura 5.18 - Visualização das instabilidades no jato livre; (a) Distância da marca a 59,5 cm do bico e (b) Distância da marca a 91,7 cm do bico. Movimento de enrolamento tridimensional com desprendimento de gotas e ligamentos do jato nas duas figuras; Bico No 11; vazão 1.480 l/h; $Re_b = 119.915,6$.

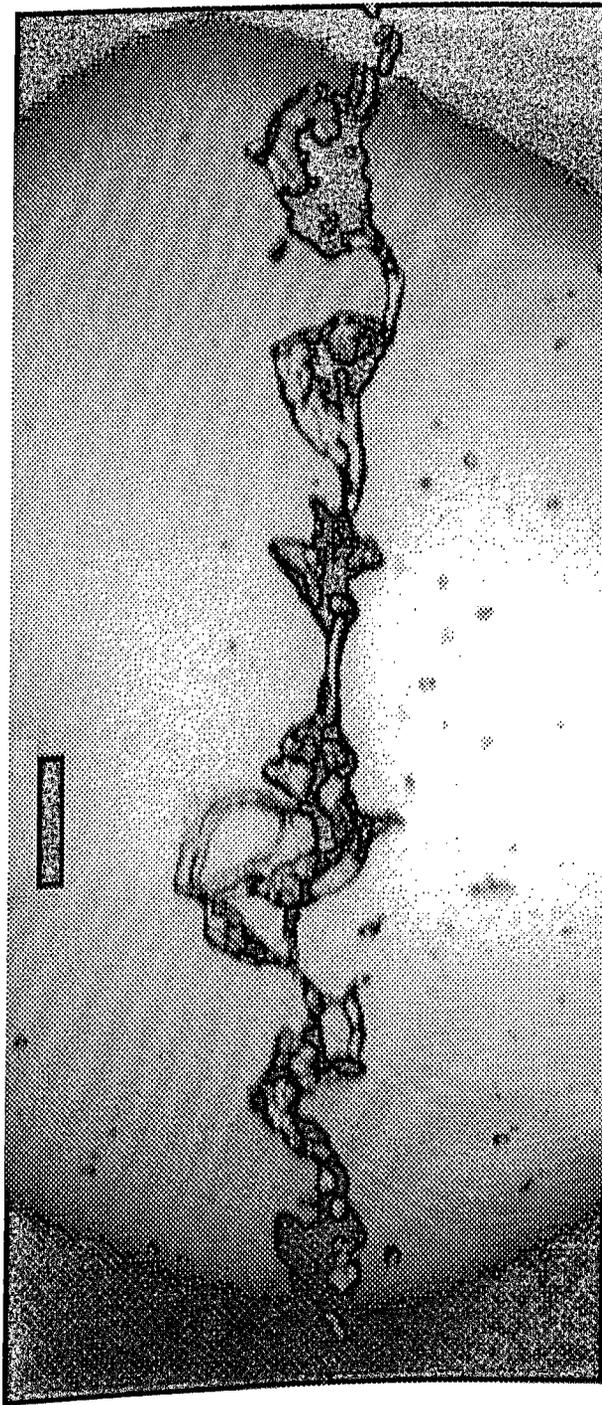


Figura 5.19. Visualização das instabilidades no jato livre; aumento do desprendimento de ligamentos líquidos e gotas; Distância da marca a 103,7 cm; Bico No 11; vazão 1.480 l/h; $Re_b = 119.915,6$.

5.4 - Visualização do breakup do jato livre

5.4.1 - Considerações Gerais

Nesta seção utilizou-se a técnica de iluminação back lighting difusa par estudar o fenômeno de breakup do jato. Na seção 5.4.2 serão apresentadas imagens fotográficas correspondentes ao estudo do breakup do jato para bico No 7, para uma análise qualitativa. Utilizando um bico 2,8 mm, na seção 5.4.3 serão apresentadas imagens obtidas no estudo da visualização do breakup e o breakup secundário dos ligamentos remanescentes.

5.4.2 - Visualização do Breakup do jato

Nas figuras 5.20 (a) a 5.20 (d) visualiza-se o fenômeno de breakup do jato, definido como sendo a posição em que ele se quebra e deixa de ser uma coluna contínua de fluido. Na realidade esta posição é oscilante com o tempo. Para garantir a captura deste fenômeno, utilizou-se uma lâmpada estroboscópica e definiu-se uma região em foco dentro da qual sempre se localizou o breakup do jato. Mostra-se na figura 5.20 quatro imagens para $Re_b = 6.400$, $Re_b = 13.200$, $Re_b = 33.300$ e $Re_b = 51.000$. Visualiza-se claramente a posição do breakup. Observa-se que para Re_b mais elevados o breakup do jato gera uma serie de ligamentos líquido, os quais entram em um breakup secundário transformado-se em gotas. No item seguinte visualiza-se o breakup secundário destes ligamentos. Na figura 5.20 (a) o mecanismo de breakup é devido às instabilidades Rayleigh ou de primeira ordem. Fenômeno similar foi observado na seção 5.3.2. Na figura 5.20 (b) o mecanismo de breakup é devido às

instabilidades de segunda ordem, ver seção 5.3.3. Na figura 5.20 (c), observa-se a presença de instabilidades de segunda ordem. Na figura 5.20. (d), observa-se a presença de instabilidades da terceira ordem como um mecanismo do breakup do jato, ver seção 5.3.4.

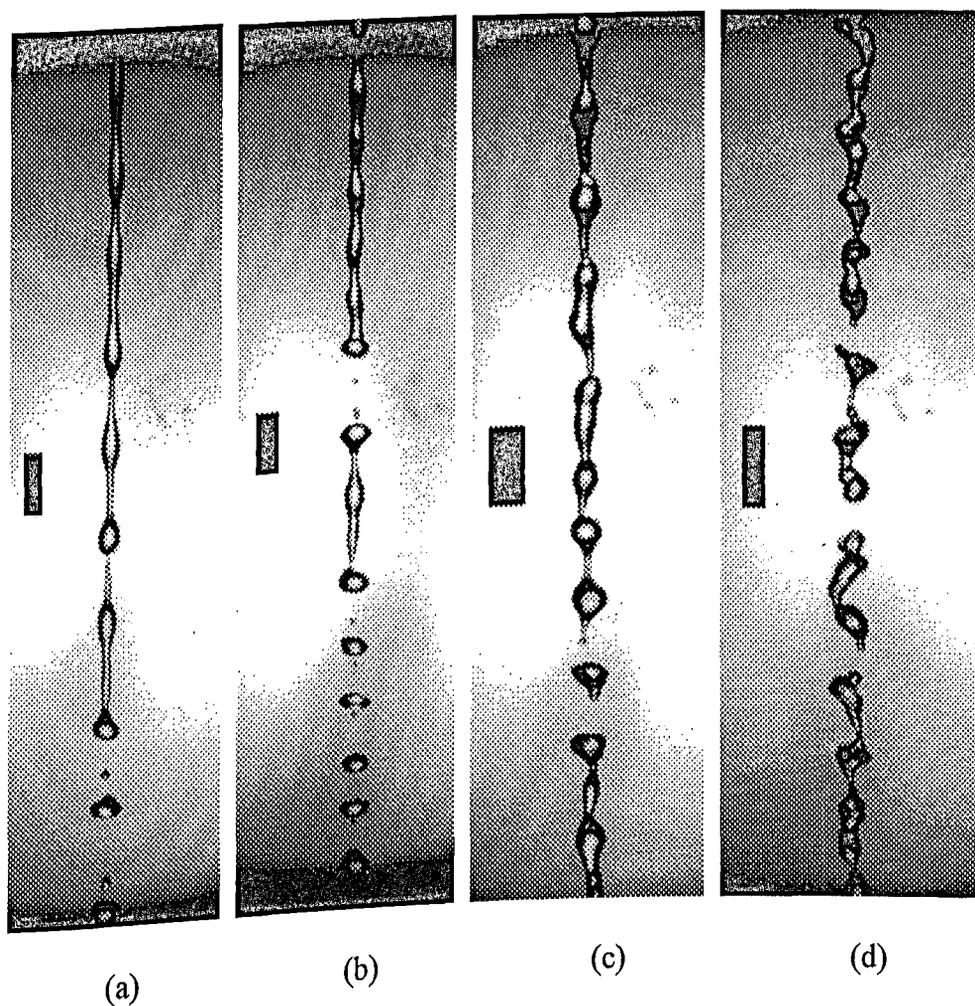


Figura 5.20. Visualização do breakup do jato livre. As quatro provas foram feitas com bico No 7 e o objeto de referência é de 1 cm; a) $Re_b = 6.400$, com objeto de referência a 43,5 cm do bico; b) $Re_b = 13.200$, com objeto de referência a 52 cm do bico; c) $Re_b = 33.300$, com objeto de referência a 72 cm do bico; d) $Re_b = 51.000$, com objeto de referência a 73,5 cm do bico.

5.4.3 - Visualização dos Breakup Secundários

Nas figuras 5.21 (a) e 5.21 (b), com $Re_b = 6.315$, têm-se duas posições diferentes, uma ilustrando o breakup do jato livre e a outra ilustrando o segundo breakup nos ligamentos líquidos a 10 cm aproximadamente do breakup do jato. Observa-se claramente como as instabilidades Rayleigh ou de primeira ordem geram o breakup do jato e se conservam nos ligamentos líquidos remanescentes gerando um breakup secundário que dá origem ao conjunto de gotas menores. As gotas maiores tem sua origem na ação das forças de tensão superficial e força de inércia que atuam sobre os ligamentos. Isto foi explicado de maneira detalhada na seção 5.3.2.

Nas figuras 5.21 (c) e 5.21 (d), com $Re_b = 22.100$, têm-se duas posições diferentes, uma ilustrando o breakup do jato livre e a outra ilustrando o segundo breakup nos ligamentos líquidos a 10 cm aproximadamente do breakup do jato. As figuras mostram o mesmo mecanismo de breakup do jato e breakup dos ligamentos apresentados devido à ação das instabilidades de segunda ordem. A descrição deste mecanismo foi feita de maneira detalhada na seção 5.3.3. Nas figuras 5.22 (a) e 5.22 (b), com $Re_b = 33.630$, têm-se duas posições diferentes, uma ilustrando o breakup do jato livre e a outra ilustrando o segundo breakup nos ligamentos líquidos a 10 cm aproximadamente do breakup do jato. Observa-se na figura 5.22 (a) a presença de instabilidades de segunda ordem como um mecanismo dominante do breakup do jato mas também observa-se a presença de instabilidades de terceira ordem, porém com um grau leve que gera um ligeiro movimento oscilante. Na figura 5.22 (b), as instabilidades de segunda ordem são conservadas nos ligamentos que juntamente com as instabilidades de Rayleigh, dão origem ao breakup secundário.

Nas figuras 5.22 (c) e 5.22 (d), com $Re_b = 54.313$, têm-se duas posições diferentes, uma ilustra o breakup do jato livre e a outra ilustra o breakup secundário nos ligamentos líquido a 10 cm aproximadamente do breakup do jato. Observa-se nestas figuras a presença tanto das instabilidades da terceira ordem quanto das de primeira ordem as quais são o mecanismo de breakup do jato e do breakup secundário. Estes fenômenos foram explicados de uma maneira detalhada na seção 5.3.4.

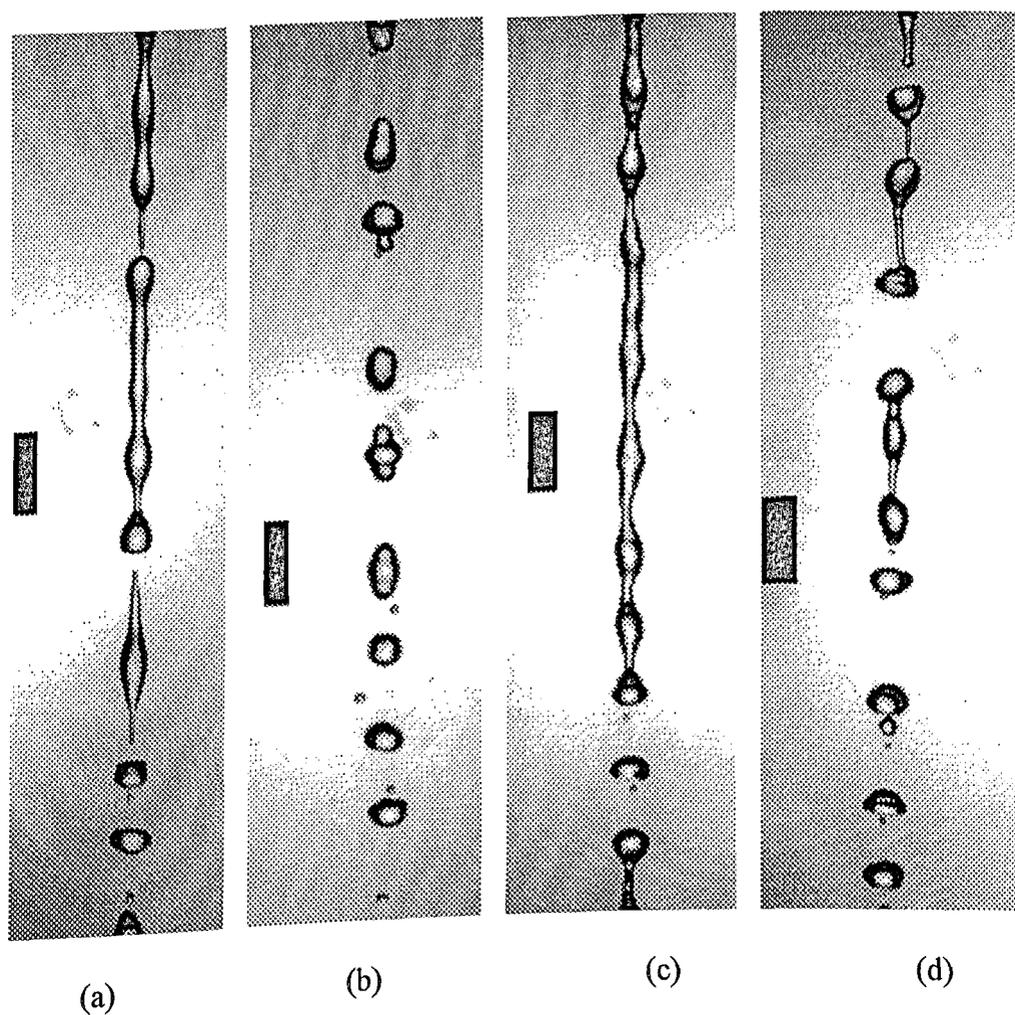


Figura 5.21. Visualização do breakup do jato livre e visualização do breakup secundário nos ligamentos formados após do breakup do jato. As quatro provas foram feitas com bico de 2,8 mm de diâmetro e o objeto de referência é de 1 cm; a) $Re_b = 6.315$, com o objeto a referência a 24,5 cm do bico; b) $Re_b = 6.315$, com o objeto a referência a 35,5 cm do bico; c) $Re_b = 22.100$, com o objeto a referência a 44,5 cm do bico; d) $Re_b = 22.100$, com o objeto a referência a 56 cm do bico.

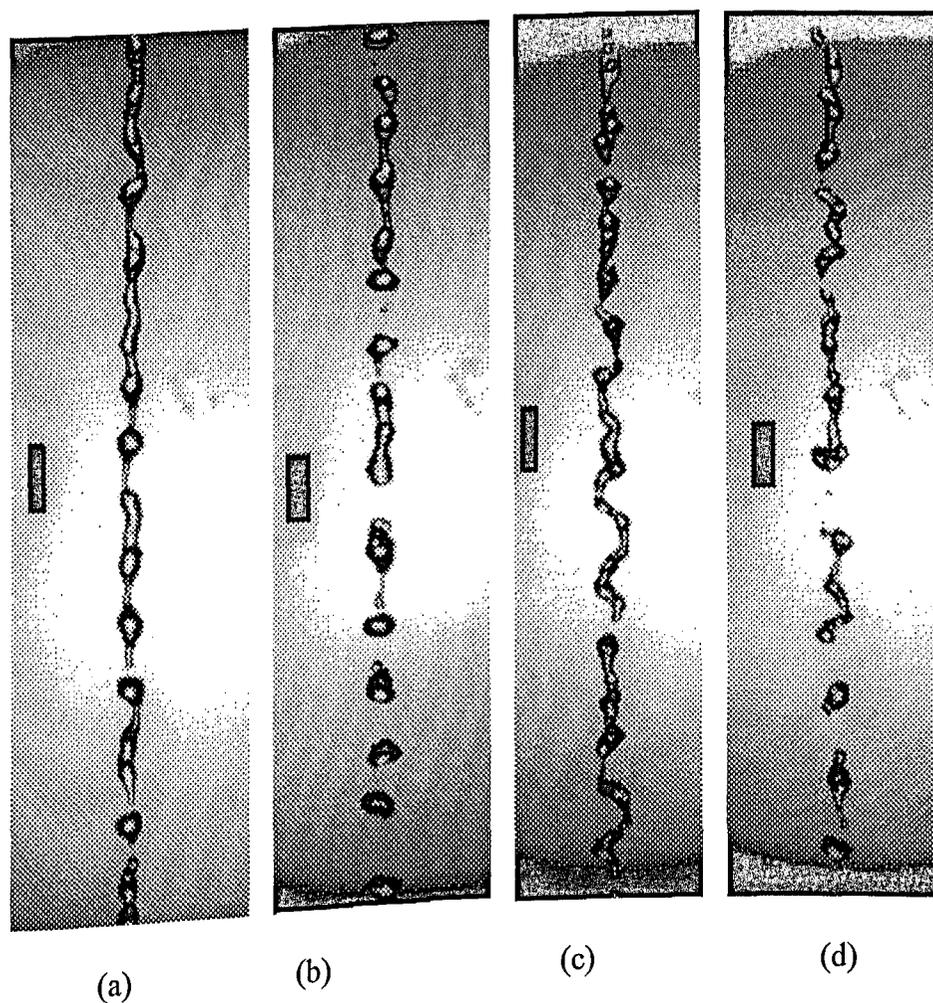


Figura 5.22. Visualização do breakup do jato e visualização do segundo breakup nos ligamentos formados após do breakup do jato. As quatro provas foram feitas com bico de 2,8 mm de diâmetro e o objeto de referencia é de 1 cm; a) $Re_b = 33.630$, com o objeto de referência a 51,5 cm do bico; b) $Re_b = 33.630$, com o objeto de referência a 63,5 cm do bico; c) $Re_b = 54.313$, com o objeto de referência a 57,5 cm do bico; d) $Re_b = 54.313$, com o objeto de referência a 68,5 cm do bico.

5.5 - Análise Qualitativa e Quantitativa Preliminares entre dois modelos de Bico

5.5.1 - Considerações Gerais

Considerando que as provas anteriores se realizaram com dois tipos de bico de diferentes fabricantes e que seus diâmetros apresentam quase a mesma medida (bico Senninger No 7 com diâmetro 2,77 mm e Bico Fabrimar No 2.8 com diâmetro 2,8 mm) e ademais com condições de operação quase similares. Então, uma análise qualitativa e quantitativa de caráter comparativo entre estes dois tipos de bico foi realizada.

5.5.2 - Análise Qualitativa

O procedimento para a análise qualitativa comparativa consistiu na seleção de duas imagens correspondentes a cada tipo de bico, para similares condições de operação. A análise qualitativa foi baseada na identificação da ordem das instabilidades em cada imagem e comparação das imagens com respeito ao grau de manifestação das instabilidades no jato. Esta análise qualitativa não ofereceu muita diferença na ordem de instabilidades e no grau de manifestação das instabilidades apresentadas em cada imagem.

5.5.3 - Análise Quantitativa

Devido à carência de outros instrumentos que permitissem uma quantificação direta da magnitude das instabilidades apresentadas no jato, decidiu-se por um mecanismo de

quantificação baseado na medição do comprimento do breakup, tomando em conta que as condições de funcionamento, assim como o diâmetro do bocal. Então, qualquer diferença apresentada no comprimento do breakup do jato será atribuída ao efeito do desenho do bico sobre o desenvolvimento das instabilidades.

Nesta seção, com a utilização do Software "GLI", se procedeu à medição do comprimento de breakup do jato para ambos bicos (No 7 e No 2.8), tomando em conta o objeto de referência apresentado em cada fotografia o qual tem uma medida de 1 cm de comprimento e se encontra localizado a uma distancia predeterminada do bico. Com os resultados obtidos foi possível levantar as curvas de comprimento do breakup do jato em função da vazão, do número de Re e do número de We para cada bico e assim realizar a análise comparativa.

Nas figuras 5.23 e 5.24 têm-se o comprimento de breakup do jato em função da vazão e do número de Reynolds. Na figura 5.23, observa-se na faixa de 20 l/h a 75 l/h uma queda brusca do comprimento de breakup do jato. O efeito aumento de maneira linear corresponde a uma desintegração do jato líquido devida à ação das forças superficiais (força de inércia do jato e a força de tensão superficial) como foi estudado por Rayleigh (1879) e Weber (1931). A decida marca o início da influência do gás circundante. Weber oferece uma explicação mais ampla. Ele mostrou que as forças de gás circundante na superfície tendem a amplificar as instabilidades ou distúrbios simétricos ou assimétricos. Esse efeito de amplificação dos distúrbios por parte da força de arraste ou inércia do gás se manifesta com a queda do comprimento do breakup do jato nesta faixa de vazão. Alguns autores atribuem esta queda ao início do regime turbulento no jato desenvolvido. Haenlein (1932) sugere que o início da queda do comprimento de breakup marca o inicio da mudança do breakup varicoso a sinuoso. A partir de vazões maiores de 75 l/h o comprimento de jato aumenta de forma linear

com o incremento da vazão. Quando a vazão atinge valores superiores a 300 l/h aproximadamente, o comprimento do jato não varia de modo significativo. Pode-se afirmar que o valor da força de inércia diminuiu. As curvas do comprimento de breakup do jato em função do número de Re e We, mostraram similar resultados ao apresentado na figura 5.23.

