USP

Campus de São Carlos

CARACTERÍSTICAS DE ESCOAMENTOS DECORRENTES DE DIFERENÇAS DE DENSIDADES

Selma Vargas da Silva

Orientador: Harry Edmar Schulz

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

CARACTERÍSTICAS DE ESCOAMENTOS DECORRENTES DE DIFERENÇAS DE DENSIDADES

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 19/03/03
Ass.:

Selma Vargas da Silva

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Civil.

ORIENTADOR: Prof. Dr.Harry Edmar Schulz.

DEDALUS - Acervo - EESC
31100043034

São Carlos

2002

EESC - USP
Biblioteca

Class. TESE-EESC
Cutt. 5473
Tombo T081/03
Sysno 1311667

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca - EESC/USP

S586c

Silva, Selma Vargas da
Características de escoamentos decorrentes de diferenças de densidade / Selma Vargas da Silva. -- São Carlos, 2002.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.
Área : Hidráulica e Saneamento.
Orientador: Prof. Dr. Harry Edmar Schulz.

1. Corrente de densidade. 2. Plumas. 3. Intrusões. 4. Velocimetria a laser. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **SELMA VARGAS DA SILVA**

Tese defendida e julgada em 19-12-2002 perante a Comissão Julgadora:

APROVADO

Prof. Tit. **HARRY EDMAR SCHULZ (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Tit. **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **MICHAEL GEORGE MAUNSELL**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADO

Prof. Dr. **ALEXANDRE AUGUSTO BARBOSA**
(Escola Federal de Engenharia de Itajubá/EFEI)

Aprovado

Prof. Dr. **MILTON DALL'ÁGLIO SOBRINHO**
(UNESP/Campus de Ilha Solteira)

Profa. Associada **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Agradecimentos

Valnisete Vargas da Silva

Harry Edmar Schulz

Alexandre Augusto Barbosa.

Jefferson Luís Coutinho

Sérgio Sadayoshi

Luís Américo Monteiro Júnior

Rumi Yamaguishi

Prof. Gilberto

Osni Aparecido Rizatto.

Giovanni Penner

Alberto Carlos de Melo e Lima

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS i
LISTA DE TABELAS xv
LISTA DE ABREVIATURAS xvi
LISTA DE SÍMBOLOS xvii
RESUMO xix
ABSTRACT xx

1. Introdução 1
2. Objetivos 5
3. Revisão bibliográfica 6
4. Materiais e métodos 26
   4.1 Tanque existente 26
   4.2 Implementações efetuadas para o presente trabalho 28
      4.2.1 Suporte dos reservatórios de abastecimento 28
      4.2.2 Suporte do equipamento fotográfico e de vídeo. 30
      4.2.3 Extravasor 31
      4.2.4 Adição de aquecedores 32
      4.2.5 Quadro de lâmpadas 33
   4.3 Densidade das soluções utilizadas 34
   4.4 Corantes utilizados 35

4.5 Equipamento a Laser 36
4.5.1 Funcionamento do equipamento a Laser 37
4.5.2 Acessórios 38
4.5.3 Técnica VLPI 42
4.5.3.1 Registro das imagens 42
4.5.3.2 Pré-processamento das imagens 43
4.5.3.3 Escolha do método de análise 44
4.5.3.4 Análise do escoamento 44
4.6 Fases do experimento 45
4.7 Resumo descritivo de um ensaio 47
4.8 Resumo descritivo do registro das imagens 48
4.8.1 Imagens estática e em movimento 49
4.8.2 Imagens para campo de velocidades 51
4.9 Avaliação densitométrica das fotos 51
4.10Simulação do escoamento turbulento bidimensional 52
4.11 Experimentos com correntes de fundo 53
4.12 Singularidades 54

5. Resultados experimentais 55
5.1 Simbologia 56
5.1.1 Plumas 56
5.1.2 Intrusões 57
5.1.3 Correntes de fundo em torno de obstáculos 58
5.2 Plumas 58
5.2.1 Plumas geradas por diferentes salinidades 58
5.2.1.1 Evolução das plumas 59
5.2.2 Plumas geradas por diferentes temperaturas 80
5.2.2.1 Plumas térmicas sem corantes 81
5.2.2.1.1Velocidade longitudinal Q=50ml/s e posição1 84
5.2.2.1.2Velocidade longitudinal Q=50ml/s e posição2 86
5.2.2.1.3Velocidade longitudinal Q=150ml/s e posição1 89

5.2.2.1.4Velocidade longitudinal Q=150ml/s e posição2 91
5.2.2.1.5 Velocidade longitudinal Q=300ml/s e posição1 93
5.2.2.1.6 Velocidade longitudinal Q=300ml/s e posição2 96
5.2.2.1.7 Velocidade transversal Q=50ml/s e posição2 99
5.2.2.1.8 Velocidade transversal Q=150ml/s e posição2 101
5.2.2.1.9 Velocidade transversal Q=300ml/s e posição2 103
5.2.2.2 Plumas térmicas com corantes 105
5.3 Intrusões 112
5.3.1 Situação para vazão de 50ml/s 113
5.3.2Situação para vazão de 150ml/s 116
5.3.3Situação para vazão de 300ml/s 118
5.4 Correntes de fundo com obstáculos 120
5.4.1Escoamento em torno de obstáculos circulares 121
5.4.1.1Ensaio de corrente de fundo,Q=220ml/s e ϕ=200mm 125
5.4.1.2 Ensaio de corrente de fundo,Q=50ml/s e ϕ=200mm 126
5.4.1.3 Ensaio de corrente de fundo,Q=50ml/s e ϕ=50mm 127
5.4.1.4 Ensaio de corrente de fundo,Q=220ml/s e ϕ=50mm 128
5.4.1.5 Ensaio de corrente de fundo,Q=50ml/s e ϕ=100mm 129
5.4.1.6 Ensaio de corrente de fundo,Q=220ml/s e ϕ=100mm 130
5.4.1.7 Ensaio de corrente de fundo,Q=50ml/s e ϕ=60mm 131
5.4.1.8 Ensaio de corrente de fundo,Q=220ml/s e ϕ=60mm 132
5.4.2Escoamento em torno de barreiras 132
5.5 Singularidades 135
5.5.1Estrutura de escoamento na entrada do tanque 135
5.5.2Deslocamentos laterais em experimentos com plumas 139
5.5.3Assimetria nos experimentos com intrusões 140
5.5.4Considerações finais 142

6. Análise de resultados 144
6.1Plumas 144
6.1.1Situações p11, p21, p31 e ptt1 147

6.1.2Situações p12, p22, p32 ptt2 151
6.1.3Situações p13, p23, p33 e ptt3 154
6.1.4Comportamentos gerais 158
6.2Intrusões 159
6.2.1 Situação de escoamento na região com cisalhamento 164
6.2.2Relação complementar para largura e altura da corrente 173
6.2.3Discussão acerca das aproximações propostas 176
6.3Correntes de fundo em torno de obstáculos 178
6.4Comentários finais 179

7 Conclusões e recomendações 180
7.1Escoamentos superficiais (Plumas) 180
7.2Escoamentos intrusivos 181
7.3Corrente de fundo em torno de obstáculos 182
7.4Recomendações 183
Anexo A 184
Anexo B 204
Anexo C 214
Anexo D 231
Anexo E 280

7. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA 281

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Variação do coeficiente de carreamento (E) em função do número de Richardson (Ri) de Ellison e Turner (1959). 10

FIGURA 2 – Dados experimentais do coeficiente de carreamento (E) em função do número de Richardson (Ri) extraído de Barbosa (1999). 11

FIGURA 3 – Padrões de escoamento típicos para mistura de um jato flutuante (Jirka,G.H. "Physical Processes and Modeling Methodologies".). 13

FIGURA 4 – Esquema de escoamento de jato superficial flutuante em superfície inclinada de Safaie (1979) 16

FIGURA 5 – Ausência do ponto de destacamento de Atkinson (1993). 17

FIGURA 6 – Ocorrência do ponto de destacamento de Atkinson (1993). 17

FIGURA 7– Volume de controle para avaliação da equação do momentum de Atkinson,J.F.(1993). 18

FIGURA 8 – Divisões de parâmetros espaciais em regiões de diferentes padrões de escoamento Koh (1971). 20

FIGURA 9 - Definições das váriáveis utilizadas por Faust e Plate (1984). 21

FIGURA 10 – Esboço das dispersões do escoamento intrusivo em planta e lateral dos experimentos de Faust e Plate (1984). 22

FIGURA 11 – Vista geral da bancada experimental 27

FIGURA 12 – Receptor. 27

FIGURA 13 – Comporta de entrada. 28

FIGURA 14 – Suporte dos reservatórios. 29

FIGURA 15 – Quadro elétrico das bombas.. 30

FIGURA 16 – Estrutura de suporte para equipamento fotográfico e de vídeo 31

FIGURA 17 – Extravasor. 32

FIGURA 18 – Quadro de lâmpadas 34

FIGURA 19 – Condutivímetro 35

FIGURA 20 – Laser modelo LS 20 36

FIGURA 21 – Tubo Laser. 38

FIGURA 22 – Refrigerador 39

FIGURA 23 – Gerador do plano de luz 39

FIGURA 24 - Medidor de potência . 40

FIGURA 25 – Medida de potência na saída do raio Laser 40

FIGURA 26 – Obturador, fibra ótica e conversor 41

FIGURA 27 – Disposição geométrica entre a câmera CCD eo gerador do plano de luz 41

FIGURA 28 – Princípios do método VLPI 42

FIGURA 29 – Espessura da pluma para o ensaio p32 46

FIGURA 30 – Vista em planta da corrente de gravidade 48

FIGURA 31 caso a – Esquema para a 1ª declividade 49

FIGURA 31 caso b– Esquema para a 2ª declividade 50

FIGURA 32 – Densidades utilizadas no ensaio de intrusões 57

FIGURA 33 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p11 60

FIGURA 34 – Gráfico dos espalhamentos longitudinais e transversais para o ensaio p1161

FIGURA 35 – Velocidades médias longitudinais para o ensaio p11. 61

FIGURA 36 – Comportamento da velocidade média transversal do ensaio p11. 62

FIGURA 37 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p12 62

FIGURA 38 –Espalhamentos longitudinais e transversais do ensaio p12 63

FIGURA 39 – Velocidade média longitudinal para o ensaio p12 63

FIGURA 40 – Velocidade média transversal do ensaio p12 64

FIGURA 41 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p13 64

FIGURA 42 - Espalhamentos longitudinais e transversais do ensaio p13 65

FIGURA 43 - Velocidade média longitudinal para o ensaio p13 65

FIGURA 44 – Velocidade média transversal do ensaio p13 66

FIGURA 45 – Espalhamentos da pluma para o ensaio p21 66

FIGURA 46 – Espalhamentos longitudinais e transversais do ensaio p21 67

FIGURA 47 – Velocidade média longitudinal para o ensaio p21 67

FIGURA 48 – Velocidade média transversal do ensaio p21 68

FIGURA 49 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p22 68

FIGURA 50 – Espalhamentos da pluma para o ensaio p22 69

FIGURA 51 - Velocidade média longitudinal para o ensaio p22 69

FIGURA 52– Velocidade média transversal do ensaio p22 70

FIGURA 53 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p23 70

FIGURA 54 - Espalhamentos longitudinais e transversais da pluma para o ensaio p23 71

FIGURA 55 - Velocidade média longitudinal para o ensaio p23 71

FIGURA 56 – Velocidade média transversal do ensaio p23 72

FIGURA 57 – Gráfico da transparência pela distância para o ensaio p23. 72

FIGURA 58 – Variação da intensidade de luz com a distância para o ensaio p23 73

FIGURA 59 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p31 74

FIGURA 60 - Espalhamentos longitudinais e transversais da pluma para o ensaio p31 75

FIGURA 61 - Velocidade média longitudinal para o ensaio p31 75

FIGURA 62 – Velocidade média transversal do ensaio p31 76

FIGURA 63 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p32 76

FIGURA 64 - Espalhamentos longitudinais e transversais da pluma para o ensaio p32 77

FIGURA 65 - Velocidade média longitudinal para o ensaio p32 77

FIGURA 66 – Velocidade média transversal do ensaio p32 78

FIGURA 67 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p33 78

FIGURA 68 - Espalhamentos longitudinais e transversais da pluma para o ensaio p31 79

FIGURA 69 - Velocidade média longitudinal para o ensaio p33 79

FIGURA 70 – Velocidade média transversal do ensaio p33 80

FIGURA 71 – Disposição da câmera para a posição 2 82

FIGURA 72 – Posição 1, Q=50ml/s e foto Q1000.tif 84

FIGURA 73 – Campo instantâneo de velocidades para Q1000.tif e Q1001.tif para Q=50ml/s 84

FIGURA 74 – Campo médio de velocidades para Q=50ml/s (média sobre 1s) 85

FIGURA 75 – Vorticidade "média" para Q=50ml/s (média sobre 1s). 85

FIGURA 76 – Posição 2, Q=50ml/s e foto Qr000.tif 86

FIGURA 77 – Campo de velocidades para Qr000.tif e Qr001.tif para Q=50ml/s 87

FIGURA 78 – Campo médio (sobre 1s)de velocidades para Q=50ml/s e posição 2 87

FIGURA 79 – Vorticidade "média"(para 1s) para Q=50ml/s e posição 2 88

FIGURA 80 – Posição 1, Q=150ml/s e foto Qa2002.tif 89

FIGURA 81 – Campo de velocidades para Qa2001.tif e Qa2002.tif 89

FIGURA 82 – Campo médio (sobre 1s)de velocidades para Q=150ml/s e posição 1 90

FIGURA 83 – Vorticidade "média"(para 1s) para Q=510ml/s e posição 1 90

FIGURA 84 – Posição 2, Q=150ml/s e foto sold006.tif 91

FIGURA 85 – Campo de velocidades para sold005.tif e sold006.tif 92

FIGURA 86 – Campo médio (sobre 1s)de velocidades para Q=150ml/s e posição 2 92

FIGURA 87 – Vorticidade "média"(para 1s) para Q=150ml/s e posição 2 93

FIGURA 88 – Posição 1, Q=300ml/s e foto Vc000.tif 93

FIGURA 89– Campo de velocidades para Vc000.tif e Vc001.tif 94

FIGURA 90 – Campo médio (sobre 1s)de velocidades para Q=300ml/s e posição 1 94

FIGURA 91 – Vorticidade "média"(para 1s) para Q=300ml/s e posição 1 95

FIGURA 92 – Posição 2, Q=300ml/s e foto Qe000006.tif 96

FIGURA 93 – Campo de velocidades para Qe000005.tif e Qe00006.tif 96

FIGURA 94 – Campo médio (sobre 1s)de velocidades para Q=300ml/s e posição 2 97

FIGURA 95– Vorticidade "média"(para 1s) para Q=300ml/s e posição 2 97

FIGURA 96 – Detalhes da correlação cruzada para o ensaio pt2 e posição 1 98

FIGURA 97 – Posição 2, Q=50ml/s e foto qt2008.tif 99

FIGURA 98 – Campo de velocidades para qt2007.tif e qt2008 99

FIGURA 99 – Campo médio (sobre 1s)de velocidades para Q=50ml/s e posição 2 100

FIGURA 100 – Vorticidade "média"(para 1s) para Q=50ml/s e posição 2 100

FIGURA 101 – Posição 2, Q=150ml/s e foto qt1004.tif 101

FIGURA 102 – Campo de velocidades para qt1003.tif e qt1004.tif 101

FIGURA 103 – Campo médio (sobre 1s)de velocidades transversais para Q=50ml/s e posição 2 102

FIGURA 104 – Vorticidade "média"(para 1s) para Q=150ml/s e posição 2 102

FIGURA 105 – Posição 2, Q=300ml/s e foto qt7008.tif 103

FIGURA 106 – Campo de velocidades para qt7007.tif e qt7008.tif 103

FIGURA 107 – Campo médio (sobre 1s)de velocidades transversais para Q=300ml/s e posição 2 104

FIGURA 108 – Vorticidade "média"(para 1s) para Q=300ml/s e posição 2 104

FIGURA 109 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio ptt1 106

FIGURA 110 - Espalhamentos longitudinais e transversais da pluma para o ensaio ptt1 106

FIGURA 111 - Velocidade média longitudinal para o ensaio ptt1 107

FIGURA 112 – Velocidade média transversal do ensaio ptt1 107

FIGURA 113 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio ptt2 108

FIGURA 114 - Espalhamentos longitudinais e transversais da pluma para o ensaio ptt2 108

FIGURA 115 - Velocidade média longitudinal para o ensaio ptt2 109

FIGURA 116 – Velocidade média transversal do ensaio ptt2 109

FIGURA 117 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio ptt3 110

FIGURA 118 - Espalhamentos longitudinais e transversais da pluma para o ensaio ptt3 110

FIGURA 119 - Velocidade média longitudinal para o ensaio ptt3 111

FIGURA 120 – Velocidade média transversal do ensaio ptt3 111

FIGURA 121 – Estratificação em duas camadas para o ensaio de intrusão 113

FIGURA 122 – Fotos de uma intrusão formada com vazão de entrada de 50ml/s 114

FIGURA 123 – Intrusão formada para vazão de entrada de 50ml/s 115

FIGURA 124 – Foto de uma intrusão formada para Q=50ml/s 116

FIGURA 125 – Foto da dispersão de uma intrusão com vazão de entrada de 150ml/s 117

FIGURA 126 - Foto da dispersão de uma intrusão com vazão de entrada de 300ml/s 119

FIGURA 127 - Foto da dispersão de uma intrusão com vazão de entrada de 300ml/s 120

FIGURA 128 – Fotografia mostrando a acumulação de material a montante do cilindro (vazão de entrada de 50ml/s e diâmetro de 100mm) 122

FIGURA 129 – Esquema do que acontece a montante cilindro (comportamento Médio) 122

FIGURA 130 – Fotografia superior mostrando a acumulação de material a mon-Tante do cilindro 123

FIGURA 131 – Esquema do que acontece a montante do cilindro (vórtice com Geometria tipo ferradura – comportamento médio). 123

FIGURA 132 – Diagrama que mostra o movimento de uma mancha a jusante do obstáculo 124

FIGURA 133 – Corrente de fundo com vazão de 220ml/s e ϕ=200mm 125

FIGURA 134 - Corrente de fundo com vazão de 50ml/s e ϕ=200mm 126

FIGURA 135 - Corrente de fundo com vazão de 50ml/s e ϕ=50mm 127

FIGURA 136 - Corrente de fundo com vazão de 220ml/s e ϕ=50mm 128

FIGURA 137 - Corrente de fundo com vazão de 50ml/s e ϕ=100mm 129

FIGURA 138 - Corrente de fundo com vazão de 220ml/s e ϕ=100mm 130

FIGURA 139 - Corrente de fundo com vazão de 50ml/s e ϕ=60mm 131

FIGURA 140 - Corrente de fundo com vazão de 220ml/s e ϕ=60mm 132

FIGURA 141 – Corrente de fundo em torno de um objeto com geometria plana 134

FIGURA 142 – Obtenção da "mancha" clara a jusante da entrada do tanque 136

FIGURA 143 – Detalhes da "mancha" clara para as condições experimentais descritas 136

FIGURA 144 –Explicação simplificada da estrutura vista nas figuras 140 e 141. 137

FIGURA 145 a - Obtenção da "mancha" clara a jusante da entrada do tanque 138

FIGURA 145 b e c- Detalhes da "mancha" clara para as condições experimentais

descritas 138

FIGURA 146 – Três momentos de uma pluma com singularidade 140

FIGURA 147 Assimetria observada em experimento com intrusão. Vazão de 150 ml/s e temperaturas de 23^0C 142

FIGURA 148 – Domínio de cálculo com contornos adotados no presente estudo 145

FIGURA 149 – Comparação do espalhamento medido/calculado para a situação p11 147

FIGURA 150 – Comparação do espalhamento medido/calculado para a situação p21 147

FIGURA 151 – Comparação do espalhamento medido/calculado para a situação p31 147

FIGURA 152 – Comparação do espalhamento medido/calculado para a situação pt1 147

FIGURA 153 – Espalhamento longitudinal para os ensaios com plumas indicados 148

FIGURA 154 – Espalhamento transversal para os ensaios com plumas indicados 148

FIGURA 155 – Velocidades longitudinais médias para todos os ensaios de plumas 149

FIGURA 156 – Velocidades transversais médias para todos os ensaios de plumas 150

FIGURA 157 – Comparação do espalhamento medido/calculado para a situação p12 151

FIGURA 158 – Comparação do espalhamento medido/calculado para a situação p22 151

FIGURA 159 – Comparação do espalhamento medido/calculado para a situação p32 151

FIGURA 160 – Comparação do espalhamento medido/calculado para a situação ptt2 151

FIGURA 161 – Espalhamento longitudinal para os ensaios com plumas indicados 152

FIGURA 162 – Espalhamento transversal para os ensaios com plumas indicados 152

FIGURA 163 – Velocidades longitudinais médias para os ensaios de plumas indicados 153

FIGURA 164 – Velocidades transversais médias para os ensaios de plumas indicados 154

FIGURA 165 – Comparação do espalhamento medido/calculado para a situação p13 155

FIGURA 166 – Comparação do espalhamento medido/calculado para a situação p23 155

FIGURA 167 – Comparação do espalhamento medido/calculado para a situação p33 155

FIGURA 168 – Comparação do espalhamento medido/calculado para a situação ptt3 155

FIGURA 169 – Espalhamento longitudinal para os ensaios com plumas com Q=300ml/s 156

FIGURA 170 – Espalhamento transversal para os ensaios com plumas Com Q=300ml/s 156

FIGURA 171 – Velocidades longitudinais médias para os ensaios de plumas Com Q=300ml/s 157

FIGURA 172 – Velocidades transversais médias para os ensaios de plumas
Com Q=300ml/s 157

FIGURA 173 – Definição da região na qual se aplica o presente estudo 163

FIGURA 174 – Volume considerado para a formulação proposta 165

FIGURA 175 – Área da seção transversal em uma corrente de fundo 173

FIGURA 176 – Tendência à explosão da espessura para corrente atingindo um
Meio mais denso que ela própria 177

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Estimativa de dimensões de Lagoas de resfriamento para velocidade média U= 1,0m/s de Ericson (1997). 8

TABELA 2 – Valores das áreas analisadas 83

TABELA 3 – Experimentos conduzidos com obstáculos circulares 118

TABELA 4 – Tipos de regime equações para o desenvolvimento da corrente De fundo retirado de Barbosa (1999) 158

LISTA DE ABREVIATURAS

VDL	- Velocimetria a Doppler de Laser
VLPI	- Velocimetria a Laser por Processamento de Imagem
FIL	- Fluorescência Induzida por Laser
CRHEA	– Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada
CCD	- Camera Coupled Device
TVS	- Thermal Video System
DIPT	- Digital Image Processing Technique

LISTA DE SÍMBOLOS

A_s = razão de aspecto.

b = meia-largura.

b_o = largura da corrente na entrada.

b_d = meia-largura adimensional.

B_o = fluxo de diferença de densidade

C_D = coeficiente de arraste.

D = profundidade hidráulica.

E = coeficiente de carreamento.

f = coeficiente de atrito.

Fr_d = número densimétrico de Froude.

g = aceleração gravitacional.

g'_o = aceleração gravitacional reduzida na fonte.

h_c = espessura da corrente.

h_d = espessura do destacamento.

hi = espessura das camadas estratificadas.

H = altura total do canal.

k = coeficiente de troca de calor com a superfície.

K = coeficiente de troca de calor.

Kcr = coeficiente de troca de calor crítico.

M_o = quantidade de movimento específico.

Q_o = vazão na fonte

Rey = número de Reynolds

Ri = número de Richardson

Ri_n = número de Richardson normal.

S = ângulo de inclinação do fundo do canal.

S_1,S_2 = parâmetros de não uniformidade dos perfis de velocidade e densidade.

U = velocidade média.

u_o = velocidade de entrada do fluido.

u_c = velocidade da corrente.

x = direção longitudinal da corrente.

x_d = distância longitudinal do destacamento.

y = direção transversal da corrente.

z = direção vertical da corrente.

Símbolos gregos.

αj = constante de proporcionalidade entre velocidade de entrada do fluido ambiente e velocidade da corrente.

$\Delta T1/2$ = metade do valor da diferença máxima de temperatura.

ΔTmáx=máxima diferença de temperatura.

ρo = massa específica da corrente na fonte.

ρc = massa específica da corrente.

ρa = massa específica do fluido ambiente.

θ = ângulo de inclinação da corrente.

θb = ângulo de abertura da corrente.

ν = viscosidade cinemática.

Resumo

Silva, S. V.(2002) "Características de escoamentos decorrentes de diferenças de densidade". São Carlos, 2002.284p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Neste trabalho analisam-se escoamentos de correntes de densidade tipo plumas, intrusões e corrente de fundo em torno de obstáculos. Os experimentos foram realizados em duas fases. Na 1ª fase dos ensaios, a estratificação ambiente e a obtenção das correntes foram obtidas variando-se a densidade de soluções de água e sal. A visualização das correntes foi feita utilizando-se permanganato de potássio e sua dispersão foi obtida através do registro em câmera filmadora. Na 2ª fase, os ensaios de plumas foram realizados com equipamento a Laser de vapor de cobre (LVC) envolvendo o método de velocimetria a Laser por Processamento de Imagens (VLPI). Nesta fase, observou-se grande dificuldade na visualização das partículas do escoamento e foi necessário a confecção de um sistema de aquecimento de água para a obtenção do escoamento superficial. É apresentado um modelo númerico em linguagem FORTRAN baseado no método das diferenças finitas para discretização da equação de Navier-Stokes e a obtenção de velocidades longitudinais e transversais. Observou-se, neste trabalho, a importância da visualização do fenômeno de correntes superficiais e intrusivas, tendo em vista a extrema sensibilidade destes fenômenos para com as condições de trabalho (alterações sutis geram grandes diferenças no escoamento obtido). Pode-se concluir que o método VLPI produz resultados satisfatórios para o campo de vetores de velocidade. As correntes intrusivas apresentaram configurações diversas para mesmas condições de escoamento, o que demonstra a necessidade de maiores estudos. O modelo numérico se mostrou coerente para determinados experimentos, mas as condições particulares da entrada dos reservatórios mostra que há a necessidade de implementações para uma forma mais abrangente de situações.

Palavras-chave: Corrente de densidade; plumas; intrusões; velocimetria a Laser.

ABSTRACT

Silva, S. V.(2002) "Caracteristics of flows due density differences.". São Carlos, 2002.284p Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Unstable gravity currents flows like buoyant surface jet (BSJ), intrusions and dense currents around obstacles are analysed in this research. The experiments were performed in two phases. In the first one, the environmental stratification as well as the current flows were obtained varying the density of the water and salt solutions. The current visualization were possible by the use of the $KMnO_4$ dye and its dispersion was recorded by video camera. In the second phase , the runs with plumes were evaluated with a Laser Vapour Copper (LVC) equipment using the processing image velocimetry (PIV) method. In this phase, it was observed a great difficulty in the particle flow visualization and it was necessary a war water system to simulate overflow. It's presented a numerical model in fortran language based in the finit difference method to discretisize the Navier-Stokes equation and obtain the transversal and longitudinal velocities. It was noted in this research, the relevance of the visualization in overflows and intrusive flows because of the extreme sensitivity of these phenomenos to work conditions (slightly modifications generates great differences in the flow behaviour). It concludes that the PIV method results good data for vectors velocity field. The intrusive currents show many configurations to the same flow conditions which requires further investigations. The numerical model has shown coherance to particular experiments, but sourece particularities justifies the necessity of implementaion to larger situations.

Keywords : Density currents; plumes; intrusions; Laser velocimetry.

Capítulo1 – Introdução

Nota-se, atualmente, uma necessidade de se preservar e recuperar recursos naturais indispensáveis ao Homem visto os inúmeros danos ambientais trazidos pela evolução tecnológica. Diariamente, são jogadas toneladas de dejetos em corpos d'água e na atmosfera provenientes de atividades industriais e domésticas, além dos danos causados por acidentes ambientais (como por exemplo o derramamento de petróleo na Baía da Guanabara no Rio de Janeiro, as queimadas em florestas, entre outros). Os dejetos lançados em corpos dágua podem ter efeitos nocivos no meio ambiente, como o aumento da temperatura do corpo hídrico receptor, o decréscimo da massa específica e da viscosidade, a redução do oxigênio dissolvido, a aceleração das reações químicas e possíveis alterações no metabolismo, reprodução e crescimento de espécies aquáticas (Pinheiro e Ortiz, 1998).

A capacidade de diluição dos oceanos é grande, considerando a natural degradação e transformação de materiais. Todavia, as altas concentrações localizadas de poluentes podem causar impacto ambiental considerável. As regulamentações existentes se aplicam de acordo com níveis locais de poluição e limites específicos de concentração (que não se permite exceder). Por exemplo: contagem de coliformes fecais em praias ou quantidade mínima de oxigênio dissolvido para prática da pesca.

Os danos ambientais trazem conseqüências graves como racionamento de água, efeito estufa, deterioração da camada de Ozônio entre outros problemas que agridem ao Homem e a natureza em geral. Essas conseqüências podem se tornar irreversíveis, sendo que, com o atual nível de conhecimento , não sabemos qual é o " limite de reversibilidade ".

Analisando as regiões do campo próximo e campo distante da emissão do efluente, torna-se viável a construção de estruturas hidráulicas de deposição como canais submersos simples, difusores submersos múltiplos, canais superficiais etc, capazes de

controlar a quantidade de mistura e diluição inicial em pequeno espaço de tempo após o efluente ser depositado no oceano, além de oferecer equações preditivas que auxiliam na remoção contínua de material poluente do local de descarga (Jirka e Lee,1994)

A Engenharia Hidráulica (hoje vinculada a Hidráulica Ambiental) tem o escopo de prevenir ou minimizar os efeitos nocivos da poluição e promover processos de degradação e transformação. Os escoamentos gerados por fluidos de diferentes densidades são evidenciados através do estudo das correntes de densidade no ambiente de Fenômenos de Transportes, no campo da Geofísica, da Limnologia, Hidráulica Ambiental, etc. Tanto na natureza como nas atividades humanas encontram-se muitas situações de importância onde se verifica a ocorrência desses escoamentos. Como alguns exemplos, tém-se:

- Nas áreas costeiras da Groenlândia são encontrados os ventos katabáticos que se formam do contato de massas de ar com solo gelado e escoam ao longo da superfície causando danos à agricultura. Estes ventos podem carregar fumaça ou neblina que afetam a visibilidade em portos e aeroportos (Scorer,1954, Ball,1956 e Ellison e Turner, 1959);
- Entrada de rios e correntes em lagos ou áreas costeiras com densidades diferentes devido ao gradiente de temperaturas ou salinidades O encontro de estuários com o oceano ocasiona uma variedade de movimentos e fenômenos importantes para o meio ambiente (Stommel, 1953);
- Correntes túrbidas nos oceanos devido a acumulação de sólidos suspensos (Kuenen,1952);
- Tempestades de areia na atmosfera (Freeman,1952);
- Escoamento de gás metano ao longo do teto de galerias em minas de carvão;
- Escoamento de fragmentos de rochas, água e lava de erupções vulcânicas podem ser consideradas formas especiais de correntes de densidade (Alavian et al.,1992);
- Grandes emissários de esgoto em rios (Krebes, P.,1991);
- Processos de circulação de massas de água nos oceanos originando plumas estuarinas com padrões sazonais de circulação e distribuição;

- Avanço de frentes frias;
- Fenômeno de inversão térmica devido à poluição do ar;
- Processos de erosão devido à água das chuvas;
- Lançamento de dejetos aquecidos em rios e lagos através de condutos submersos horizontais podendo causar impactos prejudiciais à flora e a fauna aquática, Pinheiro, A.C.F.B.(1993).

A ocorrência de correntes de densidade tem conseqüências de significativa relevância em aplicações em reservatórios e no estudo da qualidade da água. Conhecendo o modo como os contaminantes (sais dissolvidos, excesso de calor, sólidos suspensos, substâncias químicas) são transportados e dissolvidos ao longo do reservatório, obtém-se os possíveis pontos de coleta de água de acordo com seus fins (Alavian et al. 1992). Outro exemplo ocorre na execução de projetos de decantadores de água ou esgoto, como mostram, por exemplo, os trabalhos de Krebs, P.(1991). Tendo em vista o atual aumento de produção de energia elétrica e conseqüente eliminação de calor na atmosfera ou em corpos d'água, faz-se necessário o estudo do comportamento destes efluentes para dimensionamento e eficiência de lagoas de resfriamento (Pinheiro, A.C.F.B.,1993), o custo de operação em usinas térmicas (Alavian et al. 1992) e o projeto de instalação de sistemas (Safaie, 1979).

As correntes de densidade são governadas por equações de quantidade de movimento, conservação de massa e conservação de volume, considerando os contornos sólidos e outras hipóteses de cálculo. Para uma melhor compreensão desse escoamentos, faz-se necessária uma avaliação empírica juntamente com aproximações analíticas ou numéricas.

No presente trabalho, efetuou-se um estudo experimental de correntes de densidade do tipo pluma e intrusões bidimensionais com entrada horizontal em reservatório inclinado e ambiente fluido estagnado, utilizando-se a técnica não-intrusiva de velocimetria a Laser por processamento de imagem (VLPI) para a previsão de seus efeitos. É importante frisar que os textos da literatura inicialmente estudados induziram a procedimentos que, com a obtenção dos primeiros resultados, mostraram-se apenas parcialmente adequados. Assim, o grau de sensibilidade deste tipo de escoamento para

com as condições externas não é registrado na literatura, mas é um aspecto de altíssima relevância para o estudo experimental. Apenas este fato isolado já mostra a importância de estudos experimentais convenientemente conduzidos, buscando-se todos os possíveis padrões de escoamento e os parâmetros que interferem na sua obtenção.

Nesta área de estudo, vale afirmar, a observação e a experimentação devem preferencialmente anteceder a modelação, uma vez que padrões de escoamento, e os limites dos parâmetros relevantes que impõem os diferentes padrões, são apresentados apenas tangencialmente na literatura, com alguma forma de "classificação" a ser melhor detalhada.

Capítulo 2 - Objetivos

O objetivo geral deste projeto foi de efetuar um estudo experimental acerca de escoamentos com densidade diferente da densidade do meio receptor, utilizando imagens estáticas (fotografias), imagens em movimento (filmes), visualização por diferenças de cores e visualização por velocimetria a Laser (métodos não intrusivos).

Os objetivos específicos podem ser assim arrolados:

- Estudar a evolução dos escoamentos menos densos e de densidade intermediária que o meio receptor;
- Verificar os padrões de escoamento em torno de obstáculos em escoamentos mais densos que o meio receptor.
- Coletar informações, como o campo de velocidades, a taxa de aumento de largura das plumas e intrusões, a evolução da espessura, a quantificação da diluição, as diferenças de concentrações, a localização dos pontos de separação
- Buscar modelos previsivos acerca das grandezas mencionadas.

Capítulo 3 - Revisão Bibliográfica.

As correntes de densidade se formam do contato de dois ou mais fluidos de diferentes densidades. Estes podem ser originados por diferentes salinidades, temperaturas concentração de sólidos dissolvidos ou sedimentos em suspensão, etc.

A distribuição temporal e espacial de uma corrente de densidade decorre de diferentes mecanismos de transporte de massa. Esses mecanismos são determinados por condições de descarga do efluente e por condições ambientais, que interagem para estabelecer o comportamento da corrente. As condições de descarga envolvem as características geométricas, o fluxo de diferença de densidade (B_0) e quantidade de movimento específico (M_0), vazão, localização, orientação e submersão. Os parâmetros B_0 e M_0 são definidos como:

$$B_0 = g'_0 * Q_0 \tag{3.1}$$

sendo B_0 = fluxo de diferença de densidade (do inglês "buoyancy flux).

Q_0 = vazão na fonte.

g'_0 = aceleração gravitacional reduzida

$$g'_0 = \frac{g * (\rho_a - \rho_c)}{\rho_a} \tag{3.2}$$

onde g = aceleração da gravidade.

ρ_a = massa específica do fluido ambiente

ρ_c = massa específica da corrente.

$$M_0 = Q_0 * u_0 \tag{3.3}$$

sendo M_0 = quantidade de movimento específico.

u_0 = velocidade de entrada do fluido.

As condições ambientais são descritas por parâmetros geométricos (seção transversal, declividade, forma, batimetria), por características dinâmicas e de distribuição de densidade. Estas características são afetadas por fatores como a influência de marés, correntes de ventos e ondas, correntes secundárias devido a efeito topográfico, influências baroclínicas entre outras. Assim, a corrente de densidade, ao entrar num ambiente de pouca influência de marés, poderá sofrer pouca mistura e apresentar um quadro de estratificação com duas camadas,(são os estuários denominados de bem estratificados),ou então, quando houver uma forte mistura, os gradientes de densidade poderão existir somente na direção horizontal.

Os processos hidrodinâmicos de mistura nas correntes de densidade são estudados analisando as regiões de campo próximo e campo distante da emissão do efluente. No campo próximo, as condições de descarga influenciam a trajetória e mistura da corrente enquanto que, no campo distante, as condições ambientais controlam a trajetória e a diluição devido à turbulência. A ordem de magnitude da profundidade hidráulica é tipicamente usada para definir as dimensões da região ativa. Há, entre os campos próximo e distante, uma terceira região, denominada de região intermediária ou região de ligação, cujos fenômenos físicos importantes são o arraste do fluido ambiental, o empuxo, a superfície de resfriamento e a convecção (Ortiz e Pinheiro, 1998).

Um exemplo da importância das considerações aqui tecidas é, por exemplo, dado pelas configurações para usinas termelétricas do sistema aberto de resfriamento, como mostra a tabela 1.

Usina	Empresa	Potência (MW)	Emissários	Largura	Comprimento	Área
Corumbá -I	Enersul	34,4	4	19	15	285
Corumbá -II	Enersul	23,5	4	19	15	285
Campo Grande -I	Enersul	35	4	19	15	285
Campo Grande -II	Enersul	35	4	19	15	285
Campo Grande -III	Enersul	30	4	19	15	285
Corumbá - III	Enersul	34,4	4	19	15	285
Corumbá - IV	Enersul	23,5	4	19	15	285
Campo Grande - IV	Enersul	35	4	19	15	285
Campo Grande - V	Enersul	35	4	19	15	285
Campo Grande - VI	Enersul	30	4	19	15	285
Campo Grande - VII	Enersul	35	4	19	15	285
Campo Grande - VIII	Enersul	35	4	19	15	285
Campo Grande - IX	Enersul	30	4	19	15	285
Piratinga	ELP	2x350	57	271	15	4065
Carioba	CPFL	300	25	119	15	1785

Tabela 1 – Estimativa de dimensões de Lagoas de resfriamento para velocidade média U= 1,0m/s de Ericson (1997).

O exemplo citado é apenas uma ilustração que mostra que a Engenharia Hidráulica está adequando o seu escopo para prevenir ou minimizar os efeitos nocivos da poluição e promover processos de degradação e transformação

O efluente, ao ser emitido em ambiente fluido, possui movimento turbulento que origina uma zona de alta turbulência. A largura desta zona aumenta à medida que o fluido ambiente se incorpora à corrente. Esta entrada de fluido ambiente é determinada através do coeficiente de carreamento E.

A idéia de um coeficiente de carreamento constante foi explicitada por Morton, Taylor e Turner (1956). Morton (1959) estendeu esta teoria para plumas forçadas (ou jatos flutuantes) emitidas com grande quantidade de movimento inicial. Até então os escoamentos estudados eram considerados casos neutros, onde os contornos da região turbulenta eram verticais, desconsiderando a ação dos gradientes de densidade em inibir a mistura. No entanto, a zona de mistura numa corrente densa inclinada deixa de ser vertical e os gradientes de densidade afetam os valores do coeficiente de carreamento.

Ellison e Turner (1959) realizaram experimentos de laboratório com escoamentos superficiais e de correntes densas inclinadas e concluíram que E é uma função monotônica decrescente do número de Richardson (Ri), sendo estes parâmetros definidos como:

$$E = \frac{1}{uc} * \frac{d(u_c h_c)}{dx} \tag{3.4}$$

sendo E = coeficiente de carreamento.

u_c = velocidade da corrente.

h_c = espessura da corrente.

x = direção longitudinal da corrente.

$$Ri = \frac{g' * h_c * \cos\theta}{u_c} \tag{3.5}$$

sendo Ri = número de Richardson

θ = ângulo de inclinação da corrente.

A figura 1 mostra uma queda rápida dos valores de E à medida que Ri aumenta. No campo próximo, Ri < 1 e ocorre uma grande entrada de fluido ambiente na corrente acarretando uma grande mistura, enquanto que no campo distante, Ri local ≥ 1 ocasionando pouca mistura. Wilkson e Wood (1971) interpretaram a primeira região como uma região de "ajuste" do escoamento, onde ocorre uma espécie de salto hidráulico e a perda de energia cinética da corrente é responsável pela mistura.

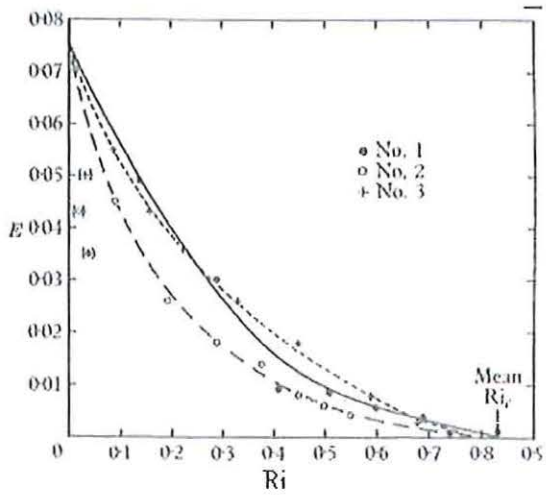


Figura 1 – Variação do coeficiente de carreamento (E) em função do número de Richardson (Ri) de Ellison e Turner (1959).

O coeficiente de carreamento utilizado por Ellison e Turner (1959) pode ser aproximado por:

$$E = 0{,}075 * \left[\frac{2}{1 + \left(\frac{Ri}{0{,}85} \right)} - 1 \right]^{1{,}75} \qquad \text{para} \Rightarrow 0 \leq \text{Ri} \leq 0{,}85 \tag{3.6}$$

$$E > 0{,}85 \qquad \text{para} \Rightarrow \text{Ri}=0$$

O número de Richardson pode indicar o estabelecimento de um escoamento estratificado. Portanto, grandes valores de Ri correspondem a uma estratificação estável e conseqüentemente, a uma redução no transporte vertical de quantidade de movimento (Ortiz e Pinheiro, 1993).

Barbosa (1999) elaborou um gráfico com dados experimentais do coeficiente de carreamento (E) de diversos autores como mostra a figura 2 e observou-se uma razoável dispersão em relação às proposições empíricas adotadas. Barbosa (1999) comenta que a dispersão apresentada pode ter sido ocasionada devido ao fato de que a obtenção de E foi feita por meio da equação da continuidade

adaptada a uma entrada de fluido do meio ambiente receptor no corpo da corrente de fundo, entrada esta que se baseia somente nos valores da velocidade preponderante do escoamento devido ao fato regime de pouca quantidade de movimento. Ainda ressalta que as dispersões observadas podem ter sido ocasionadas por erros de avaliação de volumes de fluido que penetram na corrente contínua e por demais erros experimentais.

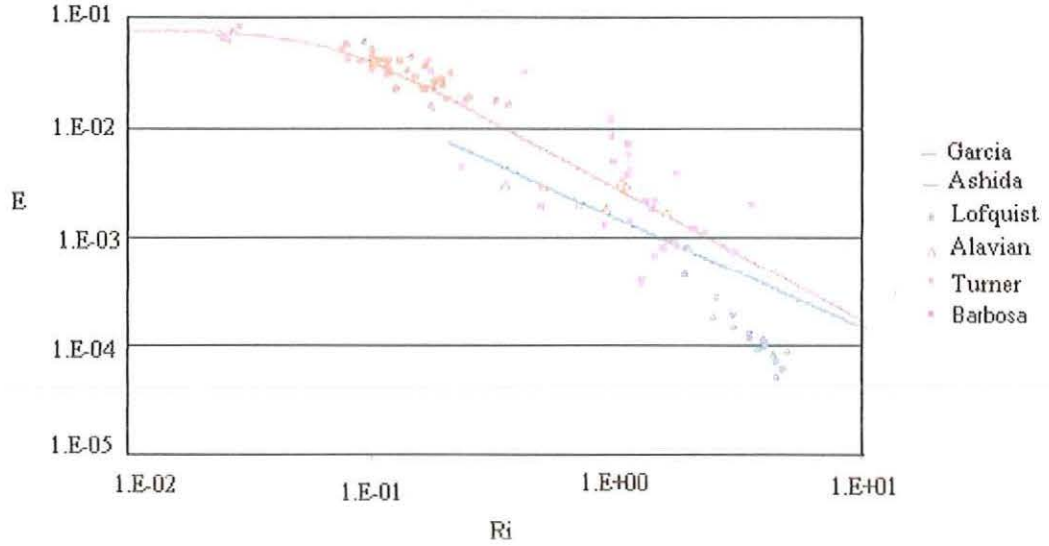


Figura 2 – Dados experimentais do coeficiente de carreamento (E) em função do número de Richardson (Ri) extraído de Barbosa (1999).

Em geral a equação da quantidade de movimento para uma corrente densa inclinada pode ser escrita como (Turner,1979):

$$\frac{d(U^2 h_c)}{dx} = -C_D U^2 - 0{,}5\frac{d(S_1 g' hc^2 \cos\theta)}{dx} + S_2 g' h_c \operatorname{sen}\theta \qquad (3.7)$$

sendo U = velocidade média da corrente.

h_c = espessura da corrente.

C_D = coeficiente de arraste.

S_1 e S_2 = constantes de perfis definidos como:

$$S_1 g' h^2 = \int_0^\infty 2g' z dz$$

$$S_2 g' h = \int_0^\infty g' dz$$

sendo z a direção vertical.

Os termos do lado direito da equação 3.7 representam o arraste turbulento devido ao atrito com o fundo; a força de pressão na corrente devido a sua mudança de espessura; a força de gravidade que acelera a corrente, respectivamente.

Há um valor particular de Ri (denominado de Richardson normal = Ri_n), determinado pela declividade e pelo atrito, que torna nulo os valores do lado direito da equação 3.7 e faz com que Ri se torne uma constante ao longo da inclinação do fundo. No entanto, é necessário se obter S_1 e S_2 para então calcular Ri_n através da equação 3.8:

$$\frac{dh}{dx} = E(Ri_n) \tag{3.8}$$

Valores maiores que Ri_n tornam a mistura desprezível. Ellison e Turner sugerem $Ri_n = 0{,}83 \pm 0{,}10$. À medida que se aumenta o valor de E, aumenta-se a diluição da corrente.

Uma corrente de densidade emitida num ambiente fluido pode assumir comportamentos diversos tais como: **jatos**, onde a grande quantidade de movimento inicial causa a mistura turbulenta, **plumas**, onde o fluxo de diferença de densidade a dirige para acelerações verticais locais e então para a mistura turbulenta, **jatos flutuantes**, ou plumas forçadas onde a combinação de quantidade de movimento inicial e o fluxo de diferença de densidade são os responsáveis pela mistura, **intrusões**, onde o escoamento ocorre na interface de um sistema estratificado, **correntes densas ou correntes de fundo,** que se propagam ao longo do fundo do

canal. A literatura mostra-se rica na terminologia adotada para cada uma das situações, havendo sobreposição de termos.

A figura 3 mostra o comportamento de um jato flutuante segundo condições de descarga e condições ambientais. Os jatos flutuantes são caracterizados por uma zona turbulenta estreita com intensa mistura. Estes assumem trajetórias curvas quando emitidos em ambiente estagnado não estratificado, dependendo da orientação do duto e direção da aceleração como no caso a. O jato então é afetado pelas condições ambientais que o defletem gradualmente na direção das correntes ambientais, como no caso b. De acordo com a estratificação pode haver um aprisionamento do fluido, como mostra o caso c, e, finalmente, quando o jato flutuante é emitido através de difusores múltiplos, ocorrem interações entre os jatos com formação de um escoamento plano como visto no caso d da figura 3.

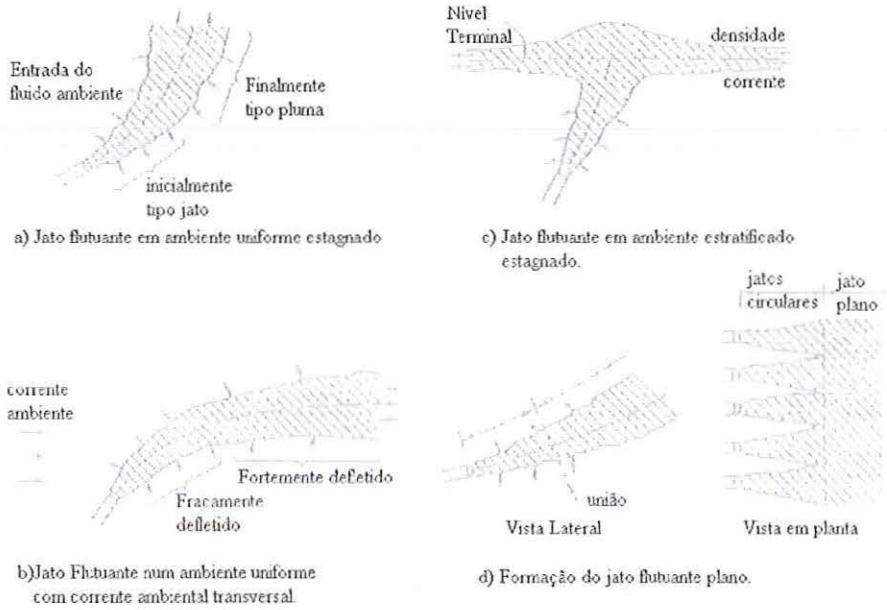


Figura 3 – Padrões de escoamento típicos para mistura de um jato flutuante (Jirka,G.H., notas de curso "Physical Processes and Modeling Methodologies".).

Na formação de escoamento superficial, as forças originárias da diferença de densidade são maiores que as forças advectivas e há o espalhamento da corrente. Os

parâmetros importantes no estudo de escoamentos superficiais são a determinação da região de separação, a espessura da corrente e as componentes da velocidade de acordo com as hipóteses simplificadoras da classificação geométrica do escoamento.

É possível que um mesmo escoamento apresente múltiplas configurações ao longo do canal, dependendo das condições de descarga e ambientais existentes. Dentre estes fenômenos surgem as "picnoclinas", que são correntes de mudança rápida de densidade e que são consideradas contornos internos. Estas correntes surgem principalmente onde há o aprisionamento do escoamento como no caso d da figura 3.

No fluido ambiente receptor pode-se observar três camadas denominadas epilimnion, metalimnion e hypolimnion cujas temperaturas possuem determinados comportamentos de acordo com a profundidade (Matsumara Tundisi et alii, 1979). As termoclinas são planos de taxa máxima de decréscimo de temperatura com a profundidade, que limita a ação dos ventos no processo de mistura.

O escoamento de uma corrente de densidade num canal está sob influência dos contornos, que são: a superfície sob pressão atmosférica, o fundo do canal caracterizados pelo coeficiente de atrito e declividade (S), e as "picnoclinas". Os processos de mistura interagindo com os contornos podem ser graduais, suaves ou abruptos e podem influenciar significantemente as condições de descarga do efluente classificando-as em condições estáveis e instáveis.

As condições de descarga estáveis usualmente ocorrem de uma combinação de escoamentos com alto fluxo de diferença de densidade, baixa quantidade de movimento específica e águas profundas (também conhecidas como condições de águas profundas), enquanto as condições instáveis são obtidas com baixo fluxo de diferença de densidade e em águas rasas.

Os processos de mistura da região passiva são caracterizados pelo movimento de advecção longitudinal das correntes ambientais na corrente previamente diluída. A dispersão da corrente nesta região surge devido às forças de gravidade causadas pelo gradiente de densidade. Estas forças podem espalhar rapidamente a corrente lateralmente em largas distâncias com pequenas espessuras, particularmente no caso

de ambiente fortemente estratificado. Se a corrente possui baixos valores de B_0 e ambiente uniforme, não há espalhamento na região passiva, somente uma região de difusão.

Dependendo do tipo de região ativa e estratificação ambiente, o espalhamento da corrente na região passiva pode ocorrer na superfície, no fundo do canal, na interface ou no nível terminal de um ambiente continuamente estratificado (caso c da figura 3).

Safaie (1979) realizou um estudo experimental sobre jatos flutuantes com altas temperaturas emitidos horizontalmente sobre superfície inclinada e, por análise dimensional, verificou que a corrente flutuante é caracterizada por dois parâmetros adimensionais: número densimétrico de Froude (Fr_d) e razão de Aspecto (As) em escoamento com altos valores do número de Reynolds (Rey). Estes parâmetros foram definidos por:

$$Fr_{d0} = \frac{u_0}{\sqrt{g' h_0}} \tag{3.9}$$

onde Fr_{d0} = número densimétrico de Froude na fonte.

u_0 = velocidade da corrente na fonte.

h_0 = espessura da corrente na fonte.

$$As = \frac{h_0}{b_0} \tag{3.10}$$

sendo b_0 = meia-largura da entrada.

$$\mathrm{Re}\,y = \frac{u_0 h_0}{\nu} \tag{3.11}$$

sendo Rey = número de Reynolds.

ν = viscosidade cinemática.

O autor apresentou seus resultados em termos de parâmetros integrais convencionais representante de jatos turbulentos, tais como linha de centro e meia-largura. Esta última é definida como a distância lateral entre dois pontos na pluma , sendo o 1º ponto correspondente à máxima diferença de temperatura entre o jato

flutuante e o fluido ambiente (que ocorre na linha de centro) e o $2^{\underline{0}}$ ponto correspondente à metade da diferença máxima de temperatura como mostra a figura 4

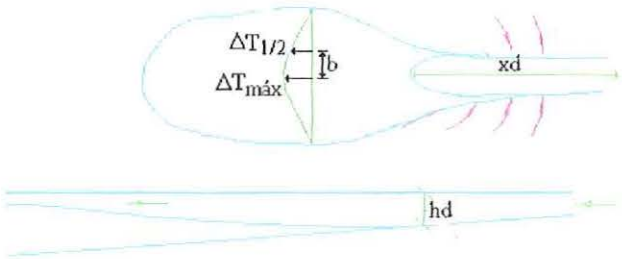


Figura 4 – Esquema de escoamento de jato flutuante em superfície inclinada de Safaie (1979)

Baseado em suas observações o autor observou que o padrão do escoamento mudava consideravelmente com a variação de Fr_d e o classificou em três grupos:

- Padrão baixo de escoamento ($Fr_d \leq 3$), onde o fenômeno dominante era o espalhamento não permanente da corrente com região de destacamento pequena ou inexistente e uma periodicidade também observada por Sacrpace e Green(1973);
- Padrão médio ($3 \leq Fr_d \leq 10$), onde a característica dominante era a formação de um núcleo turbulento estável e permanente a montante da região de destacamento. À jusante desta, o escoamento apresentava característica de um escoamento dirigido não instável;
- Padrão alto($Fr_d > 10$), houve formação de dois vórtices de larga escala logo após a emissão da corrente no ambiente fluido e conseqüente aumento dos mesmos à medida que se distanciavam da fonte.

Safaie concluiu que a dispersão lateral do jato não varia monotonicamente com Frd_c, devido a formação de vórtices de larga escala e do comportamento instável da corrente dirigida. Concluiu que a região de destacamento ocorre quando $Fr_{d0}>2,45$ e S=15% e sugeriu uma equação para a previsão, na forma :

$$h_d = 0,914 * (Frd)^{0,5} * h_0 \qquad (3.12)$$

onde h_d = espessura da corrente no ponto de destacamento.

Safaie ainda concluiu que na região dominada pela quantidade de movimento, não existem padrões únicos de perfis de velocidade e de temperatura e que estes dependem da declividade do fundo (S) e da razão de aspecto (As).

Atkinson (1993) estudou o destacamento de um jato flutuante emitido horizontalmente em ambiente fluido inclinado para previsão de diluição e das características de dispersão da corrente. A figura 5 mostra um caso de ausência de ponto de destacamento e a figura 6 mostra a ocorrência deste ponto.

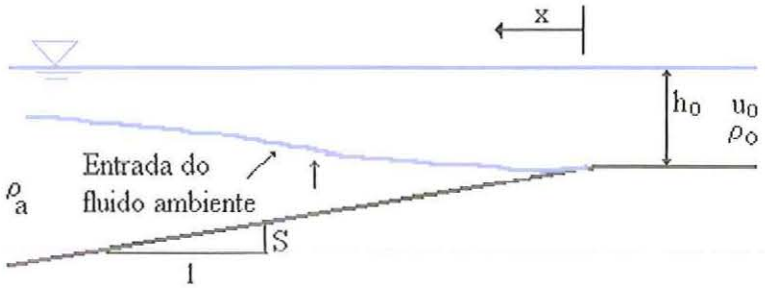


Figura 5 – Ausência do ponto de destacamento de Atkinson (1993).

Observa-se, na figura 5, pouco ou nenhum contato do jato flutuante com o fundo do canal (ausência de ponto de destacamento). Ocorre entrada de fluido ambiente pelas laterais e abaixo da corrente, variando longitudinalmente sua densidade. Os valores de E são maiores quando a região de destacamento é pequena ou ausente (Baddour e Chu,1975). As forças gravitacionais tendem a decrescer o coeficiente de carreamento (Ellison e Turner, 1959). Após a passagem de uma região dominada pela quantidade de movimento, o jato espalha-se devido ao fluxo de diferença de densidade (B_0).

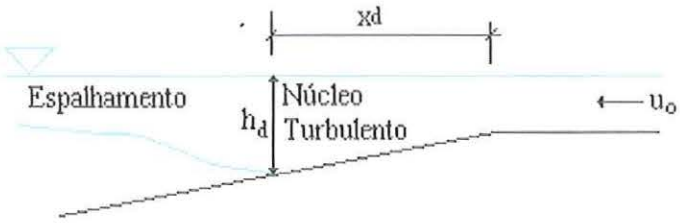


Figura 6 - Ocorrência do ponto de destacamento de Atkinson (1993).

A figura 6 mostra um jato flutuante emitido com grande quantidade de movimento que forma um núcleo turbulento (observado por Safaie no padrão médio de escoamento) e se destaca do fundo do canal. A profundidade e a distância de destacamento são denominados de h_d e x_d respectivamente. Devido ao contorno inferior, a entrada de fluido ambiente somente se verifica pelas laterais da corrente.

Atkinson (1993) utilizou o volume de controle apresentado na figura 7 para a determinação de uma equação de previsão do valor de h_d, como sendo:

$$\frac{h_d}{L_s} = 0{,}04 * \frac{S^{0.65}}{Frd_0 As^{0.15} C_D^{\ 0.55} \alpha_j} \qquad (3.13)$$

onde $L_s = h_0 \left(\frac{2Frd_0 + 1}{2Frd_0^{\ 2/3}} \right)$ para geometrias bidimensionais.

α_j = constante de proporcionalidade entre velocidade de entrada do fluido ambiente e velocidade da corrente.

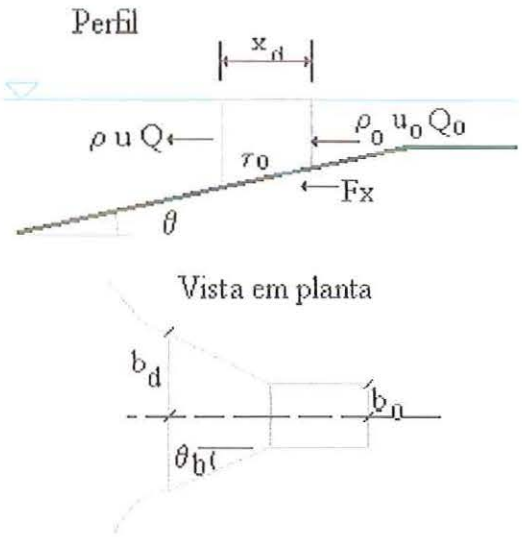


Figura 7 – Volume de controle para avaliação da equação do momentum de Atkinson,J.F.(1993).

Atkinson concluiu que a espessura da corrente no destacamento varia com o inverso de Frd_0, decrescendo com o aumento de E e com o atrito no fundo, mas crescendo com a declividade.

Koh (1971) apresentou um trabalho sobre a mistura e dispersão de jatos flutuantes bidimensionais emitidos horizontalmente em ambiente estratificado estagnado, onde B_0 é devido à diferença de temperaturas. Observou-se a divisão do campo do escoamento em quatro zonas, a saber:

Zona 1 : região de estabelecimento do escoamento.

Zona 2 : região super-crítica, onde o escoamento do jato flutuante ocorre com diminuição do E.

Zona 3 : região de salto hidráulico interno.

Zona 4 : região sub-crítica, onde os fenômenos dominantes são as tensões cisalhantes com a interface e a troca de calor com a superfície.

Notou-se que nem todas essas zonas poderiam ocorrer. Quando o coeficiente de troca de calor (K) for muito alto, haverão somente as zonas 1 e 2, pois com a perda de calor para a atmosfera, a corrente deixa de ser leve e não flutua. Por outro lado, se K for pequeno, poderá ocorrer inundação da fonte com aparecimento somente da zona 4.

Estabeleceu-se dois valores críticos para o coeficiente de troca de calor (K) na obtenção das zonas anteriormente citadas. Assim se:

$K > Kcr+$ $\Rightarrow$somente zonas 1 e 2.

$K < Kcr-$ $\Rightarrow$somente zona 4.

$Kcr- < K < Kcr+$ $\Rightarrow$todas as zonas estarão presentes.

Koh (1971) desenvolveu um modelo matemático para prever o aparecimento destas zonas e identificar a localização do salto hidráulico (ponto de destacamento). O autor observou que os parâmetros de Frd_0, Rey_0 e K exercem importância não somente na descrição quantitativa do campo de escoamento, mas também do tipo de escoamento, originando-se o gráfico da figura 8.

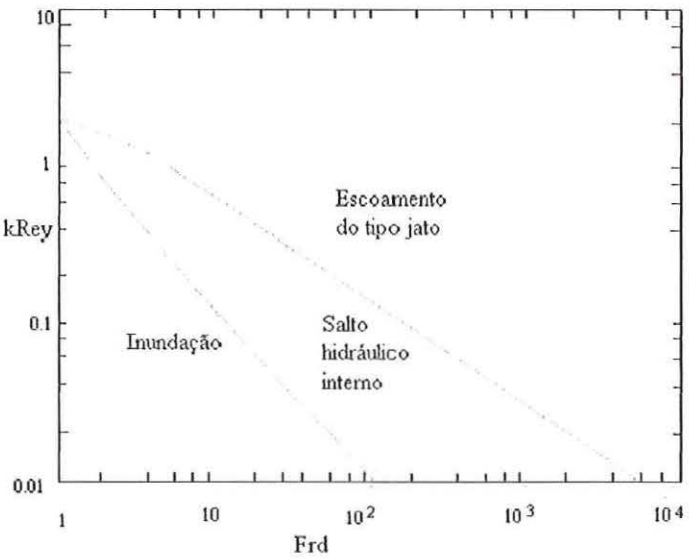


Figura 8 – Divisões de parâmetros espaciais em regiões de diferentes padrões de escoamento Koh (1971).

Na figura 8 foi utilizado o coeficiente de troca de calor com a superfície, adimensionalizado como $k=K/u_0$. A linha superior da figura 7 indica a relação $k*Rey \cong 2{,}9*(Frd_0)^{-0{,}655}$. Observou-se que para $k*Rey>2{,}9*(Frd_0)^{-0{,}655}$, o escoamento é do tipo jato. Para k*Rey menor que o valor crítico dado pela linha inferior da figura 8, ocorrerá inundação da fonte. Para valores de k*Rey entre essas duas linhas, o escoamento consistirá de um jato próximo a fonte e com comportamento estratificado em duas camadas no campo distante, ocorrendo um ressalto hidráulico entre essas duas regiões. Nota-se entretanto que o autor usou valores constantes para K e para viscosidade, sendo estes dependentes de outras variáveis, como o tempo e velocidade do vento.

Faust e Plate (1984) realizaram um estudo experimental sobre a influência da interface na forma e velocidade das frentes de correntes intrusivas em ambiente estratificado por variação da densidade. O perfil de densidade foi obtido através de um medidor de condutividade e o corante utilizado para a visualização das correntes foi "Nigrosin". Os autores puderam observar que para espessuras da interface de $\delta/D \cong 0{,}5$ (onde δ é a espessura da interface e D é a profundidade hidráulica) ocorriam instabilidades e intensa mistura a jusante da máxima espessura da corrente, fenômeno

também observado por Britter e Simpson (1981). Para $\delta/D \cong 0{,}25$ a corrente apresentava um comportamento tipo onda, contradizendo a previsão teórica de Holyer e Huppert (1980). Os autores concluíram que para espessuras da interface $(\delta/D) < 0{,}165$, o escoamento se torna instável e super-crítico, com intensa mistura a jusante da cabeça da corrente. Escoamentos em interfaces com espessuras $\delta/D > 0{,}165$ apresentam uma frente estável, sem mistura e subcrítico.

Ressalta-se aqui que o número densimétrico de Froude utilizado pelos autores foi obtido pelas variáveis definidas na figura 9 como sendo:

$$Frd = \frac{vi}{\sqrt{0{,}5g\dfrac{\Delta\rho}{\rho}hi}} \tag{3.14}$$

onde vi = velocidades do escoamento reverso.

g = aceleração da gravidade.

hi = espessuras das camadas estratificadas.

ρ = massa específica da substância.