Na figura 5.26, tem-se o comprimento de breakup do jato em função da variação da vazão para bico 2,8, observa-se na figura que o fenômeno de variação brusca do comprimento de breakup do jato na faixa de vazão de 20 l/h a 75 l/h, não se apresenta. A curva mostra para estas vazões um comportamento quase constante. Quando a vazão varia de 100 l/h para 200 l/h, observa-se um rápido aumento do comprimento comparado ao observado na figura 5.23. Para vazões superiores a 200 l/h, o aumento do comprimento do jato é pequeno. A partir da vazão 300 l/h o comprimento do jato permanece quase constante, comportamento similar ao da figura 5.23.

Um detalhe importante, refere-se às medidas dos comprimentos do jato para as figuras 5.23 e 5.26. Os comprimentos do jato para bico No 7 resultaram ser 10 cm maiores em média que os comprimentos do jato para o bico No 2.8. As diferenças apresentadas entre os dois bicos, são atribuídas ao desenho do mesmo. Devido a limitações da bomba não foi possível quantificar o comprimento do jato para vazões maiores de 500 l/h, quando deve se manifestar um novo regime de formação de gotas, ou seja, o regime de spray desde o bico injetor.

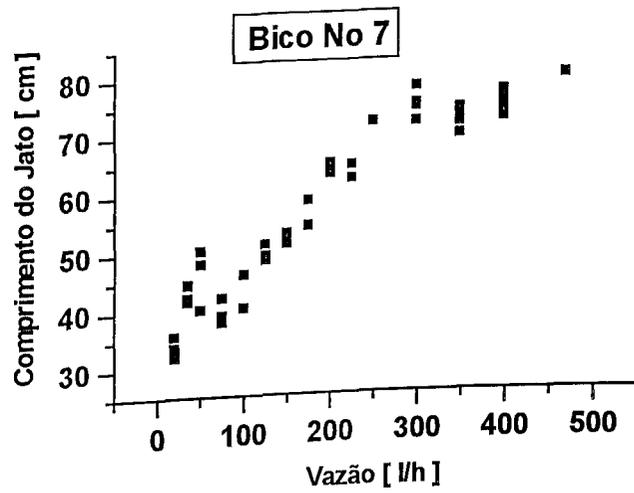


Figura 5.23 - Variação do comprimento do jato ou comprimento de breakup do jato em função da vazão.

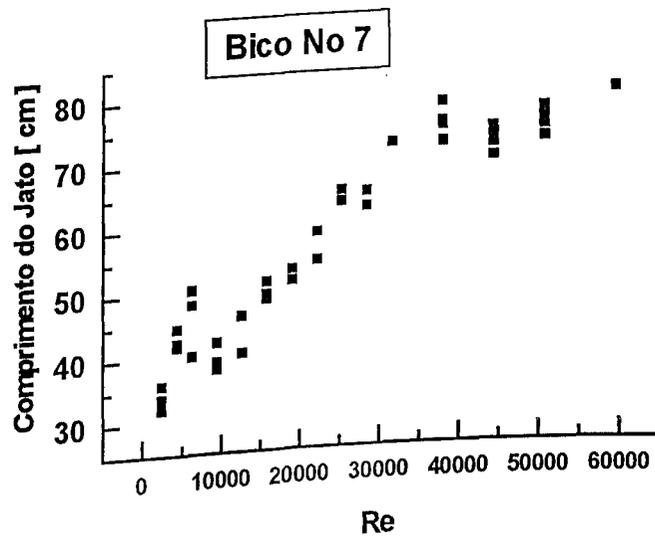


Figura 5.24 - Variação do comprimento de breakup do jato em função do número de Reynolds.

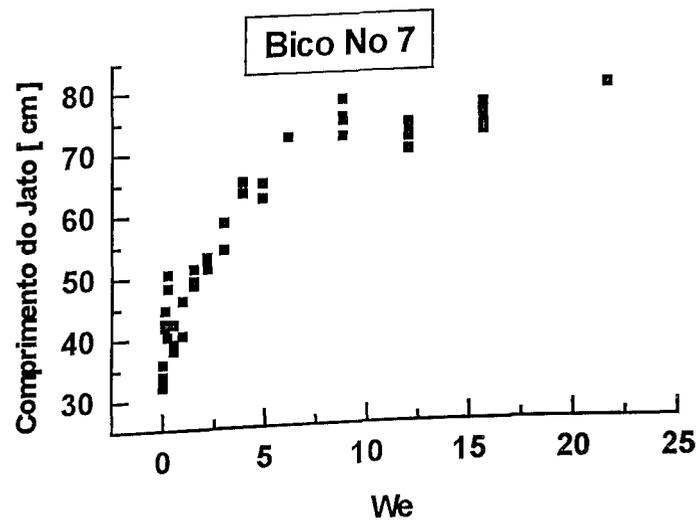


Figura 5.25 - Variação do comprimento de breakup do jato em função do número de Weber

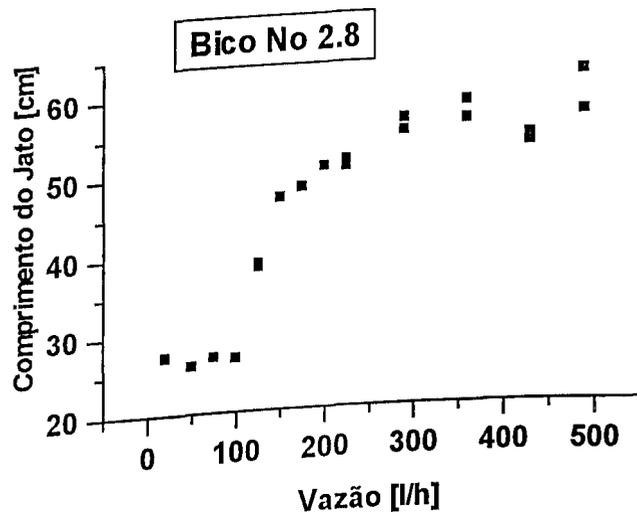


Figura 5.26 - Variação do comprimento de breakup do jato em função da vazão.

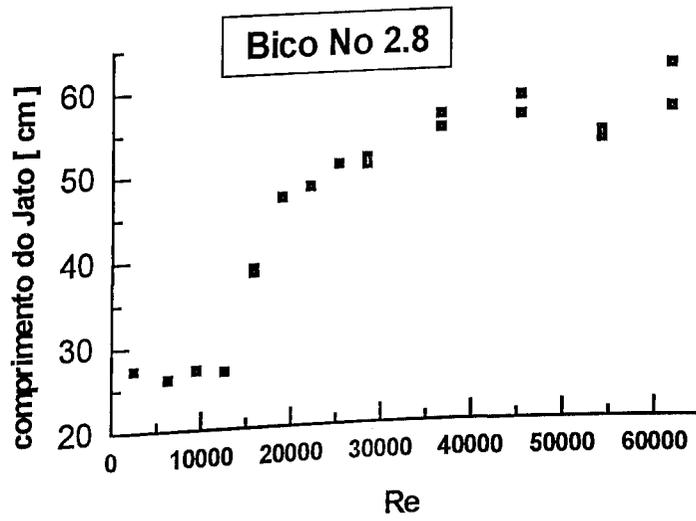


Figura 5.27 - Variação do comprimento de breakup do jato em função do número de Reynolds.

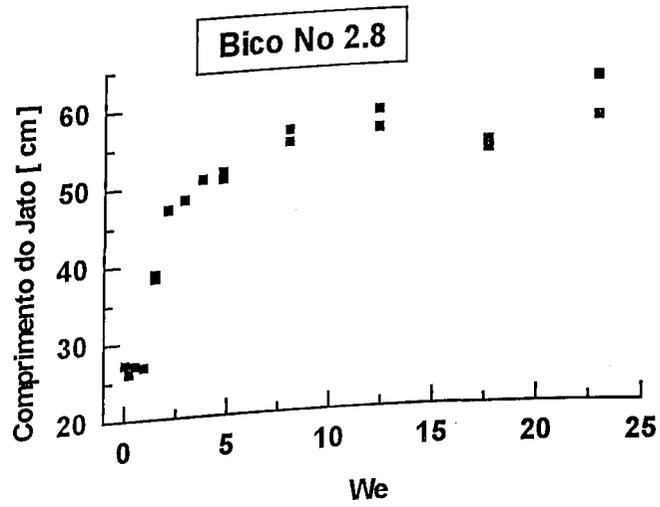


Figura 5.28 - Variação do comprimento do breakup do jato em função do número de Weber

5.6 - Visualização do Processo de Formação de Gotas - Fenômenos Associados

5.6.1 - Considerações Gerais

Nesta seção utilizou-se a técnica de congelamento de imagem para estudar o processo de formação das gotas no sistema jato-placa em estudo.

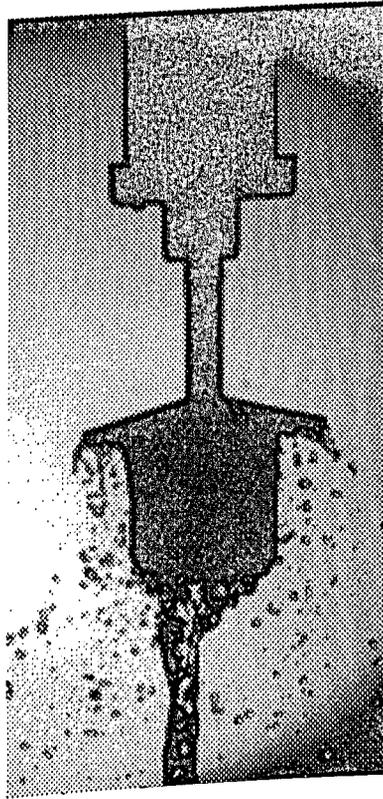
5.6.2 - Visualização do Perfil do Lençol

Nas figuras 5.29 a 5.31 visualizou-se globalmente o comportamento do lençol, vista lateral, para as vazões de 75 l/h, 125 l/h, 200 l/h, 300 l/h, 400 l/h, e 500 l/h. O bico injetor No 7 (anexo I) e uma placa cônica de 44 mm de diâmetro são utilizados. Na figura 5.29 (a) vê-se o processo de formação das gotas para uma vazão muito baixa. Na figura 5.29 (b) vê-se a formação de um lençol de água aparentemente contínuo, no final do qual uma frente de gotas se forma. Observa-se que ao sair da placa cônica o lençol sofre um declínio originando uma diferença de ângulos do lençol e da placa. Esta diferença de ângulos será denominada ângulo α .

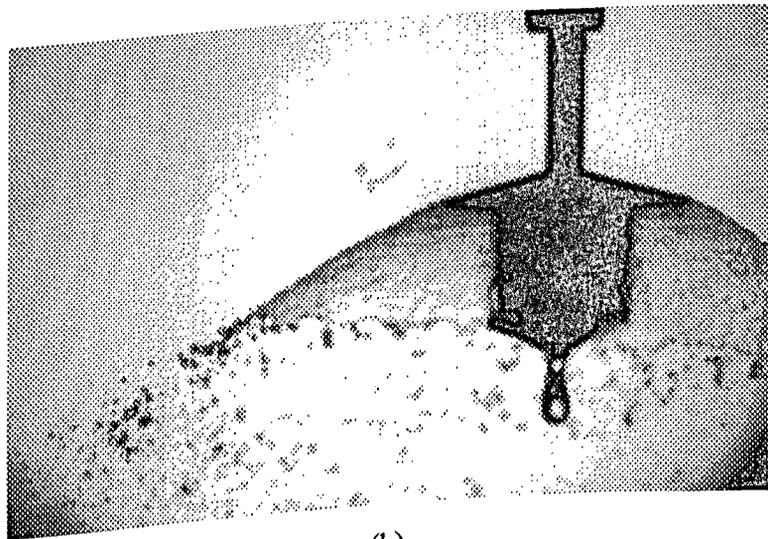
Nas figuras 5.30 (a) e (b) observa-se o lençol para duas vazões maiores (200 l/h e 300 l/h). Observa-se que a diferença do ângulo α reduziu-se e o diâmetro do lençol aumentou. Observa-se no seu perfil a presença de instabilidades de caráter sinuoso mas de amplitude pequena e frequência não muito elevada. Nas figuras 5.31 (a) e (b) tem-se vazões ainda maiores (400 l/h a 500 l/h). Observa-se que a diferença de ângulo α é visualmente nula e que o diâmetro do lençol contínuo voltou a cair. Por outro lado as instabilidades aumentaram em

frequência e amplitude. Note-se que estas instabilidades são importantes para o processo de molhamento do solo. Quanto maiores as amplitudes destas instabilidades, maior será a região molhada no solo.

Nas figuras 5.32 a 5.34 tem-se uma série de figuras numa placa cônica menor. Diferenças fundamentais em relação aos resultados precedentes são observadas, principalmente no diâmetro do lençol e também no fato que, para altas vazões, tem-se um processo de atomização do lençol, praticamente na saída da placa. Na figura 5.35, observa-se o perfil do lençol para bico 2,8, placa cônica de 44 mm de diâmetro e vazão de 400 l/h. O lençol apresenta fortes instabilidades em comparação com o perfil do caso de bico No 7, ver figura 5.31 (a), para as mesmas condições de funcionamento. O mesmo fenômeno é observado quando se faz a comparação das figuras 5.36 e 5.34 (a). Na figura 5.37 têm-se uma amplificação do filme líquido sobre a placa cônica de 44 mm, bico 2,8 e vazão de 290 l/h, observa-se a presença de instabilidades em forma de ondas superficiais, ainda sobre a placa aspersora.

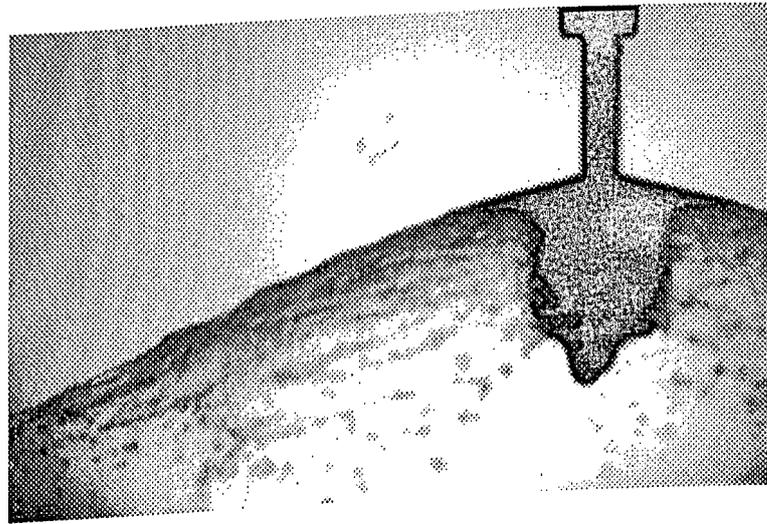


(a)

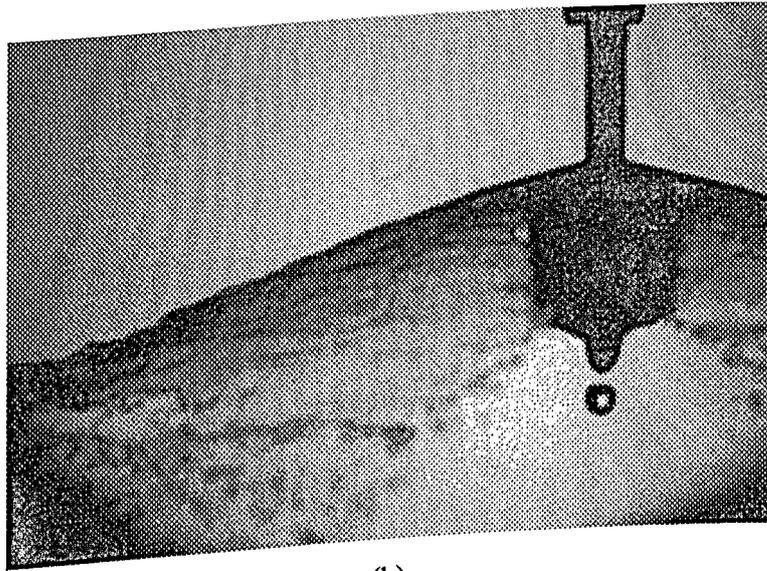


(b)

Figura 5.29 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 75 l/h; b) Vazão 125 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro.

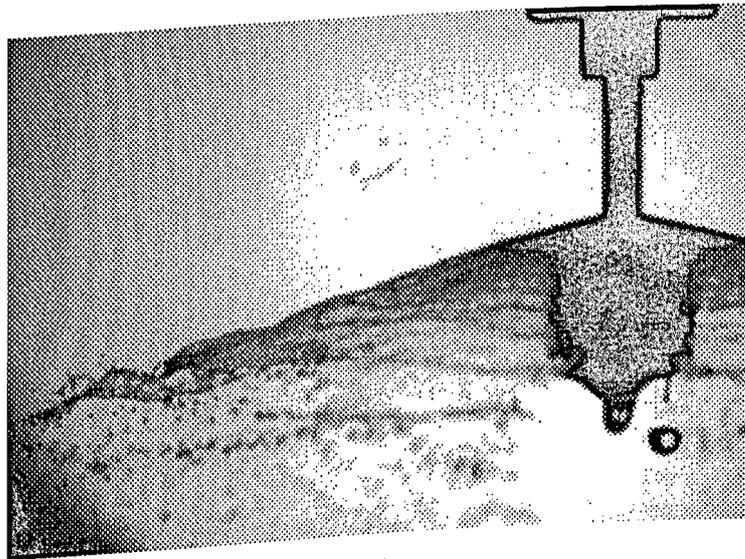


(a)

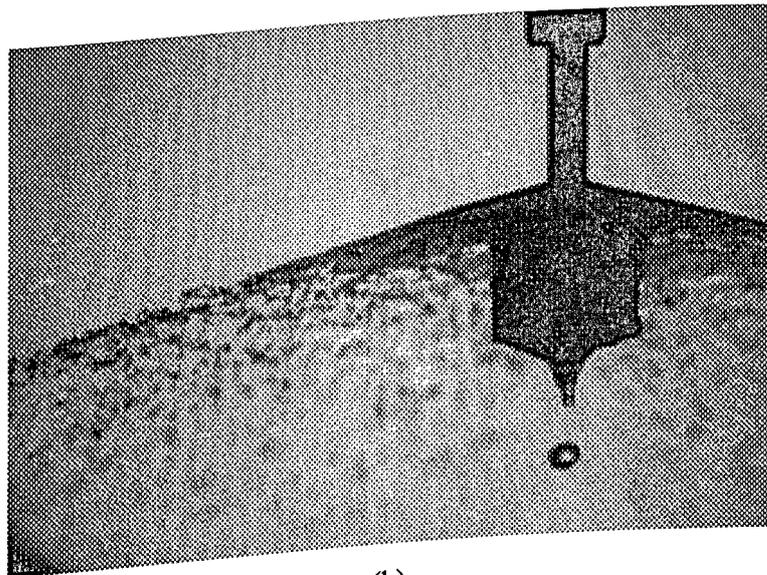


(b)

Figura 5.30 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 200 l/h; b) Vazão 300 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro.

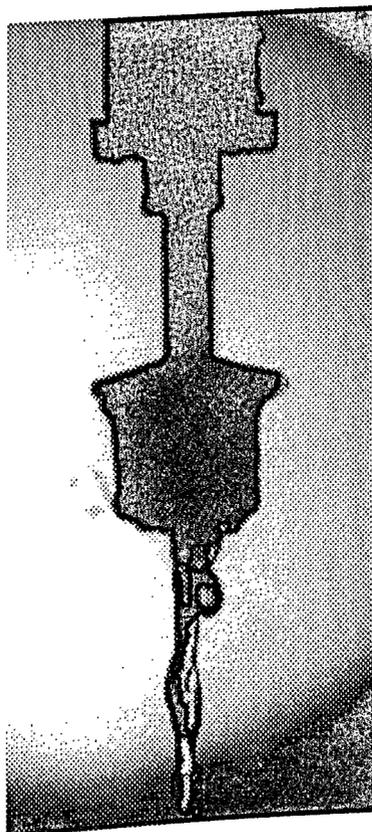


(a)

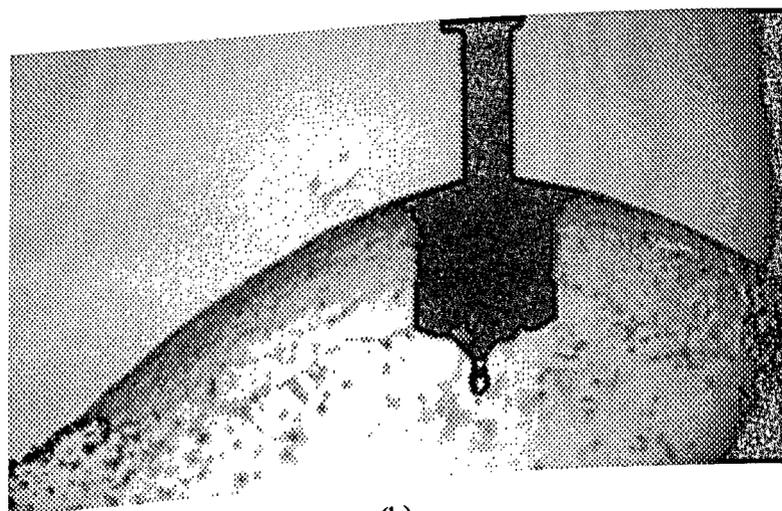


(b)

Figura 5.31 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 400 l/h; b) Vazão 500 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro.