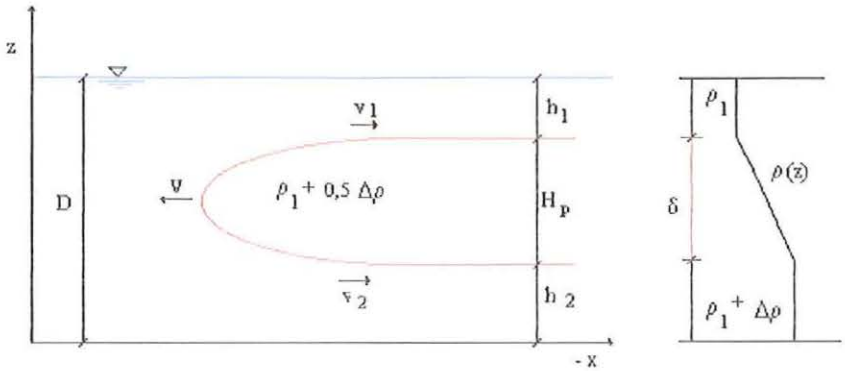


Figura 9 - Definições das variáveis utilizadas por Faust e Plate (1984).

Moretti e McLaughlin (1976) realizaram um estudo sobre modelagem hidráulica para destratificação mecânica de lagos e reservatórios. Foi observado pelos autores que, para reproduzir as condições do escoamento do protótipo no modelo, foi necessário a utilização de dois números de Richardson. Assim, houve boa similaridade dos escoamentos num canal com distorção na escala vertical, utilizando-

se $Ri_1 = \dfrac{g\Delta\rho\, H}{\rho\, U^2}$, onde H - altura total do canal e U a velocidade principal na direção longitudinal . Similarmente, a dispersão do escoamento pode ser modelada se $Ri_2 = \dfrac{g\Delta\rho\, w^2}{\rho\, U^2 H}$, (onde w - largura de entrada) for usado como o parâmetro básico de modelagem. A figura 10 mostra um esboço para o campo de escoamento dos ensaios realizados.

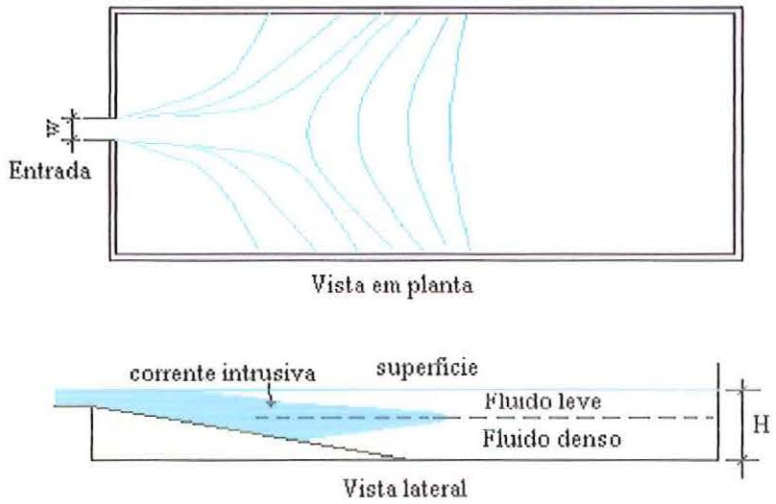


Figura 10 - Esboço das dispersões do escoamento intrusivo em planta e lateral dos experimentos de Faust e Plate (1984).

Os autores concluíram que Ri_1 é o parâmetro adimensional apropriado para generalizar os resultados similares aos escoamentos que ocorrem no campo distante, quando da destratificação mecânica através de bombas.

A visualização de imagens tem sido utilizadas em todos os trabalhos desta área (a revisão aqui apresentada é de estudos com visualização). Métodos clássicos, como o uso de fotografias de frentes de manchas poluentes (ou correntes de densidade) por intervalos de tempo fixos, permitiram, quando desejado, a avaliação das velocidades dessas frentes.

Contudo, a quantificação da velocidade ou do campo de velocidades de forma direta, entendendo-o como um elemento que interage com a pluma (corrente de densidade), não é prática muito comum. Isto se deve, com certeza à complexidade

envolvida em medidas desse tipo. Ainda hoje, com as técnicas modernas, dificuldades experimentais podem ser observadas.

Atualmente, é visto um considerável aumento do uso de equipamentos a laser para a visualização de fenômenos em diversas áreas científicas, tais como na Física, na Medicina, na Engenharia, na Química, etc. O uso de técnicas não-intrusivas oferece a vantagem de se obter características do fenômeno estudado através de suas imagens e da devida análise espectral, oferecendo continuidade espacial. Na Engenharia Hidráulica obtém-se parâmetros hidrodinâmicos relevantes dos escoamentos sem afetá-los com a introdução de sondas ou outros dispositivos que perturbam suas características como linhas de corrente, velocidades, vorticidades, tensões turbulentas, etc. Dentre essas técnicas, ressaltam-se a velocimetria a doppler de laser (VDL), velocimetria a laser por processamento de imagem (VLPI) e a fluorescência induzida por laser (FIL), entre outras. Basicamente, analisa-se o escoamento que atravessa uma região iluminada pelo feixe de laser e, através de softwares específicos, faz-se o processamento das imagens capturadas por equipamento fotográfico e de vídeo. No presente trabalho a VLPI é utilizada como complemento às técnicas tradicionais de imagens instantâneas e imagens em movimento obtidas com o uso de corantes em água. Assim, é feita uma breve revisão de trabalhos que utilizaram esta técnica.

Jirka (1992), utilizou a técnica VDL para obter medidas de velocidades de escoamentos de jatos em águas rasas e pôde observar que uma vez que a largura do jato superasse a profundidade do ambiente fluido, os espectros de energia das flutuações de velocidade se tornam progressivamente diferentes e concluiu que os escoamentos distantes da fonte, de grande escala de flutuações, são caracterizados pela dependência com o Número de Ondas. Chen e Jirka (1991), utilizaram a técnica FIL para o estudo de estruturas coerentes (coherent structures), que são escoamentos turbulentos em superfície livre que apresentam movimentos periódicos em larga escala, tais como esteiras e camadas de misturas e observaram, pela análise espectral, uma intermitência em larga escala, característica para tais escoamentos.

Barbosa (1999) apresentou tese de doutorado sobre correntes densas escoando em reservatórios com fundo inclinado e ambiente fluido estagnado. Realizou experimentos laboratoriais envolvendo o método VLPI, mostrando a unidimensionalidade de vetores, zonas de alta turbulência e outras características hidrodinâmicas do escoamento de correntes densas em ambiente fluido inclinado e estagnado. Para tanto utilizou um equipamento a Laser de vapor de cobre, da marca OXFORD, modelo LS-20 com 10 KHz de freqüência e 20 W de potência, com comprimentos de emissão de onda de 510,6 e 578,2 nm e uma câmera CCD (charged doupled device) de resolução de 1K X 1K. O autor fez seus registros numa região de 640x480 pixels e usou uma substância fluorescente para visualização e germinação de partículas.

No presente trabalho, são utilizados a mesma canaleta e o mesmo equipamento a Laser utilizado por Barbosa. No capítulo de materiais e métodos há a descrição dos equipamentos e comparações com o estudo deste autor.

Gao e Shuto (1991), apresentaram um estudo experimental sobre escoamentos superficiais do tipo jato, originados por um sistema de aquecimento de água e introduzidos numa canaleta horizontal. Estes autores utilizaram uma técnica não intrusiva denominada TVS (Thermal Video System - Sistema de Vídeo Termal) que possibilitou a digitalização e visualização das temperaturas de superfícies com a análise do espectro de energia.

Wang e Yu (1991), utilizaram técnica de processamento de imagem digital (DIPT- Digital Image Processing Technique) para aplicações em Hidráulica Ambiental. Esta técnica possibilitou a obtenção de campos de velocidade e concentração através da análise da distribuição dos tons de cinza da imagem digital.

Walker, Chen e Willmarth (1994) realizaram um estudo sobre a interação do escoamento turbulento com a superfície livre, para o monitoramento do tráfego marítimo. Estes autores utilizaram três diferentes técnicas de visualização para determinar características qualitativas de jatos com três diferentes diâmetros.

A 1ª técnica utilizada foi a de sombreamento de imagem (Shadowgraph imaging) para visualização do comportamento da superfície livre. Esta técnica

consiste em registrar imagens através de uma tela translúcida do jato escoando numa região iluminada por uma lâmpada de tungstênio de 300 W. Qualquer deformação da superfície resulta em refração da luz na interface ar-água e a uma correspondente mudança na intensidade de luz incidente na tela. Elevações locais da superfície ocasionarão regiões brilhantes na tela, enquanto depressões na superfície ocasionarão regiões escuras.

A 2ª técnica, FIL, foi utilizada para visualização do jato em seções transversais do escoamento. O jato foi marcado por um corante fluorescente, fluoresceína de disodium de sal, que ao passar por um plano de luz de 10 mm de espessura tinha seu escoamento registrado por uma câmera (Cohu Inc. modelo 4115 ICCD) conectada a um captador de imagem (Perceptics Inc. modelo PTG 425) que permitia a captação de 128 *frames* em tempo real com resolução de 512x512 pixels.

A 3ª técnica utilizada foi a usada por Duncan (1983) e implementada pelos autores para examinar a elevações dos perfis da superfície livre, utilizando-se do mesmo corante fluorescente anteriormente mencionado, mas com a diferença de se marcar toda a água do reservatório. Através de uma folha de luz, toda a energia do Laser era absorvida numa camada no nível d'água. Esta energia era reemitida como fluorescência e vista acima da superfície. Originava-se um perfil de auto contraste. A descrição dessas técnicas é interessante por mostrar que diferentes concepções metodológicas estão sendo empregadas, com maior ou menor sucesso, nos estudos dos ambientes hídricos. Sem dúvida, esta busca é relevante.

A atual pesquisa buscou subsídios na literatura para as técnicas utilizadas para a visualização e a obtenção de dados referentes a campo de velocidades e demais parâmetros relevantes ao estudo dos escoamentos de correntes de densidade. Os resultados mostram que há vantagens e limitações para cada técnica e que estudos experimentais nessa área são ainda altamente necessários.

26

Capítulo 4 – Materiais e métodos

O presente estudo tem como objetivo principal a visualização do comportamento de correntes superficiais (plumas) e intrusivas através de experimentos de laboratório. Estes foram conduzidos no laboratório de Hidráulica Ambiental do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC). Foram necessárias adequações na bancada já existente além da confecção de outras para a realização dos experimentos. As bancadas, bem como os equipamentos utilizados, estão descritos nos tópicos a seguir.

4.1 Tanque existente

O tanque original existente no laboratório de Hidráulica Ambiental, utilizada na presente pesquisa, foi confeccionada por Barbosa (1999) para o estudo de correntes de fundo. Esta bancada é constituída por paredes laterais de vidro temperado de 1cm de espessura, com 150 cm de altura, 400 cm de largura e por seis placas de acrílico de 2,5 cm de espessura, sendo que cinco destas placas possuem dimensões de 50 x 150 cm e uma de 90 x 150 cm que compõem o fundo do tanque. Este está sobre uma estrutura metálica composta por cantoneiras de 3"x ¼", com altura de 60 cm, comprimento de 600cm e largura de 200cm. Como característica relevante vale mencionar que o fundo admite o ajuste de diferentes declividades através de um sistema de articulações composto de roscas sem fim e porcas de ajuste. Maiores detalhes desta bancada se encontram em Barbosa, 1999. A figura 11 mostra uma vista geral desta bancada.

Figura 11 – Vista geral da bancada experimental (em amarelo).

O ajuste das situações de trabalho é razoavelmente moroso.

No presente estudo, vale frisar, não se considerou, inicialmente, ser relevante estabelecer diferentes condições de declividade do fundo, uma vez que a formação de plumas superficiais e intrusões intermediárias ocorre com qualquer declividade. Assim, a condição de declividade (mantida constante), foi estabelecida da seguinte forma:

- Declividade de 4^0 para os primeiros 150cm do tanque e
- Declividade de 12^0 para os demais 190 cm.

Os experimentos de simulação de entrada de rio no tanque eram iniciados após o preenchimento deste último com o ambiente fluido desejado para o ensaio.

A entrada da corrente no tanque (simulação do rio) é feita através de uma caixa de acrílico (receptor) de 1,25cm de espessura, com 15cm de altura, 25cm de largura e 40cm de comprimento como mostra a figura12.

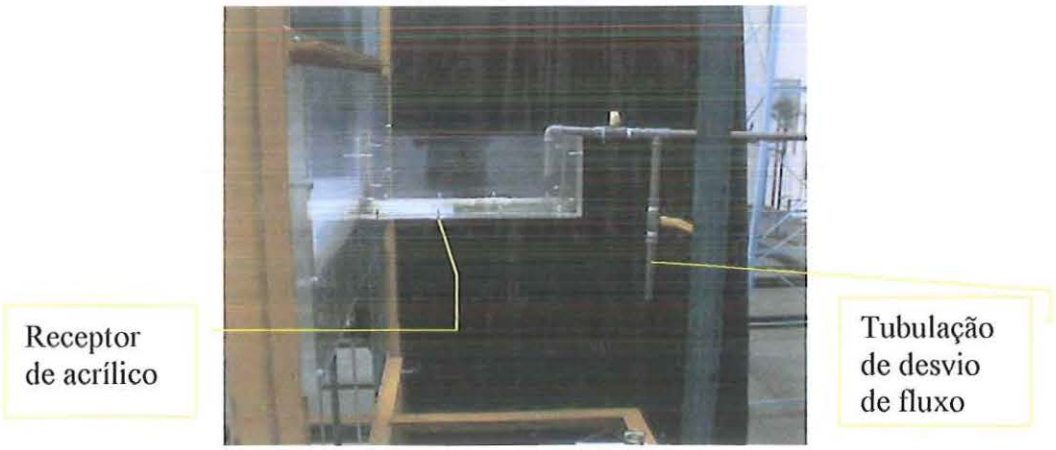


Figura 12 – Receptor (ou canaleta).

28

Na figura 12 observa-se uma tubulação com um segmento de desvio de escoamento. Através deste segmento calcula-se a vazão de entrada da corrente no tanque, coletando uma quantidade de massa de fluido por um tempo determinado (medido através de um cronômetro de precisão 0,01s). A vazão é calculada diretamente através da equação 4.1:

$$Q = \frac{M}{t * \rho} \qquad (4.1)$$

onde M = massa da amostra (kg)

t = tempo de aquisição da amostra (s)

ρ = massa específica da substância utilizada (kg/cm^3).

A simulação da entrada do rio no tanque se faz através de uma abertura de 5cm x 4,5cm presente no receptor da figura 12. Esta abertura foi obtida posicionando-se convenientemente duas placas móveis de acrílico, com dimensões de 9,5cm de largura e 4,5cm de altura. A mobilidade destas placas permite-se a variação das característica geométricas de entrada da corrente, como visto na figura 13. As dimensões foram utilizadas por se situarem na faixa de variação utilizada por Barbosa (1999), o que permite eventuais comparações.

Figura 13 – Comporta de entrada.

4.2 Implementações efetuadas para o presente trabalho

4.2.1 Suporte dos reservatórios de abastecimento

Foi confeccionada uma estrutura metálica composta de cantoneiras de 3"x 3" x ¼" com 3m de altura para suporte de três pares de reservatórios com capacidade de 1000*l* cada um. A figura 14 mostra esta estrutura.

Figura 14 - Suporte dos reservatórios.

Utilizando cantoneiras de seção quadrada de 2,5cm, foram confeccionados uma escada (com dez degraus soldados com chapas tipo "pé de galinha"), corrimão, guarda corpo, bem como demais contra-ventamentos necessários à estrutura. Adicionalmente foram feitas instalações elétricas e hidráulicas necessárias para efetuar a mistura automática das soluções salinas, preencher os reservatórios e drená-los, além de manter o nível constante dos mesmos ao longo dos experimentos.

As instalações hidráulicas mostraram-se susceptíveis à ação do sal e fez-se necessário a reposição de alguns registros (de gaveta) e válvulas de retenção.

Duas bombas com rotor em aço inoxidável com potência de 1HP foram adquiridas e uma terceira com rotor em ferro fundido foi mantida e vale mencionar

30

que esta terceira bomba tem sido intensamente agredida pelo sal, o que mostra que experimentos futuros deverão contemplar a aquisição de outra bomba de aço inoxidável. A figura 15 mostra o quadro do sistema elétrico para o funcionamento das bombas, bem como o sistema hidráulico montado para o uso dos seis reservatórios. Vale mencionar que cada conjunto de dois reservatórios (superior e inferior) funciona como uma unidade de mistura, de forma que se pode contar com três densidades distintas em um experimento.

Figura 15 – Quadro elétrico das bombas

4.2.2 Suporte do equipamento fotográfico e de vídeo.

Foi confeccionada uma estrutura metálica que permitiu elevar uma placa de madeira de 5cm de espessura e dimensões 200cm x 100cm sobre o tanque a uma altura de 400cm. Esta placa de madeira possibilitou as filmagens e a obtenção de fotografias da evolução das correntes de densidade. A figura 16 mostra a estrutura mencionada.

Vale mencionar que esta estrutura é fundamental para a determinação correta da posição das plumas. Isto decorre da necessidade de se possuir uma posição fixa, que permita efetuar a correção das medidas lidas na escala de fundo (o

desenvolvimento das plumas e intrusões ocorre distante do fundo, havendo erros de "paralaxe" que precisam se computados).

Figura 16 – Estrutura de suporte para equipamento fotográfico e de vídeo.

4.2.3 Extravasor.

Para a evacuação das correntes durante os experimentos de plumas e intrusões foi confeccionada uma estrutura vertedora com movimentos verticais, que se alinhava à altura do nível do fluido ambiente e permitia a coleta homogênea em toda a largura do tanque. Este extravasor foi confeccionado com placas de alumínio de 1/4"de espessura com dimensões de 160cm de comprimento e seção quadrada de 5cm. O fluido penetra no extravasor através de uma abertura de 0,5cm (podendo ser variada) e escoa por uma tubulação flexível conectada a sua base. A figura 17 mostra o dispositivo. A figura permite observar que a pluma em estudo se estende por toda a largura do tanque. Adicionalmente, toda a água da pluma marcada com permanganato de potássio (cor vermelha), é coletada pelo extravasor, não passando para a parte posterior do mesmo.

32

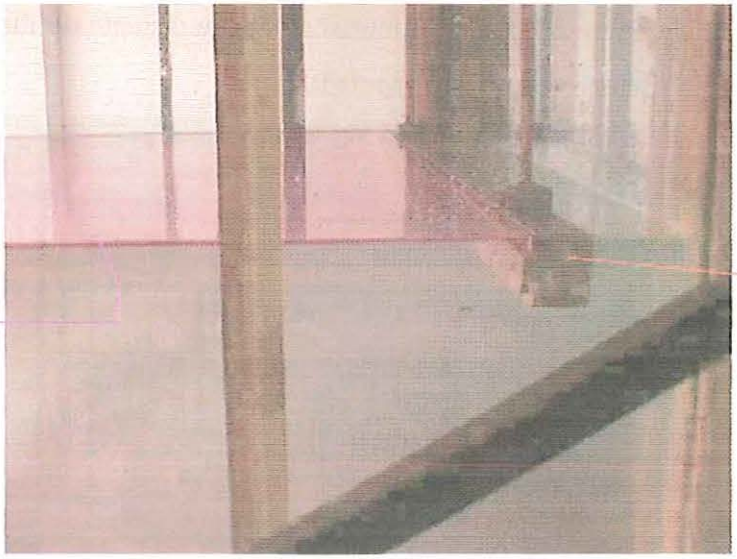


Figura 17 – Extravasor.

Vê-se o escoamento estratificado em duas camadas com o escoamento superficial (pluma) tingido por um corante e o ambiente fluido com água salgada.

4.2.4 Adição de aquecedores

Os experimentos com água salgada mostraram-se extremamente úteis para o uso de equipamento fotográfico e de filmagem. Contudo, mostraram-se inadequados para a obtenção de campos de velocidade com velocimetria a Laser. Verificou-se que a luz refletida pelas partículas existentes no escoamento era reabsorvida pela água salgada (provavelmente as dimensões grandes utilizadas potencializaram este efeito). Este fato conduziu a vários procedimentos tentativos, que envolveram injeção de mais partículas no escoamento e o uso de outras alternativas para a obtenção de densidades diferentes entre corpo receptor e massa injetada.

Efetuaram-se muitos testes com partículas tais como:

- ✓ Fluorescent seeding particles ϕ= 26μm 0,95≤ d ≤1,05
- ✓ Alumina (Al23)
- ✓ Corindon Al 35/70
- ✓ Quartzo

- ✓ Argila Lopes Castanha.
- ✓ Micro esferas de vidro AD.

Observou-se, contudo, que, embora houvesse a reflexão de luz em maior número de partículas, a iluminação ainda era insuficiente para obter campos confiáveis de velocidade. Adicionalmente, as partículas acrescentadas apresentaram densidade superior à do meio, sedimentando-se muito rapidamente. Soluções para este problema foram testadas, mas o problema da pouca reflexão prevaleceu.

Este fato, desalentador, implicou na necessidade de efetuar experimentos adicionais com variação de densidade provocada por efeitos térmicos (para obter campos de velocidade confiáveis). Para tal, foram adicionados dois aquecedores em um dos reservatórios e realizada a devida instalação do quadro elétrico para seu funcionamento.

Os aquecedores foram constituídos de resistências elétricas, cada qual de 5000W, adquiridos no comércio local.

Apesar da simplicidade da solução (a ausência do sal permitiu a obtenção de campos de velocidade sem injeção de partículas), foi necessário elaborar um procedimento adicional para a medição do desenvolvimento das plumas térmicas estudadas.

4.2.5 Quadro de lâmpadas

Para a visualização dos escoamentos, percebeu-se que a iluminação existente era inadequada para o correto tratamento das imagens das plumas (as imagens ficavam demasiadamente escuras, dificultando o trabalho de tratamento dessas imagens no computador). Para eliminar este problema, foi confeccionado um quadro de madeira de dimensões 95cm de largura por 200cm de comprimento com 18 lâmpadas de 200W, enfileiradas conforme mostra a figura 18. A distância entre as lâmpadas na direção transversal foi de 15 cm e na direção longitudinal de 30cm.

34

Figura 18 – Quadro de lâmpadas.

Finalmente, a estrutura pré existente foi adequada em seus detalhes para os experimentos previstos. Esta adequação envolveu o ajuste da comporta de entrada do receptor, a colocação de uma escala graduada no fundo do tanque, a confecção de uma escada de acesso ao interior da mesma, batentes de segurança, entre outros.

4.3 Densidades das soluções utilizadas

Numa primeira fase dos experimentos foram definidas as condições de densidades para os ensaios a serem conduzidos. Diferentes quantidades de sal foram adicionadas à água, para obter as condições consideradas adequadas. Para o controle da densidade foi utilizado um condutivímetro da marca Metler Toledo, que fornecia valores de concentrações em unidades de mg/L ou µS/cm, bem como valores de temperaturas (em graus Celsius). A figura 19 mostra o equipamento mencionado.

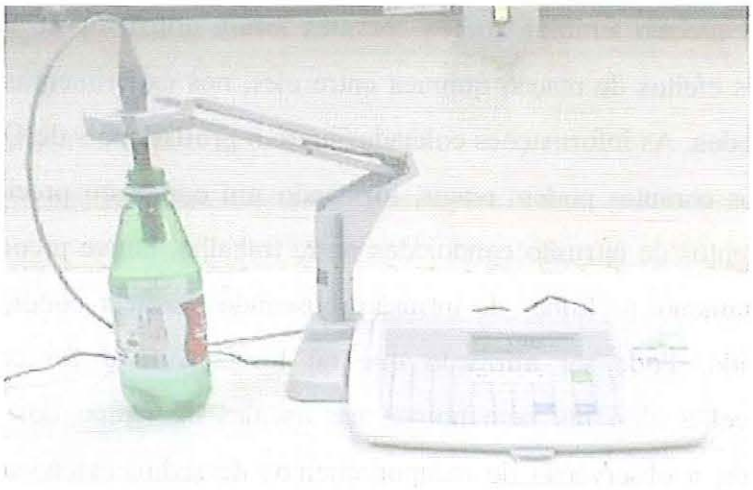


Figura 19 – Condutivímetro.

Foram usados três diferentes valores para densidade do fluido ambiente quando do estudo das plumas, a saber $d_1 = 1{,}013$, $d_2 = 1{,}020$ e $d_3 = 1{,}050$. Ao longo dos experimentos, as plumas eram visualizadas com o uso do corante permanganato de potássio como marcador.

Quando do estudo de intrusões, a estratificação do ambiente era feita em duas camadas: a 1ª camada (inferior) com solução de água e sal de densidade d_3 e marcada com o corante azul de metileno. A 2ª camada (superior) era de água pura. A corrente intrusiva era composta da solução de água e sal com densidade d_2 e era marcada pelo permanganato de potássio.

Finalmente para os experimentos com água aquecida (realizado apenas para o estudo das plumas), foram registradas as temperatura da água injetada no reservatório (rio). Essas temperaturas permitiram avaliar a densidade da água injetada através de funções ajustadas existentes na literatura. Por exemplo, segundo a literatura, foi utilizado o valor de 0,98 g/cm^3 para a temperatura de 50^{0}C.

4.4 Corantes utilizados

Conforme já mencionado no ítem 4.3, foram utilizados dois tipos de corantes nos experimentos:

- ✓ Permanganato de potássio.
- ✓ Azul de metileno.
- ✓ Anil.

36

É preciso lembrar que os corantes foram utilizados de forma criteriosa e os eventuais efeitos de reação química entre eles, nos experimentos de intrusões, foram monitorados. As informações coletadas junto a profissionais de Química mostram que ambos os corantes podem reagir, formando um composto preciptável. Em todos os experimentos de intrusão conduzidos neste trabalho, houve preocupação em observar detalhadamente a "folha" de intrusão, buscando verificar condições de formação de precipitado. Pode ser afirmado que tal formação não foi constatada em escala observável a olho nu, nem houve, nas escalas de tempo dos escoamentos e seus turbilhões, a observação de comportamentos de sedimentação ou de inibição desses escoamentos.

Dessa forma, a metodologia de visualização seguida apresentou-se viável com os dois corantes.

4.5 Equipamento a Laser

Para se obter medidas do campo bidimensional dos vetores de velocidade, foi utilizada a técnica não intrusiva de velocimetria a Laser por processamento de imagem (VLPI), com o mesmo equipamento utilizado por Barbosa (1999): Laser de vapor de cobre modelo OXFORD LS-20 e software Visiflow. A figura 20 mostra uma visão geral do equipamento Laser utilizado nos experimentos.

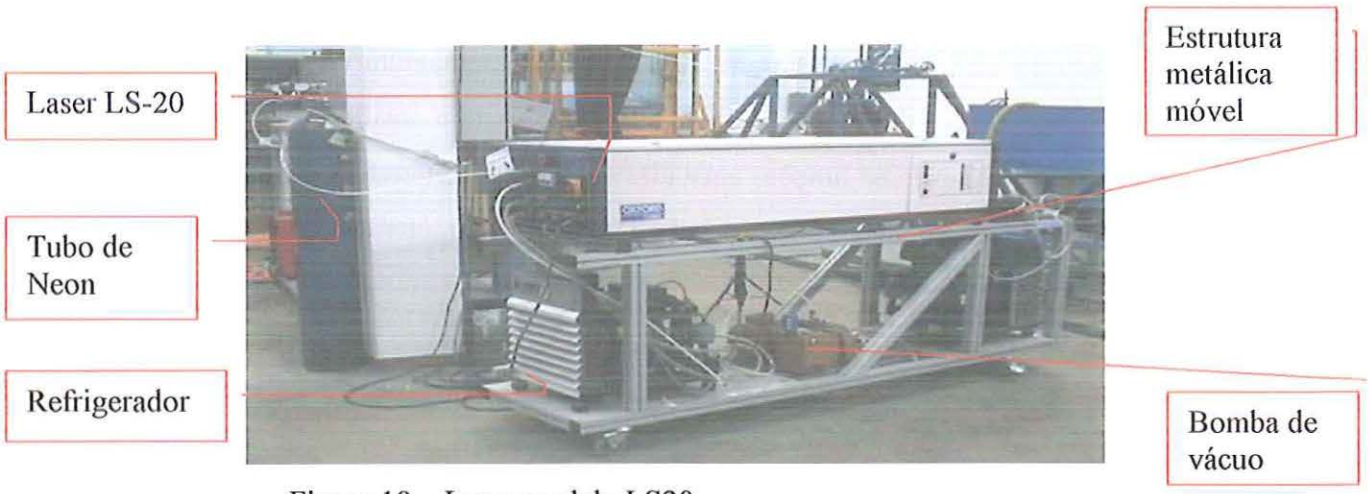


Figura 19 – Laser modelo LS20.

4.5.1 Funcionamento do equipamento a Laser.

Os equipamentos a laser de vapor de cobre (LVC) são inerentementes pulsados, devido à estrutura eletrônica particular dos átomos de cobre. O Laser de cobre é um Laser de três níveis: nível superior do Laser; nível inferior de Laser e estado fundamental. O nível inferior de Laser é metaestável, isto significa que o átomo para decair para o estado fundamental leva um tempo grande. O átomo decai (perde energia) por choque com a parede do tubo ou com choque com átomo de Neônio.

O equipamento OXFORD LS-20 opera a uma freqüência de 4 a 20 KHz e a uma potência de 10 a 100 W. Seu funcionamento se verifica basicamente devido a geração de uma corrente elétrica no interior de um tubo de gás. Neste tubo, os elétrons da corrente colidem com os íons de cobre (cobre volatilizado), excitando-os. No processo de retorno ao estado de equilíbrio, esses íons emitem fótons em dois comprimentos de onda principais: 60% dos fótons são emitidos na faixa do espectro de luz visível, verde, com comprimento de onda de λ=510,6 nm, e 40% são emitidos na faixa do espectro de luz visível, amarelo, com comprimento de onda de λ=578,2 nm. Este circuito é alimentado por uma fonte de 220Vac que é transformada em 363 Vdc. A corrente interna produzida é de cerca de 6,14A originando assim uma potência interna de $\cong$ 2,23KVA. Um dispositivo eletrônico eleva a tensão para 10 kV e carrega um capacitor. Uma chave eletrônica (thyratron) descarrega elétrons do capacitor sobre o tubo após passar por um estágio de compressão magnética produzindo um pulso de tensão da ordem de 15kV e 100ns de largura. E obtém-se uma corrente de 800A com 50ns de largura e que promove o plasma no interior do tubo. Esta corrente circula por um tubo de cerâmica de ϕ_{int} = 1"e ϕ_{ext} = 11/4", onde se depositam 17 segmentos de cobre de aproximadamente 1g. A temperatura deste ambiente cresce até1500^{0}C, temperatura esta que determina a pressão de vapor de cobre (0,5 mbar). Como já foi dito, o cobre volatiliza no interior de um tubo e os íons excitados liberam fótons nas cores verde e amarelo. Estes fótons são redirecionados ao interior do tubo laser ao se depararem com espelhos total e parcial localizados nas extremidades do mesmo.

O tubo laser é revestido por um isolante térmico de material fibroso com 70% de porosidade que por sua vez é revestido por um invólucro a vácuo de pirex. Na

38

parte superior deste pirex, há um sistema de cirulação de água que é usado para a refrigeração destes tubos. A figura 21 mostra um esboço deste sistema.

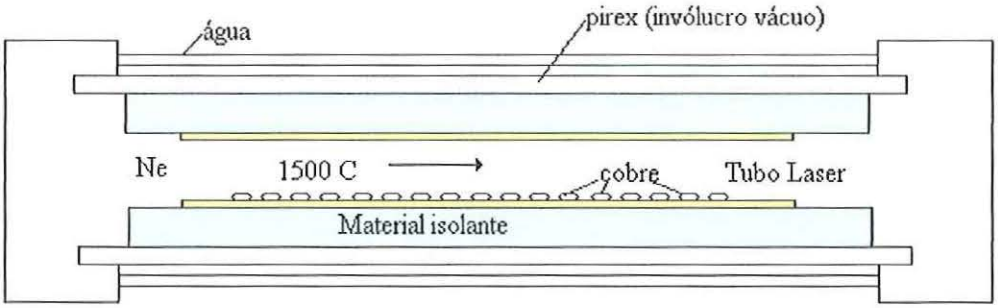


Figura 21 – Tubo Laser.

Com as altas temperaturas produzidas no interior do tubo, ocorre um acúmulo de impurezas nas paredes do mesmo. Faz-se necessário então, uma remoção destas pela circulação do gás Neônio a pressões de 50 mbar e vazão de 0,5 *l*.atm/hora.

Ao conjunto destes invólucros mais os espelhos denomina-se de cavidade ressonante.

4.5.2 Acessórios

Observa-se na figura 20, que o equipamento gerador de luz Laser é sustentado por uma estrutura metálica móvel que contém dois refrigeradores em cada extremidade e uma bomba de vácuo no centro. Observa-se ainda no canto esquerdo da mesma figura, a conexão com o tubo de gás Neônio (cilindro azul).

A figura 22 mostra um dos refrigeradores. É sempre necessário a verificação do nível de água do interior destes aparelhos antes do funcionamento do Laser.

Figura 22- Refrigerador.

Para o bom funcionamento de laser faz-se necessário :

- Energia elétrica de 200-250 V para a produção de uma potência de 3000Watts;
- Gás Neon com regulagem de pressão de 1 a 3 bar absoluto;
- Bomba de vácuo com operação na mesma linha de voltagem e freqüência do Laser;
- Água para os refrigeradores;
- Óleo para o tanque de imersão da válvula thyratron.

O método (VLPI) utilizado nesta pesquisa fornece o campo completo de velocidades instantâneas através da iluminação de uma seção do escoamento. Esta iluminação é obtida com o uso de um plano de luz, de pequena espessura, formado pela contração do raio laser em uma direção e pela sua ampliação na direção ortogonal, através de um conjunto de lentes cilíndricas. O equipamento padrão ótico utilizado é o "gerador de plano de luz", como visto na figura 23.

Figura 23 – Gerador do plano de luz.

40

A luz colimada que emana do gerador Laser é introduzida numa fibra ótica e direcionada para os pontos adequados de estudo. Para verificar a eficiência dos ajustes, são feitas medidas de potência do raio na saída da fibra ótica. Os resultados obtidos para iluminação parcial e total foram de 0,29W e 15,5W respectivamente, representando uma perda de aproximadamente 25% para o último caso. Para as medidas utilizou-se o medidor de potência da marca Coherent- fieldmaster mostrado na figura 24. No presente estudo, fez-se o alinhamento do feixe uma única vez, para adequação do equipamento a Laser para posterior experimentação.

Figura 24 – Medidor de potência.

Na figura 25, mostra-se o uso do medidor de potência na saída do gerador de luz Laser.

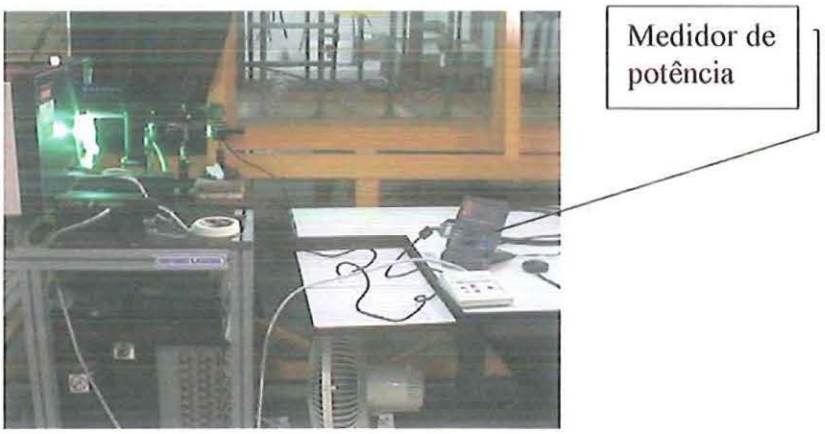


Figura 25 – Medida da potência na saída do raio Laser.

A figura 25 mostra o procedimento já descrito de introduzir o feixe colimado de luz em uma das extremidades da fibra ótica (através de um conversor de Laser). Vêem-se o obturador, o conversor e a fibra ótica.

Figura 25 – Obturador, fibra ótica e conversor.

A espessura da folha de luz determina a resolução espacial da técnica, bem como a distância da folha determina o campo de visão. Esta distância é função quadrática da espessura. No presente estudo, a espessura da folha de luz atingida foi de aproximadamente 6mm, e inserida na região de interesse. As partículas que atravessarem essa região de luz têm seu movimento registrado através de uma câmera CCD (charged coupled device) que converte a imagem ótica do escoamento (fótons de luz) em sinal de vídeo branco e preto (sinal elétrico). A câmera utilizada nos experimentos foi da marca Kodak Megaplus de alta resolução (1024x1024 pixels) que oferece formato analógico ou digital. A câmera CCD deve estar posicionada ortogonalmente com o plano de luz como mostra a figura 27.

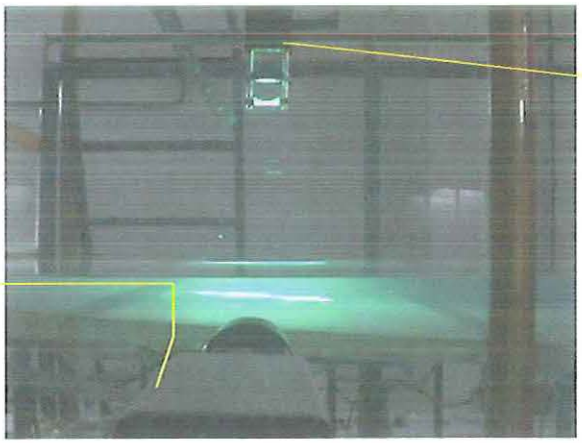


Figura 27 – Disposição geométrica entre a câmera CCD e o gerador do plano de luz.

42

A extensão longitudinal do plano de luz ficava em torno de 27 cm e penetrava verticalmente por toda a profundidade da lâmina de água. A posição desse plano de luz era de 59 cm a partir do início da comporta. A medida da posição foi feita considerando o centro geométrico do gerador de folha de luz.

4.5.3 Técnica VLPI

A técnica VLPI requer o controle de diversos parâmetros. Para tanto fez-se necessário um seguinte procedimento passo-a-passo, que é descrito nos subítens a seguir:

4.5.3.1 Registro das imagens.

Para se obter o registro das imagens, posicionou-se a câmera CCD ortogonalmente com a folha de luz, como visto anteriormente na figura 27. Foram feitas tomadas de medidas com duas posições do gerador do plano de luz, que permitissem a obtenção de velocidades longitudinais e velocidades transversais. Houve impossibilidade física da iluminação em um plano paralelo à superfície do escoamento, junto à mesma.

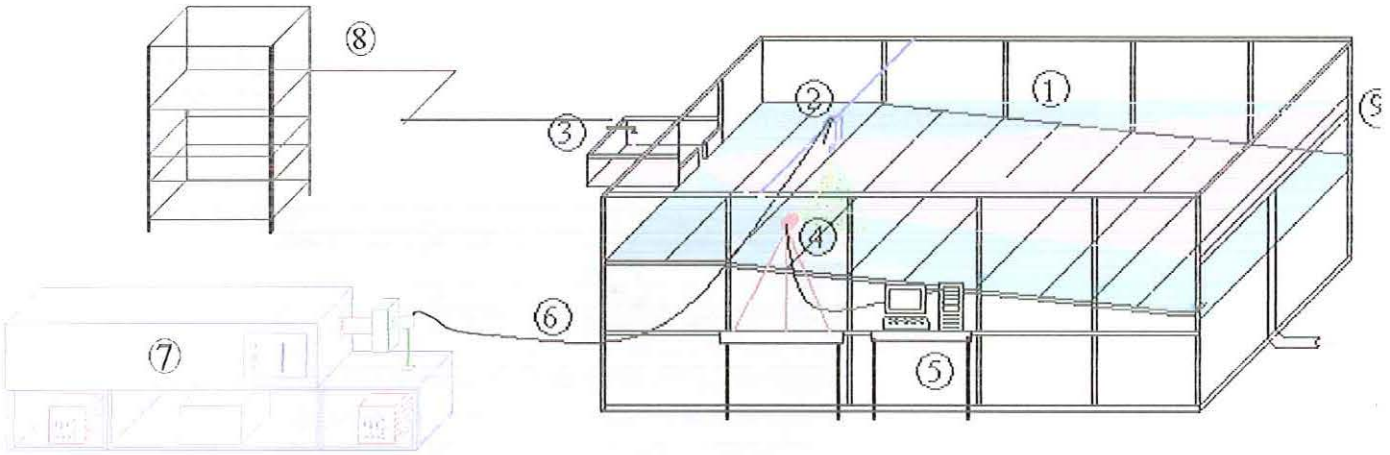


Figura 28 – Princípios do método VLPI.

1. Canaleta
2. Gerador do plano de luz.
3. Receptor.
4. Câmera CCD
5. Sistema computacional
6. Fibra ótica.
7. Equipamento a Laser.
8. Abastecimento das soluções (reservatórios).
9. Vertedor.

Nesta etapa, a imagem capturada pela câmera sempre era inicialmente visualizada ao vivo (tempo real) na tela do computador. Focalizava-se uma escala (foi usada uma régua de alumínio nas calibrações) já inserida na seção de interesse do escoamento (iluminada pelo gerador do plano de luz) e delimitava-se o seu comprimento com o auxílio do cursor (mouse). Esta distância (10 cm) representava uma fração significativa do tamanho total da imagem, o que era positivo para a precisão da medida, e informada ao software Visiflow em micrômetros (μm). Automaticamente o programa convertia a distância em número de pixels (544) e posteriormente calculava o número de microns por pixel (139.86014) usado para todos os experimentos com escoamentos superficiais.

Também era fornecido o tempo em μs de separação entre os pulsos do Laser (100), o tempo de exposição de abertura da câmera (32,246ms), a taxa de captação de imagens (30 exposições por segundo),o modo de aquisição das imagens (as imagens capturadas eram salvas diretamente no disco rígido) e o tamanho das imagens (foi escolhida uma área de 640x480 pixels).

4.5.3.2 Pré-processamento das imagens.

A imagem de um escoamento pode ser analisada tanto na escala de cinza como uma imagem binária de branco e preto no software Visiflow. Ressalta-se aqui que se a imagem registrada possuir um fundo escuro com um bom número de partículas claras (imagem de boa qualidade) não é necessário fazer a binarização. Caso

44

contrário, efetua-se a binarização através de softwares como *photo studio, visilog* ou outro programa de processamento de imagem.

4.5.3.3 Escolha do método de análise.

Há dois métodos principais de análise vinculados ao programa Visiflow, o da correlação e pareamento/rastreamento de partículas. A análise de correlação usa as funções de auto-correlação e correlação cruzada para se obter a velocidade média para um segmento de imagem. A auto-correlação é usada para imagens simples (uma única fotografia) enquanto a correlação cruzada utiliza pares de imagens. A análise por pareamento/rastreamento de partículas "acompanha" as partículas nas imagens. O método usado nos ensaios foi o de correlação cruzada, com aproximação gaussiana, tamanho das regiões dos vetores de 32x32 pixels e sobreposição de áreas de 50%.

4.5.3.4 Análise do escoamento.

Esta é a fase de obtenção dos campos bidimensionais de velocidade. Após a obtenção das imagens das partículas suspensas na água (11 imagens por segundo), opera-se diretamente com o programa Visiflow. Na prática, basta informar ao programa a primeira de uma lista de imagens adquiridas, que o programa executa o pareamento de imagens, reconhece as condições de cálculo escolhidas, opera sobre as imagens e fornece os campos instantâneos de velocidades. É possível obter ainda o campo médio de velocidades, animação dos campos instantâneos, vorticidade, linhas de corrente, componentes u e v (velocidade longitudinal e transversal ou vertical) que podem ser exportadas para outros programas como *excell* e *origin* para obtenção da distribuição das velocidades com as distâncias, etc.

As imagens obtidas nesse trabalho, juntamente com o campo de velocidades, são de ótima qualidade.

4.6 Fases dos experimentos.

Os experimentos foram realizados em duas fases. Na 1ª fase, utilizou-se material fotográfico e de vídeo para o registro das dispersões laterais e longitudinais das plumas e intrusões, além do auxílio do fundo graduado da canaleta. Na 2ª fase dos experimentos utilizou-se o equipamento a Laser para a obtenção das medidas dos campos de velocidades.

Na 1ª fase de ensaios utilizou-se uma câmera filmadora (marca gradiente GCP –155c full auto compact camcorder) que registrava o comportamento do fluido a partir de sua passagem pela comporta de entrada e percorrendo toda a extensão graduada do fundo da canaleta (a corrente penetrante nesta fase, estava tingida com permanganato de potássio). Fotografias para tempos distintos da propagação da pluma, também foram feitas em todos os experimentos. Estabelecido um regime permanente da corrente, eram feitas fotografias do perfil do escoamento para a medida da espessura (ver figura 28).

Na 2ª fase de ensaios, utilizou-se o equipamento a Laser, conforme explicado no ítem 4.5.3.

Após os ensaios exploratórios das plumas, foram elaboradas seqüências de passos para os trabalhos a serem conduzidos nas duas fases. Essas seqüências são apresentadas a seguir.

Primeira fase.

1. Estabelecia-se a densidade desejada para o fluido ambiente. Foram utilizadas $d_1 = 1{,}013$; $d_2 = 1.020$, $d_3 = 1{,}050$. As concentrações correspondentes das soluções eram $C_1 \cong 13 \pm 0{,}5$g/l, $C_2 \cong 18 \pm 0{,}5$g/l e $C_3 \cong 40 \pm 0{,}5$g/l. Feita a homogeneização da mistura (utilizando-se os seis reservatórios de armazenamento de soluções e o sistema hidráulico construído para esta mistura), iniciava-se o preenchimento do tanque. Em média eram usados aproximadamente 1100*l* de solução para cada ensaio.
2. Eram coletados valores de temperatura ambiente da água colorida e da solução salina., além da umidade relativa do ar.

3. Preenchido o tanque, calculava-se a vazão do escoamento de entrada através da equação (4.1) com o desvio do escoamento, registrando a massa do fluido coletado em um Becker (utilizou-se uma balança eletrônica com precisão de 1grama).

4. Iniciava-se a entrada do escoamento no tanque.

5. Através de uma câmera filmadora e de câmera fotográfica (digital, marca Sony), registravam-se todas as dispersões longitudinais e transversais da pluma.

6. Estabelecido um regime permanente, tomavam-se as medidas das espessuras da pluma. A figura 29 mostra uma foto com a medida da espessura da pluma para o ensaio p32 (d_3 = 1,050 e Q = 150 ml/s).

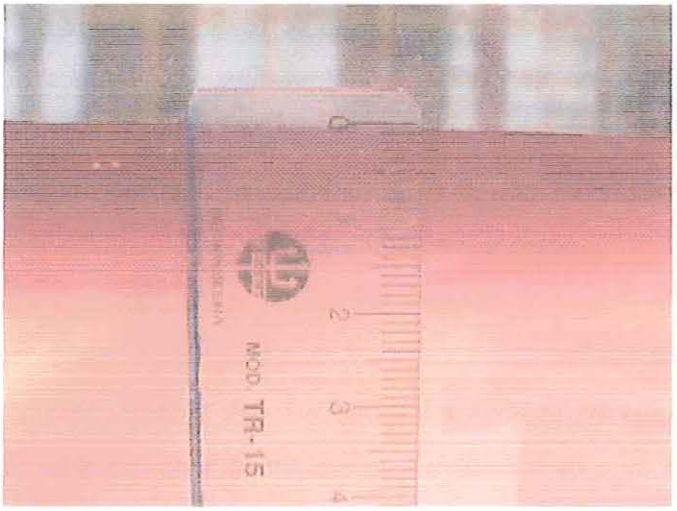


Figura 29 – Foto da espessura da pluma para o ensaio p32.

7. Terminado o ensaio, limpava-se o tanque e os reservatórios de armazenamento das soluções para os próximos ensaios.

Segunda fase

1. Preenchia-se o tanque com água pura e anotava-se sua temperatura.

2. Determinava-se a vazão de entrada,

3. Posicionava-se a câmera CCD e o gerador do plano de luz para as seções de estudo desejada.

4. Anotavam-se os valores da temperatura da pluma, temperatura do laboratório e umidade relativa do ar

5. Com o auxílio de uma régua de metal, ajustava-se o nível de preto do programa da Kodak para o foco adequado e faziam-se as calibrações na tela do computador.

6. Iniciava-se o escoamento, com a imagem ao vivo (tempo real) na tela do computador.

7. Pelos experimentos anteriores, tinha-se o conhecimento do tempo em que a mancha atravessaria a seção e observando visualmente a agitação das partículas na tela do computador iniciava-se a gravação das imagens.

8. Terminada a captura das imagens, encerrava-se o ensaio esgotando o tanque e fechando os demais registros para o posterior processamento das imagens e seus campos instantâneos de velocidades.

9. Realizava-se o processamento das imagens pelas etapas descritas pelos ítens 4.5.3.2 a 4.5.3.4.

Ressalta-se aqui que eram necessários noventa minutos para o aquecimento do equipamento a Laser (Warm up). Os procedimentos para a ligação, o manuseio dos acessórios e o desligamento deste equipamento constam no manual do Laser e devem ser rigorosamente respeitados por se tratar de um Laser da classe IV com altos riscos à saude.

Foram feitos ensaios com plumas térmicas tingidas com o uso de equipamento fotográfico e de vídeo para o conhecimento de suas dispersões antes do uso do equipamento a Laser.

4.7 Resumo descritivo de um ensaio

Após a descrição detalhada de cada passo e de cada componente deste trabalho, considerou-se conveniente apresentar um resumo descritivo, para novamente permitir a "visão do todo" nos procedimentos. Utilizou-se aqui, o exemplo das plumas.

As soluções estudadas foram preparadas num conjunto de reservatórios de armazenagem que possuem bombas centrífugas para promover a mistura das soluções. As densidades foram monitoradas através de um condutivímetro e as vazões de entradas foram calculadas pela equação 4.1. A figura 30 mostra uma vista

48

do tanque recebendo uma pluma através do receptor. Esta pluma se dispersa ao longo da superfície e tem seu movimento registrado por equipamento fotográfico e de vídeo, bem como o auxílio de um quadro de lâmpadas que iluminam as placas de acrílico por baixo, aumentando a qualidade das fotos. Com o auxílio de papel graduado localizado no fundo do tanque, foram tomadas medidas de seus movimentos. Na extremidade a jusante do tanque se encontra o extravasor que coleta a corrente e a drena para fora.

Figura 30 – Vista em planta da corrente de gravidade.

Na figura 30 é visto o escoamento de uma pluma através do extravasor, o quadro de lâmpadas sob o tanque e o extravasor ao fundo.

4.8 Resumo descritivo do registro das imagens.

Como no item 4.7 este resumo descritivo tem o intuito de permitir a "visão do todo" nos procedimentos adotados.

4.8.1 Imagens estáticas e em movimento.

Como mencionado, o avanço das plumas e intrusões foi acompanhado detalhadamente com o uso de corantes, câmera fotográfica digital e câmera filmadora VHS. Para a obtenção das imagens, posicionou-se a câmera VHS a 5,6 m acima do solo, permitindo a visualização de 95% da superfície da água. Utilizou-se a estrutura descrita no ítem 4.2.2. Da mesma forma, imagens estáticas foram obtidas, permitindo efetuar as correções geométricas decorrentes do posicionamento escolhido. Um total de 70 experimentos, cada qual com cerca de 10 fotografias foi executado. Cada experimento foi igualmente filmado. Assim, as 700 fotos e 70 filmes tiveram valores de posicionamento da pluma corrigidos. Neste caso, foram avaliadas as correções devido ao erro de paralaxe, decorrente do fato de a escala do fundo estar afastada da pluma e da intrusão. Os esquemas a seguir são feitos em relação a figura 16, caso a e caso b, que fornecem as medidas usadas para o cálculo das correções.

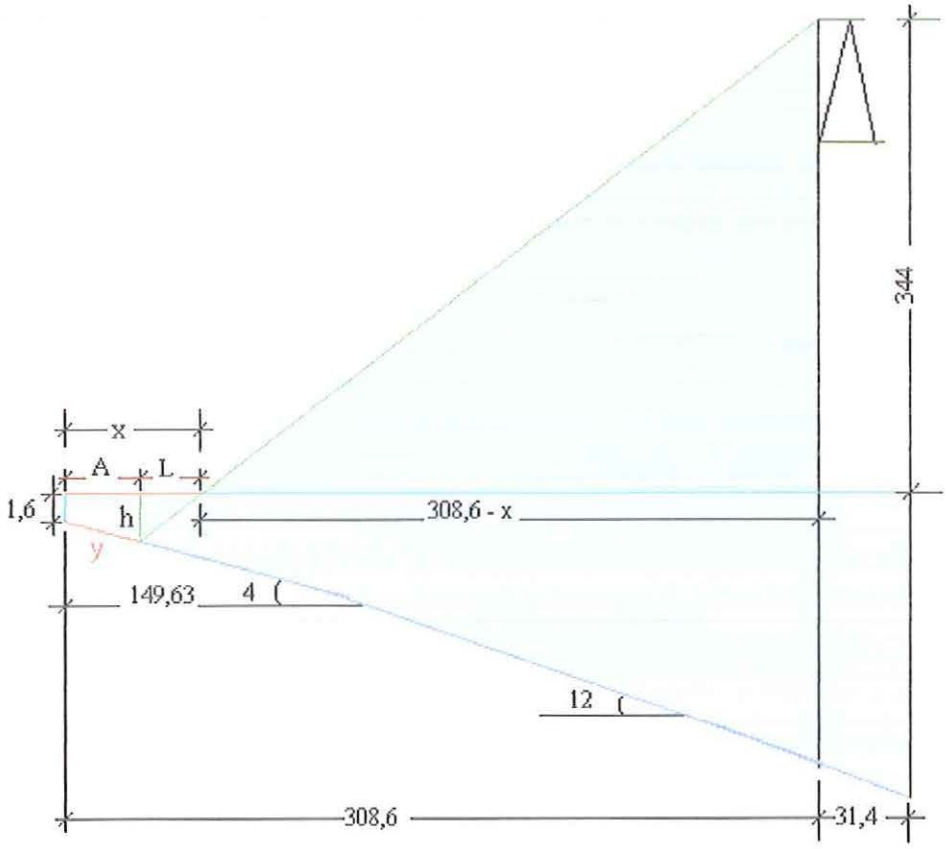


Figura 31 caso a - Esquema para 1ª declividade (medidas em cm).

50

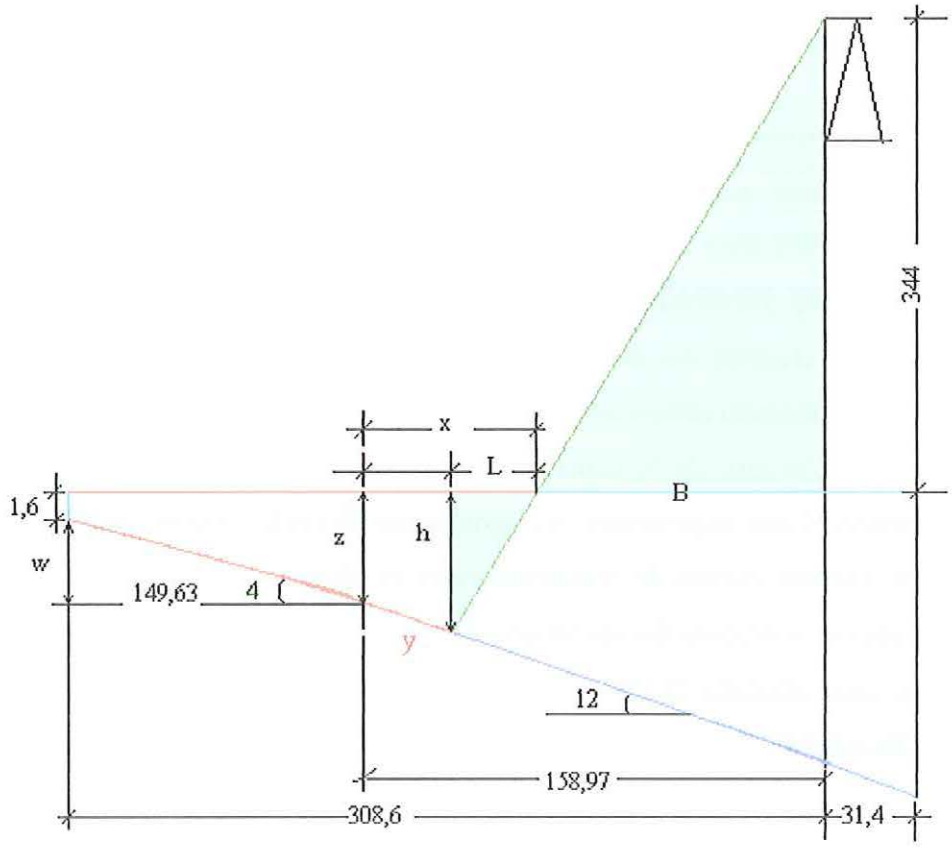


Figura 31 caso b - Esquema para 2ª declividade.

De acordo com a 1ª inclinação do fundo do tanque (4^0), as equações de correção das distâncias longitudinais são dadas por:

$$h = y \operatorname{sen} 4^0 + 1{,}6 \tag{4.2}$$

$$L = \frac{h * (308{,}6 - y \cos 4^0)}{344 + h} \tag{4.3}$$

$$x = y \cos 4^0 + \frac{(308{,}6 - y \cos 4^0)(y \operatorname{sen} 4^0 + 1{,}6)}{344 + (y \operatorname{sen} 4^0 + 1{,}6)} \tag{4.4}$$

De acordo com a 2ª inclinação do fundo do tanque (12^0), as equações de correção das distâncias longitudinais são dadas por:

$$B = 308{,}6 - 150\cos 4^0 - x \tag{4.5}$$

$$z = w + 1{,}6 \tag{4.6}$$

$$h = y\,\mathrm{sen}\,12^0 + z \tag{4.7}$$

$$L = \frac{(158{,}97 - y\cos 12^0) * h}{L + 344} \tag{4.8}$$

$$x = y\cos 12^0 + L \tag{4.9}$$

$$x_{long} = 150\cos 4^0 + x \tag{4.10}$$

4.8.2 Imagens para campos de velocidades.

A obtenção das imagens para campo de velocidades segue os passos descritos no ítem 4.5.3

4.9 Avaliação densitométrica das fotos.

Puderam ser observadas, nas fotografias das plumas obtidas na 1ª fase dos ensaios, regiões de maiores concentrações do permanganato de potássio. Optou-se, assim, por efetuar uma a avaliação densitométrica das fotos. Esta técnica é muito utilizada na análise da extensão da formação do tecido ósseo de dentes e promove a identificação de regiões mais transparentes (zonas brancas da foto) e menos transparentes (zonas mais escuras da foto). O equipamento utilizado denomina-se densitômetro, que detecta a diminuição da transparência. Com este equipamento, foi possível obter medidas de opacidade ou transmitância em uma linha transversal pré-definida dos escoamentos de acordo com as distâncias ao longo de um eixo transversal, permitindo-se assim a obtenção de gráficos onde se pode identificar as regiões de maiores concentrações do corante. O procedimento utilizado implicou no

uso de um referencial interno, correspondente sempre a uma zona mais clara. Foi usada a região das paredes do tanque, que refletia uma forte luz clara, à qual foi dado o valor zero, ajustado no equipamento, seguido de varredura na zona de maior largura da pluma. As fotos escolhidas foram aquelas que apresentaram a máxima largura da pluma antes desta atingir os contornos físicos do tanque. Salienta-se que todas as fotografias foram obtidas com auxílio de um posicionador, de modo que as mesmas fossem repetidas o mais fielmente possível. Pode-se concluir, conforme esperado, que, em média as maiores concentrações se verificaram na linha de centro do escoamento bidimensional.

4.10 Simulação de escoamento turbulento bidimensional

O desenvolvimento temporal das plumas e intrusões ocorre em regiões horizontais estreitas, que induzem a se considerar a hipótese de bidimensionalidade horizontal do escoamento.

Visando tratar a possibilidade de reprodução do experimento real a partir de um modelo bidimensional de escoamento e transporte de massa, adaptou-se o modelo numérico desenvolvido por Monteiro (1998), originalmente escrito para escoamentos laminares e sem transferência de massa. Foi introduzida a viscosidade turbulenta, a equação de transporte turbulento de massa e a difusividade turbulenta.

O sistema de equações resolvido numericamente foi:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \upsilon_t \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) \tag{4.11}$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \tag{4.12}$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \bar{v}\frac{\partial \bar{C}}{\partial y} = D_t \left(\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial y^2} \right) \tag{4.13}$$

u a velocidade longitudinal,

v a velocidade transversal,

υ_t viscosidade turbulenta,

C concentração,

D_t difusividade turbulenta.

O equacionamento não possui qualquer termo de fonte ou sumidouro, uma vez que não atuam forças de campo no plano horizontal, não houveram reações químicas e o gradiente de pressão na superfície é nulo (pressão é constante e igual a atmosférica).

Para a adaptação do código numérico para o estudo aqui conduzido contou-se com o auxílio do criador do código, MSC Luís Américo Monteiro Júnior (1998).

A discretização utilizada no código foi diferenças finitas. Uma cópia do mesmo é apresentada em anexo (Anexo B).

Os resultados das simulações mostraram-se promissores, muito embora os escoamentos simulados não possam descrever os detalhes (singularidades) decorrentes do fato de a realidade ser tri-dimensional.

4.11 Experimentos com correntes de fundo.

As facilidades existentes na bancada experimental incentivaram uma extensão do estudo original, que foi a investigação das características dos escoamentos tipo correntes de fundo em torno de obstáculos. A questão básica a ser respondida era a possibilidade de se gerar instabilidades que se propagassem a jusante do obstáculo.

Foram efetuados experimentos com vários obstáculos que foram registrados através de fotografias.

Os experimentos foram classificados em termos do número de Reynolds associado ao diâmetro do obstáculo.

54

Os resultados mostraram comportamentos muito estáveis. As condições experimentais constam do capítulo 5, resultados experimentais.

4.12 Singularidades

Os experimentos com fluidos de densidades diferentes mostram-se uma área apaixonante para estudos, principalmente como conseqüência da ocorrência de "situações não previstas". Neste particular, a região de entrada mostrou que podem surgir estruturas de escoamentos curiosas, que estão devidamente registradas neste trabalho, mas cujo estudo detalhado exige mais tempo do que aquele destinado a este doutorado.

Também deve ser registrada aqui a dificuldade observada em reproduzir os escoamentos de intrusão, que se mostraram mais arredios a uma quantificação ou mesmo a uma descrição com padrões melhor estabelecidos.

Contudo, a descrição das intrusões é feita em detalhes, permitindo, espera-se, fomentar outros estudos na área.

Capítulo 5 – Resultados experimentais

O presente trabalho buscou explorar ferramentas que permitissem a visualização de escoamentos superficiais e intrusivos, que adentram continuamente em ambiente líquido estagnado.

Como já mencionado numa primeira etapa de ensaios, a geração das correntes foi feita utilizando-se soluções salinas, corantes e equipamentos como filmadora e câmera digital para o registro de seu comportamento e posterior comparação com previsões. Numa outra etapa de ensaios, estudou-se o comportamento do campo de velocidades de plumas térmicas com o auxílio de equipamento a Laser.

Os fenômenos estudados foram organizados adotando-se uma simbologia própria, para cada tipo de escoamento, e espera-se, de rápida interpretação.

O estudo das correntes leves (plumas) foi dividido de acordo com o método de geração das mesmas, ou seja, em plumas originárias de diferentes salinidades e em plumas originárias de diferentes temperaturas. Para cada tipo de pluma foi usado um determinado equipamento na realização dos ensaios.

O estudo das correntes intrusivas foi realizado somente com o equipamento fotográfico e de vídeo.

O estudo das correntes de fundo (em torno de objetos) foi realizado somente com equipamento fotográfico.

Ressalta-se aqui a importância da visualização de tais fenômenos e o cuidado que se deve ter com as tendências a generalizações, devido a existência de singularidades inerentes aos mesmos.

Para cada ensaio foi registrada uma média de 10 fotografias, que são mostradas em anexo, assim como as tabelas referentes aos valores numéricos de suas dispersões e demais dados relevantes ao ensaio.

5.1. Simbologia.

Os ensaios com plumas geradas por diferentes salinidades são discriminados pela letra **p.** Os ensaios feitos com plumas originadas por diferença de temperatura (plumas térmicas) são discriminados pelas letras **pt** e os ensaios feitos com plumas térmicas tingidas são discriminados pelas letras **ptt**.

Os ensaios com correntes intrusivas são caracterizados pela letra **i**.

Os ensaios com correntes de fundo são caracterizados pela vazão de entrada e pelo diâmetro do obstáculo.

5.1.1 Plumas.

Para os ensaios de plumas originadas por diferentes salinidades são utilizados dois números após a letra **p**. O 1° número representa a densidade do meio ambiente fluido sendo :

1 referente a densidade $d_1 = 1{,}013$,
2 referente a densidade $d_2 = 1{,}020$,
3 referente a densidade $d_3 = 1{,}050$,

enquanto que o 2° número representa os valores das vazões de entrada, sendo:

1 para vazão de entrada de $Q_0 = 50$ ml/s,
2 para vazão de entrada de $Q_0 = 150$ml/s,
3 para vazão de entrada de $Q_0 = 300$ ml/s

Após as letras que identificam os ensaios de plumas térmicas (pt) e de plumas térmicas tingidas (ptt), é usado apenas um número referente as vazões de entrada, sendo 1 para vazão de 50 ml/s, 2 e 3 para as vazões de 150 e 300ml/s respectivamente.

Exemplo de identificação do ensaio de plumas :

Seja por exemplo o ensaio de conotação p23. Sabe-se que este ensaio refere-se ao estudo do escoamento superficial tipo pluma gerada por diferentes salinidades (p) cujo ambiente fluido possui densidade 1,020 (1° número) e cuja vazão de entrada (2° número) é de 300ml/s.

5.1.2 Intrusões.

Para todos os ensaios de intrusões foram utilizados os mesmos valores de densidade para o ambiente fluido mais denso (d_3=1,050) e para as correntes intrusivas (d_2=1,020).

A estratificação ambiente se fez inicialmente preenchendo-se o tanque com solução salina de densidade d_3=1,050 e tingido pelo corante azul de metileno. O restante do tanque foi preenchido com água pura até a altura de trabalho. A corrente intrusiva possuía uma densidade intermediária de d_2=1,020 e foi tingida com permanganato de potássio para melhor visualização.