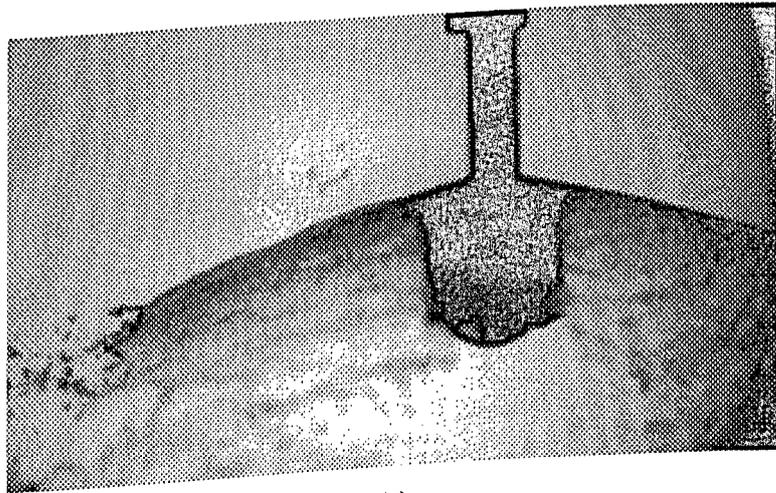


(a)

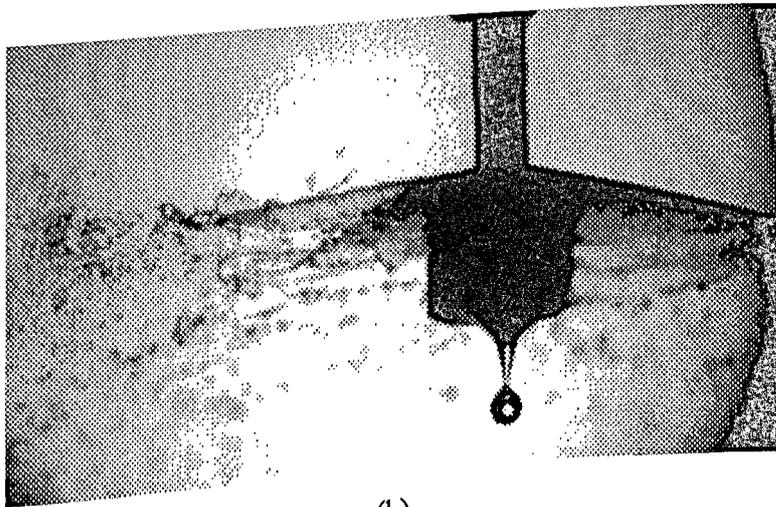


(b)

Figura 5.32 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 50 l/h; b) Vazão 125 l/h. Bico No 7 e placa de 34 mm de diâmetro.

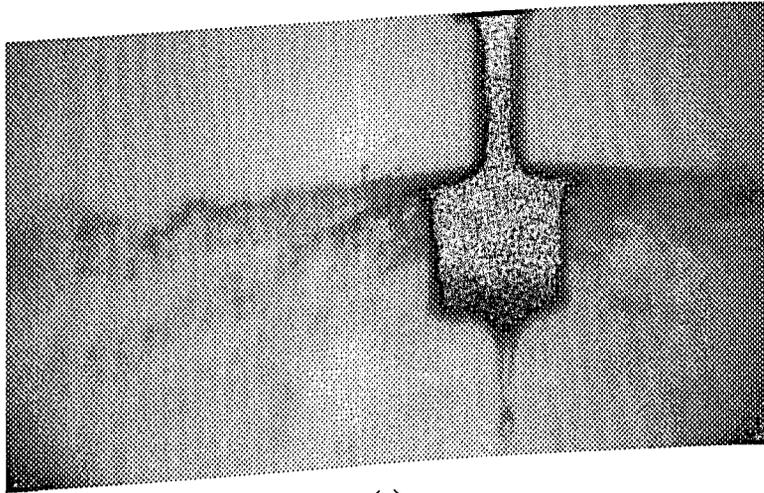


(a)

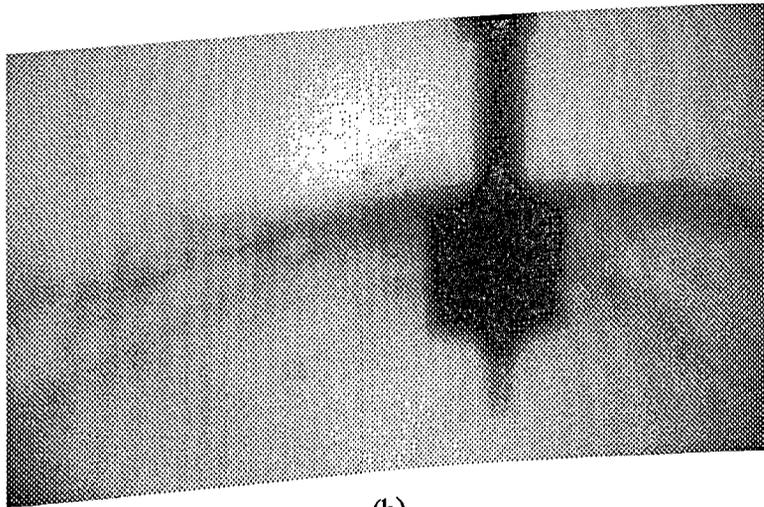


(b)

Figura 5.33 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 200 l/h; b) Vazão 300 l/h; Bico No 7 e placa de 34 mm de diâmetro.



(a)



(b)

Figura 5.34 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 400 l/h; b) Vazão 500 l/h; Bico No 7 e placa de 34 mm de diâmetro.

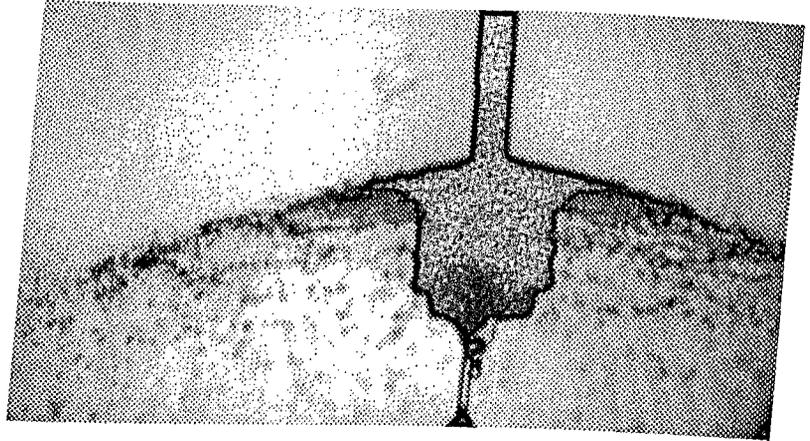


Figura 5.35 - Visualização do perfil do lençol; Vazão 400 l/h; Bico 2,8 de diâmetro e placa de 44 mm de diâmetro.

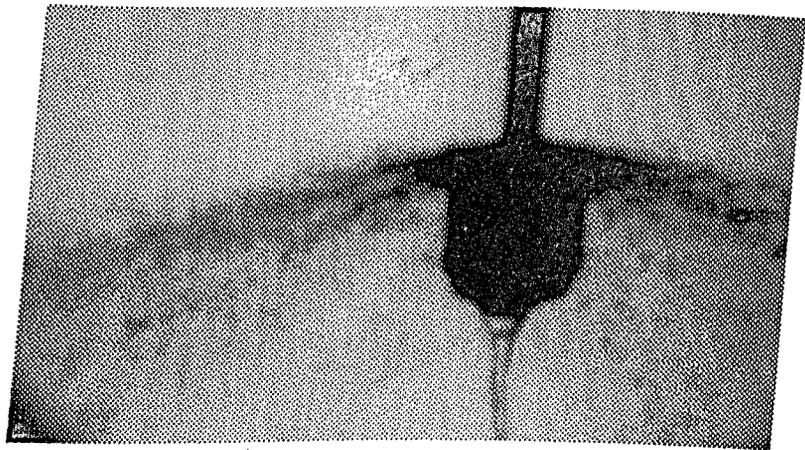


Figura 5.36 - Visualização do perfil do lençol; a) Vazão 400 l/h; Bico de 2,8 de diâmetro e placa 34 mm de diâmetro.

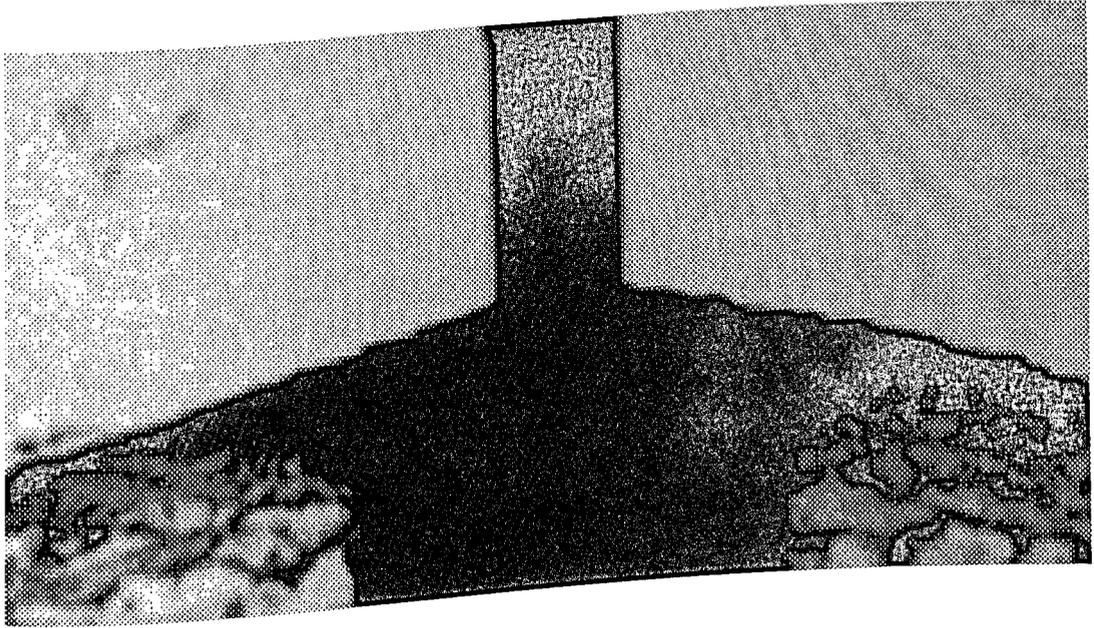


Figura 5.37 - Visualização de instabilidades sobre a placa; Vazão 290 l/h; bico 2,8 e placa de 44 mm de diâmetro.

5.6.3 - Quantificação da Inclinação do Lençol

Nesta seção anterior visualizou-se a variação do ângulo do lençol em relação ao ângulo da placa aspersora em função da vazão de fluido. A diferença de ângulo entre o lençol e a placa cônica foi definida como sendo α . Na figura 5.39, para o bico No 7 e placa de 44 mm a placa cônica foi definida como sendo α . Na figura 5.39, para o bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro, observa-se que o aumento da vazão de 75 l/h a 150 l/h provoca uma diminuição de diâmetro, observa-se que o aumento da vazão de 75 l/h a 150 l/h provoca uma diminuição drástica do ângulo α . Com vazões maiores de 150 l/h a variação do ângulo é suave até atingir o valor zero. Os mesmos resultados são observado nas curvas para bico No 7 e placa 34 mm de diâmetro, ver figura 5.40. Nas figuras 5.41 e 5.42, para bico No 2.8 e placas de 44 mm e 34 mm de diâmetro respectivamente, observa-se similar comportamento no processo de diminuição do ângulo α com o aumento da vazão, observado na figura 5.38.

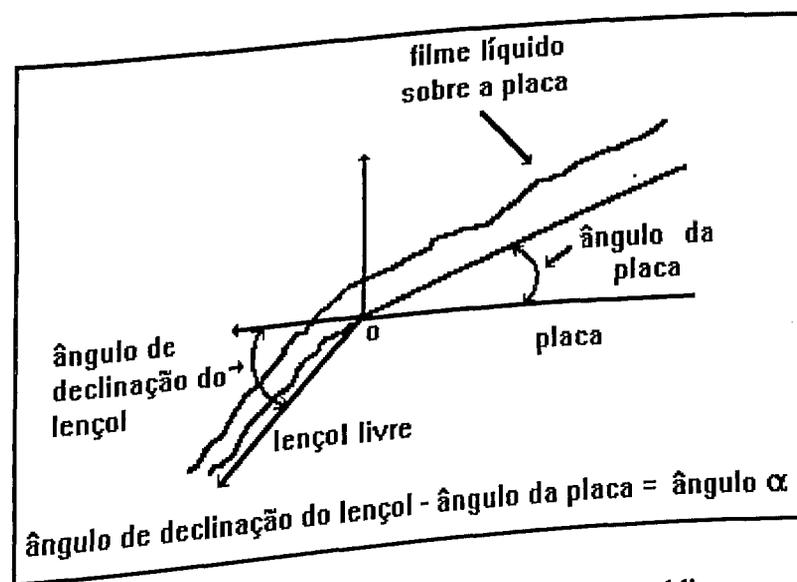


Figura 5.38 - Fenômeno de declinação do lençol livre

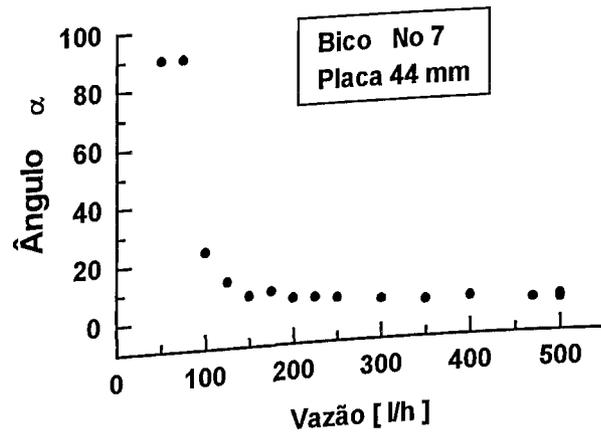


Figura 5.39 - Curva da diferença do ângulo do perfil do lençol e do ângulo da placa (α) vs. Vazão.

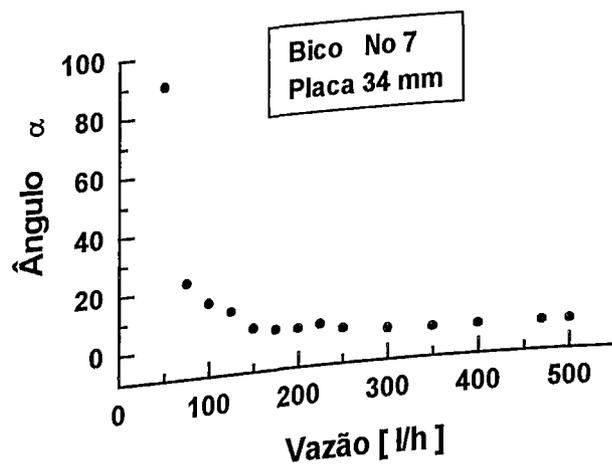


Figura 5.40 - Curva da diferença do ângulo do perfil do lençol e do ângulo da placa (α) vs. Vazão.

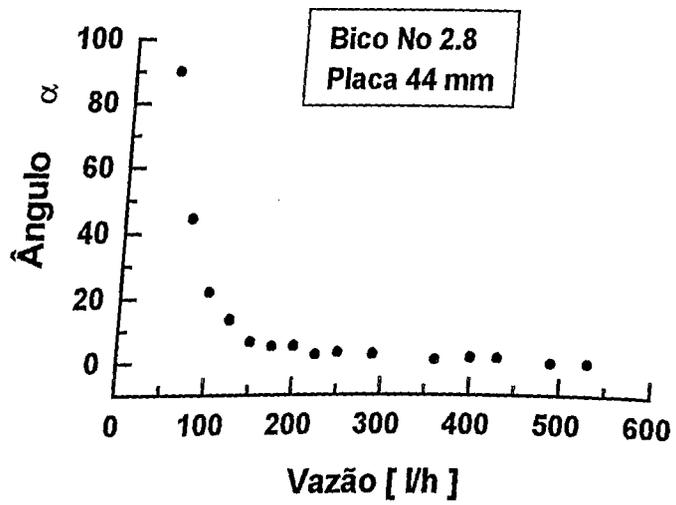


Figura 5.41 - Curva da diferença do ângulo do perfil do lençol e do ângulo da placa (α) vs. Vazão.

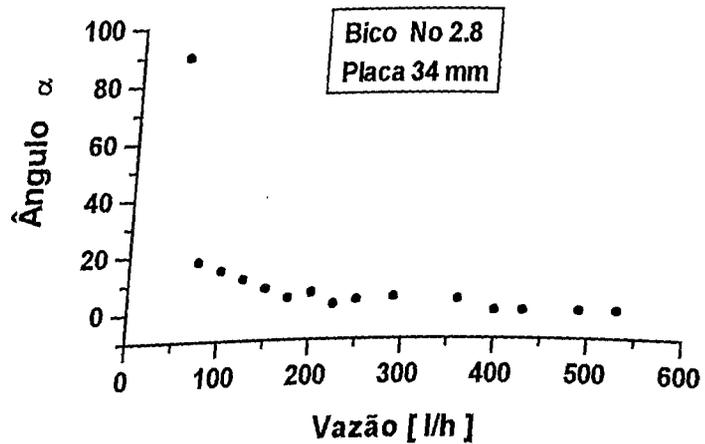


Figura 5.42 - Curva da diferença do ângulo do perfil do lençol e do ângulo da placa (α) vs. Vazão.

5.6.4 - Processo de Formação de Gotas - Fenômenos Físicos

5.6.4.1- Considerações Gerais

Nesta seção serão apresentados os resultados relativos à visualização dos fenômenos físicos associados com o lençol de fluido, após da sua saída da placa. Serão também apresentados detalhes envolvendo o processo de formação de gotas.

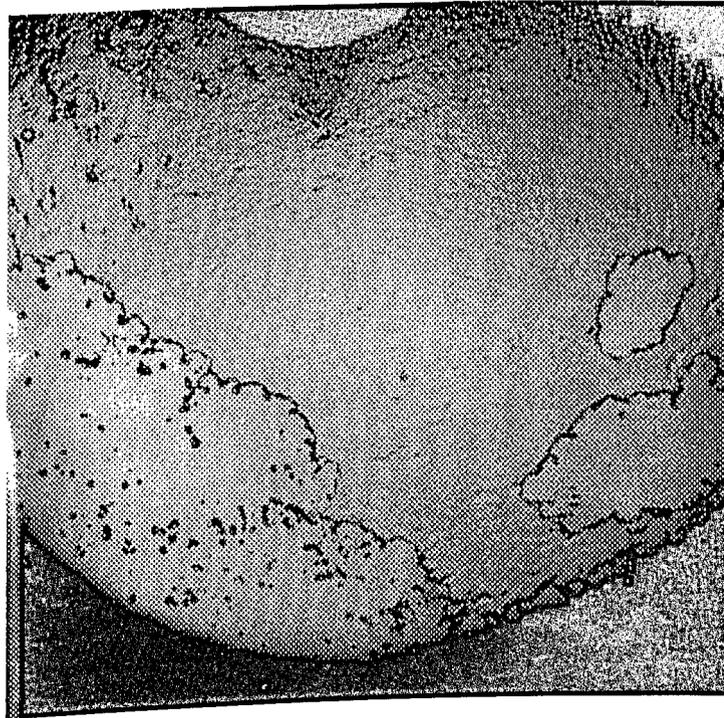
5.6.4.2 - Visualização Global do Lençol

Nas figuras 5.43 a 5.46 têm-se uma sequência de imagens relativas a vários valores crescentes da vazão. Um primeiro fato que se constata e que já havia sido apontado por Reis e Silveira (1993) é a presença de lacunas no lençol líquido. O mecanismo físico de formação destas lacunas ainda não está esclarecida. Julga-se que devido à presença de instabilidades tridimensionais ao longo do lençol os efeitos da tensão superficial e de atração molecular do fluido podem ser vencidos pelos efeitos de inércia, dando origem a descontinuidades do lençol. Estas lacunas se amplificam rapidamente e dão origem à formação de gotas no interior do lençol, em quanto avançam para as bordas do mesmo. A presença destas lacunas e de instabilidades oscilantes do lençol caracterizam o processo altamente irregular de formação das gotas no final do mesmo.

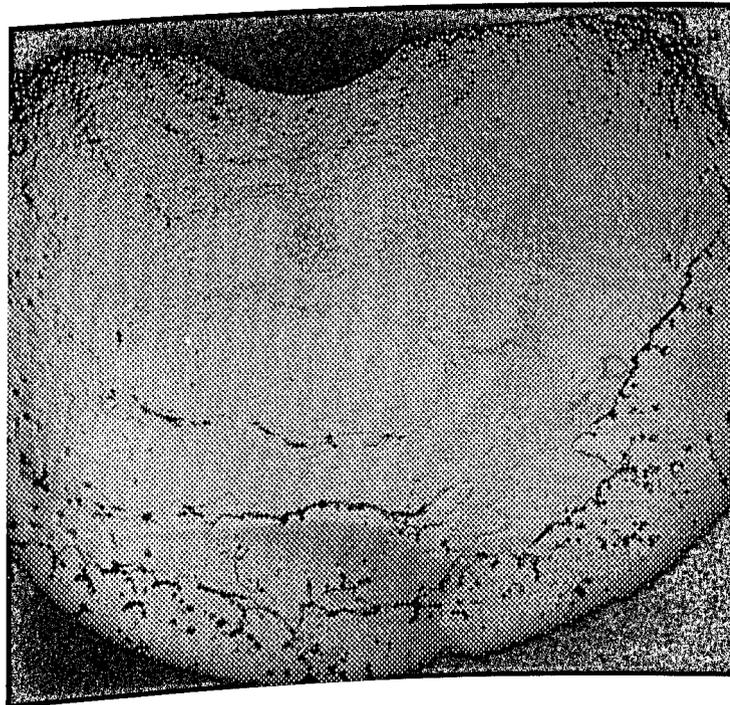
Observa-se que à medida que a vazão aumenta o tamanho das lacunas diminui. De fato, a frequência de formação destas lacunas aumenta rapidamente com o aumento da vazão assim como a velocidade de transporte das mesmas. Com isto seus tempos de vida diminuem

com o aumento da vazão. Percebe-se também que as lacunas se formam mais cedo, o que explica o fato observado na visualização global do item 5.6.2 que, a vazões médias, o comprimento do lençol aumenta, e, altas vazões, o comprimento do lençol diminui.

Percebe-se claramente nas figuras 5.44 (b) a 5.46 que estas lacunas determinam o processo de formação de frentes de gotas, de caráter não contínuo. De fato, visualiza-se claramente as frentes irregulares de gotas intermediadas por espaços vazios. Estes espaços têm formas poligonais a além disto estas frentes são altamente oscilantes na direção vertical, conforme pode ser observado nas figuras 5.31, 5.33 (b) e 5.34. De uma forma global, destaca-se dois fenômenos determinantes da dinâmica de formação de gotas: as oscilações do lençol e a presença das lacunas. Acredita-se que estes dois fenômenos determinam também as bandas de tamanho e frequências das gotas. Em consequência é de suma importância descobrir e entender a origem e os mecanismos destes dois fenômenos. Isto deverá ser objeto de estudos quantitativos de futuros trabalhos. Em seguida serão apresentados resultados mais detalhados (amplificações) sobre fenômenos localizados do processo a da dinâmica de formação das frentes de gotas.

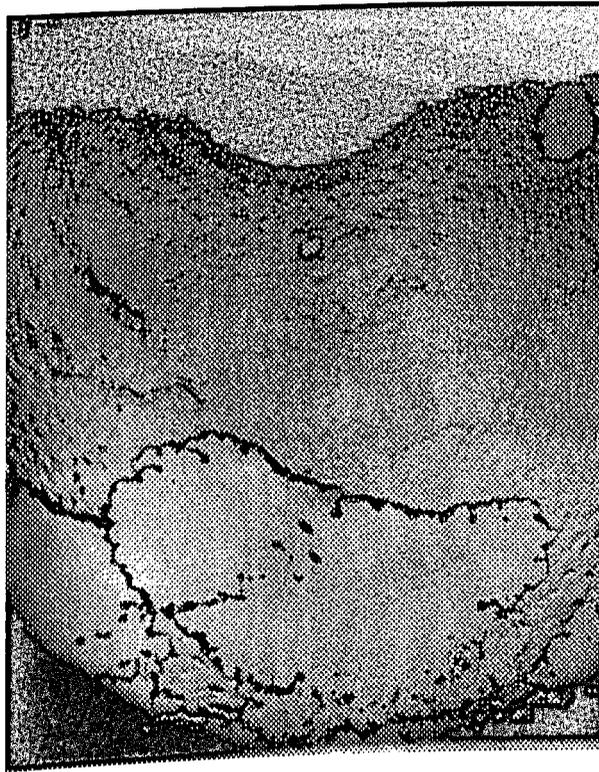


(a)



b)

Figura 5.43 - Visualização das lacunas sobre o lençol; a) Vazão 250 l/h; b) Vazão 300 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro.

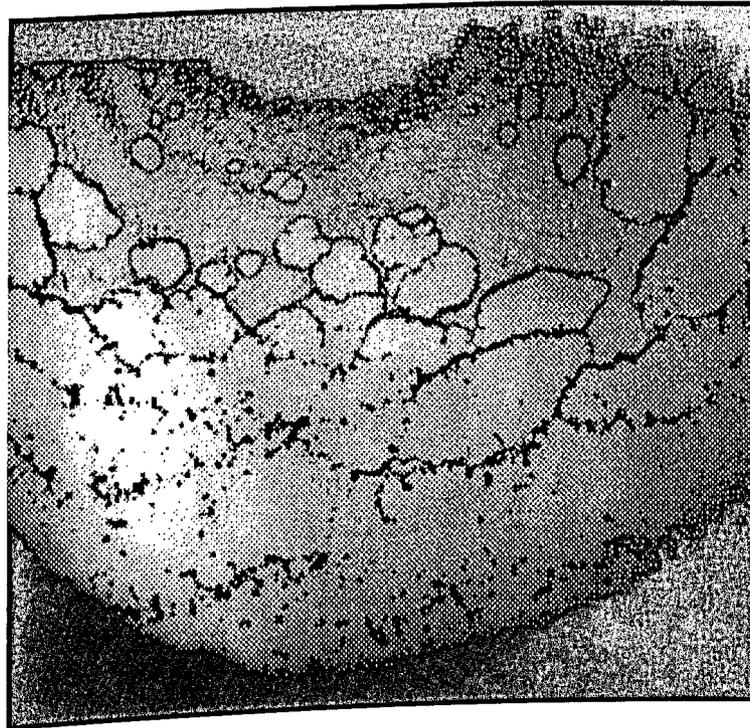


(a)



(b)

Figura 5.44 - Visualização das lacunas sobre o lençol; a) Vazão 350 l/h; b) Vazão 400 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro.



(a)



(b)

Figura 5.45 - Visualização das lacunas sobre o lençol; a) Vazão 450 l/h; b) Vazão 500 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro.

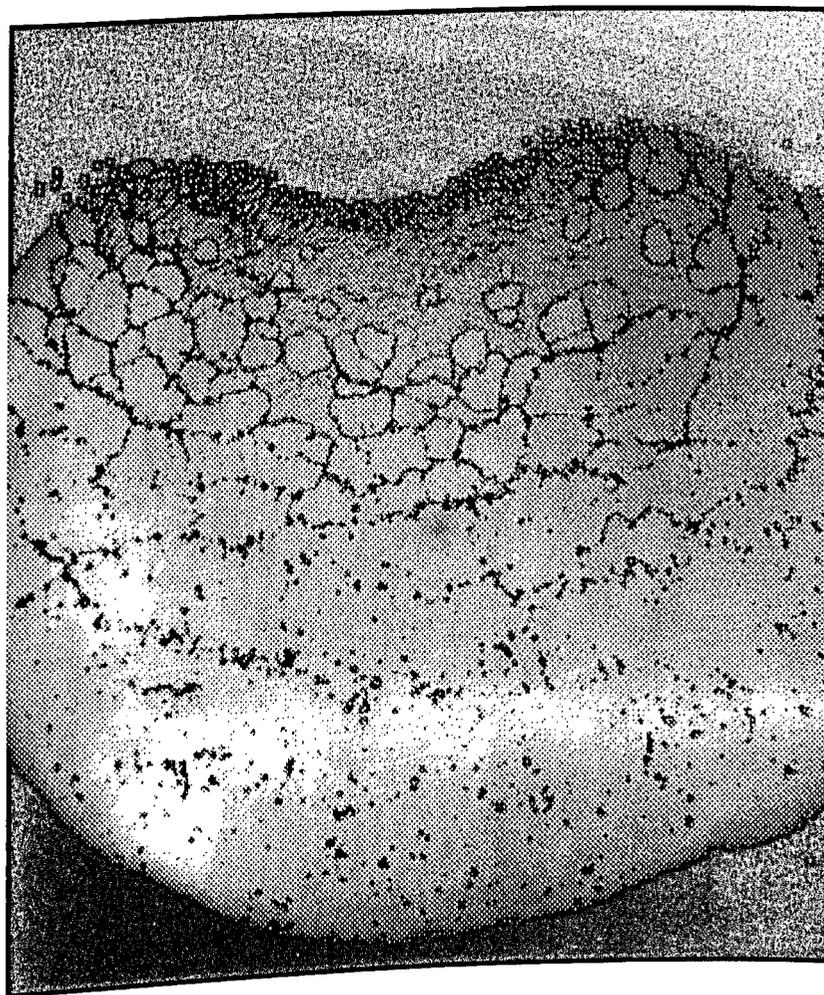


Figura 5.46 - Visualização das lacunas sobre o lençol; Vazão 530 l/h; bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro.

5.6.4.3 - Detalhes das Frentes das Gotas

Na figura 5.47 tem-se uma fotografia com forte efeito de amplificação dos fenômenos locais. A vazão é de 150 l/h. Observa-se que gotas de diversos tamanhos se desprendem das bordas do lençol. Tem-se também a presença de pequenas instabilidades locais sobre o lençol que são transportadas para as bordas e que influenciam na sua geometria. Resta ainda obter uma melhor compreensão da física da origem destas gotas. Pelo contraste observado nas bordas, de cor escura, infere-se que aparece um fenômeno de enrolamento da borda do lençol, criando uma acumulação de massa e, pelo princípio de sua conservação, a borda é forçada e gera-se as gotas, a partir do momento que as forças de adesão molecular e de tensão superficial são vencidas.

Na sequência observa-se a dinâmica das gotas já formadas. Têm-se uma variedade nas geometrias : esferoides e bastonetes ou cilindroides. Observa-se ainda o processo de fusão de gotas dando origem a gotas maiores. Têm-se também o processo inverso ou seja a quebra de bastonetes em várias gotas.

Na figura 5.48 (vazão de 200 l/h) o processo é similar, porém com uma aparente redução no tamanho das gotas. Na figura 5.49 tem-se um detalhe da figura 5.48 e observa-se uma frente longitudinal de gotas lançadas por uma crista do lençol. Na figura 5.50 (vazão de 300 l/h) observa-se um processo similar. Nas ampliações mostradas nas figuras 5.51 (a) e (b) tem-se uma visão mais detalhada das instabilidades do lençol e do desprendimento das gotas. Vê-se a complexidade do processo.

Na figura 5.52 tem-se um detalhe de uma lacuna e das frentes discretas ou intermitentes de gotas para uma vazão mais elevada (400 l/h). Nas figuras 5.53 (a) e (b) tem-

se maiores detalhes da figura 5.52.

Nas figuras 5.54, 5.55 (a) e (b) tem-se uma visualização clara do processo discreto ou intermitente de formação de gotas criado pelas lacunas. Nas figuras 5.56 e detalhes das figuras 5.57 (a) e (b) tem-se uma visualização clara do aumento da frequência das lacunas e a consequente redução no seus tamanhos. Chama-se a atenção para um fenômeno singular observado na figura 5.57 (b). Vê-se que os fragmentos de lençol se contraem à medida que são transportados, dando origem a longos ligamentos líquido e gotas, em regime tridimensional. Imagina-se que estes ligamentos darão origem às frentes de gotas observadas anteriormente, por processos físicos similares ao que foi observado nos jatos livres em regime de transição de instabilidades de terceira ordem para o regime de spray. Esta idéia fica mais clara observando-se um detalhe ainda maiores mostrados nas figuras 5.58 e 5.59.

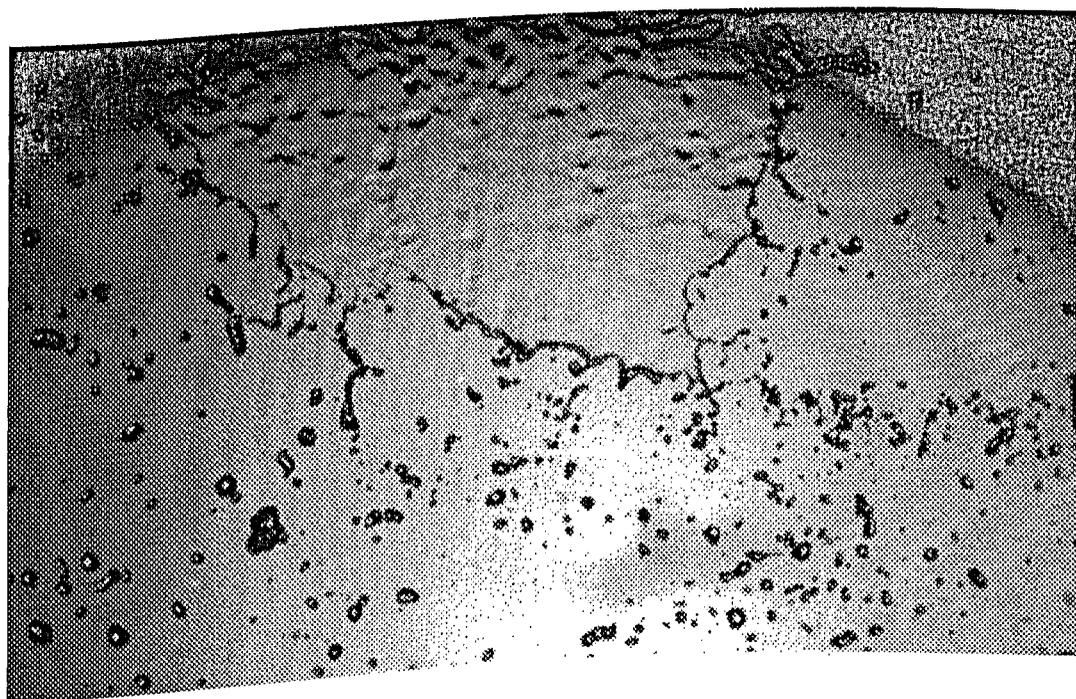


Figura 5.47 - Visualização da frente de formação de gotas, cujas origens são devidas ao breakup da borda do lençol; Bico No 7 e vazão 150 l/h.

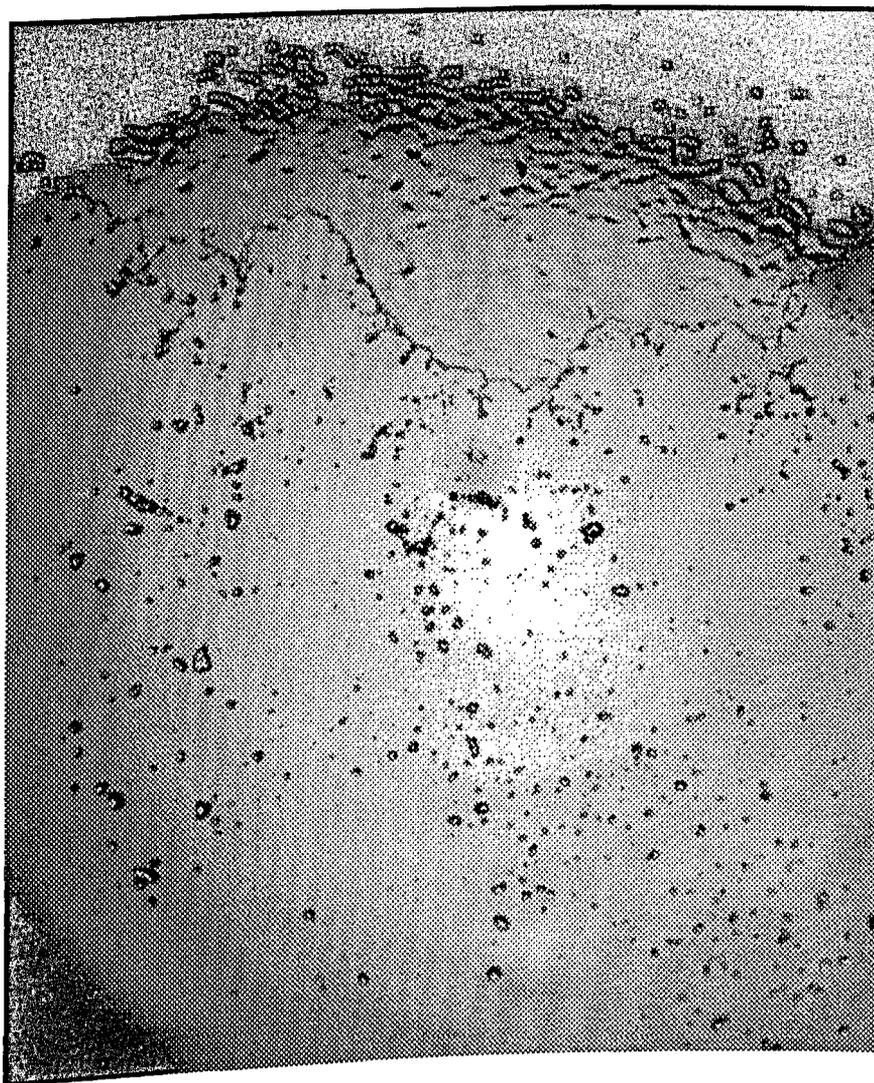


Figura 5.48 - Visualização da frente de formação de gotas; Ausência de lacunas perto da borda; A frente de gotas é dispersa; Bico No 7 e vazão 200 l/h.

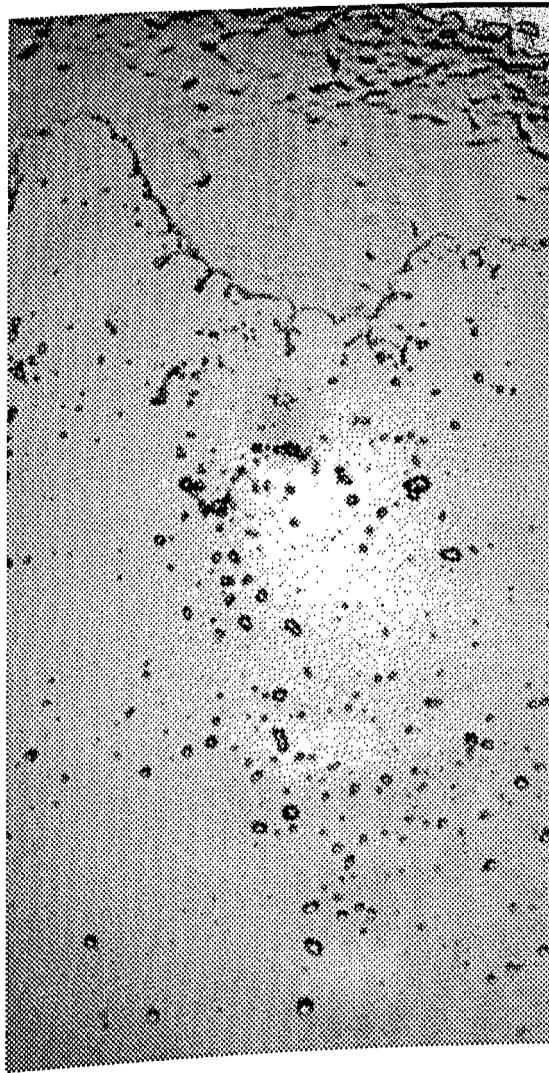


Figura 5.49 - Detalhe da frente de formação de gotas; A origem das gotas está no breakup da borda do lençol; Bico No 7 e vazão 200 l/h.