O esquema abaixo mostra uma corrente intrusiva (cor vermelha) que comporta-se inicialmente como uma corrente de fundo até atingir a interface gerada pelas diferenças de densidade e aí se espalhar através da interface.

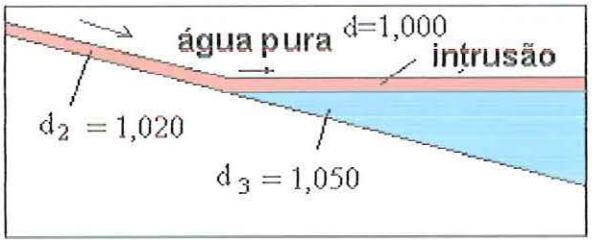


Figura 32 - Densidades utilizadas no ensaio de intrusões.

Sendo assim, os ensaios de intrusões são identificados somente pela letra **i**, seguido do número referente à vazão de entrada. As vazões de entrada possuem os mesmos números que identificam as vazões de entrada usados para plumas.

5.1.3 Correntes de fundo em torno de obstáculos

Como anteriormente mencionado no capítulo 4, ítem 4.11, foram realizados alguns ensaios com correntes de fundo para observar instabilidades a jusante de obstáculos. Estes eram cilindros de acrílico com diâmetros de D_1=50, D_2=60, D_3=100 e D_4=200 mm. Os obstáculos foram posicionados a uma distância de 40 cm a partir da saída do receptor. As correntes simuladas possuíam densidade de 1,050 para todos os ensaios e as vazões ensaiadas foram de q_1=50ml/s e q_2=220ml/s. Houve ensaios com obstáculos na forma de polígonos e o comportamento da corrente de fundo foi devidamente registrado pelas fotografias.

5.2 Plumas.

5.2.1 Plumas geradas por diferentes salinidades.

Como visto no capítulo 4 sobre materiais e métodos, para a realização dos experimentos com plumas, era necessário preencher o tanque com solução de água e sal, para em seguida introduzir continuamente a corrente leve composta por água pura tingida pelo permanganato de potássio. Como mencionado no ítem 5.1.1 foram realizados experimentos para três diferentes valores de densidade ambiente e três diferentes valores de vazões.

A espessura da pluma era registrada após sua passagem por todo o tanque (condição denominada brevemente de "regime permanente"). Sua dispersão era registrada por fotografias e filmes e obtinha-se o valor numérico do espalhamento através de papel graduado que se encontrava no fundo do tanque. Os valores lidos eram devidamente corrigidos (erro máximo em torno de 5%) devido ao ângulo de inclinação do fundo graduado com o olho do observador (erro de paralaxe).

Observou-se que nos ensaios com vazões de 50ml/s, a espessura da pluma se manteve constante ao longo do escoamento em regime dito permanente enquanto que para as demais vazões, houve um acréscimo da espessura com o tempo (caracterizando

como regime não-permanente). Efetuou-se medidas de espessura em três diferentes pontos da canaleta e obteve-se a espessura média das plumas. Assim, para os ensaios com altas vazões, tem-se a espessura da corrente superficial como função do tempo e não como um valor único aparente nas fotografias. Estas ilustram o modo de se obter o valor quantitativo das espessuras, bem como visualizar a estratificação ambiente em duas camadas.

Em anexo, constam tabelas com todos valores lidos nos ensaios, tais como temperaturas da pluma, do ambiente fluido, do laboratório, umidade do laboratório, massas específicas, condições geométricas de entrada, e valores calculados como número de Reynolds, número de Richardson, fluxo de diferença de densidade.

5.2.1.1 Evolução das plumas

As figuras 33 a 70 mostram, graficamente, a evolução de todos os ensaios realizados. Os gráficos de cada ensaio são apresentados na seguinte ordem:

1ª figura Evolução da frente de espalhamento da pluma. Os número indicam, seqüencialmente, a posição da frente.

2ª figura Evolução da posição mais distante da origem da frente de deslocamento na direção longitudinal e evolução da largura máxima da pluma.

3ª figura Velocidades longitudinais médias desde o lançamento.

As velocidades médias foram obtidas considerando a posição da frente de espalhamento (distância) dividida pelo tempo corrido desde o lançamento. Assim, não é uma velocidade para o ponto no qual se encontra a frente.

4ª figura Velocidades transversais médias desde o lançamento.

Observa-se a grande gama de dados possíveis de serem extraídos dos experimentos.

Para o ensaio 23, foram realizadas as avaliações densitométricas descritas no ítem 4.9 (ver figuras 57 e 58).

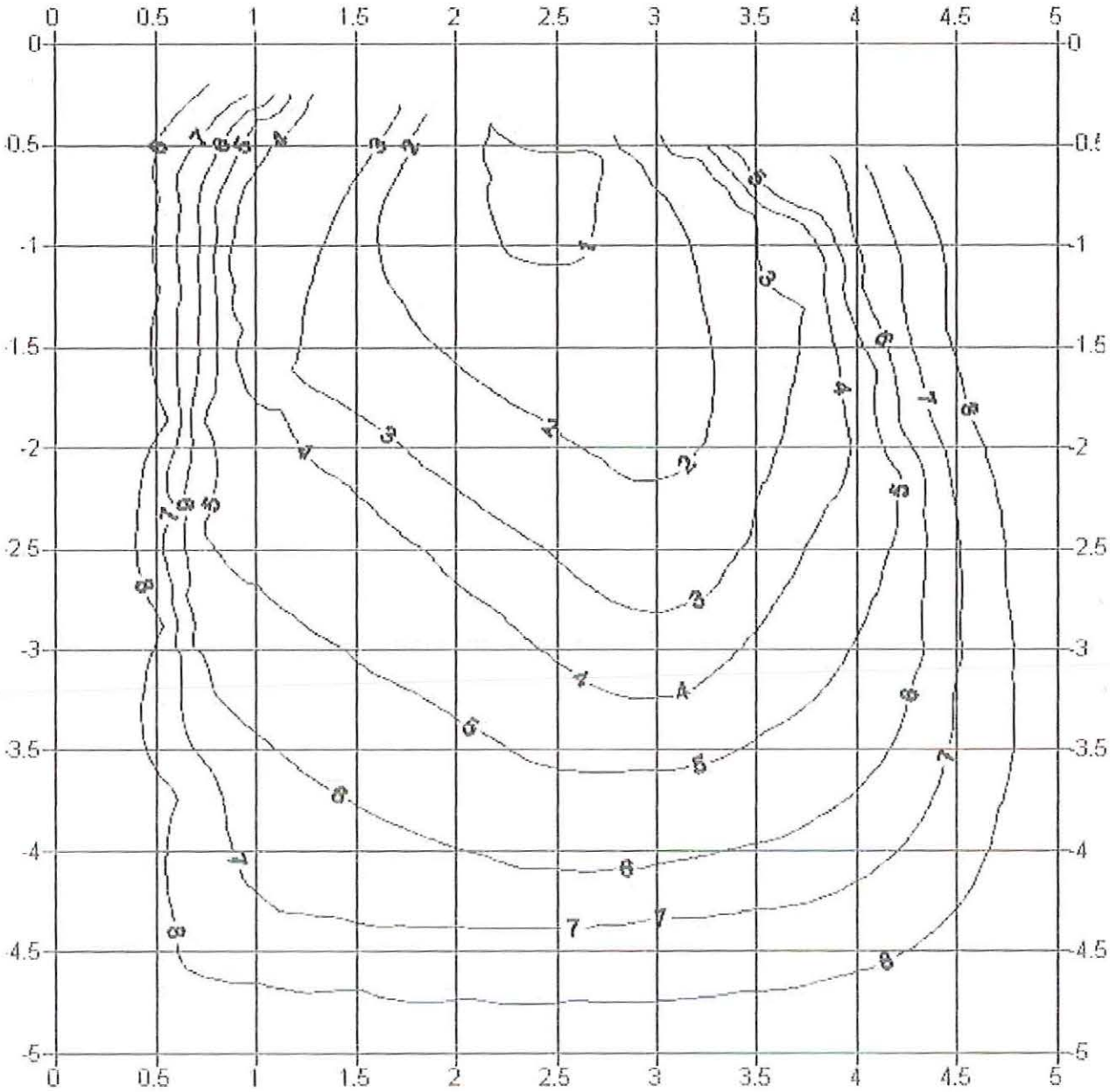


Figura 33– Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p11.

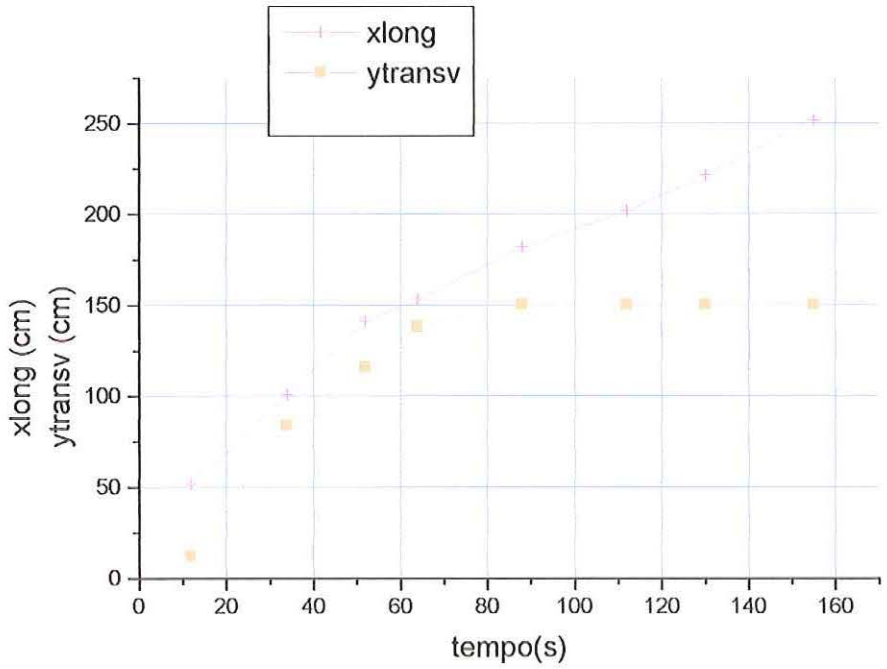


Figura 34 – Gráfico dos espalhamentos longitudinais e transversais para o ensaio p11.

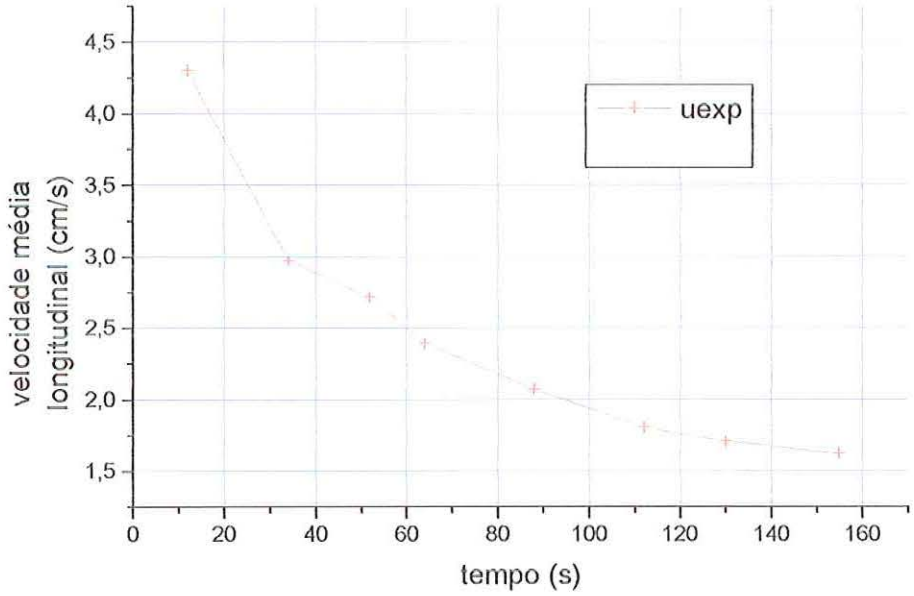


Figura 35– Velocidades médias longitudinais para o ensaio p11.

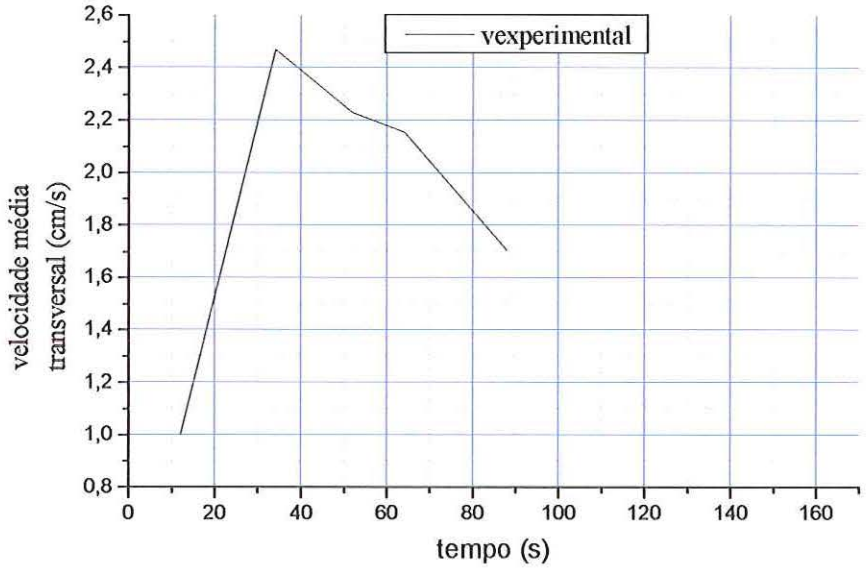


Figura 36– Comportamento da velocidade média transversal do ensaio p11.

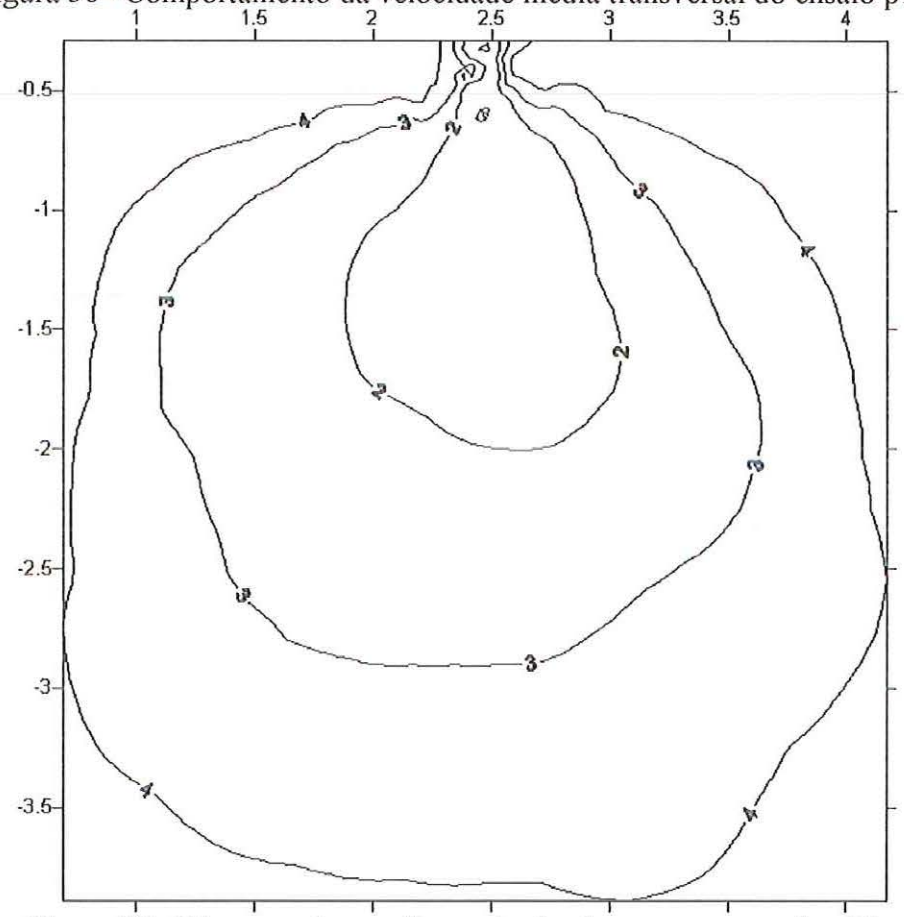


Figura 37– Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p12.

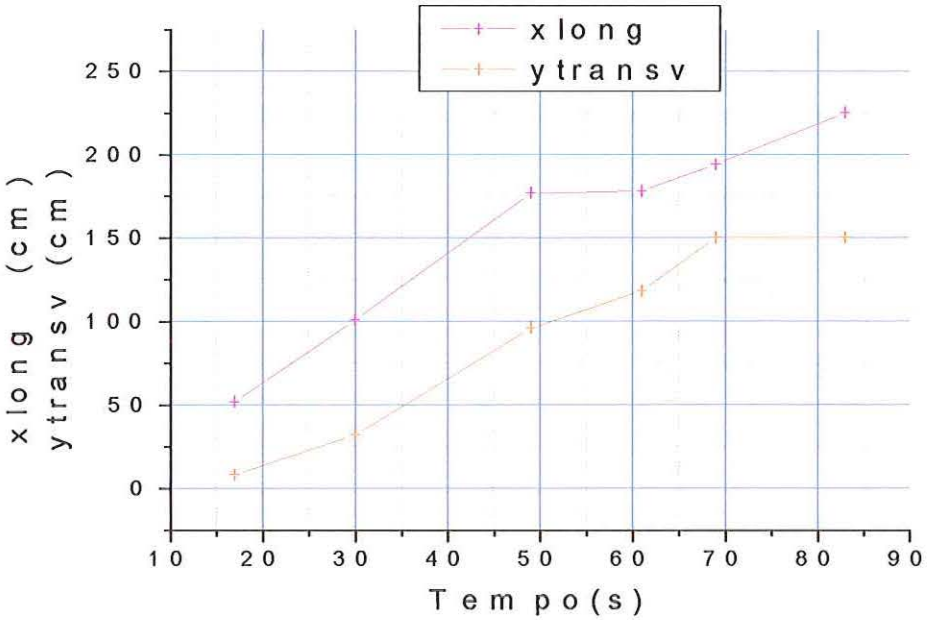


Figura 38 – Espalhamentos longitudinais e transversais do ensaio p12.

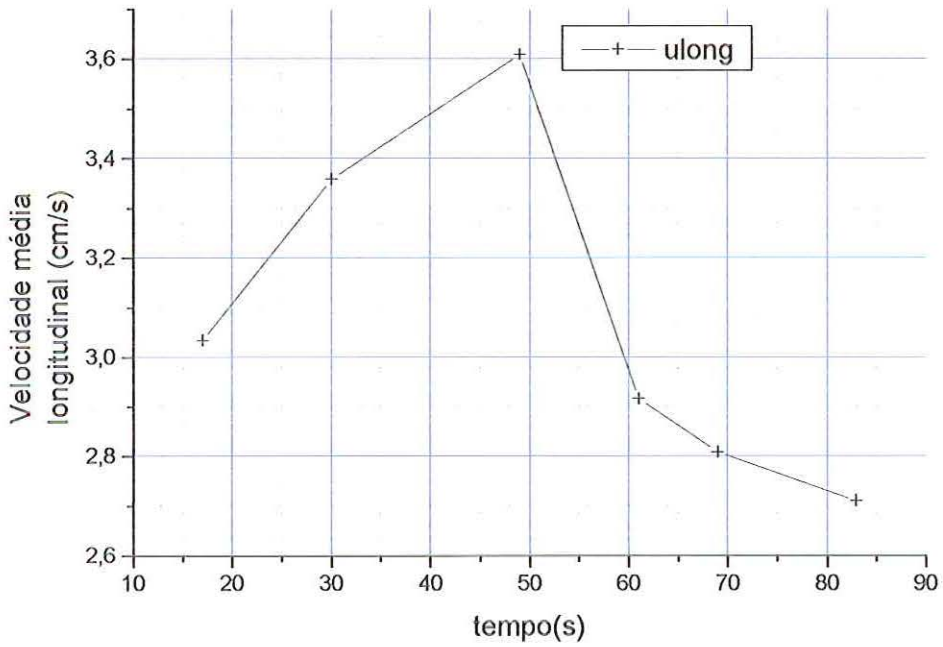


Figura 39 – Velocidade média longitudinal para o ensaio p12.

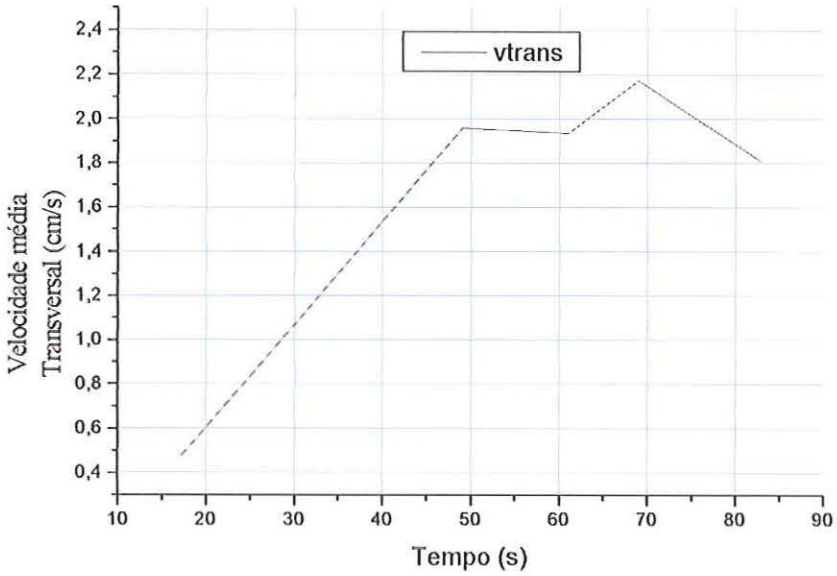


Figura 40 – Velocidade média transversal do ensaio p12.

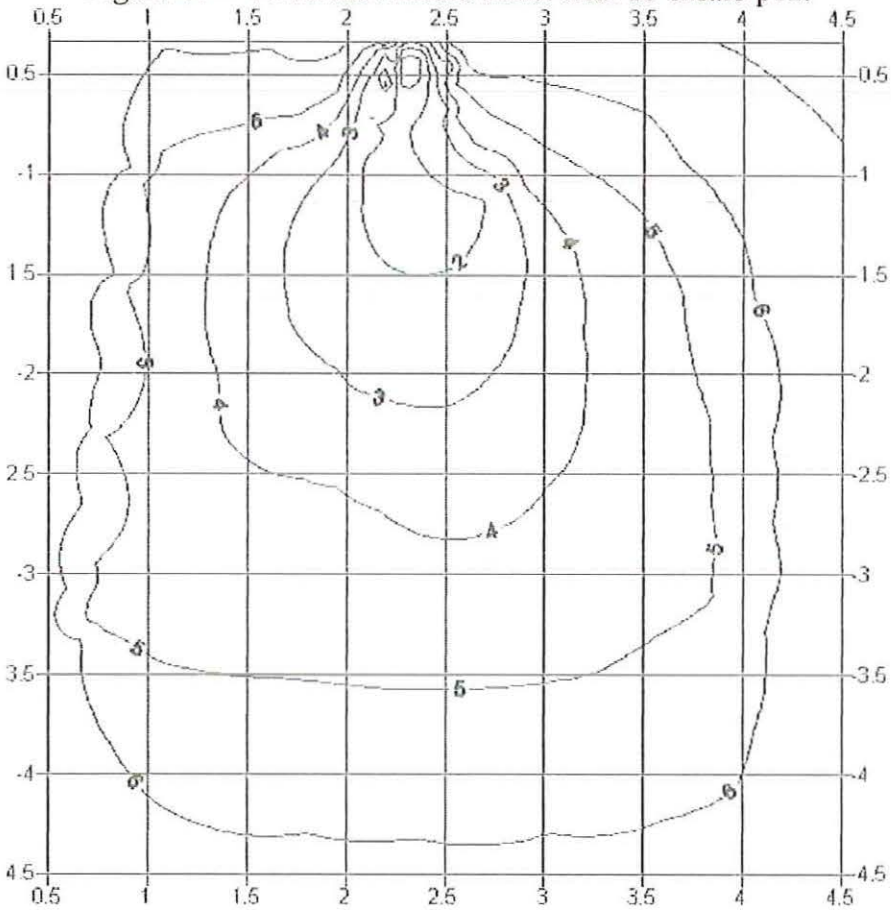


Figura 41– Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p13.

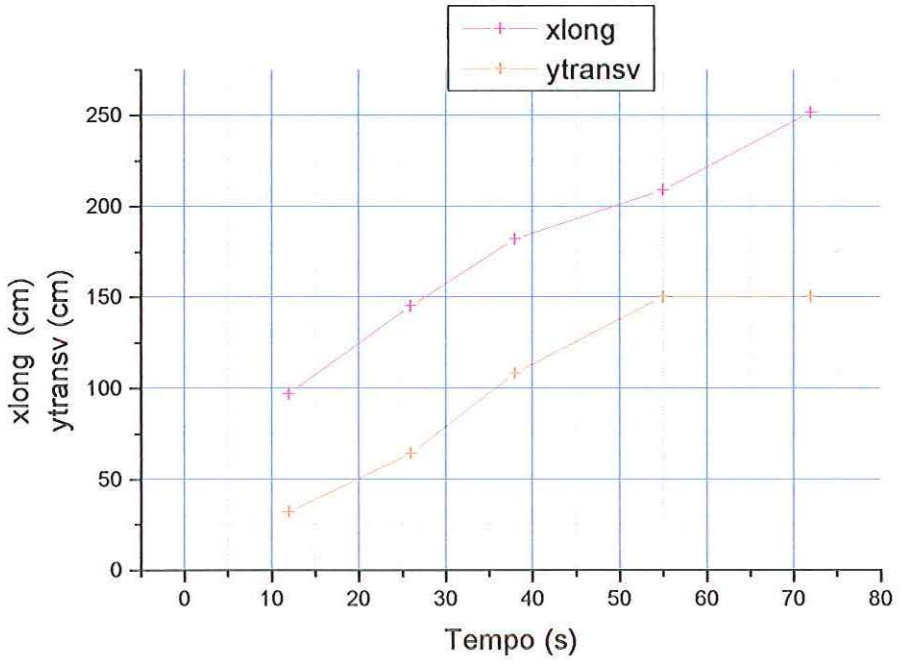


Figura 42 –Espalhamentos laterais e longitudinais do ensaio p13.

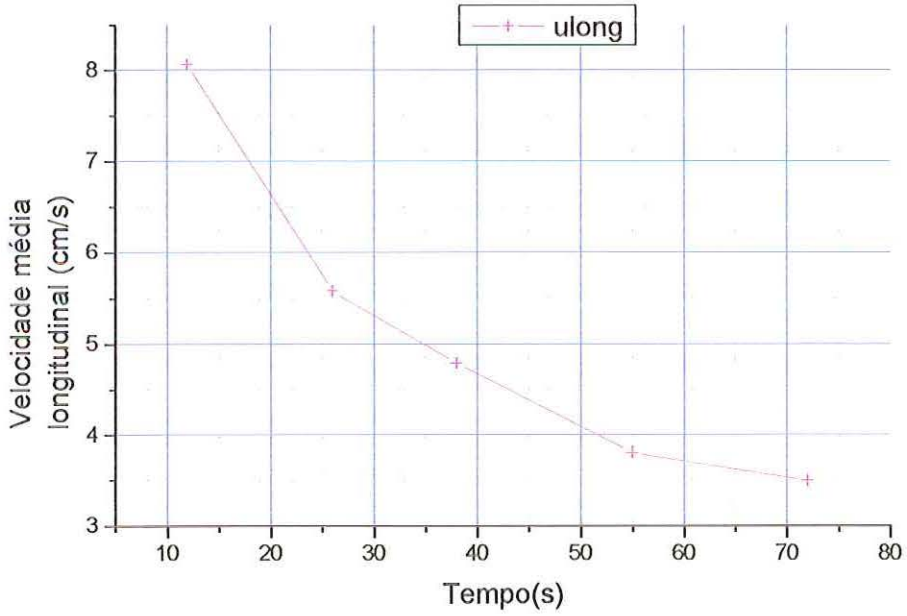


Figura 43 – Velocidade média longitudinal para o ensaio p13.

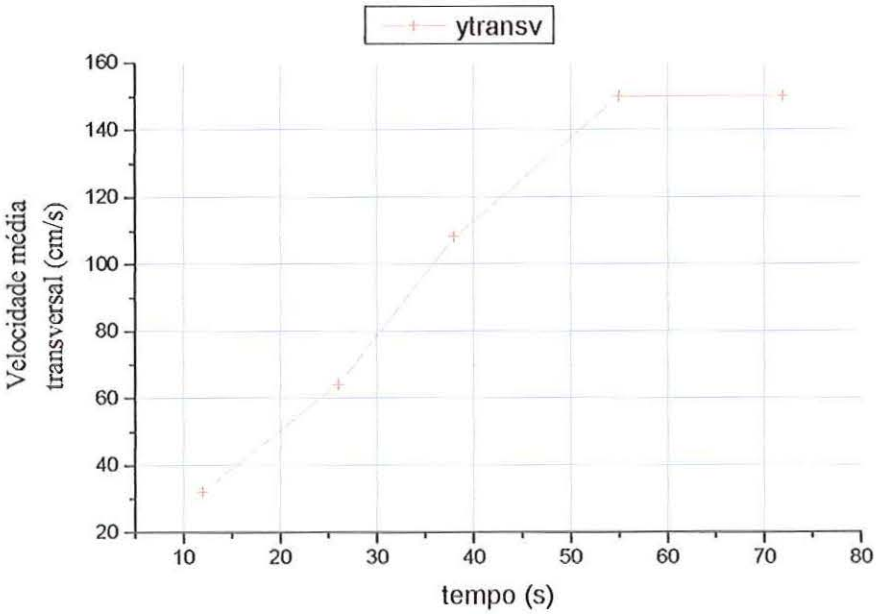


Figura 44– Velocidade média transversal para o ensaio p13.

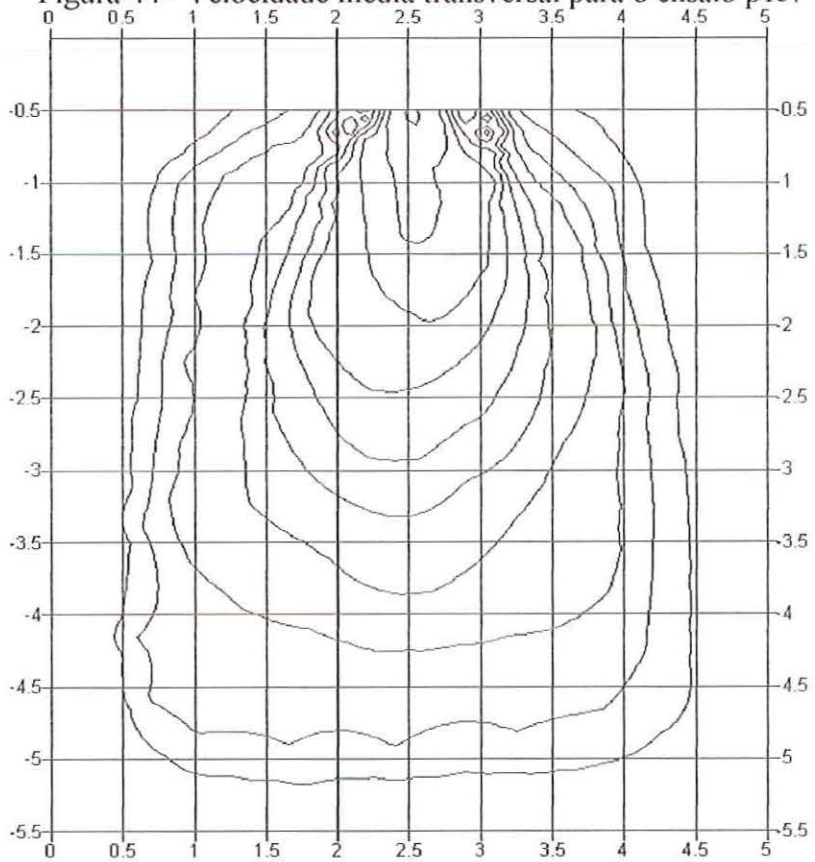


Figura 45 – Espalhamento da pluma para o ensaio p21.