LABORATÓRIO DE REFINAÇÃO
DE PETRÓLEO

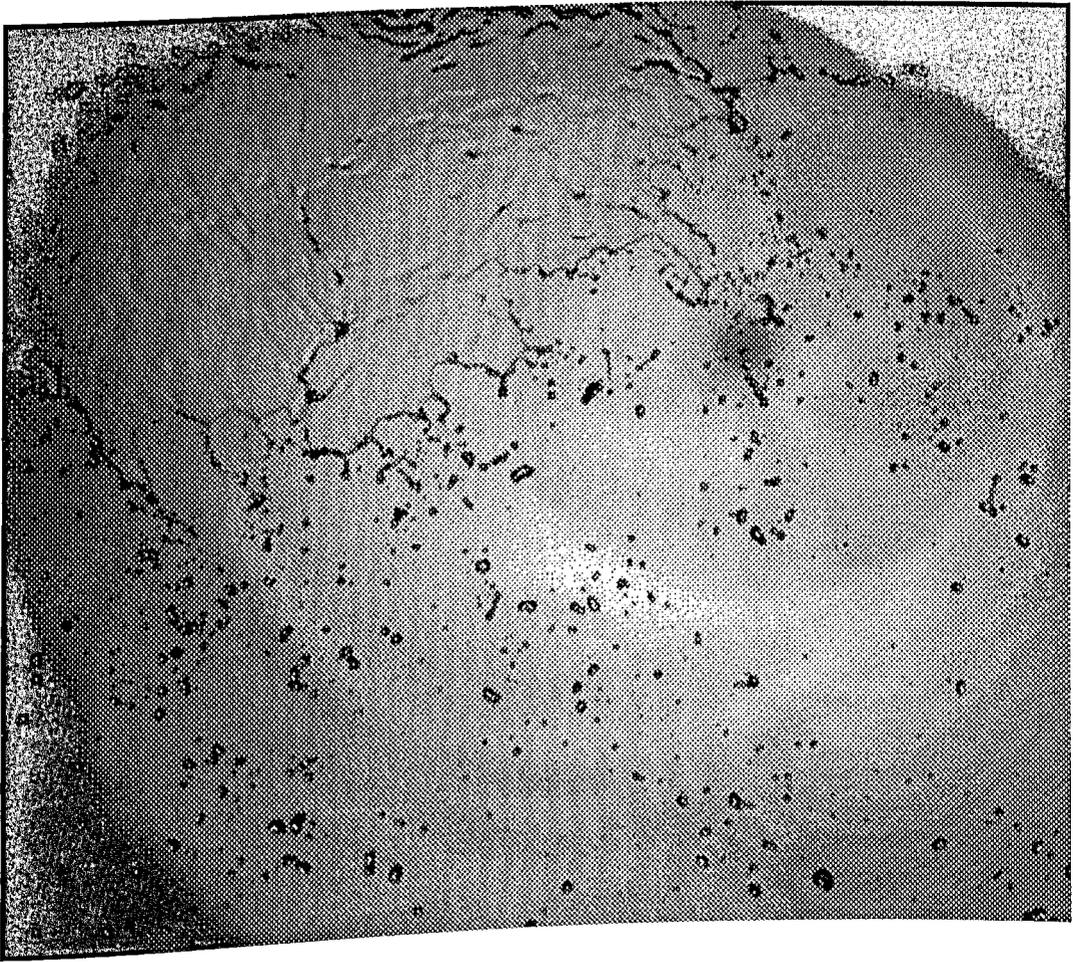
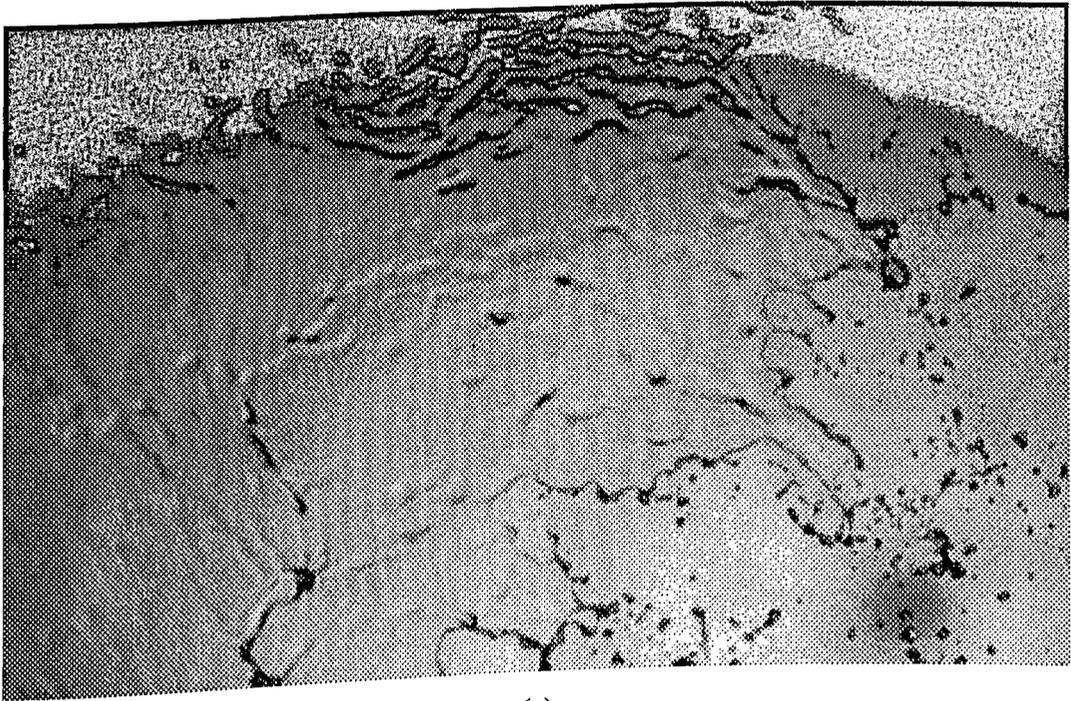
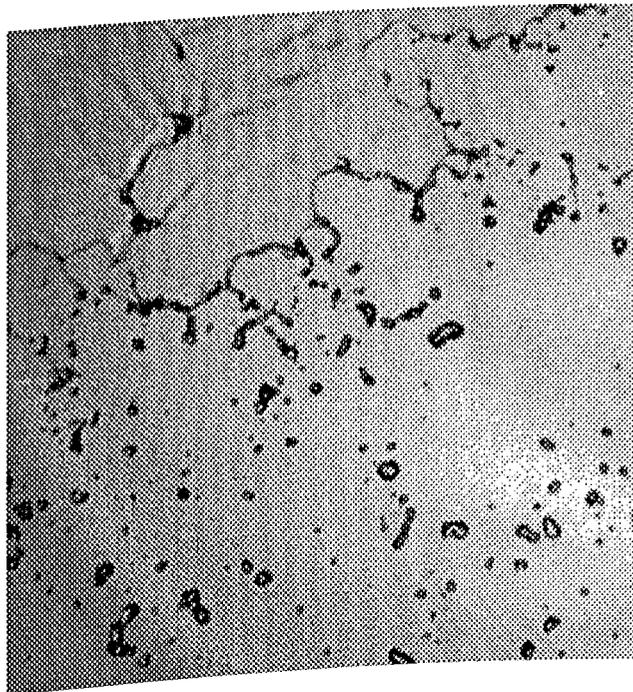


Figura 5.50 - Visualização da frente de formação de gotas; Aumento leve da frequência de lacunas e das estruturas poligonais; Frente de formação de gotas dispersa; Bico No 7 e vazão 300 l/h.



(a)

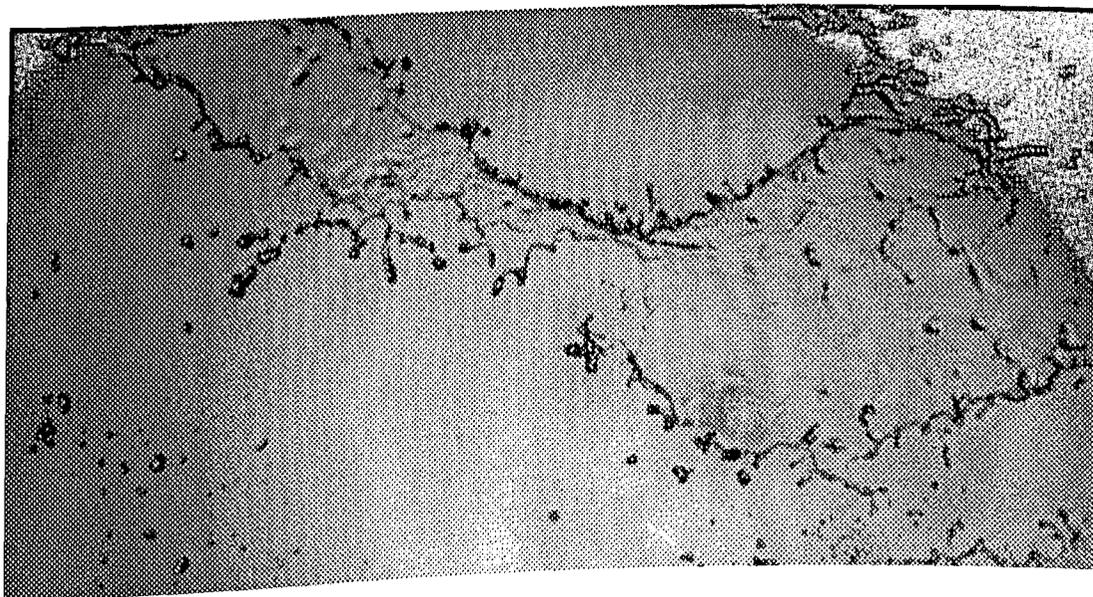


(b)

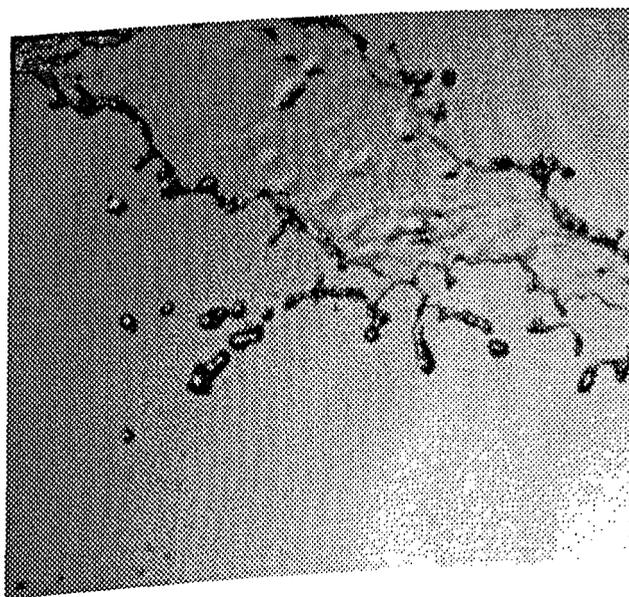
Figura 5.51 - a) Detalhes das instabilidades sobre o lençol; b) Processo de formação de gotas; Breakup da borda do lençol.



Figura 5.52 - Visualização da frente de formação de gotas; Aumento do frequência de lacunas e variação da forma dos fragmentos de lençol em estruturas de maior tamanho; Bico No 7 e Vazão 400 l/h.



(a)



(b)

Figura 5.53 - a) Detalhes das estruturas que dão origem à frente de formação de gotas; b) Processo de breakup sobre os enrolamentos das bordas nos fragmentos de lençol gerando parte das frentes de gotas; Bico No 7 e vazão 400 l/h.

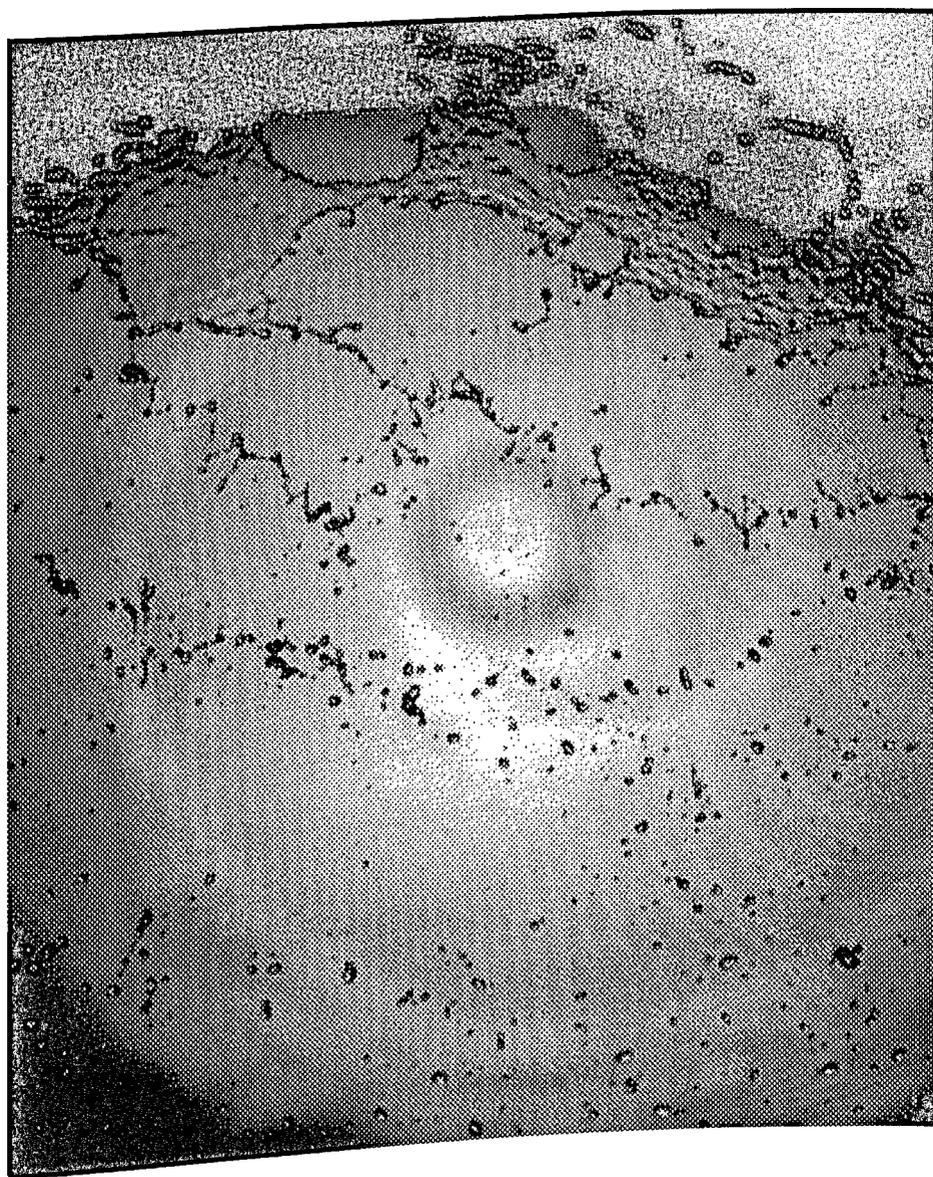
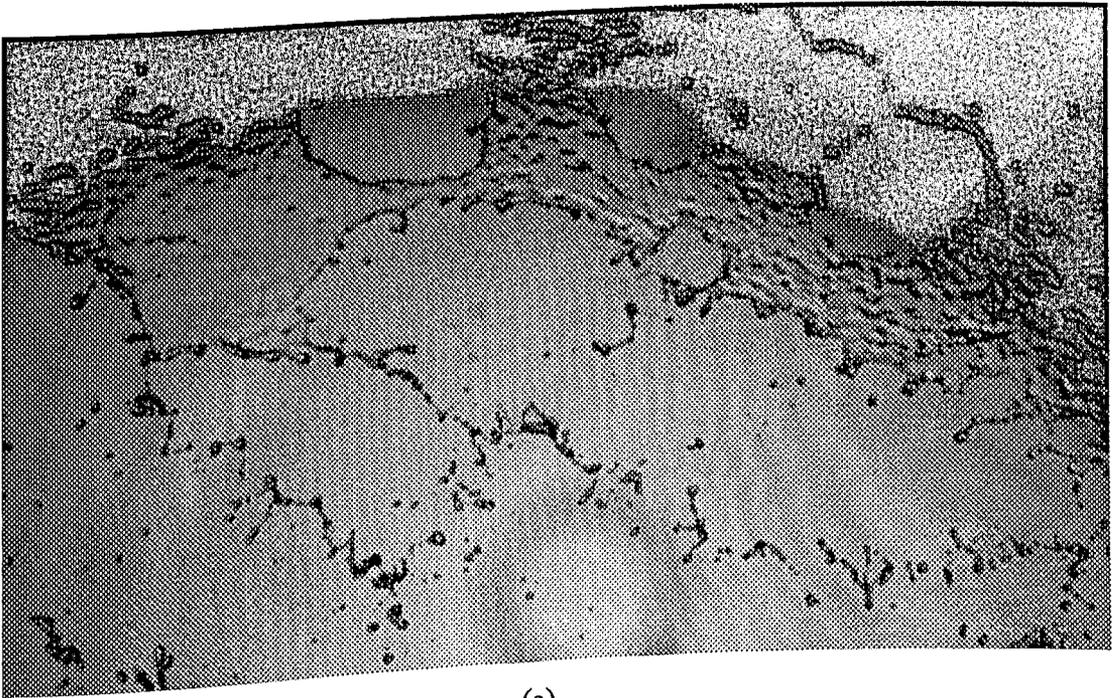
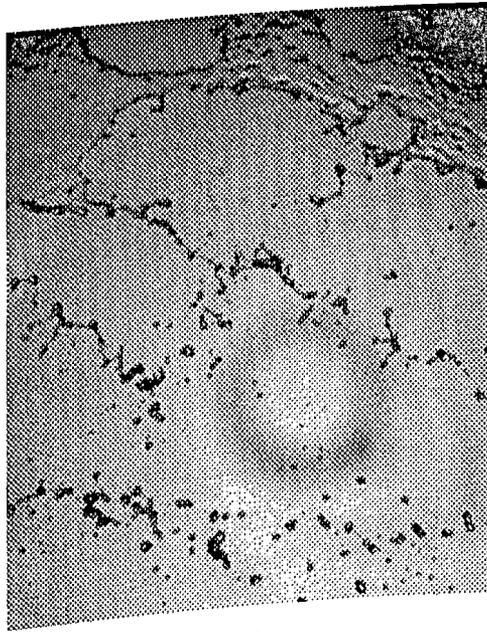


Figura 5.54 - Visualização da frente de formação de gotas; Estruturas poligonais de fragmentos de lençol; Linhas de ligamentos de líquido e frente de gotas; Vazão 470 l/h e placa de 44 mm.



(a)



(b)

Figura 5.55 - Detalhes da frente formação de gotas; a) Estruturas poligonais que dão origem à frente; b) Contração das estruturas, formação de linhas de ligamentos líquido e breakup das linhas e formação da frente de gotas; Bico No 7 e vazão 470 l/h.

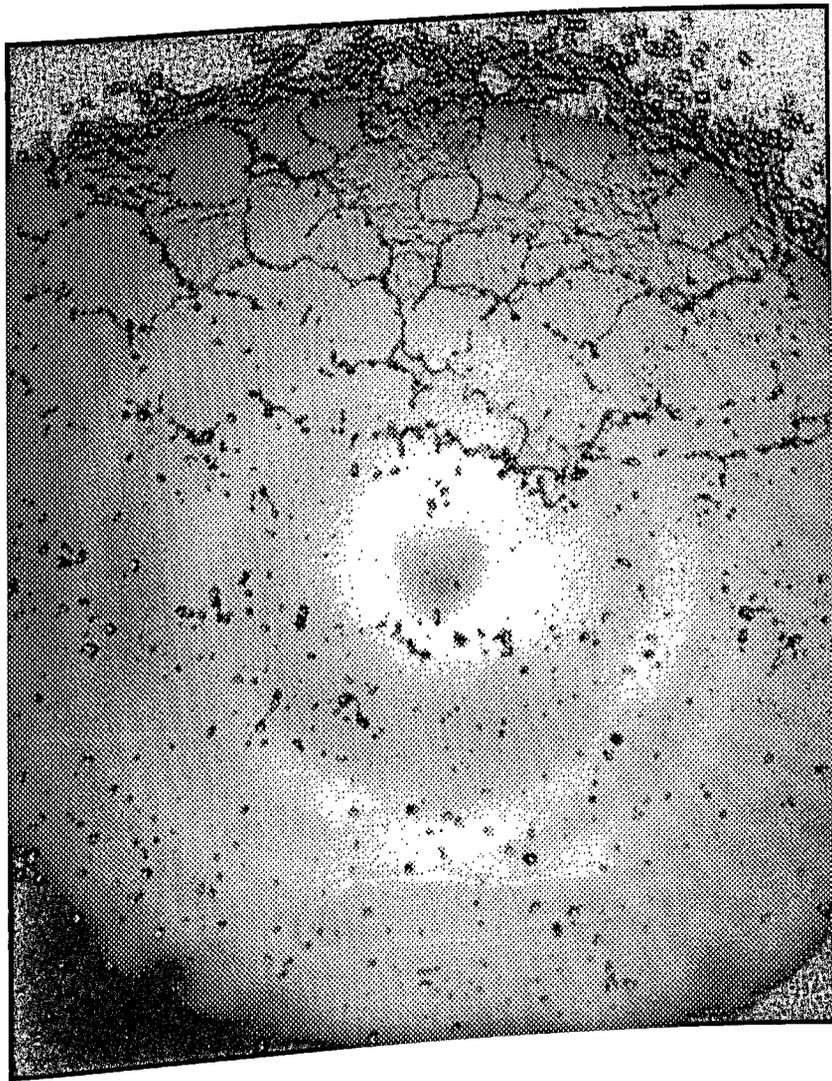
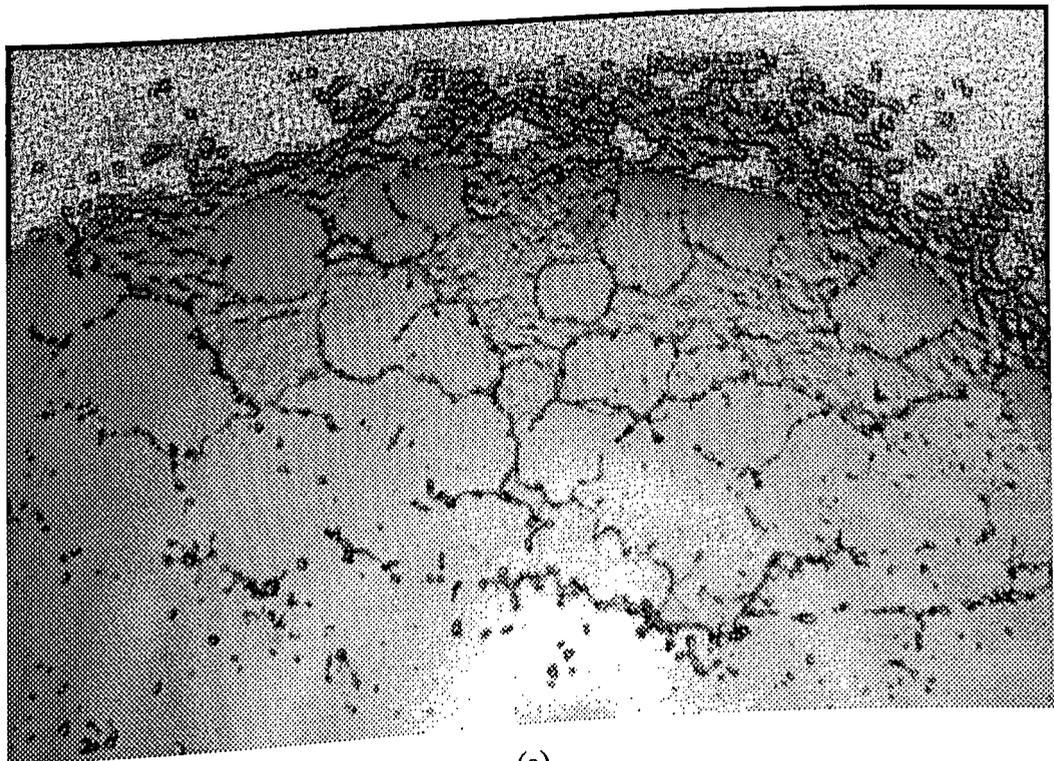
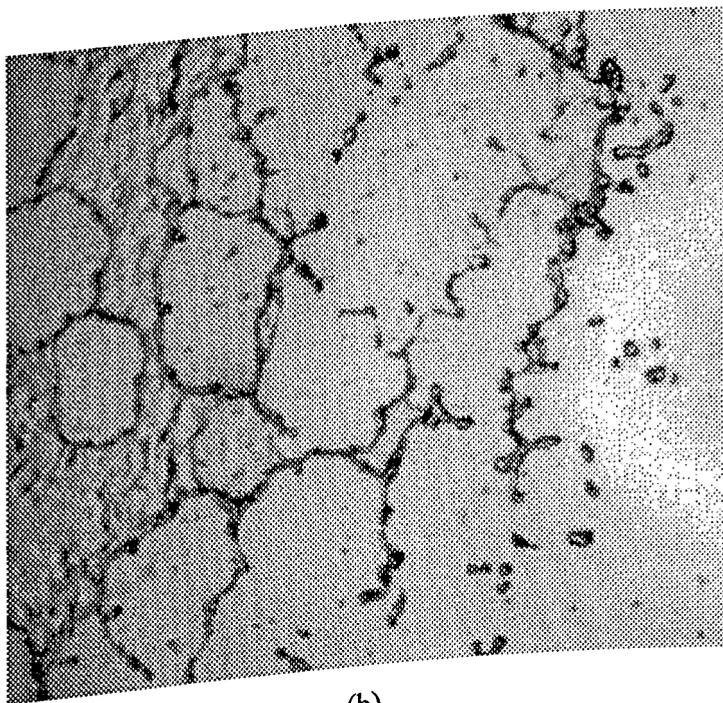


Figura 5.56 - Visualização da frente de formação de gotas; estruturas poligonais de fragmentos do lençol; formação de linhas de ligamentos líquidos e frente de gotas; Vazão 530 l/h e placa 44 mm.



(a)



(b)

Figura 5.57 - Detalhes da formação de frentes de gotas; a) Estruturas poligonais que dão origem à frente; b) Detalhe da sequência do processo de formação de linhas de ligamentos líquidos e breakup formando a frente de gotas; Vazão 530 l/h e placa 44 mm.

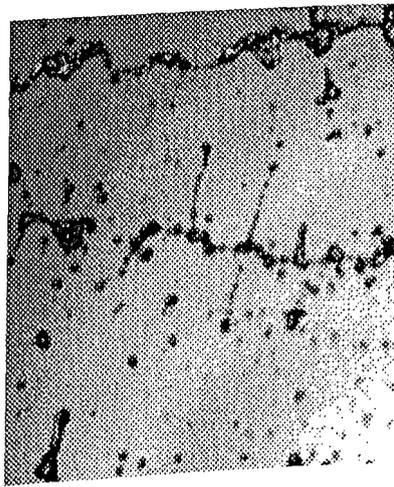


Figura 5.58 - Detalhe do breakup da linha de ligamentos líquidos; Gotas tomando direções opostas sob fortes efeitos de inércia e de arraste apresentando uma certa simetria; Vazão 530 l/h e Bico No 7.

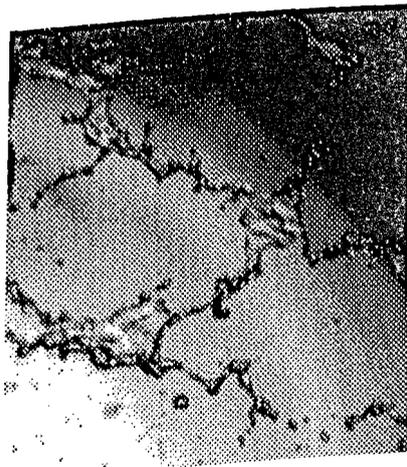


Figura 5.59 - Detalhe das estruturas que dão origem às frentes de gotas; Visualização dos ligamentos que se interconectam com outros fragmentos de lençol; Observe-se instabilidades sobre a superfície dos fragmentos; Vazão 470 l/h e bico No 7.

5.7 - Quantificação Preliminar da Frente de Gotas

5.7.1 - Processo de Quantificação Preliminar

Nas figuras 5.60 a 5.68 mostram-se as fotografias e partes delas tomadas para a quantificação de gotas. O excelente contraste e nitidez apresentadas pelas fotografias permitiu o reconhecimento das partículas por parte do software "GLI" e um close-up das gotas por meio da câmara de vídeo. A calibração realizou-se sem problemas tomando como referência uma esfera de 3 mm de diâmetro. O software apresentou limitações na quantificação devido a sua natureza (quantificação de partículas de Soldagem), fazendo distinção entre partículas e buracos e por considerar isto dentro do processo de quantificação, ver tabela de resultados da figura 5.65.

Na análise das fotografias realizadas para diferentes placas de condições geométricas e de funcionamento diferentes, observou-se que o processo de formação de gotas foi de maior intensidade para vazões compreendidas entre 530 l/h a 350 l/h com placas menores de 40 mm de diâmetro. A frente de gotas apresentou uma espessura maior que a profundidade de campo da câmara o que originou o fato que parte das gotas da frente ficaram fora de foco. Para vazões menores que 350 l/h o fenômeno diminui e a frente ficou dentro da faixa de profundidade do campo da câmara.

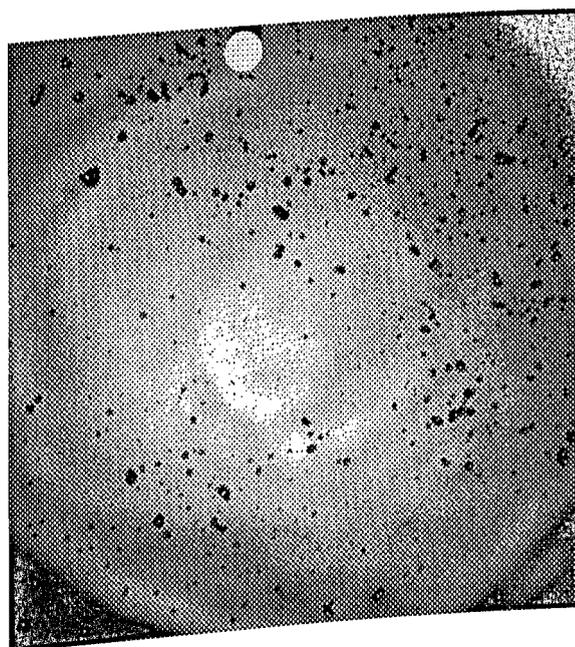


Figura 5.60 - Área de quantificação de gotas; Vazão 200 l/h e Bico No 7;
Circunferência branca de 3 mm de diâmetro.

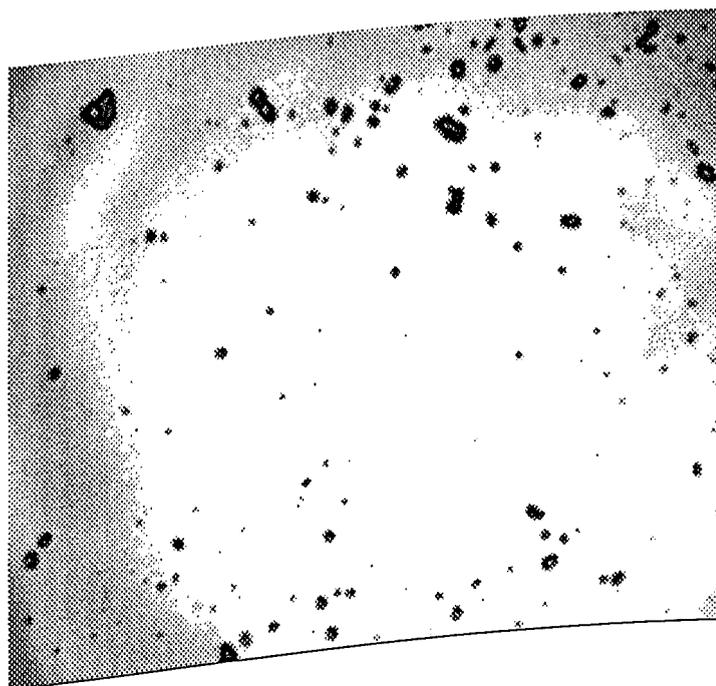


Figura 5.61. Quantificação de uma parte da frente de gotas da figura 5.60 com o
Software "GLI; Vazão 200 l/h e bico No 7.

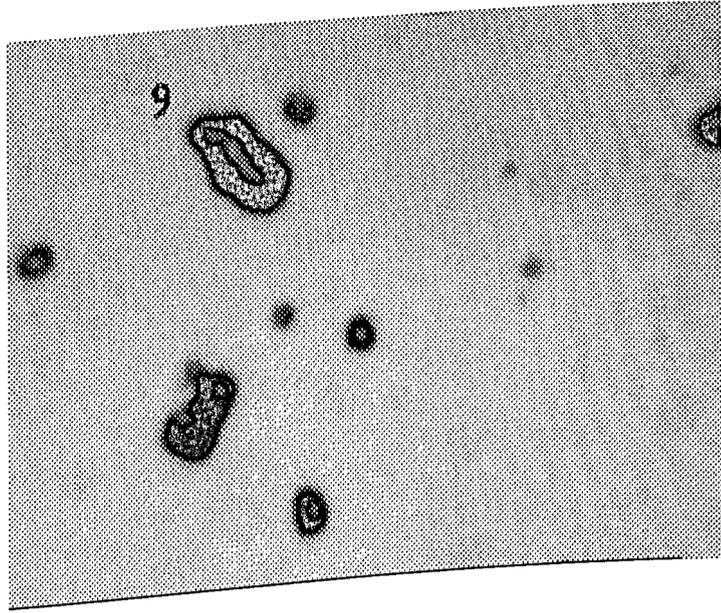


Figura 5.62 - Quantificação de uma parte da figura 5.61; O clouse up foi feito com a câmara vídeo e com o software "GLI"; Vazão 200 l/h e bico No 7; Área da gota No 9 é 1,04 mm².

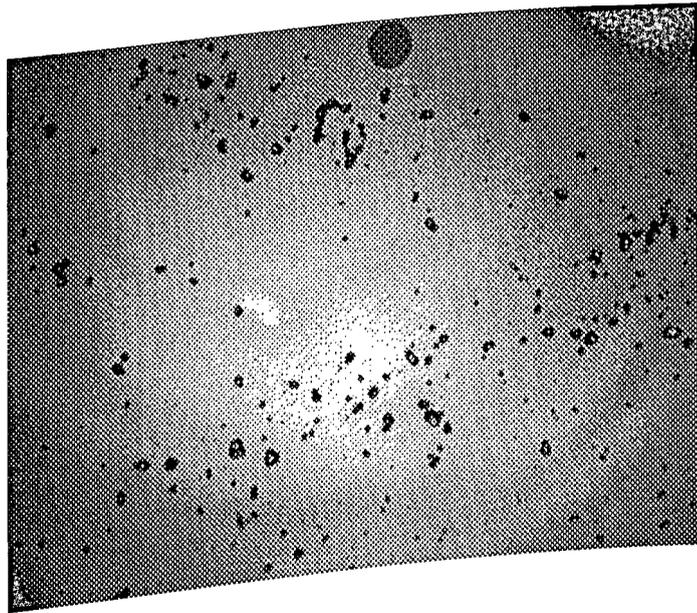


Figura 5.63 - Área de quantificação de gotas; Circunferência preta de 3 mm de diâmetro; Vazão 400 l/h e bico No 7.

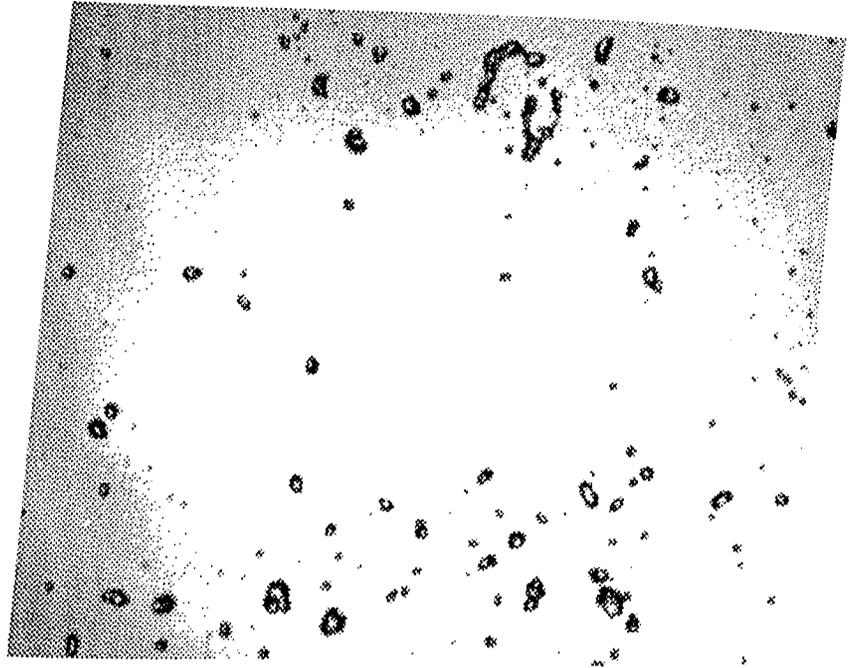


Figura 5.64 - Quantificação de uma parte da frente de gotas da figura 5.63 com o software "GLI"; Vazão 400 l/h e bico No 7.

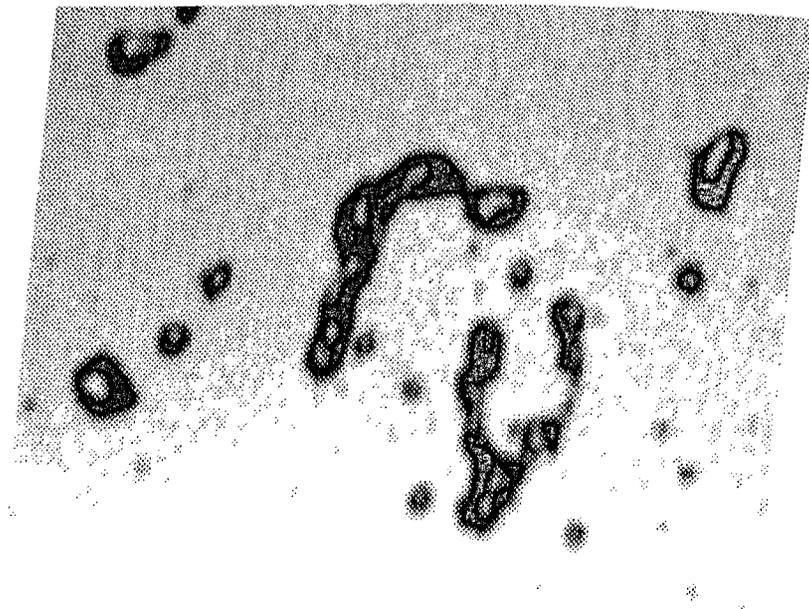


Figura 5.65 - Quantificação de uma parte da frente de gotas da figura 5.64; O close up foi feito com a câmara de vídeo e com o software "GLI"; vazão 400 l/h e bico No 7; Área da gota No 18 de 2.86 mm².

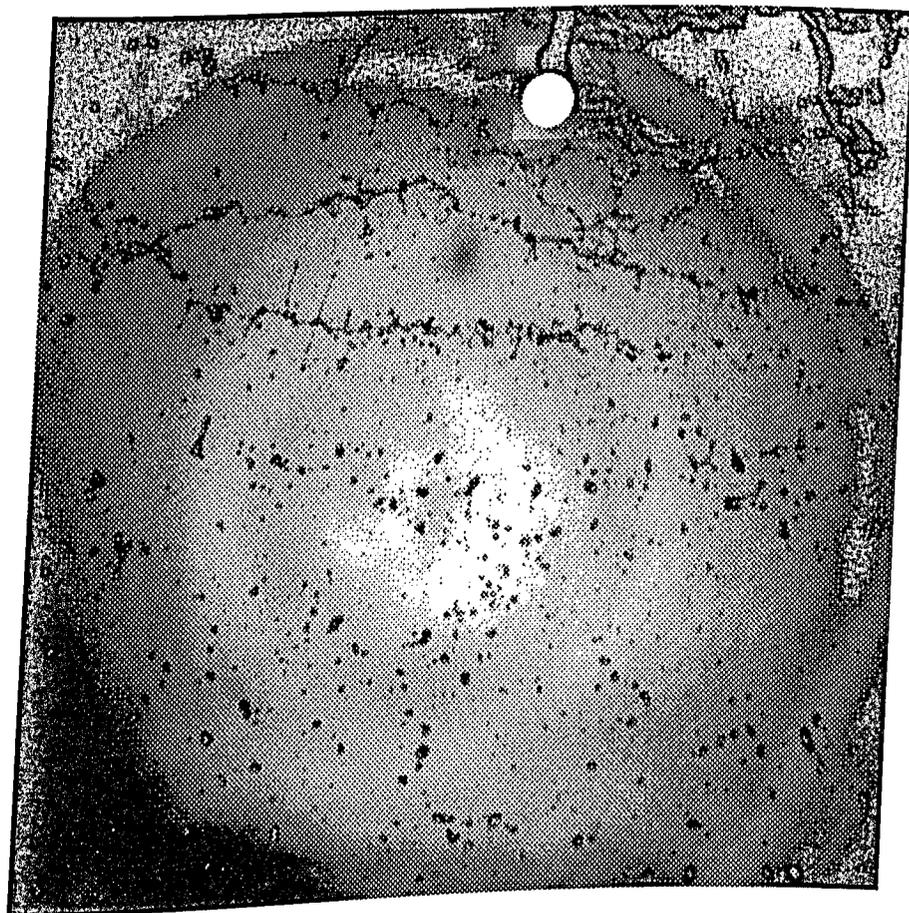


Figura 5.66 - Fotografia mostrando área de quantificação de gotas; Vazão 530 l/h e bico No 7; Circunferência de 3 mm de diâmetro é o parâmetro de referência no processo de calibração para a medição.

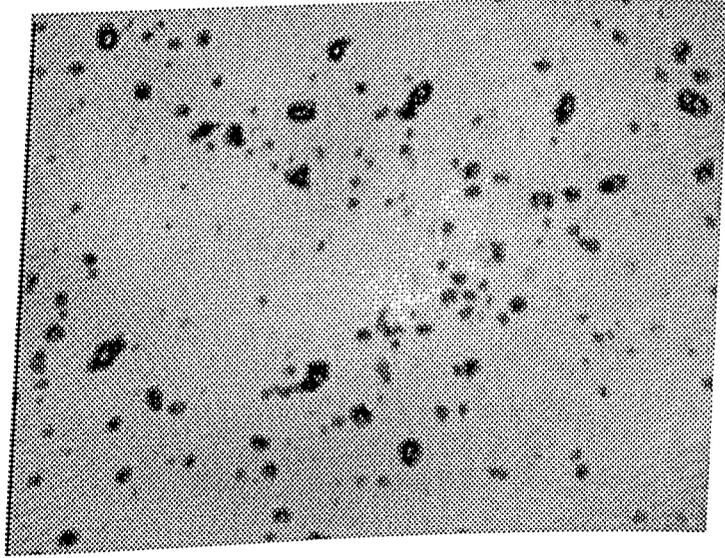


Figura 5.67 - Quantificação de uma parte da frente de gotas da figura 5.66; Vazão 530 l/h e bico No 7.