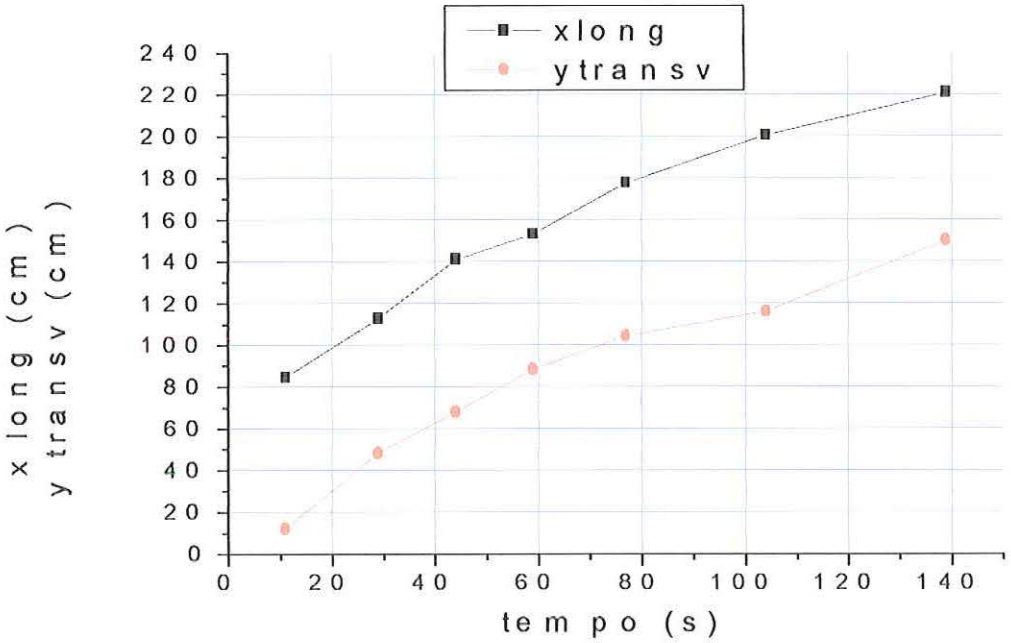


Figura 46– Espalhamentos longitudinais e transversais do ensaio p21.

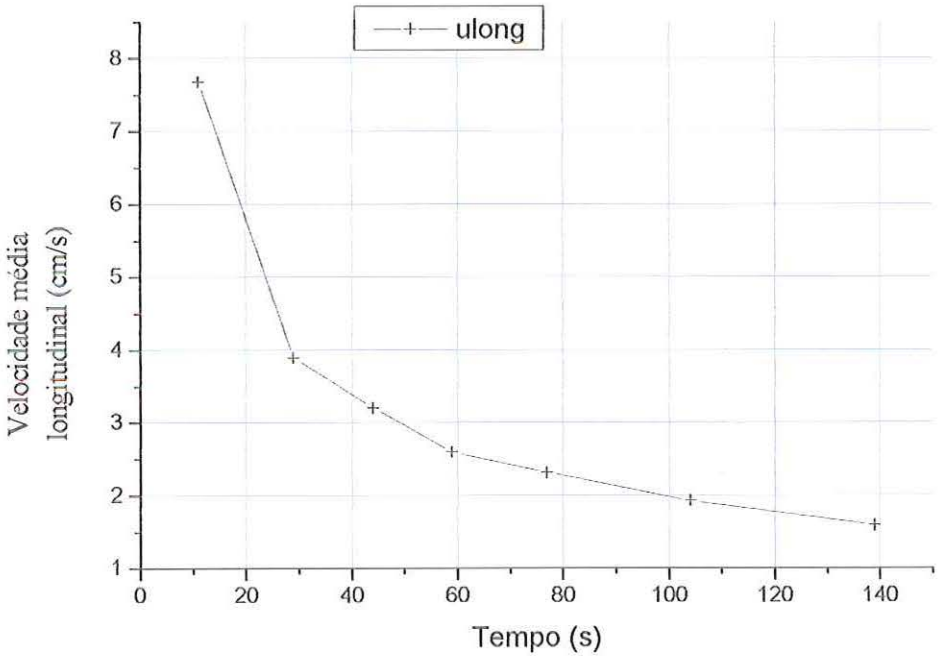


Figura 47 – Velocidade média longitudinal para o ensaio p21.

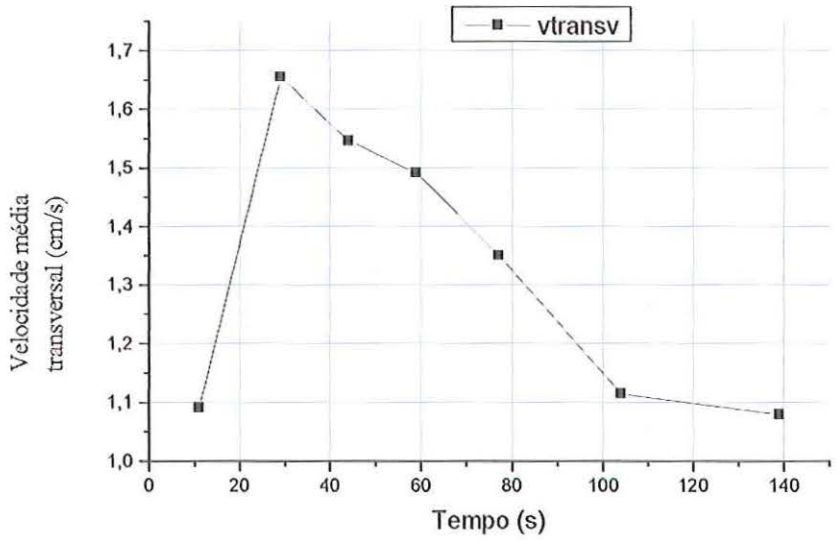


Figura 48 – Velocidade méda transversal para o ensaio p21.

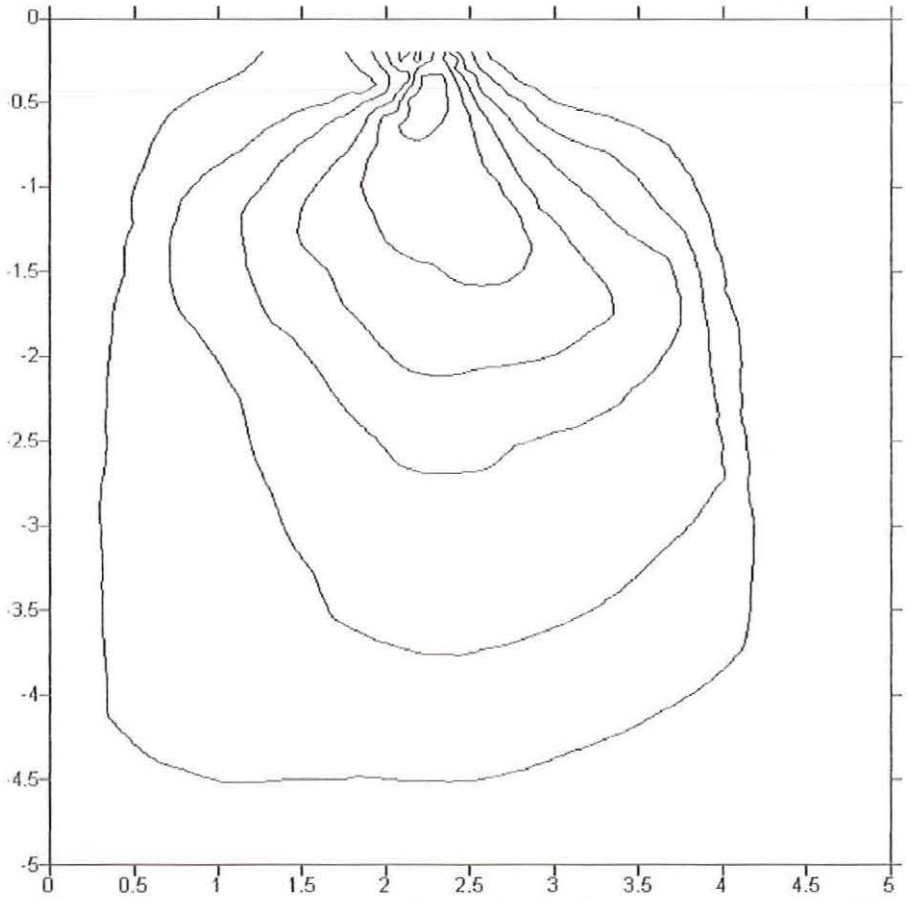


Figura 49 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p22.

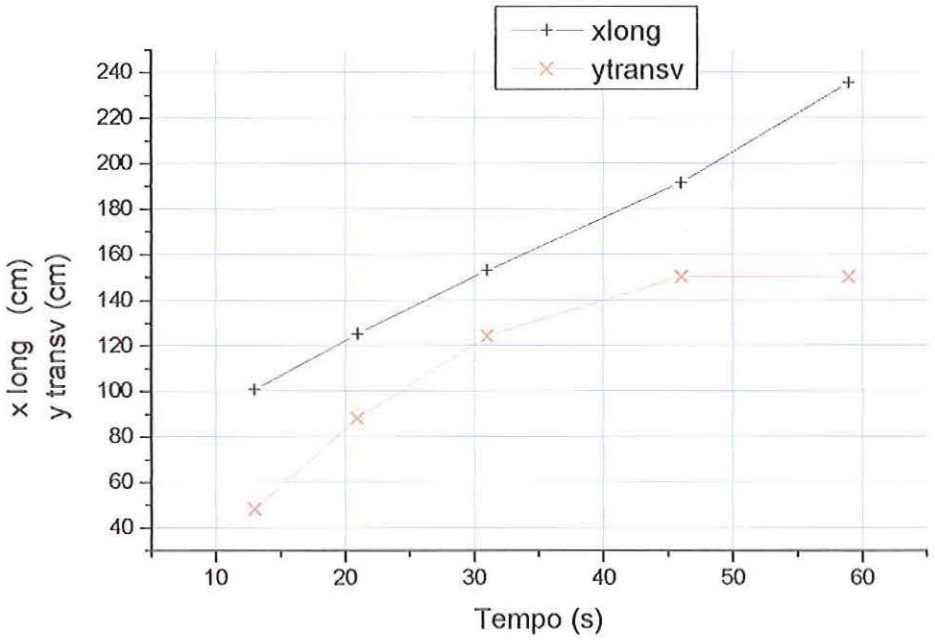


Figura 50 – Espalhamento para o ensaio p22.

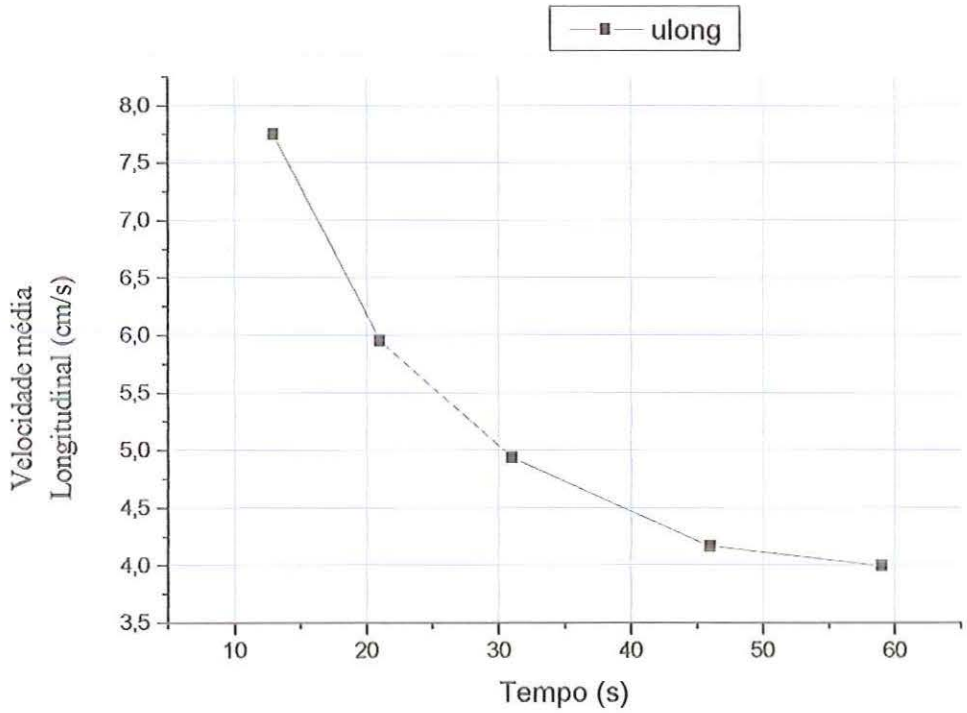


Figura 51 – Velocidade média longitudinal para o ensaio p22.

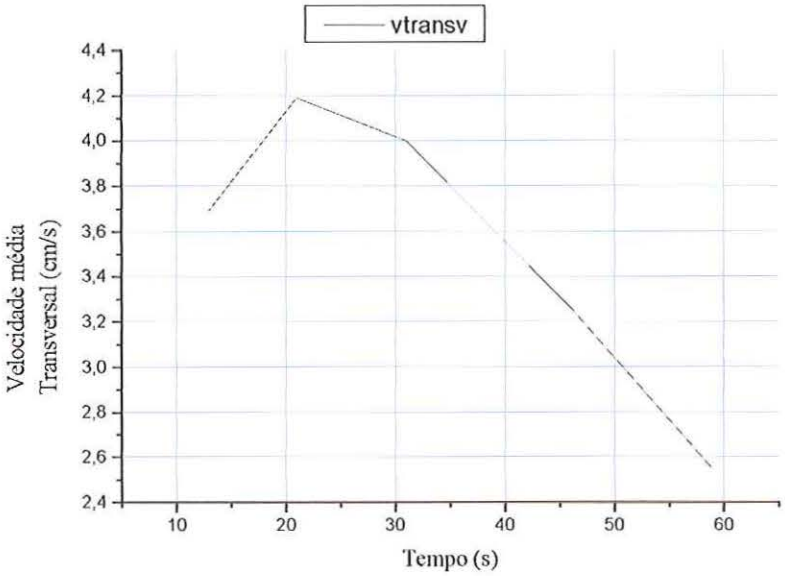


Figura 52 – Velocidade média transversal para o ensaio p22.

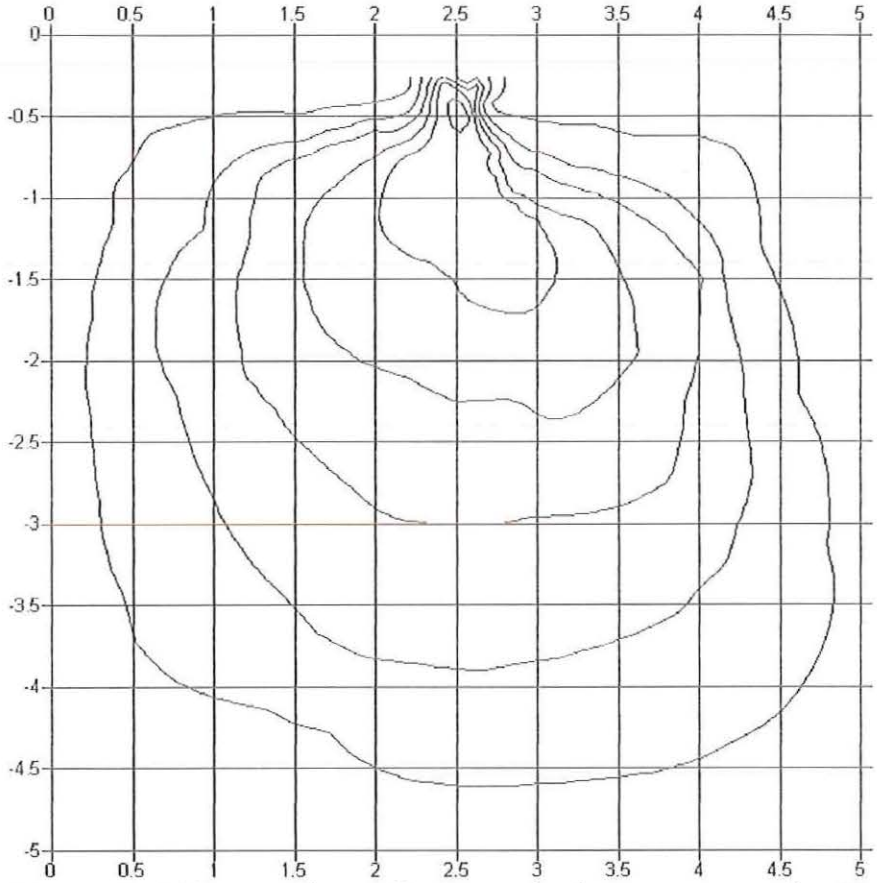


Figura 53 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p23.

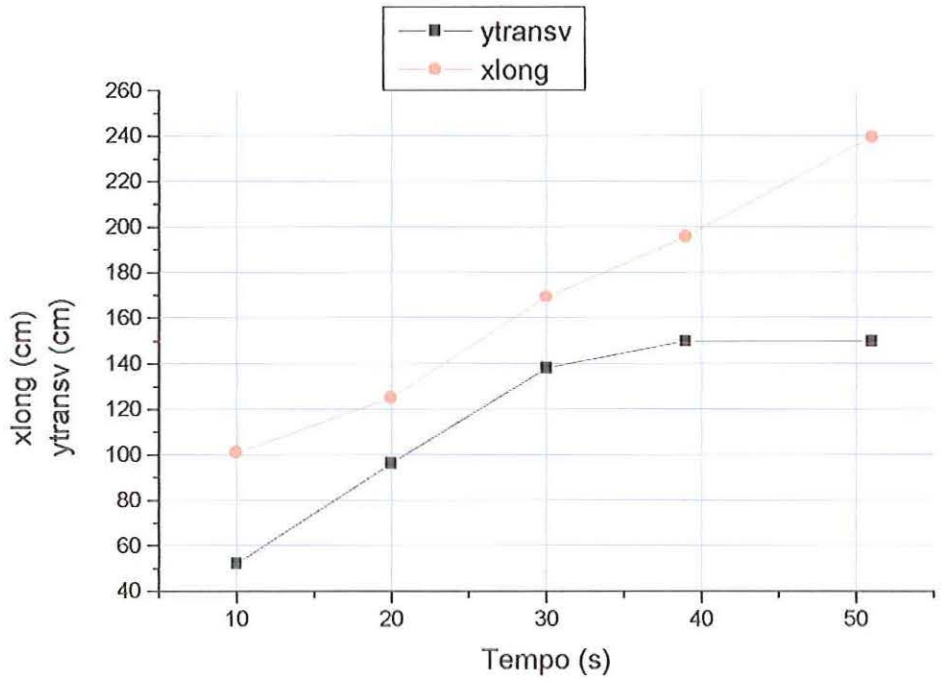


Figura 54 – Espalhamentos longitudinais e transversais para o ensaio p23.

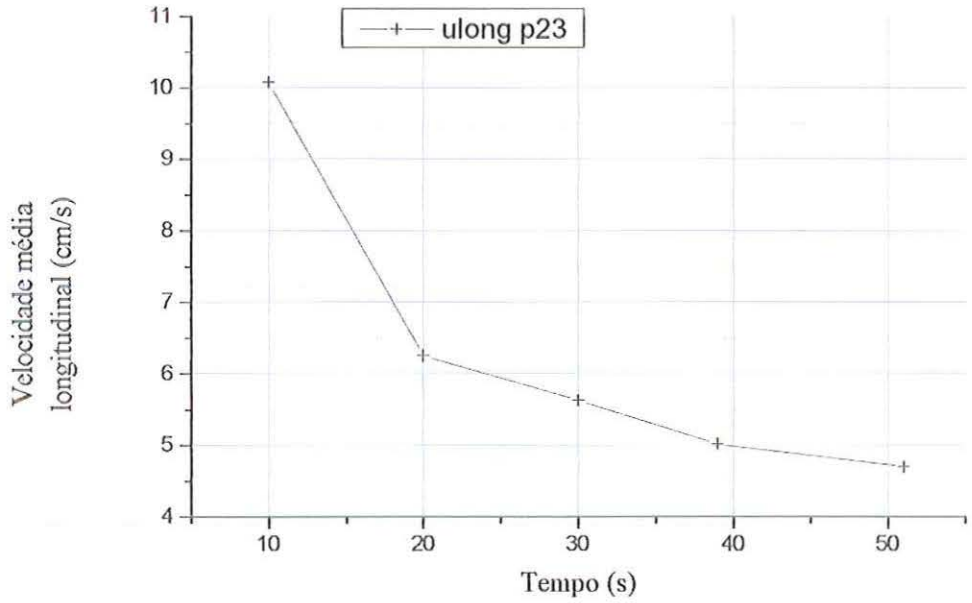


Figura 55 – Velocidade média longitudinal para o ensaio p23.

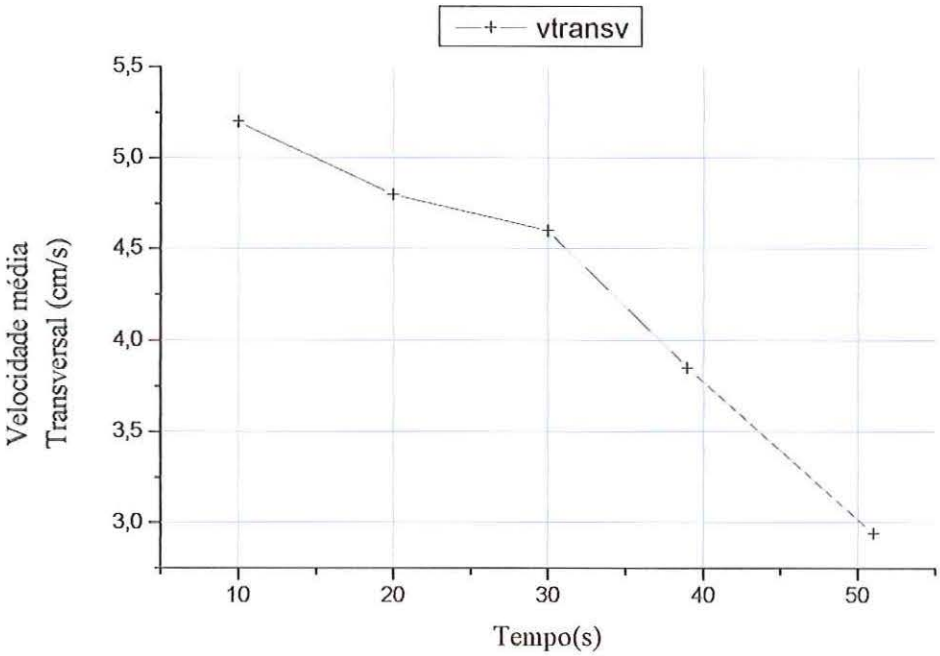


Figura 56 – Velocidade média transversal para o ensaio p23.

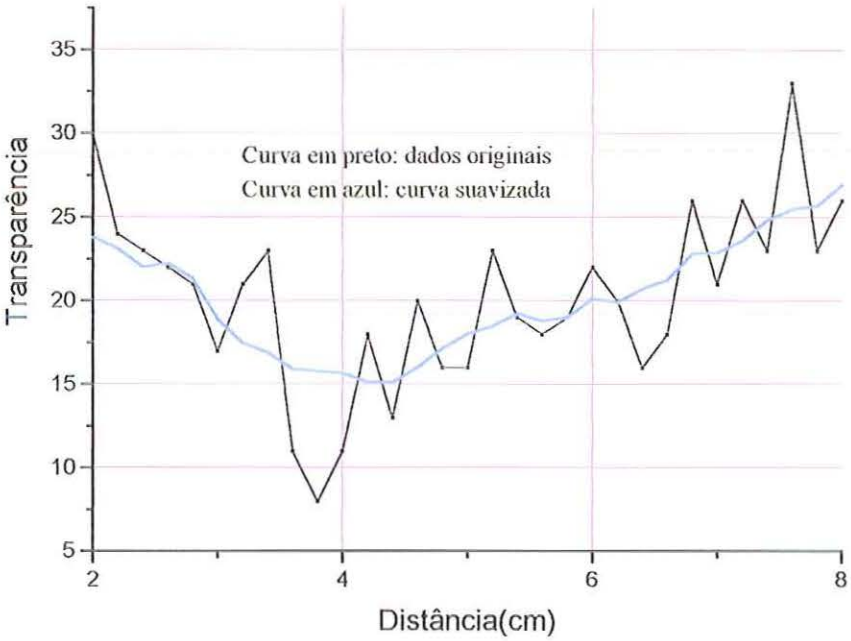


Figura 57 – Gráfico da transparência pela distância para o ensaio p23.

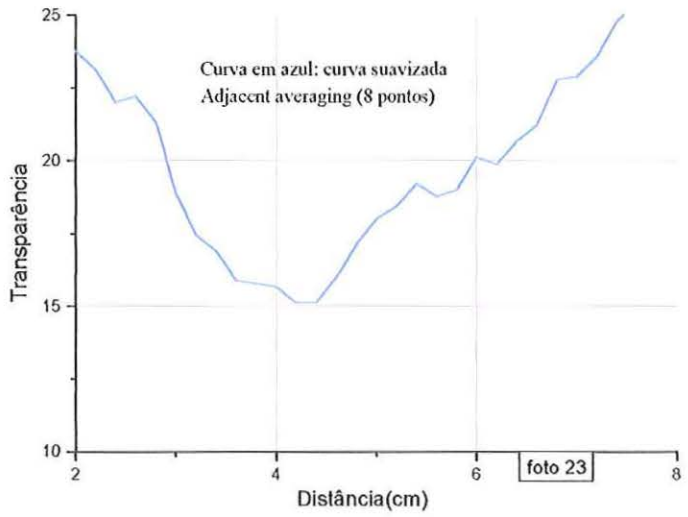


Figura 58 – Variação da intensidade de luz com a distância para o ensaio p23.

Na figura 58, vê-se os valores das distâncias em cm no eixo das abscissas. O valor de 6cm é o valor real da extensão da fotografia que foi varrida pelo densitômetro. O valor de 6cm da fotografia analisada corresponde a largura de 150cm do tanque. Nota-se que, no centro do gráfico, há uma diminuição brusca da transparência que determina a região de maior concentração do corante (permanganato de potássio).

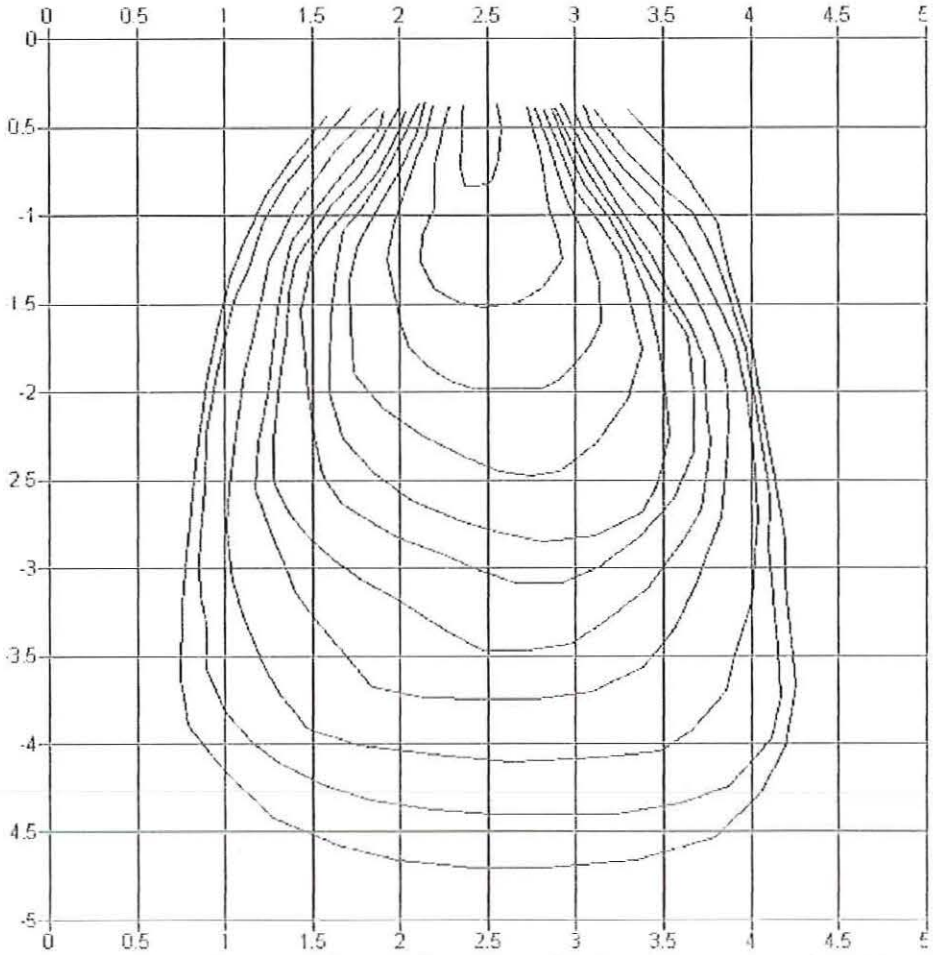


Figura 59 – Diagrama de espalhamento da pluma para o ensaio p31.

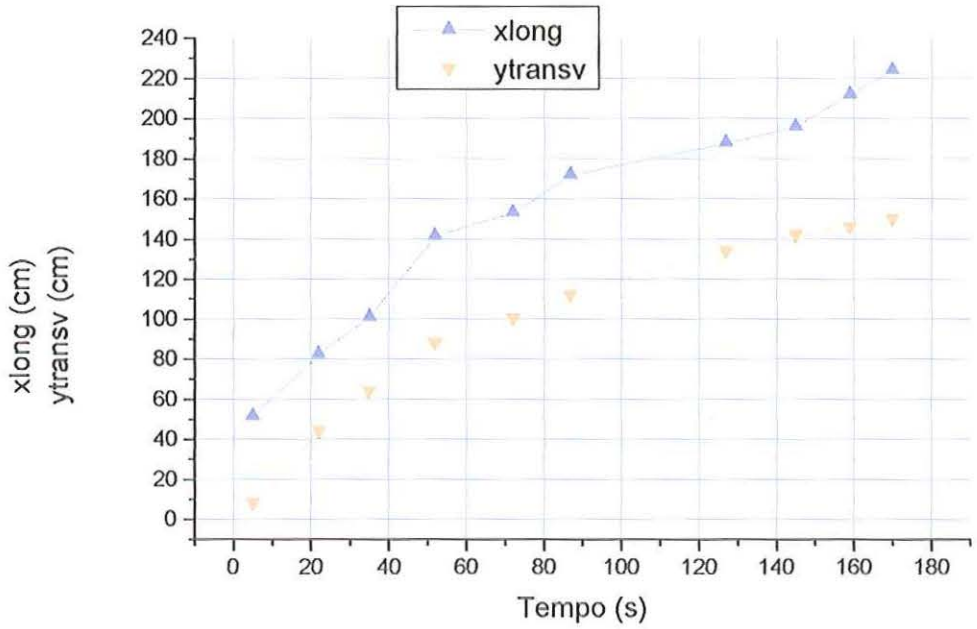


Figura 60 – Espalhamentos longitudinais e transversais da pluma para o ensaio p31.

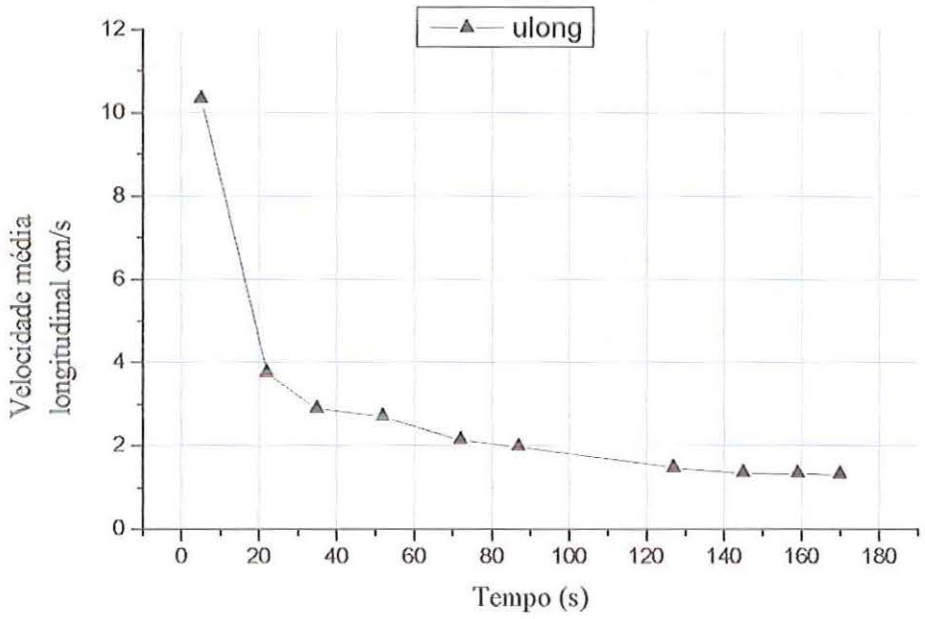


Figura 61 – Velocidade média longitudinal para o ensaio p31.

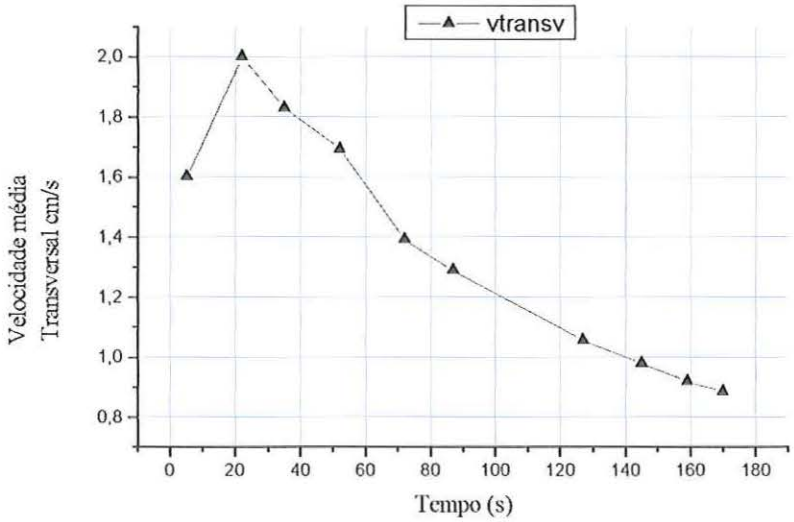


Figura 62 – Velocidade média transversal para o ensaio p31.