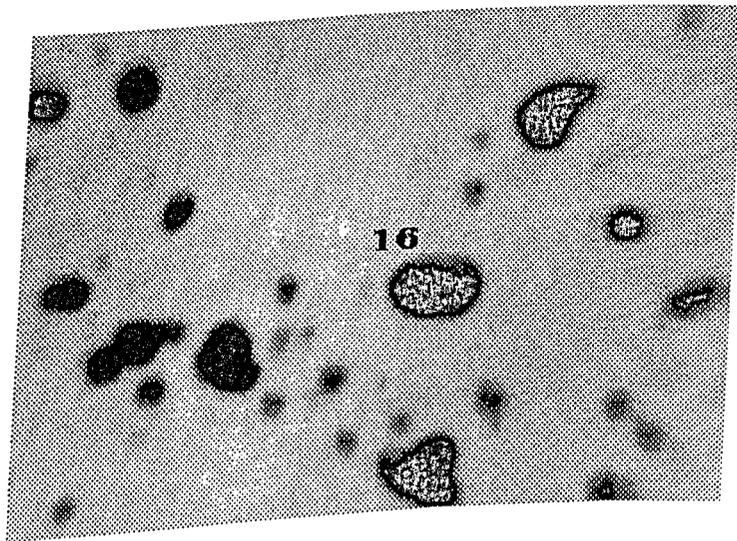


Figura 5.68 - Quantificação de uma parte da figura 5.67; O clouse up foi feito com a câmara vídeo e com o software "GLI"; Vazão 530 l/h e bico No 7; Área da gota No 16 é 0,51 mm².

5.7.2 - Atributos da Partícula

Estes atributos são apresentados na tabela de resultados e seus significados são os seguintes:

ROI Area ou ROI Área de Trabalho [mm^2];

Area Área da partícula, excluindo buracos [mm^2];

Perimeter Comprimento circunferencial da partícula [mm];

Roundness Um valor entre 0,0 e 1,0 indicando o quão perto esta a forma da partícula da forma de um círculo. Isto é computado por

$$\frac{4\pi \times \text{Area}}{\text{Perimeter}^2};$$

No. of holes Número de buracos na partícula;

Hole Area Área dos buracos dentro da partícula [mm^2];

Average radius A média dos raios do centro da área da partícula ao perímetro [mm];

Part Area A soma das áreas de todas as partículas no ROI [mm^2];

Part Ratio A soma das áreas de todas as partículas no ROI dividido pela área do ROI;

PPDA Um valor computado por

$$\frac{\text{Perimeter}^2}{\text{Total Area}};$$

Std Dev Desvio Padrão da mostra;

Total Area Área total da partícula, incluindo buracos [mm^2];

5.7.3 - Tabelas da Frente de Gotas

Dados Estatísticos da figura 5.61

Bico No 7 , Vazão = 200 l/h e Placa 44 mm

Features	Area	Avg radius	No. of holes	Perimeter	PPDA	Roundness	Total area
Mean	.151865480662	.192980858978	.032967032967	1.21217522385	13.6625388114	.932664719584	.152693837850
Min	.011421288363	.065201662480	.000000000000	.373123317956	11.6086854934	.363422363996	.011421288363
Max	1.67436087131	.747015476226	1.000000000000	4.98314189910	34.5778503417	1.000000000000	1.71090900897
Std Dev	.238212949039	.121502681080	.178550294607	.847552517793	3.29691332762	.118503287287	.241475628970
ROI Area	615.721						
Part Area	13.8197						
Part Ratio	.022444812580						

Dados Estatísticos da Figura 5.62

- Bico No 7 , Vazão = 200 l/h e Placa 44 mm

Features	Area	Avg radius	No. of holes	Perimeter	PPDA	Roundness	Total area	Hole Area
Mean	.217691992981	.207516738806	.090909090909	1.38835436376	15.1334222446	.856141957369	.218673779015	.000981792299
Min	.002249940764	.025677958503	.000000000000	.180690735578	12.7876338958	.543822407722	.002249940764	.000000000000

Max	1.04442250728	.584550499916	1.000000000000	3.98257756233	23.1074848175	.982696890830	1.05522215366	.010799715295
Std Dev	.316544596127	.170694612405	.287479787288	1.19097263332	2.97895785474	.133173037916	.319113561795	.003104699855
ROI Area	52.0715							
Part Area	2.39461							
Part Ratio	.045986998826							

Dados de cada gota na Figura 5.62

Bico No 7 , Vazão = 200 l/h e Placa 44 mm

Features	Area	Avg radius	No. of holes	Perimeter	PPDA	Roundness	Total area	Hole Area
Blob#001	.200694710016	.261086195707	.000000000000	1.60488951206	12.8337707519	.979164123535	.200694710016	.000000000000
Blob#002	.660582602024	.473384678363	.000000000000	3.45185160636	18.0375289916	.696678996086	.660582602024	.000000000000
Blob#003	.129371583461	.206063762307	.000000000000	1.30249941349	13.1134243011	.958282768726	.129371583461	.000000000000
Blob#004	.051523640751	.128975644707	.000000000000	.828349411487	13.3174333572	.943602859973	.051523640751	.000000000000
Blob#005	.023624377325	.089727580547	.000000000000	.585511445999	14.5114336013	.865963220596	.023624377325	.000000000000
Blob#006	.142646238207	.215810775756	.000000000000	1.35059547424	12.7876338958	.982696890830	.142646238207	.000000000000
Blob#007	.002249940764	.025677958503	.000000000000	.180690735578	14.5111083984	.865982592105	.002249940764	.000000000000
Blob#008	.010799715295	.058982077986	.000000000000	.420255929231	16.3536720275	.768412590026	.010799715295	.000000000000
Blob#009	1.04442250728	.584550499916	1.000000000000	3.98257756233	15.0308828353	.836036562919	1.05522215366	.010799715295
Blob#010	.124871708452	.202747464179	.000000000000	1.26738274097	12.8632717132	.976918518543	.124871708452	.000000000000
Blob#011	.003824899205	.035677488893	.000000000000	.297294169664	23.1074848175	.543822407722	.003824899205	.000000000000

Dados Estatísticos da figura 5.64

Bico No 7 , Vazão = 400 l/h e Placa 44 mm

Features	Area	Total area	Avg radius	No. of holes	Perimeter	PPDA	Roundness
Mean	.267905669323	.277550273891	.270273059606	.174757281553	1.80886720453	15.3422021773	.871761219883
Min	.021226372569	.021226372569	.088887155056	.000000000000	.508666038513	11.6086969375	.265469551086
Max	3.02688074111	3.12452197074	1.35562658309	3.00000000000	12.1179780960	47.3364143371	1.00000000000
Std Dev	.397038082857	.414592711939	.189044223955	.491227597696	1.60855211696	5.91662213553	.172629274334
ROI Area	1109.63						
Part Area	27.5942						
Part Ratio	.024867912754						

Dados Estatísticos da figura 5.65

Bico No 7 , Vazão = 400 l/h e Placa 44 mm

Features	Area	Avg radius	No. of holes	Perimeter	PPDA	Roundness	Total area	Hole Area
Mean	.444525043111	.325393555685	.277777777777	3.08975890030	85.6625497606	.710818647148	.448857638512	.004332602851
Min	.001799696474	.031322270631	.000000000000	.159404590725	12.7637052536	.010536753572	.001799696474	.000000000000
Max	3.61619019508	1.42099118232	5.00000000000	14.8083190917	1192.62194824	.984538853168	3.69417691230	.077986851334
Std Dev	.998518997501	.428727325844	1.14530711822	4.89317682137	268.825117348	.275750635792	1.01234499336	.017863779192

ROI Area 57.8914
 Part Area 8.00145
 Part Ratio .138214752078

Dados de cada gota na figura 5.65

Bico No 7 , Vazão = 400 l/h e Placa 44 mm

Features	Area	Avg radius	No. of holes	Perimeter	PPDA	Roundness	Total area	Hole Area
Blob#001	.002054027980	.029858084395	.000000000000	.154832169413	11.6712093353	1.000000000000	.002054027980	.000000000000
Blob#002	.019513266161	.085469253361	.000000000000	.559433400630	16.0386047363	.783507287502	.019513266161	.000000000000
Blob#003	.081904366612	.163455337286	.000000000000	1.02377247810	12.7967481613	.981996715068	.081904366612	.000000000000
Blob#004	.057769536972	.137812450528	.000000000000	.912579357624	14.4159135818	.871700882911	.057769536972	.000000000000
Blob#005	.007445851806	.050741177052	.000000000000	.317584306001	13.5457630157	.927697002887	.007445851806	.000000000000
Blob#006	1.77493691444	.866244494915	1.000000000000	9.52883243560	51.0968284606	.245932370424	1.77699100971	.002054027980
Blob#007	.456250965595	.472449958324	.000000000000	3.13476181030	21.5379886627	.583451151847	.456250965595	.000000000000
Blob#008	.010013386607	.059855341911	.000000000000	.375283360481	14.0649242401	.893454074859	.010013386607	.000000000000
Blob#009	.188457071781	.244710296392	.000000000000	1.61137759685	13.7778663635	.912068963050	.188457071781	.000000000000
Blob#010	.002310781506	.029557995498	.000000000000	.193022757768	16.1234493255	.779384374618	.002310781506	.000000000000
Blob#011	.113998554646	.188982948660	.000000000000	1.25819337368	13.8865785598	.904928743839	.113998554646	.000000000000
Blob#012	.010526893660	.059336762875	.000000000000	.375283360481	13.3788299560	.939272224903	.010526893660	.000000000000
Blob#013	.008729618974	.054313819855	.000000000000	.353190422058	14.2896747589	.879401683807	.008729618974	.000000000000

Blob#014	.060850579291	.157364934682	.000000000000	1.06106984615	18.5021839141	.679182708263	.060850579291	.000000000000
Blob#015	.018486252054	.089918613433	.000000000000	.555689156055	16.7037811279	.752306580543	.018486252054	.000000000000
Blob#016	.444183558225	.422226399183	.000000000000	3.24458956718	23.7004623413	.530215978622	.444183558225	.000000000000
Blob#017	.013094428926	.070561163127	.000000000000	.456289678812	15.8999042510	.790342092514	.013094428926	.000000000000
Blob#018	2.86665296554	1.29523539543	6.00000000000	12.1480398178	49.4342765808	.254203468561	2.98527288436	.118620119988
Blob#019	.157389894127	1.25159370899	.000000000000	13.7320060729	1198.09411621	.010488628409	.157389894127	.000000000000

Dados Estatísticos da Figura 5.67

Bico No 7 , Vazão = 530 l/h e Placa 44 mm

Features	Area	Avg radius	No. of holes	Perimeter	PPDA	Roundness	Total area
Mean	.153321701129	.207173193512	.000000000000	1.30699595896	13.9806959611	.911223875997	.153321701129
Min	.010983618907	.066969975829	.000000000000	.365904331207	11.6086912155	.427390307188	.010983618907
Max	.922623991966	.715844810009	.000000000000	5.20840740203	29.4025611877	1.000000000000	.922623991966
Std Dev	.164188180477	.113008631177	.000000000000	.771043451548	2.34371854763	.101031107225	.164188180477
ROI Area	319.966						
Part Area	21.0050						
Part Ratio	.065647825598						

Dados Estatísticos da figura 5.68

Bico No 7 , Vazão = 530 l/h e Placa 44 mm

Features	Area	Total area	Avg radius	No. of holes	Perimeter	PPDA	Roundness
Mean	.126730486032	.126730486032	.169524446440	.000000000000	1.13530254612	16.4663519461	.787402582665
Min	.004205499310	.004205499310	.043392587453	.000000000000	.248806089162	12.9732131958	.471542537212
Max	.517467558383	.517467558383	.414117664098	.000000000000	2.79980826377	26.6494483947	.968638062477
Std Dev	.160929920077	.160929920077	.119201172301	.000000000000	.823160008930	3.23353806030	.126600926000
ROI Area	36.8944						
Part Area	3.04153						
Part Ratio	.082438714802						

Dados de cada gota na Figura 5.68

Bico No 7 , Vazão = 530 l/h e Placa 44 mm

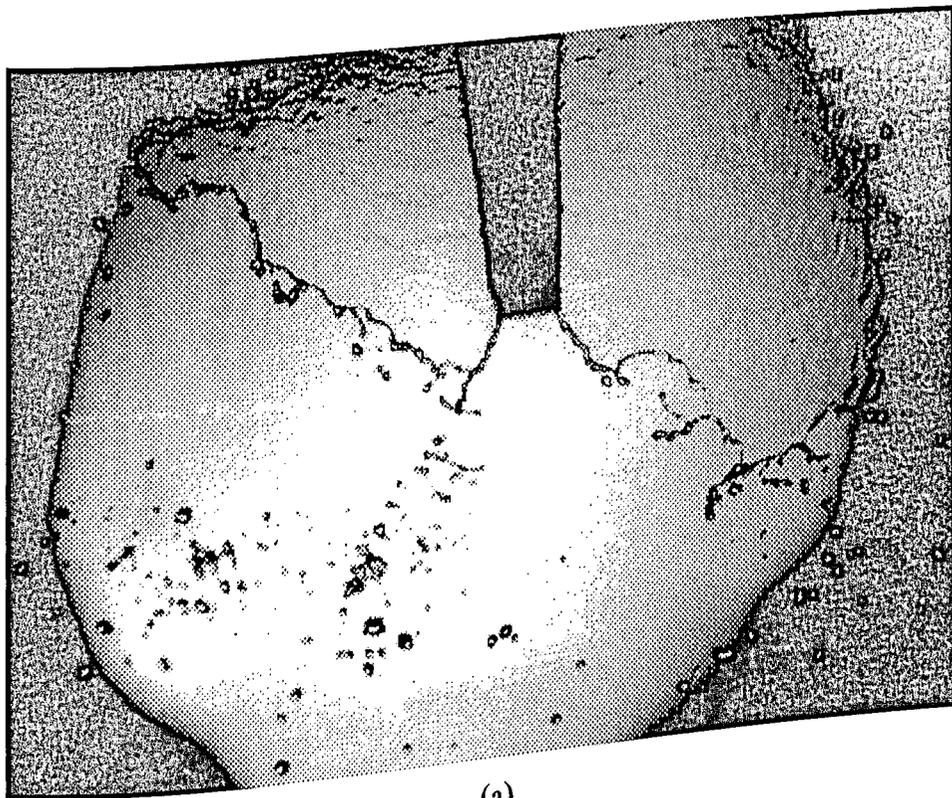
Features	Area	Total area	Avg radius	No. of holes	Perimeter	PPDA	Roundness
Blob#001	.051612943410	.051612943410	.132214590907	.000000000000	.864705443382	14.4869518280	.867425322532
Blob#002	.006499407812	.006499407812	.047758504748	.000000000000	.387369781732	23.0875034332	.544292211532
Blob#003	.014910405501	.014910405501	.074783287942	.000000000000	.495305269956	16.4534015655	.763753831386
Blob#004	.470060110092	.470060110092	.381433308124	.000000000000	2.79980826377	16.6764049530	.753540635108

Blob#005	.009175634011	.009175634011	.059643529355	.000000000000	.436184346675	20.7349643707	.606046259403
Blob#006	.005352453328	.005352453328	.043630558997	.000000000000	.318137049674	18.9092731475	.664560079574
Blob#007	.018924746662	.018924746662	.081166610121	.000000000000	.558873474597	16.5042629241	.761400163173
Blob#008	.047789763659	.047789763659	.130314752459	.000000000000	.857553899288	15.3881797790	.816623449325
Blob#009	.010704906657	.010704906657	.065125584602	.000000000000	.431754887104	17.4136924743	.721636056900
Blob#010	.035364422947	.035364422947	.108782082796	.000000000000	.761882781982	16.4137935638	.765596807003
Blob#011	.047216285020	.047216285020	.125388279557	.000000000000	.851930141448	15.3714694976	.817511200904
Blob#012	.364349156618	.364349156618	.354263603687	.000000000000	2.33755898475	14.9970788955	.837919712066
Blob#013	.010322588495	.010322588495	.103123031556	.000000000000	.524491906166	26.6494483947	.471542537212
Blob#014	.351159185171	.351159185171	.367098778486	.000000000000	2.62205266952	19.5784397125	.641846239566
Blob#015	.026762267574	.026762267574	.099588997662	.000000000000	.642056524753	15.4036226272	.815804719924
Blob#016	.517467558383	.517467558383	.414117664098	.000000000000	2.68592190742	13.9412889480	.901376366615
Blob#017	.136869877576	.136869877576	.211343541741	.000000000000	1.33350551128	12.9921483993	.967226326465
Blob#018	.114695429801	.114695429801	.194099798798	.000000000000	1.25706005096	13.7773332595	.912103116512
Blob#019	.010513748042	.010513748042	.058764383196	.000000000000	.374900609254	13.3682327270	.940015673637
Blob#020	.077037096023	.077037096023	.164027854800	.000000000000	1.11774694919	16.2175884246	.774859189987
Blob#021	.004205499310	.004205499310	.043392587453	.000000000000	.248806089162	14.7198600769	.853700220584
Blob#022	.409844994544	.409844994544	.365183621644	.000000000000	2.50787210464	15.3458309173	.818876981735
Blob#023	.128076568245	.128076568245	.205264881253	.000000000000	1.28901803493	12.9732131958	.968638062477
Blob#024	.172616615891	.172616615891	.238076880574	.000000000000	1.54276442527	13.7884635925	.911366820335

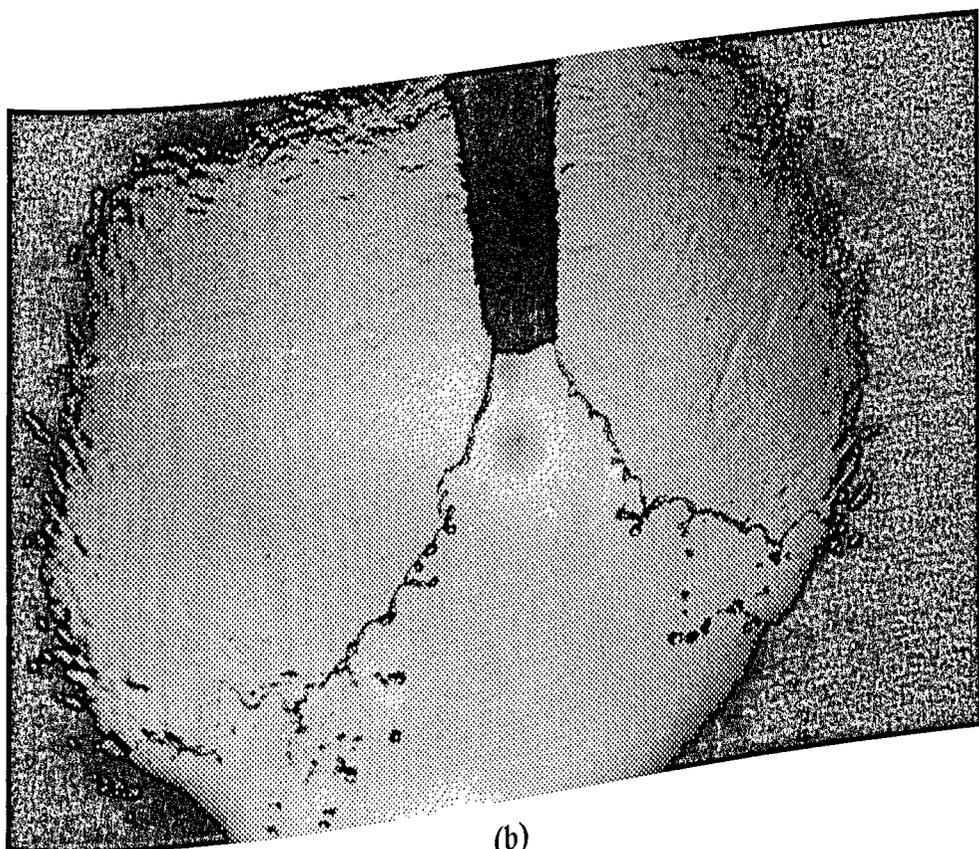
5.8 - Efeito Suporte

Chamase efeito suporte, à influência exercida pelo suporte da placa aspersora sobre o lençol contínuo. Este fenômeno físico foi observado por Reis e Silveira (1993). O estudo de este fenômeno é importante, considerando-se que ele modifica a uniformidade de molhamento do solo. As observações apresentadas nesta seção se referem ao bico No 7 e placa 44 mm de diâmetro.

Nas figuras 5.69 (a) e (b) tem-se as lacunas criadas, sobre o lençol, pelo suporte de placas, o qual é visualizado em cor escura. A origem desta lacuna está ligada à forma pouco hidrodinâmica do suporte. Nas figuras 5.69, 5.70 e 5.71 tem-se o seu comportamento para vazões de valores crecentes, observa-se que à medida que a vazão aumenta esta lacuna diminui. Este fato é devido ao aumento das forças de inércia com o aumento da vazão. Observa-se nas figuras 5.71 (a) e (b) que se forma uma esteira de gotas de pequenas magnitudes, através de novos mecanismos físicos. Aparentemente, este processo de atomização atrás do suporte, para altas vazões tornará menos prejudicial a sua influência no processo de molhamento do solo. No entanto só uma quantificação da precipitação de gotas no solo poderia dar uma resposta segura em relação à importância deste efeito em termos práticos.