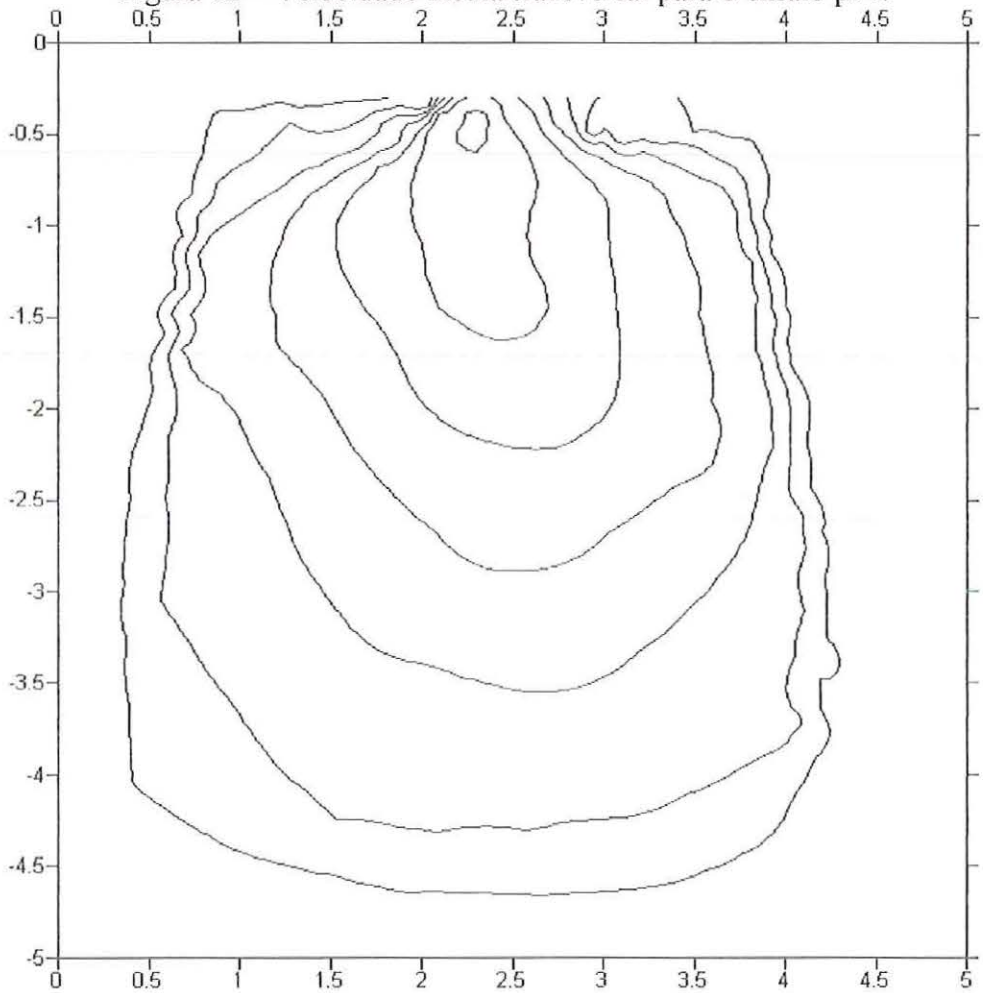


Figura 63 – Diagrama do espalhamento para o ensaio p32.

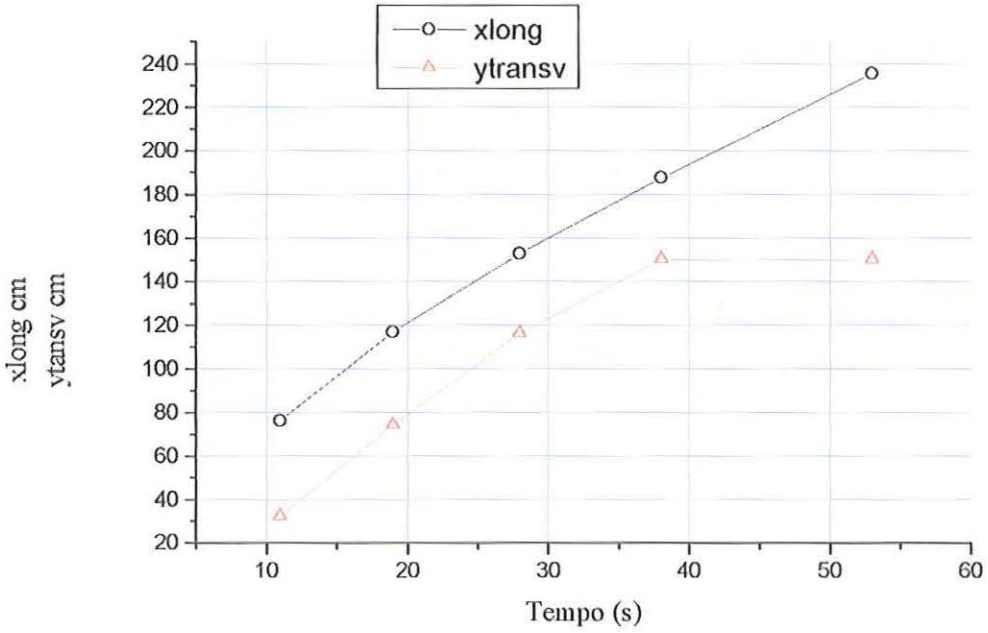


Figura 64 – Espalhamento da pluma para o ensaio p32.

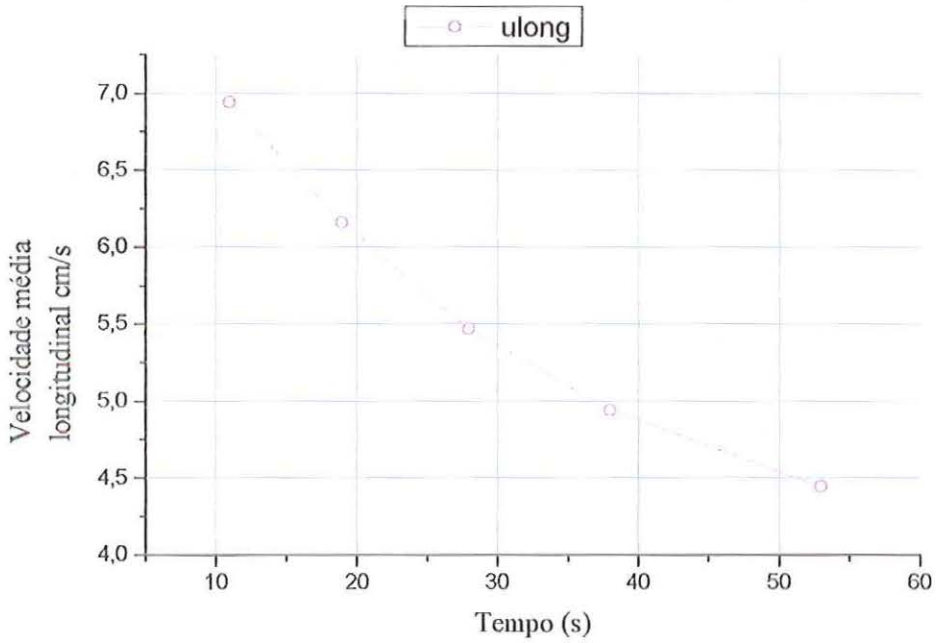


Figura 65 – Velocidade média longitudinal para o ensaio p32.

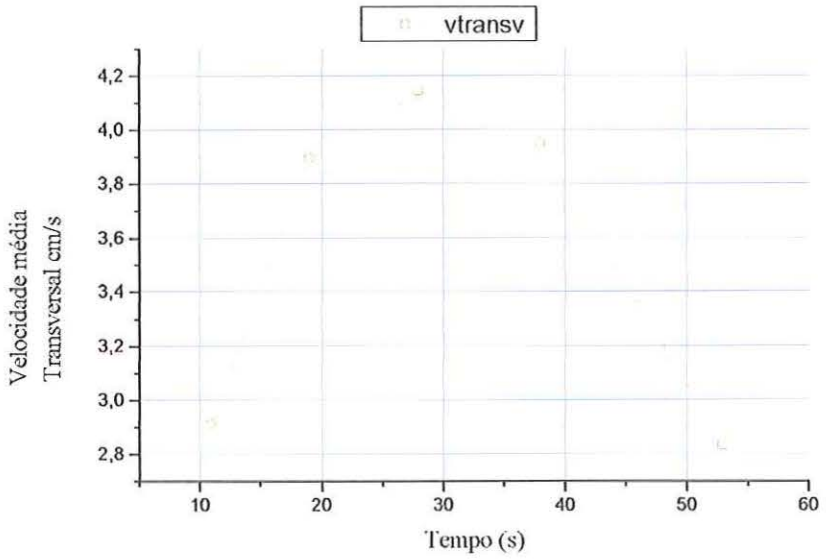


Figura 66 – Velocidade média transversal para o ensaio p32.

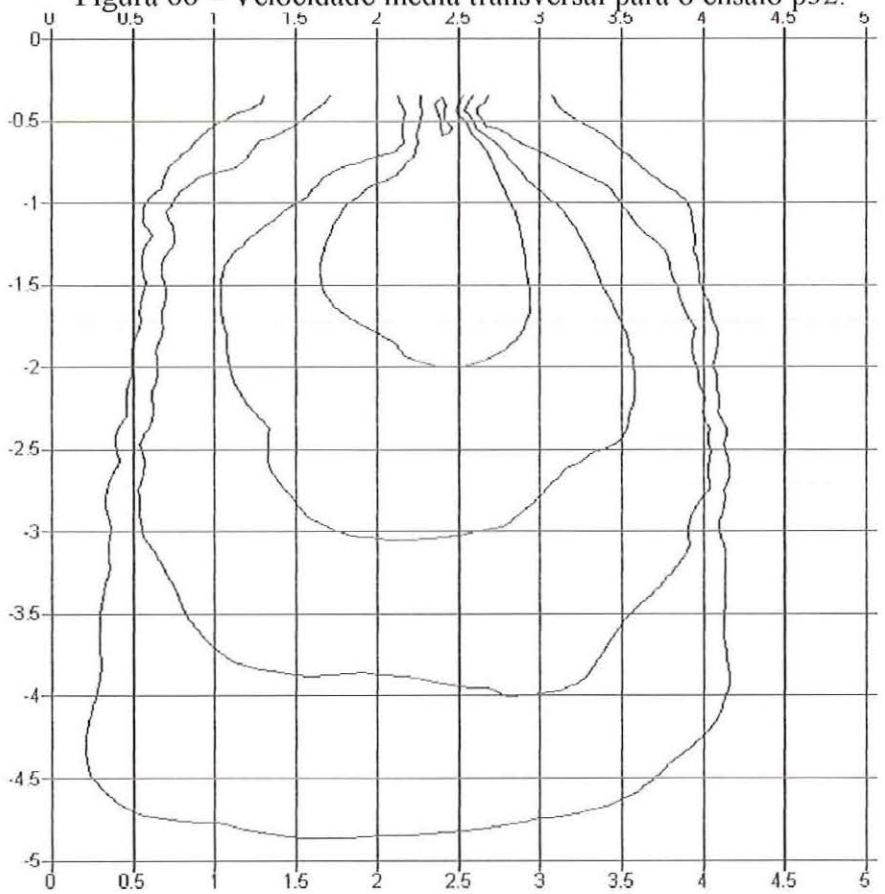


Figura 67 – Diagrama do espalhamento para o ensaio p33.

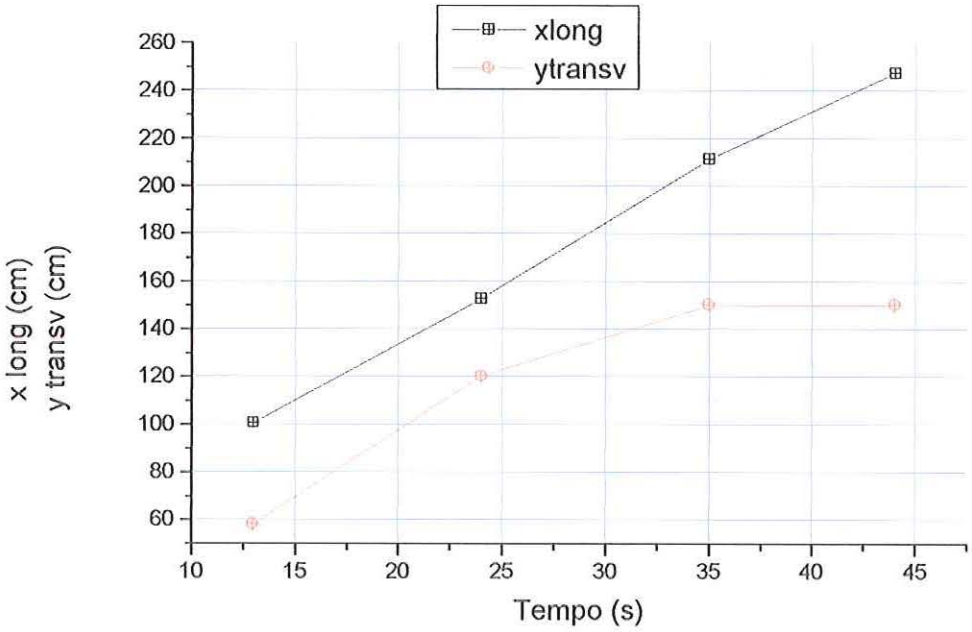


Figura 68 – Espalhamentos longitudinais e transversais da pluma para o ensaio p33.

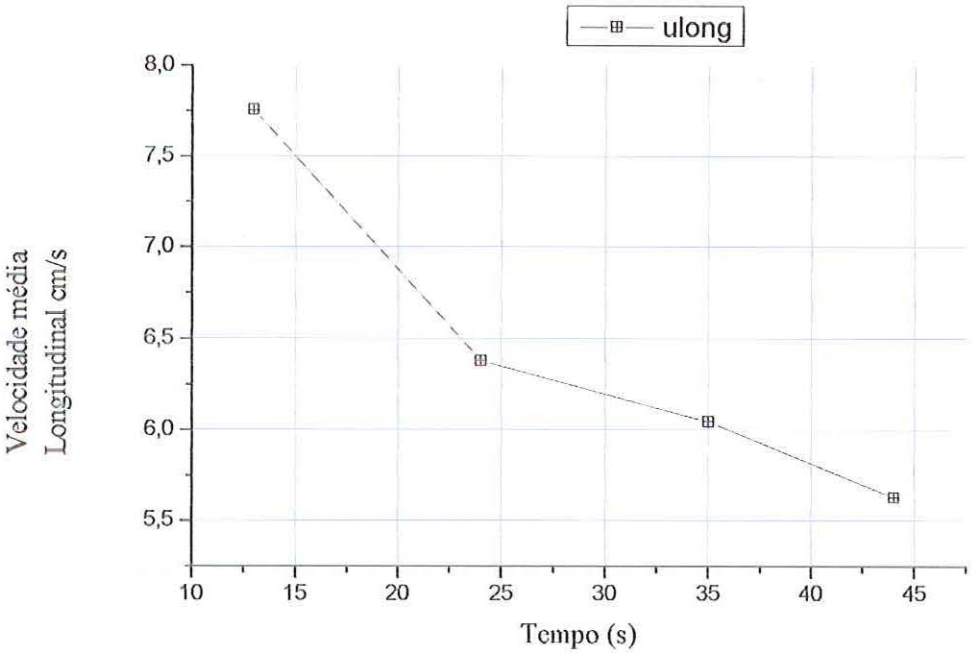


Figura 69 – Velocidade média longitudinal para o ensaio p33.

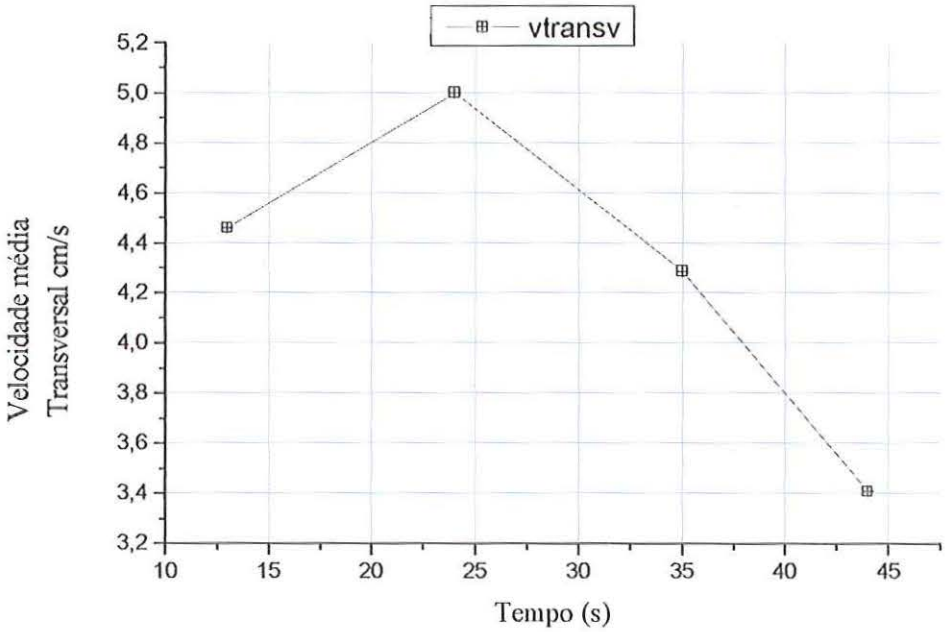


Figura 70 – Velocidade média transversal para o ensaio p33.

5.2.2 Plumas geradas por diferentes temperaturas.

Como mencionado anteriormente, as plumas geradas por diferenças de temperaturas foram necessárias devido a pouca visualização das partículas do ambiente fluido composto por solução salina quando do uso do equipamento a Laser.

Para garantir a visualização do escoamento sem interferências eventuais de sais dissolvidos, os ensaios com o equipamento a Laser foram realizados com plumas térmicas sem marcações de corantes. Entretanto, como as características do espalhamento são relevantes para os futuros estudos de simulação e aprofundamento desses escoamentos, os mesmos ensaios foram repetidos com equipamento fotográfico e filmadora e com as plumas térmicas marcadas com corante. Assim espera-se que as características medidas para as plumas térmicas possam ser utilizadas como base para as futuras quantificações também das plumas salinas.

5.2.2.1 Plumas térmicas sem corantes

Como visto no capítulo 4, o equipamento a Laser utilizado para os ensaios era o modelo OXFORD LS20 de vapor de cobre. Este equipamento fornece um raio Laser que era direcionado por uma fibra ótica até um dispositivo que o expandia num plano de luz. Este, por sua vez, iluminava uma determinada seção do escoamento. As partículas que atravessavam este plano tinham o seu movimento registrado por uma câmera CCD, posicionada ortogonalmente com o plano que posteriormente era analisado pelo software Visiflow.

A folha de luz, apesar de sua intensidade, não permitia que a reflexão das partículas fosse suficientemente intensa para atingir a câmera fotográfica com a densidade de informações necessárias para um registro confiável. Em outras palavras, a energia luminosa era reabsorvida pela solução salina. Apesar de, a olho nu, poder ser observado algum movimento de partículas, não houve registro confiável que pudesse ser utilizado. Foram feitos vários testes com partículas germinativas, mas todos resultaram em carência de partículas registradas pela câmera. Foi necessário então, uma mudança do ambiente fluido de solução salina para água pura. Sendo assim, em princípio, a corrente leve (pluma) deveria também ser desprovida de quaisquer sais. Então optou-se pela diferença de temperaturas para a obtenção da corrente de densidade.

Foi construído um sistema de aquecimento de água onde se podia obter massas de água com temperaturas de até 70^0C.

Todos os ensaios com plumas térmicas foram feitos com temperaturas de $\cong$ 46^0C$\pm$ $0,5^0$C e ambiente fluido com temperaturas de $\cong$ 26^0C $\pm 0,5^0$C.

O gerador de plano de luz foi posicionado no eixo longitudinal da canaleta, fixado por um sistema que possibilitava seus movimentos horizontais. Foram escolhidas duas posições para a colocação deste gerador, sendo p1 (56cm) e p2 (104cm), contadas a partir da comporta de entrada da corrente.

A figura 27 do capítulo 4 mostra a posição 1 da tomada de medidas, com a câmera posicionada para a captação do escoamento na direção longitudinal.

A figura 71 mostra a disposição da câmera CCD para a verificação das velocidades transversais. A câmera era convenientemente posicionada de frente ao escoamento, na extremidade a jusante da canaleta. Esta câmera era fixada num tripé e, com o auxílio de uma régua disposta na posição 2, ajustava-se o foco com o nível adequado de preto (com boa visualização das partículas), bem como realizava-se as calibrações necessárias ao cálculo dos campos dos vetores de velocidades.

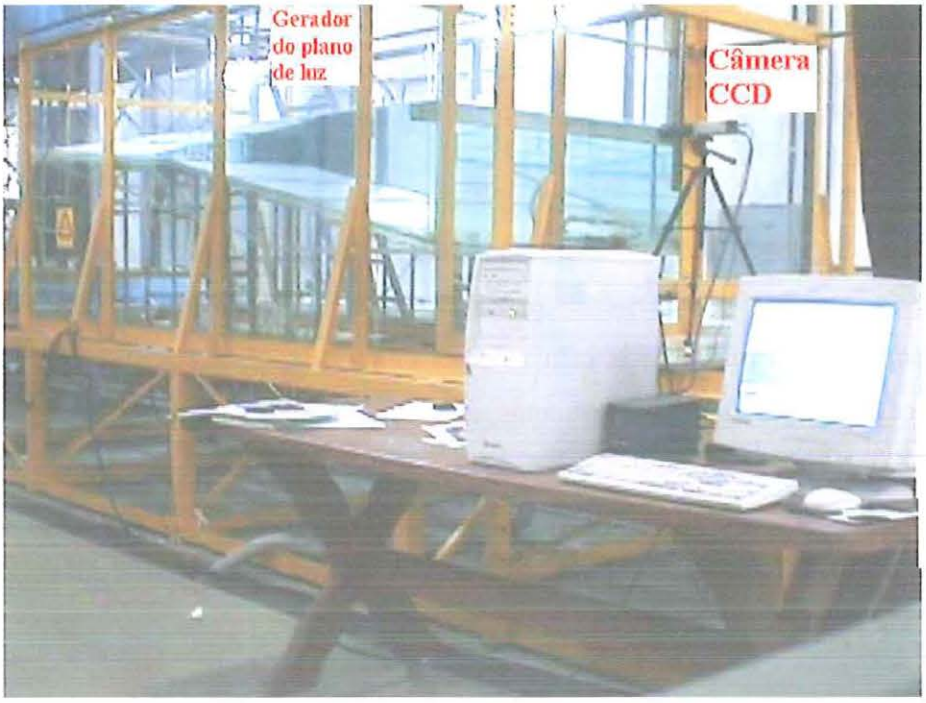


Figura 71 – Disposição da câmera para a posição 2.

Tanto para as medidas de velocidade de espalhamento longitudinal quanto para as medidas de velocidade de espalhamento transversal, ambos: o gerador de luz e a câmera CCD foram posicionados iluminando a maior área possível, respeitando sempre o sentido do escoamento.

Foram feitos nove ensaios usando o equipamento a Laser. As vazões estudadas foram de 50, 150 e 300 ml/s.

As velocidades para o espalhamento transversal foram obtidas somente na posição p2 para os ensaios pt1, pt2 e pt3, porque era nesta posição que ocorriam os maiores espalhamentos antes do choque com as paredes laterais do tanque. Após o

registro do movimento das partículas do escoamento, este movimento era analisado pelo programa Visiflow com a introdução dos parâmetros necessários para a geração dos campos instantâneos de velocidade.

Como já mencionado, o método de análise utilizado foi o de correlação cruzada, com aproximação algorítmica do tipo Gaussiana, com a escolha de visualização de resultados intermediários e parâmetros de escoamento com pixels quadrados.

As imagens possuíam tamanho de 640x480 pixels e a captação das imagens era de 11 "frames por segundo".

A tabela 2 mostra, de acordo com as calibrações, os resultados das áreas analisadas para os ensaios nas posições p1 e p2 para espalhamentos longitudinais e posição p2 para espalhamentos transversais.

Posição	Nº de μm/pixel	Área (cm^2)
p1	167,7852	86,483
p2	162,8664	81,4863
p2t	187,6173	108,1351

Tabela 2 – Valores das áreas analisadas.

A seguir são mostrados resultados obtidos pela metodologia empregada. A seqüência de figuras para cada ensaio é a seguinte:

1ª figura Fotografia do escoamento.

2ª figura Um campo instantâneo do escoamento.

3ª figura Campo "médio" para 1 segundo do escoamento.

Este campo médio de fato representa, devido ao tempo sobre o qual a média é realizada, a situação "quase instantânea" do campo de velocidades. A média neste caso é uma operação de suavização.

4ª figura Campo "médio" de vorticidade para o escoamento (vale o mesmo comentário feito para a 3ª figura).

5.2.2.1.1 VELOCIDADE LONGITUDINAL Q=50 ML/S E POSIÇÃO 1

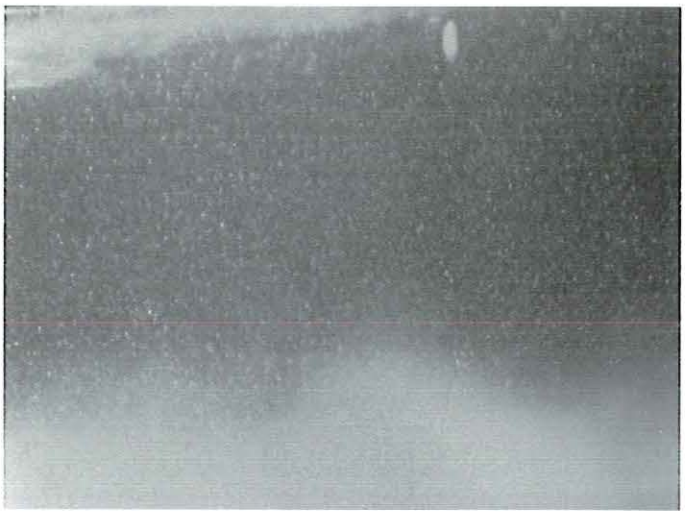


Figura 72 - Posição 1, q=50ml/s e foto Ql000.tif.

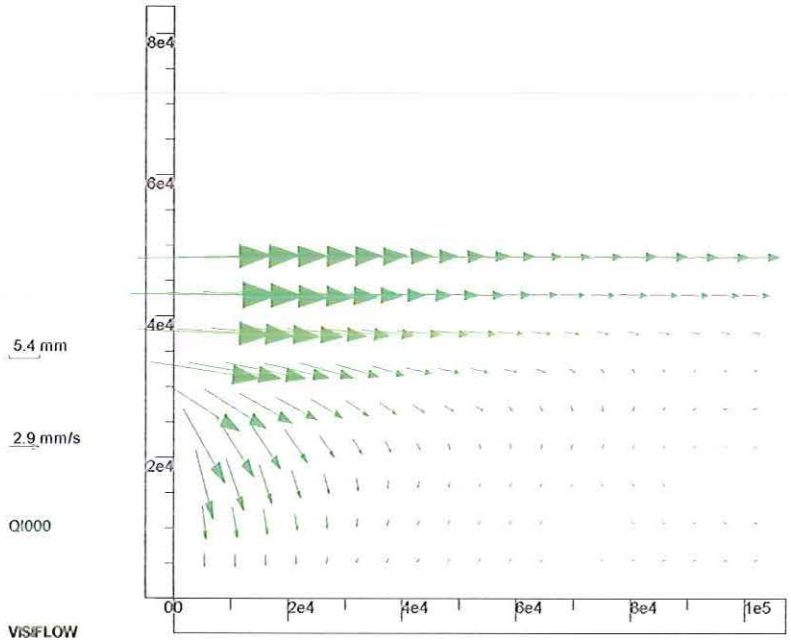


Figura 73 – Campo instantâneo de velocidades para Q1000.tif e Q1001.tif para q=50ml/s

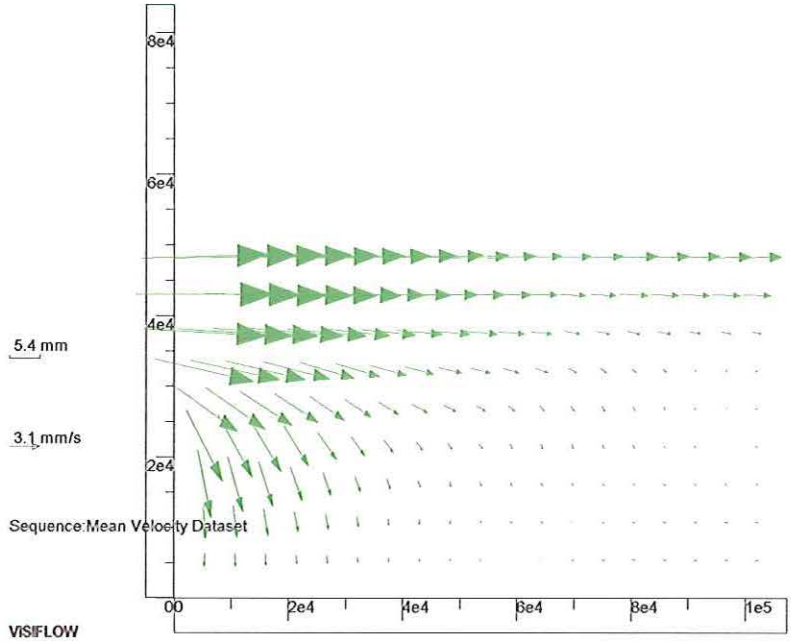


Figura 74- Campo "médio" de velocidade para q= 50ml/s (média sobre 1s).

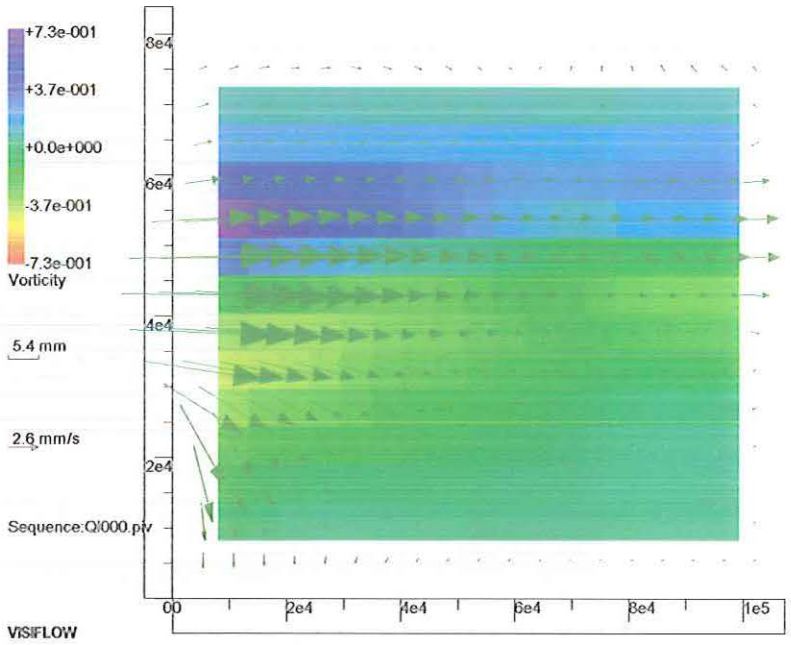


Figura 75 - Vorticidade "média" para q=50 ml/s (média sobre 1s).

As fotografias foram feitas no momento da "chegada da pluma" na seção de estudo escolhida.

Nota-se nas figuras dos campos de vetores, uma boa distinção da pluma (parte superior) e seu efeito de arraste no fluido ambiente, com pouca turbulência para esta vazão de entrada (50ml/s).

Nas fotografias do escoamento deste ensaio (pt1) a altura da lâmina d'água para esta seção era em torno de 50 ±1mm. Observou-se um efeito espelho nestas fotos (na superfície), que foi retirado para o cálculo dos campos instantâneos e médios de velocidade. Ressalta-se aqui que foi necessário a interpolação de vetores (calculados pelo próprio programa) para a obtenção destas medidas.

Os campos de vetores representaram com grande clareza o comportamento do escoamento como registrado na animação das fotografias e com o observado visualmente. Sendo assim, a análise das seqüências das fotos e os campos gerados pelo método de velocimetria a Laser permitem constatar a validade das medidas.