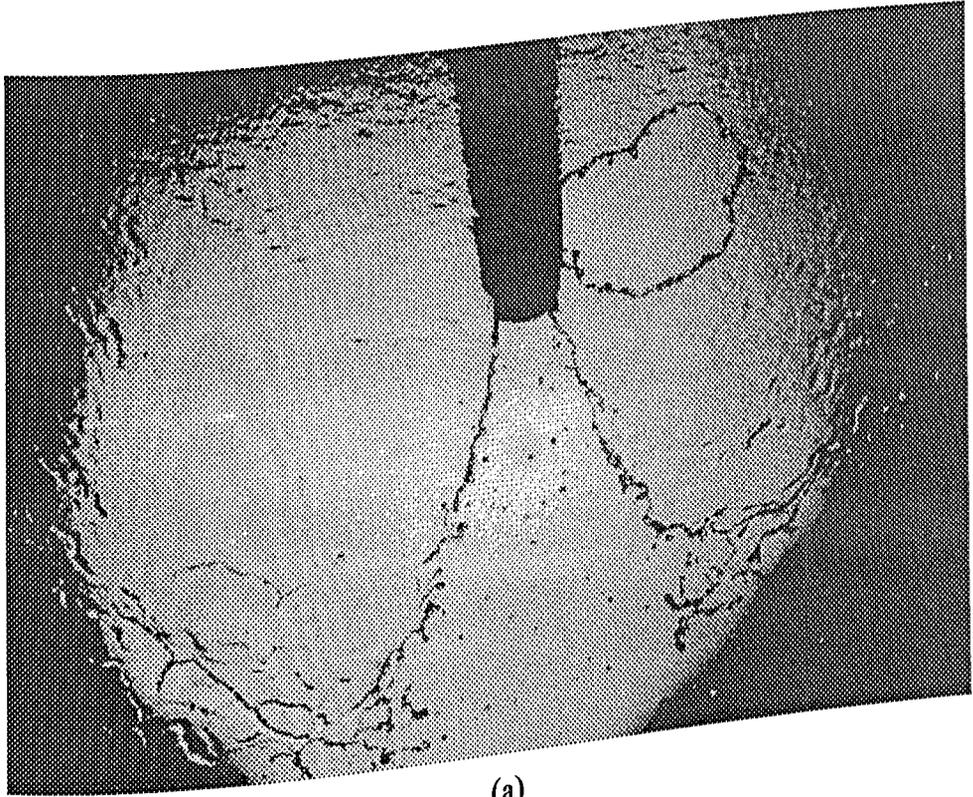


(a)

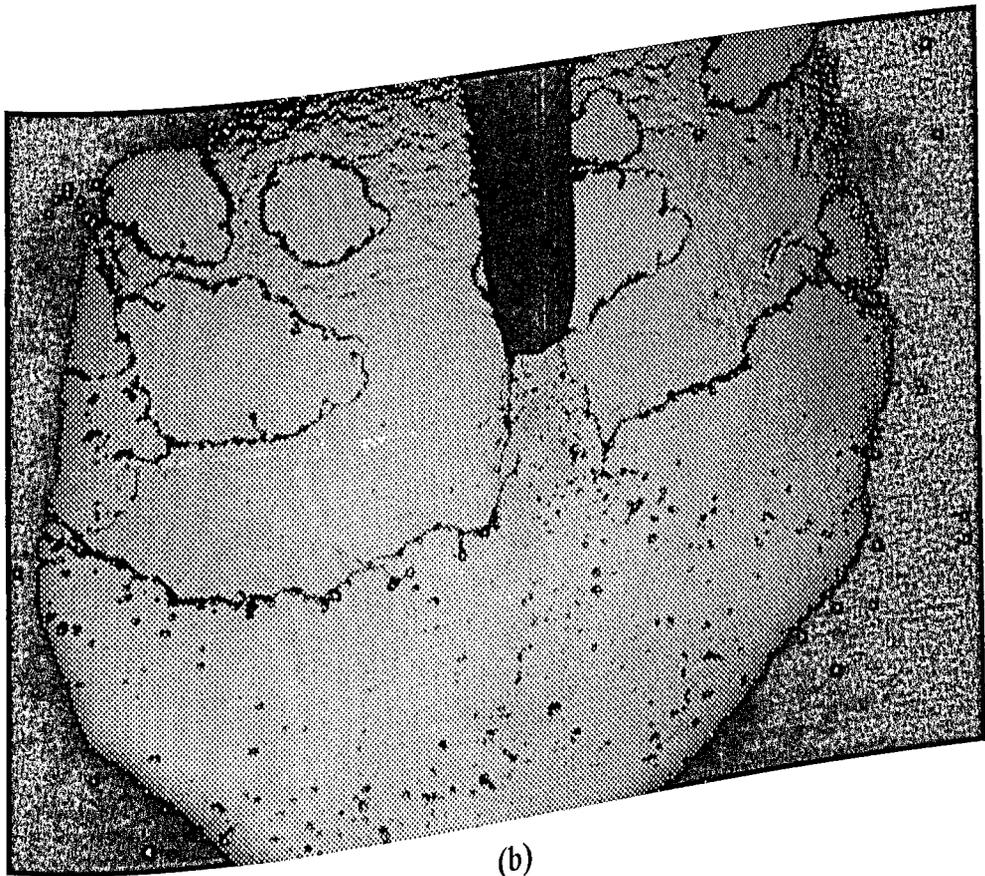


(b)

Figura 5.69 - Visualização do efeito suporte; a) Vazão 100 l/h; b) Vazão 200 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro.

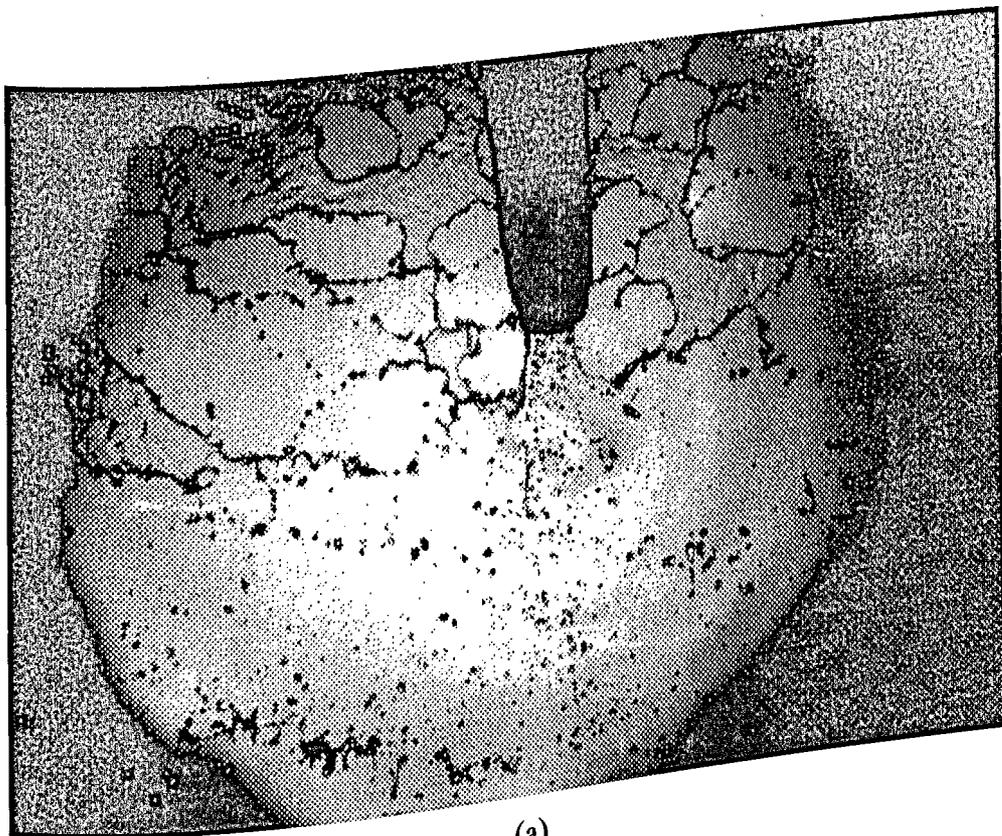


(a)

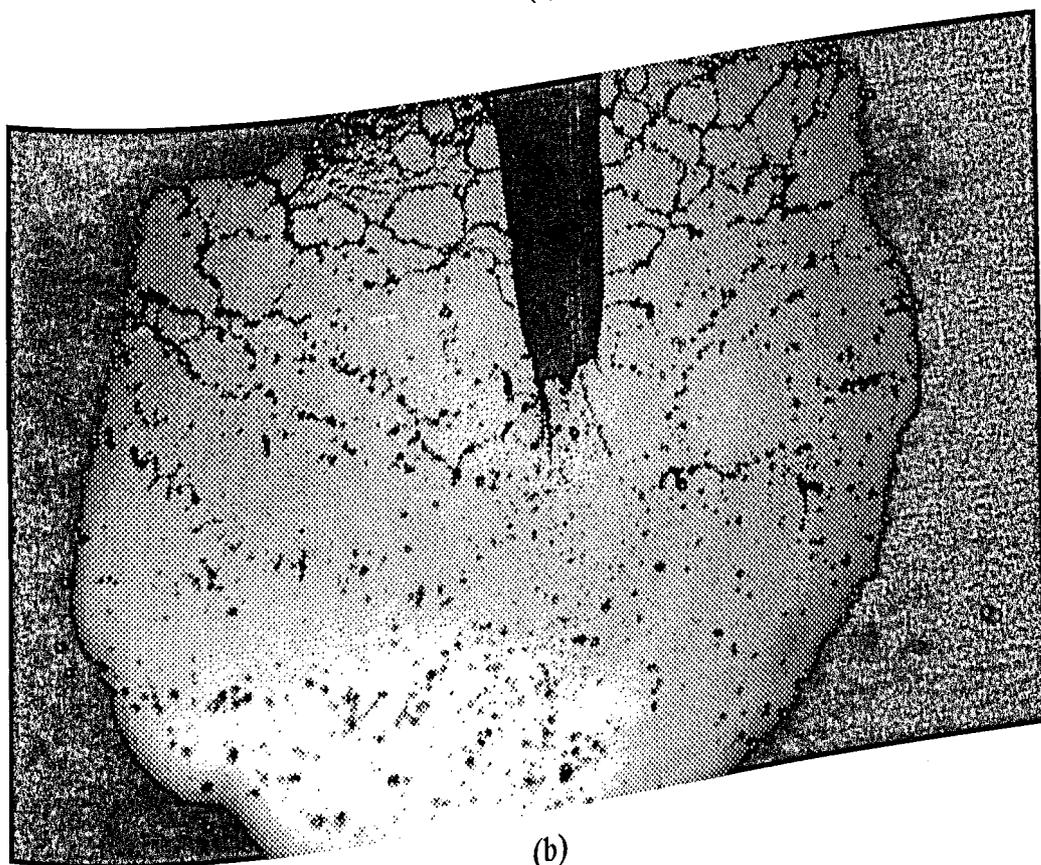


(b)

Figura 5.70 - Visualização do efeito suporte; a) Vazão 300 l/h; b) Vazão 400 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro.



(a)



(b)

Figura 5.71 - Visualização do efeito suporte; a) Vazão 450 l/h; b) Vazão 530 l/h; Bico No 7 e placa de 44 mm de diâmetro.

6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste trabalho foi desenvolvido e aplicado um método de fotografia para a captura de fenômenos físicos de altas frequência, em particular para objetos refratários de luz em movimento. Ela permitiu um estudo, com resultados importantes, de um sistema de aspersão de gotas do tipo jato-placa.

Experimentos iniciais foram realizados sobre um jato livre de água, desde moderados números de Reynolds até altos valores deste parâmetro. A metodologia se mostrou completamente adequada e eficiente para a captura dos fenômenos físicos envolvidos nos diversos regimes deste escoamento: a) instabilidades de Rayleigh ou primeira ordem em jatos livres a baixos valores de Reynolds; b) instabilidades superficiais ou de segunda ordem, criadas pelo cisalhamento entre o jato e meio circundante em repouso; c) instabilidades de terceira ordem que se manifestam como instabilidades globais, envolvendo as duas precedentes; d) transição de escoamento turbulento contínuo e o regime turbulento spray. Nesta fase do trabalho os autores acreditam ter colaborado para melhorar a compreensão dos fenômenos físicos envolvidos no processo de transição de jato livre, desde o regime laminar, passando ao regime turbulento e chegando ao regime turbulento spray.

Ainda nesta configuração foi realizado um estudo quantitativo preliminar do comprimento do breakup do jato livre. Foi feito um estudo comparativo deste parâmetro para bicos injetores de dois fabricantes diferentes para a mesma geometria e condições similares de operação. Observou-se diferenças fundamentais nos resultados, o que mostra que este parâmetro é muito sensível às condições geométricas do bico injetor.

A segunda fase dos experimentos envolveu o estudo dos fenômenos físicos presentes num sistema de aspersão de gotas do tipo jato-placa. Os seguintes estudos foram realizados :

a) visualização do comportamento global do processo de aspersão (jato, lençol sobre a placa, lençol livre e frentes de gotas); b) visualização das instabilidades presentes sobre a placa; c) visualização de instabilidades e lacunas presentes sobre o lençol livre; d) visualização das frentes de gotas; e) visualização das singularidades criadas, sobre o lençol livre, pelo suporte da placa aspersora; f) estudo preliminar de quantificação do tamanho das gotas.

Nesta fase do trabalho, destaca-se como resultados mais importantes, o avanço na compreensão dos fenômenos físicos envolvidos no processo de formação de gotas: entre eles destaca-se as instabilidades superficiais (segunda ordem) e lacunas sobre o lençol como determinantes da dinâmica de formação das gotas. Por outro lado, atribui-se a origem das gotas a um processo, pouco compreendido, de enrolamento das bordas do lençol conduzindo-se a uma acumulação de massa a ao seu rompimento.

Finalmente destaca-se como contribuições fundamentais a sistematização de uma metodologia barata de congelamento de imagens e o aprofundamento da compreensão dos fenômenos físicos presentes em problemas tecnológicos que envolvem o processo de formação de gotas.

Para finalizar, algumas sugestões de futuros trabalhos são enunciadas:

a) Um estudo mais completo do método da fotografia com respeito ao uso de equipamentos e materiais fotográficos mais sofisticados que permita a visualização de fenômenos mais complexos como a medição da velocidade de objetos;

b) Estudo mais detalhado das instabilidades apresentadas sobre o jato livre;

- c) Um estudo de maior envergadura sobre a sensibilidade do jato livre e seu breakup com respeito à forma do bico. Também, visualizar como este afeta na geração de instabilidades sobre o jato;
- d) Estudo quantitativo visando melhor entendimento do processo de formação de gotas num aspersor jato-placa;
- e) Aplicação do método da fotografia no estudo do processo de formação de gotas em outros tipos de aspersores;
- f) Aperfeiçoamento do processo de quantificação, mediante a utilização de um software mais adequado para este fim.

7 - BIBLIOGRAFIA

Balatka, K.; Mochizuki, S. and Murat A.; Experimental Investigation of Flow in an Annular-Conical Passage. *J. of Flow Visualization and Image Processing*; vol 2, pp. 113-123, 1995.

Bennett, P.; Video Imagem Analyzers, Grenfield Instruments. *Spray Technology Short Course Notes*; Vol 1, Chapter 19, pp. 53-60, Canada, 1995.

Chaya, L.A. and Hills, D. J.; Droplet Size and Drift Potencial from Micro-Spreyer Irrigation Emitters. *Transactions of the ASAE-American Society of Agricultural Engineers*; vol. 34(6), pp. 2453-2459, 1991.

Chigier, N.; Optical Imaging of Spray. *Prog. Energy Combust. Sci.*; Vol. 17, pp. 211-262, 1991.

Chigier, N. and Reitz, R.; Regimes of Breakup and Breakup Mechanisms. *Spray Technology Short Course Notes (Paper Submitted to RecenAdvances in Spray Combustion . AIAA Series, Edited by K.K. Kuo)*; Vol 1, Chapter 3, pp. 3-33, Canada, 1995.

Chigier, N.; Turbulence Characteristics in Cylindral Liquid Jets. *Spray Technology Short Course Notes*; Vol 1, Chapter 4, pp. 1-9, Canada, 1995.

Chigier, N.; The Effect of Turbulence on the Stability of Liquid Jets and the Resulting Droplet Size Distribution; Spray Technology Short Course Notes; Vol 1, Chapter 5, pp. 5-16, Canada, 1995.

Dadio, C. and Wallender, W.W.; Droplet Size Distributions and Water Application with Low-pressure Sprinklers. Transaction of the ASAE, vol 28(2), pp.511-516,1985.

Daum, R. and Hardim, K.; The Machine Vision Lighting Testbed. Technical Paper. Society of Manufacturing Engineer. 1992.

Gran R.P. and Middleman, S.; Newtonian Jet Stability. A.I.Ch.E. Vol 12, p. 669, 1966.

Haenlein, A. Uber den Zerfall eines Flussigkeitsstrahls (On the distribution of the liquid Jet). N.A.C.A.;TM 659, 1932.

Hiruyasu, H., Arai, M., and Shimizu, M.; Break-Up Length of a liquid Jet and Internal Flow in a Nozzle. Proceeding of ICLASS-91; Paper 26, July 1991.

Kataoka, K.; Impigement Heat Transfer Augmentation Due to Large Scale Eddies. Department of Chemical Engineering, Kobe University. IHTC 90 - Jerusalem; 1990

Kistler, S.F. and Scriven, L.E.; The Teapot Effect : Sheet-Forming Flows with Deflections, Wetting and Hysteresis. *J. Fluid Mech*, vol. 263, pp. 19-62, 1994.

Kohl, R. A. and Deboer, D. W.; Drop Size Distributions for a Low Pressure Spray type Agriculture Sprinkler. *Transactions of the ASAE*, 27(6), pp. 1836-1840, St. Joseph, MI, USA, 1984.

Manual Global Imagem: User Manual. **DATA TRANSLATION**. 5. ed. Marlboro, 1994.

Mao, C.P., Oechsle, V. and Chigier, N.; Drop Size Distribution and Air Velocity Measurements in Air Assist Swirl Atomizer Aprays. *ASME*; Vol. 109, pp. 64-69, March, 1987.

Mc Carthy , M.J. and Malloy, N. A.; Review of Stability of Liquid Jets and the Influence of Nozzle Design. *The Chem. Eng. J.*; Vol. 7, p. 1, 1974.

Miesse, C.C.; Correlation of Experimental Data on the Disitegration of Liquid Jets. *Indust. Engng. Chem.*; Vol. 47, p. 1690, 1955.

Rantz, W.E.; On Spray and Spraying. *Dept. Engng. Res. Penn. State University; Bulletin* 65, 1956.

Rayleigh, Lord; On the Instability of Jets. *Proc. of London Math. Soc.*; Vol.10, pp. 4-13, 1879.

Reis, W.; Oliveira, C.S.G. e Silveira Neto, A.; Comportamento Dinâmica de um Jato Incidente sobre Placas Aspersionas-Cenário da Transição à Turbulencia. *Anais do XII COBEM*, vol II, pp. 1033-1036, 1993.

Reitz, R. D. and Branco, F. V.; Mechanisms of Breakup of Round Liquid Jets. *The Encyclopedia of Fluid Mechanics*, N. Chermisnoff, Ed., Gulf Publishing, New Jersey, Vol. 3, Charter 10, pp. 233-249, 1986.

Rezende, C. e Scotti, A.; Confecção de um Manual de Utilização dos Softwares "Global Lab Acquire e "Global Lab Image" V 3.0 Aplicados à Soldagem. Relatório *PROSOLDA/UFU*; n° 02, 1995.

Stirling, A.M. and Sleicher, C.A.; The instability of Capillarity jets. *J. Fluid Mechanic.*; Vol 68, 1975,p. 477.

Van Dyke, M.; *An Album of Fluid Motion*. Parabolic Press, CA, 1982.

Vision-EZ: User Manual. DATA TRASLATION. 5 ed. Marlboro, 1994.

Von Bernuth, R. D. and Gilley, J.R.; Sprinkler Droplet Size Distribution Estimation from Single Leg Test Data, *Transaction of the ASAE*, vol. 27 (5), pp. 1435-1441, 1984.

Weber, C.; Disintegration of Liquid Jets. *Z. Angew. Math. Mech. (Germany)*, vol. 11, No 2, pp. 136-159, 1931.

Wu, P.K.; Miranda, R.F. and Faeth, G.M.; Effects of Initial Flow Conditions on Primary Breakup of Nonturbulent and Turbulent Liquid Jets. *Atomization and Sprays*, vol. 5, pp. 175-196, 1995.

8 - ANEXOS.

8.1 - Anexo I - Informações Técnicas sobre os Equipamentos

Aspersor No 1 :	
Fabricante	Senninger
Modelo	Super Spray
Corpo	Termoplástico
Partes	imóveis
Distribuição	Uniforme
Rosca	3/4 " macho
Alienamento	Vane
Bocais	2,3 a 4,8 mm
Pressão de Serviço	10 a 25 m.c.a.
Defletores	Lisos Convexos
Aspersor No 2 :	
Fabricante	Fabrimar
Modelo	AF1
Corpo	Termoplástico
Partes	Fixas
Distribuição	Uniforme

Rosca	$\frac{3}{4}$ "
Bocais	2,0 a 9,60 mm de latão
Pressão de Serviço	10 a 40 psi
Deflectores	Placa lisa Convexa PLCV

Placas Deflectoras com ângulos constantes:

Diâmetro	44 mm
Ângulo	12°
Diâmetro	34 mm
Ângulo	12
Diâmetro	24 mm
Ângulo	12°

Placas Deflectoras com Diâmetro de Placa Constante :

Diâmetro	32 mm
Ângulo	20°
Diâmetro	32 mm
Ângulo	14°
Diâmetro	32 mm
Ângulo	6°

Bico No 7 :

Diâmetro	2,77 mm
Vazão de Serviço	298 a 476 l/h

Bico No 9 :

Diâmetro

Vazão de Serviço

3,57 mm

488 a 778 l/h

Bico No 11

Diâmetro

Vazão de Serviço

4,36 mm

717 a 1147 l/h

Bico 2.8 :

Diâmetro

Vazão de Serviço

2,8 mm

250 a 490 l/h