5.2.2.1.2 VELOCIDADE LONGITUDINAL Q=50ML/S E POSIÇÃO 2.

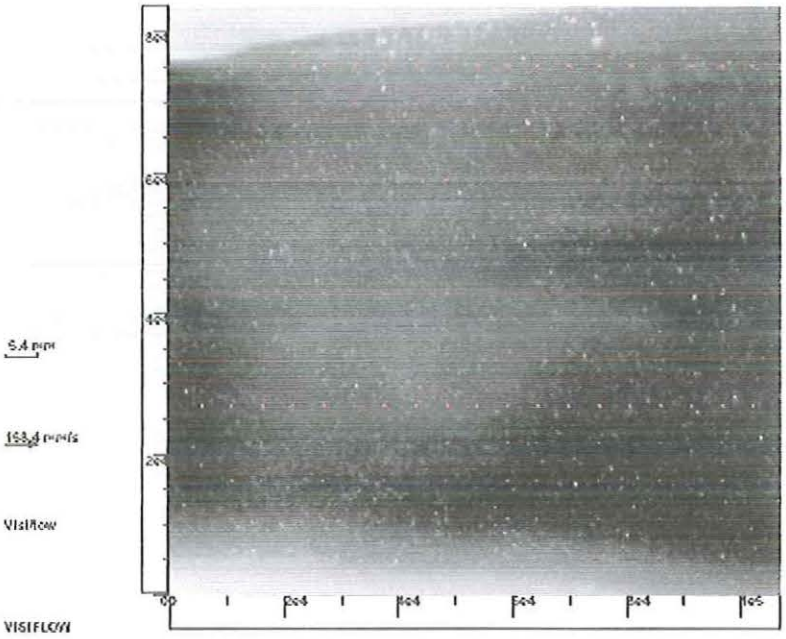


Figura 76 - Posição 2, q= 50ml/s e foto Qr000.tif.

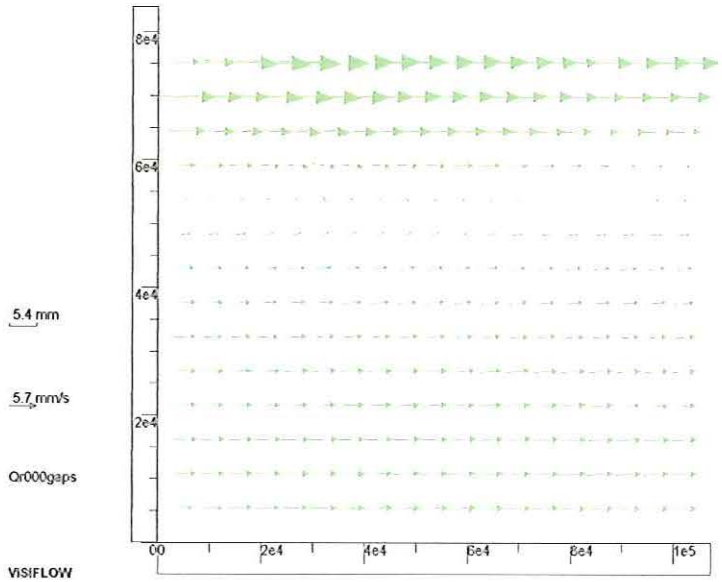


Figura 77 – Campo de velocidades para Qr000.tif e Qr001.tif

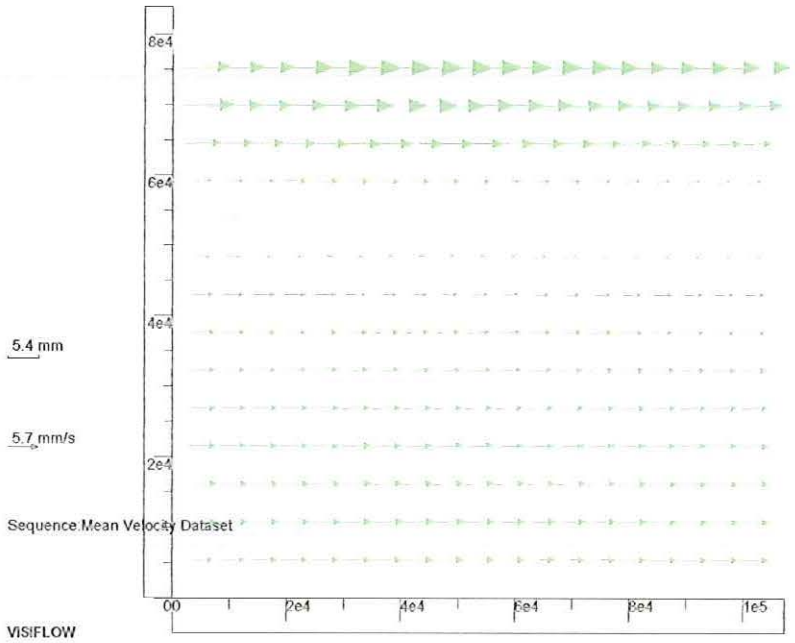


Figura 78 – Campo "médio" (sobre 1s) de velocidades para q=50 ml/s e posição2

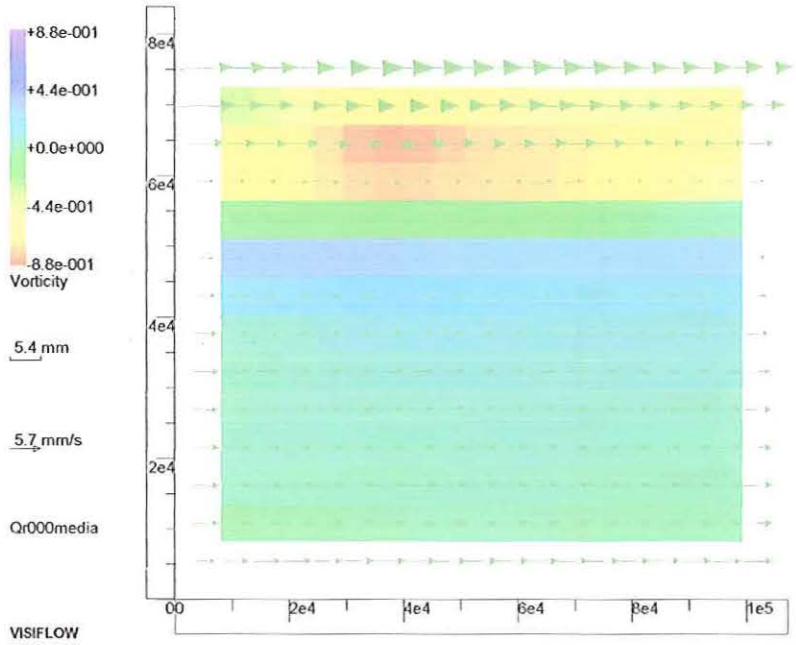


Figura 79 – Vorticidade "média" (para 1s) para q= 50ml/s e posição2

Para a seção 2, não houve efeito espelho (reflexão da imagem) nas imagens capturadas.

As imagens não foram binarizadas, devido a boa visualização das partículas.

Observou-se uma linha de vetores quase nulos entre a pluma e o ambiente fluido para todas as fotografias feitas no ensaio pt2.

Os resultados dos campos instantâneos de velocidades representam bem o observado visualmente na animação das fotografias bem como dos vetores.

5.2.2.1.3 VELOCIDADE LONGITUDINAL Q=150 ML/S E POSIÇÃO 1.

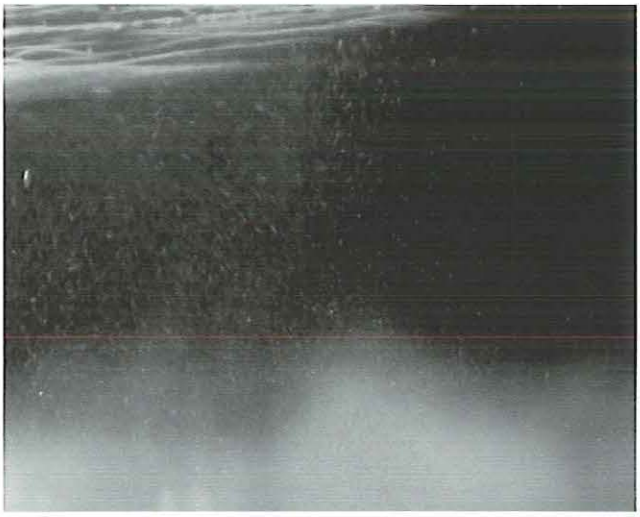


Figura 80 – Posição 1, q=150ml/s e Qa2002.tif

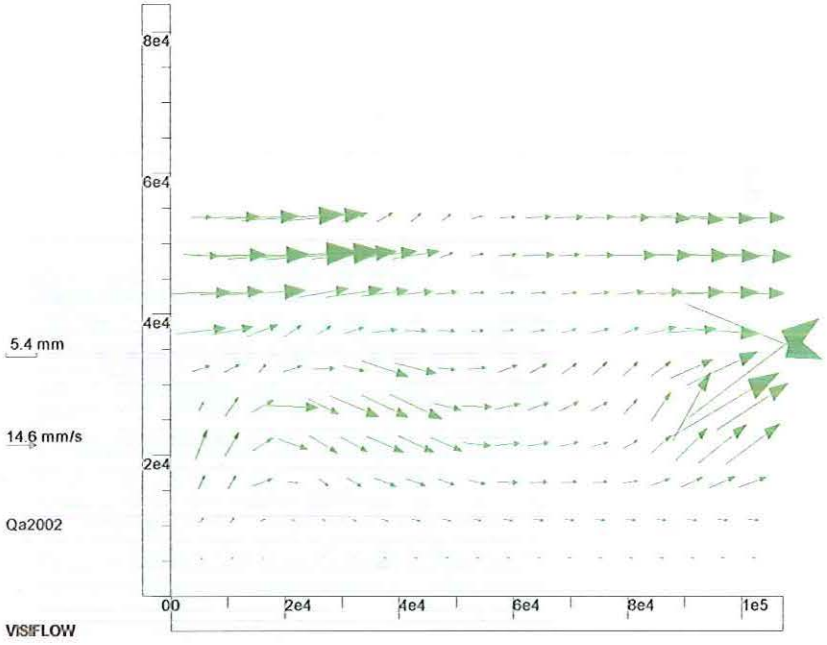


Figura 81 – Campo de velocidades para Qa2001.tif e Qa2002.tif.

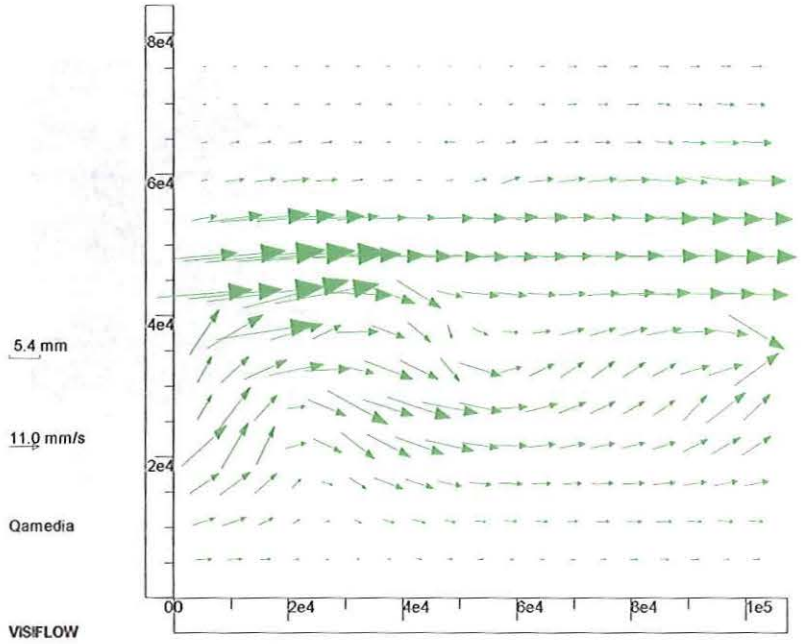


Figura 82 – Campo "médio" (sobre 1s) de velocidades para q=150 ml/s e posição1

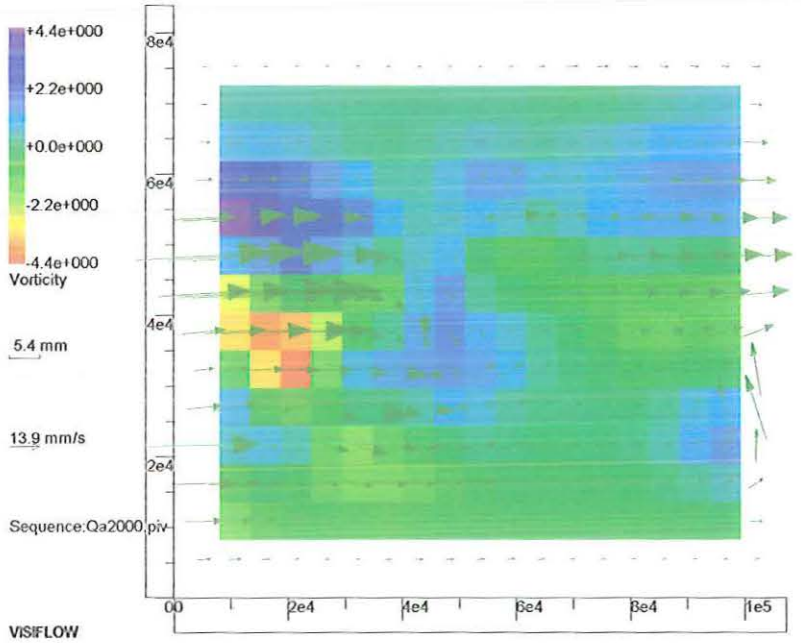


Figura 83 – Vorticidade "média" (sobre 1s) para q=150ml/s e posição 1.

Nas fotografias do escoamento deste ensaio (pt2) observou-se um efeito espelho tal como no ensaio pt1. Este efeito também foi retirado para o cálculo dos campos instantâneos e médios de velocidade.

Nota-se nas figuras dos campos de velocidade, que os maiores vetores representam o avanço da pluma com uma região de turbulência sob estes devido a vazão de entrada estabelecida.

Os campos de vetores representaram com grande clareza o comportamento do escoamento como registrado na animação das fotografias e com o observado visualmente. Sendo assim, a análise das seqüências das fotos e os campos gerados pelo método de velocimetria a Laser permitem constatar a validade das medidas para a seção escolhida.

5.2.2.1.4 VELOCIDADE LONGITUDINAL Q=150 ML/S E POSIÇÃO 2

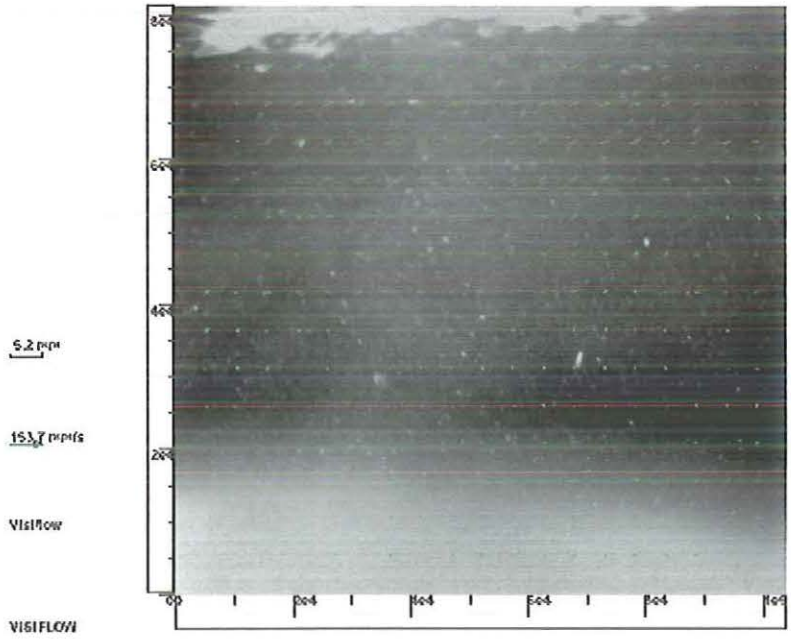


Figura 84 – Posição 2, q=150ml/s e foto sold006.tif

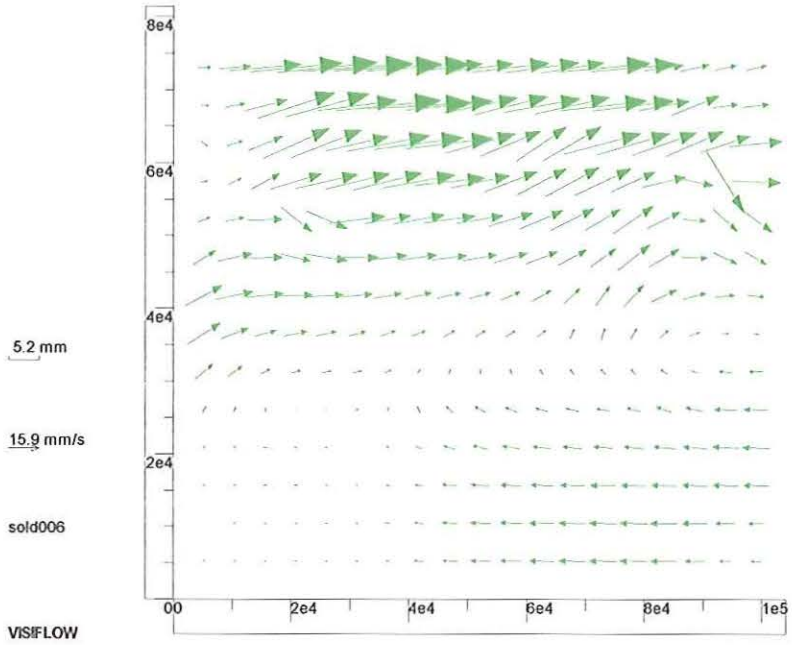


Figura 85 – Campo de velocidades para sold005.ti e sold006.tif

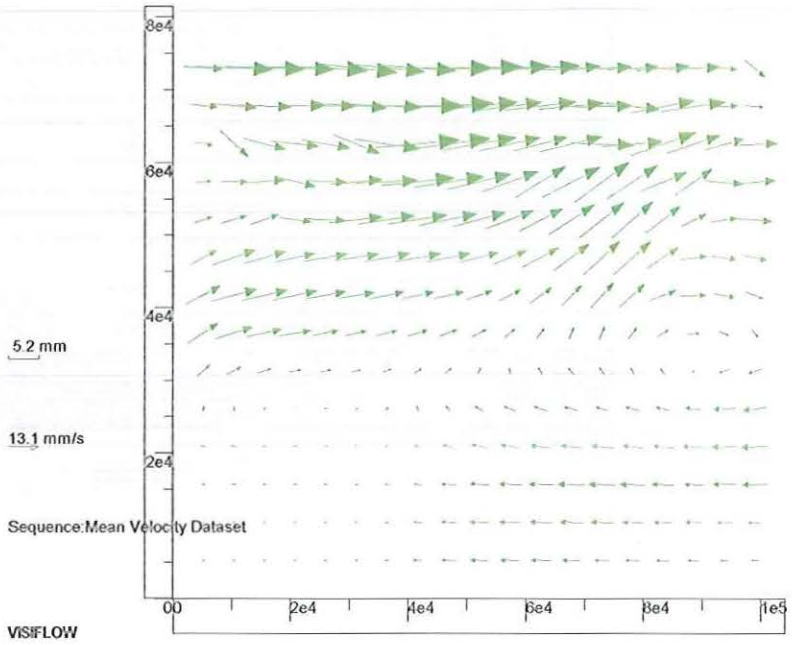


Figura 86 - Campo "médio" (sobre 1s) de velocidades para q=150 ml/s e posição 2.

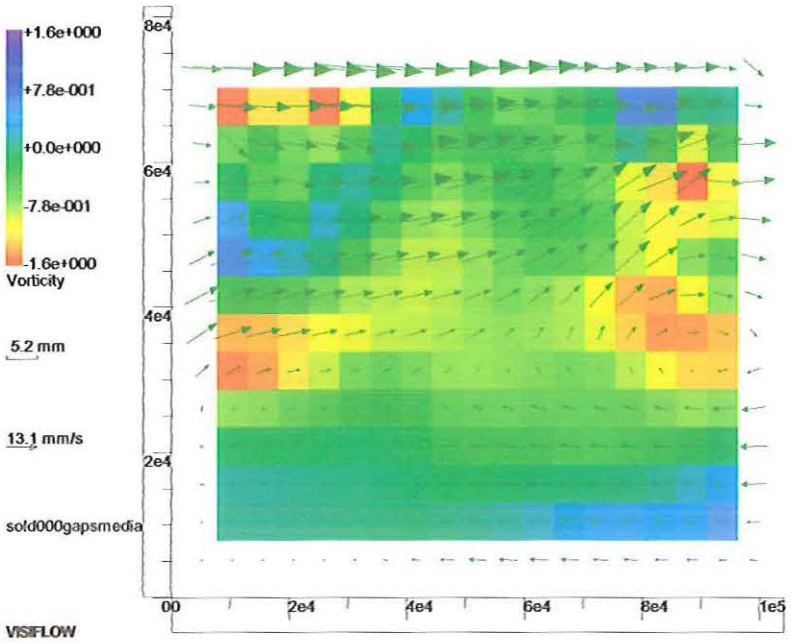


Figura 87 - Vorticidade "média" (sobre 1s) para q= 150ml/s e posição2

Observa-se pela figura 86, a presença de vórtices na parte inferior da "cabeça" da pluma., o que explica o fato da espessura da corrente neste ensaio pt2 aumentar em função do tempo.

Na parte inferior da pluma, observou-se uma intensa turbulência e uma intensa mistura, observado pelas fotografias feitas também no ensaio ptt2.

5.2.2.1.5 VELOCIDADE LONGITUDINAL Q=300ML/S E POSIÇÃO 1.

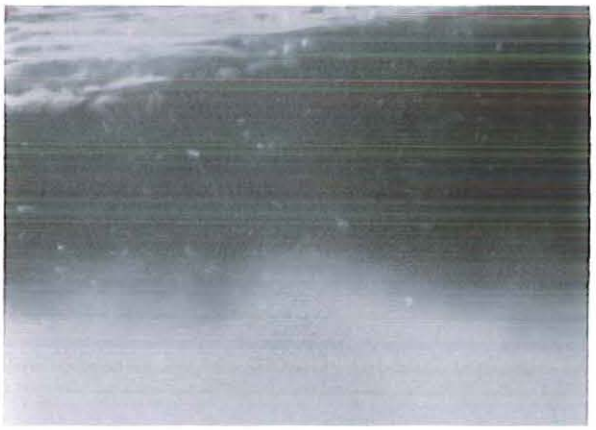


Figura 88 - Posição 1 q=300 ml/s Vc000.tif

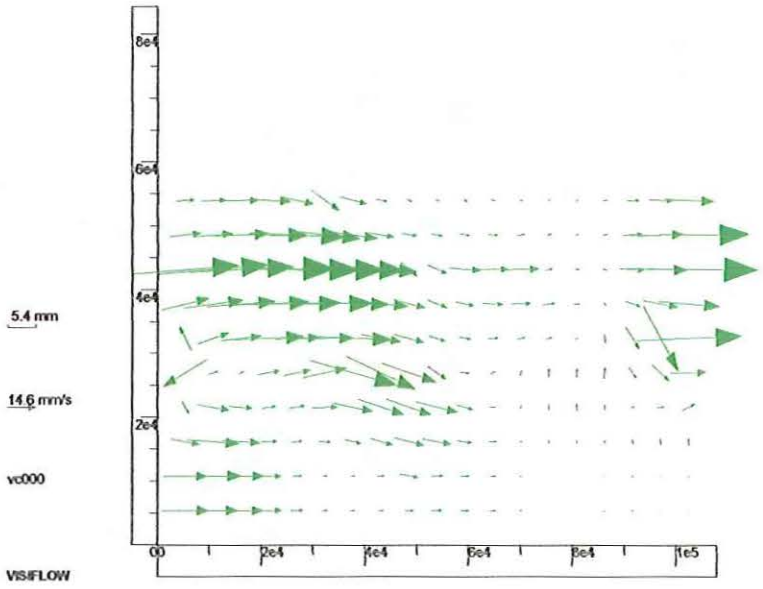


Figura 89- Campo de velocidades para Vc000.tif e Vc001.tif

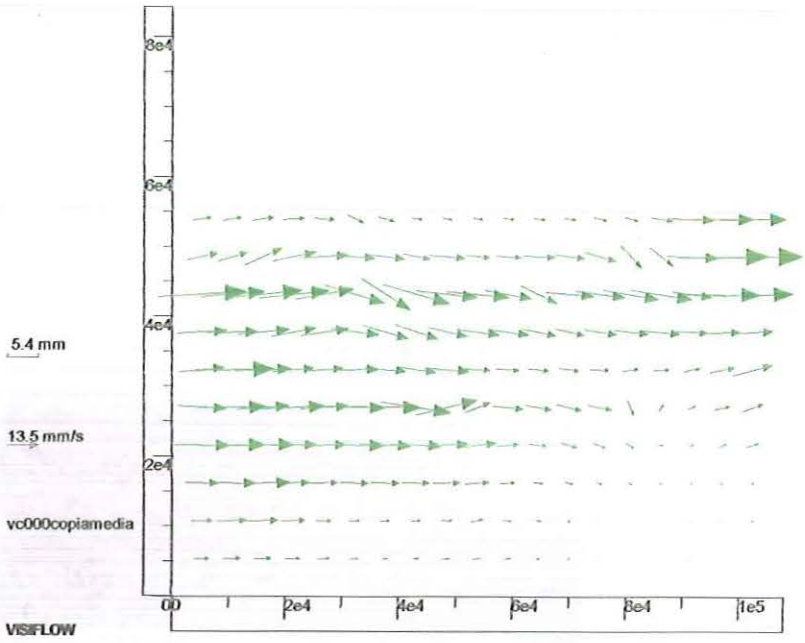


Figura 90 - campo "médio" (sobre 1s) de velocidades para q= 300ml/s e posição 1

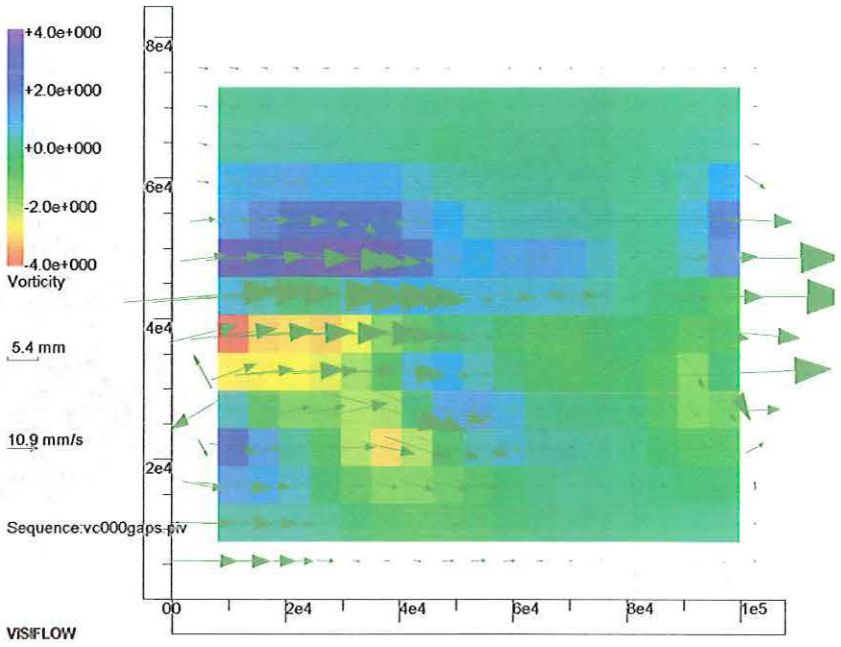


Figura 91 – Vorticidade "média" (sobre 1s) para q=300ml/s e posição 1

O ensaio pt3 foi o que apresentou as maiores turbulências.

Nota-se pelos campos instantâneos de velocidades que no início do escoamento (posição p1), a espessura da pluma é igual a altura total da lâmina d'água (50 ±0,5mm).

Pelos ensaios feitos com plumas térmicas tingidas, nota-se um destacamento da pluma na posição 2.

A espessura da pluma para os ensaios com altas vazões (300ml/s) aumenta com o tempo devido a intensa mistura acarretada pelos altos valores do número de Richardson (Ri).

5.2.2.1.6 VELOCIDADE LONGITUDINAL Q=300ML/S E POSIÇÃO 2.

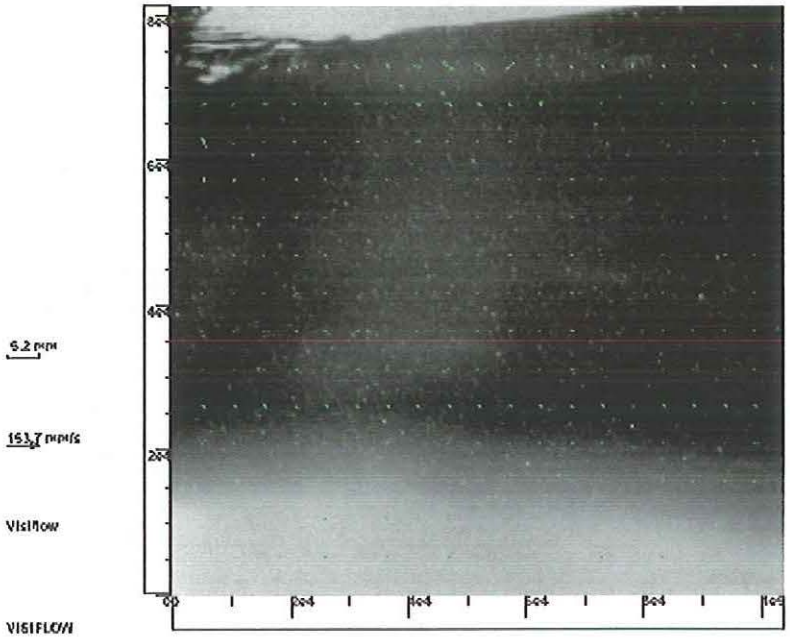


Figura 92 - Posição 2, q=300ml/s e foto Qe000006.tif

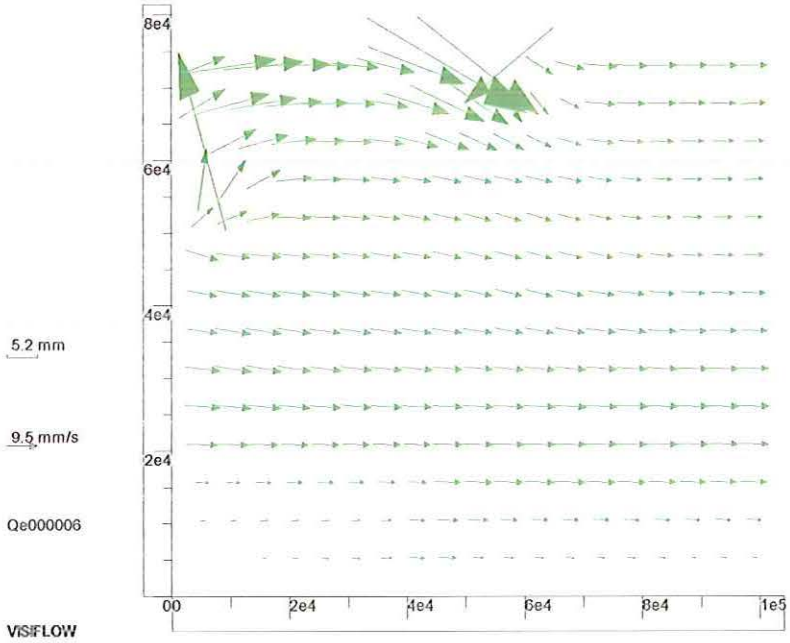


Figura 93 - Campo de velocidades para Qe000005.tif e Qe000006.tif

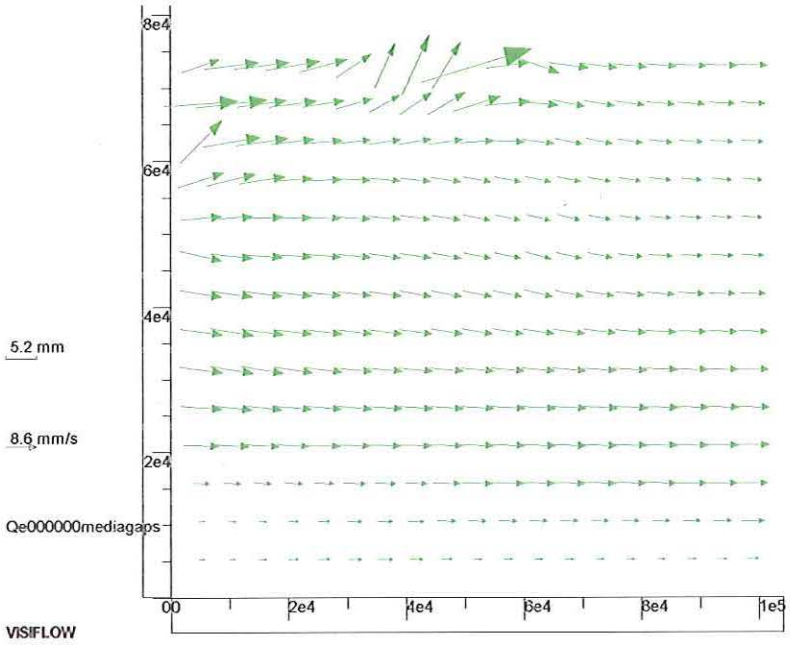


Figura 94 - campo "médio" (sobre 1s) de velocidades para q= 300ml/s e posição 2.

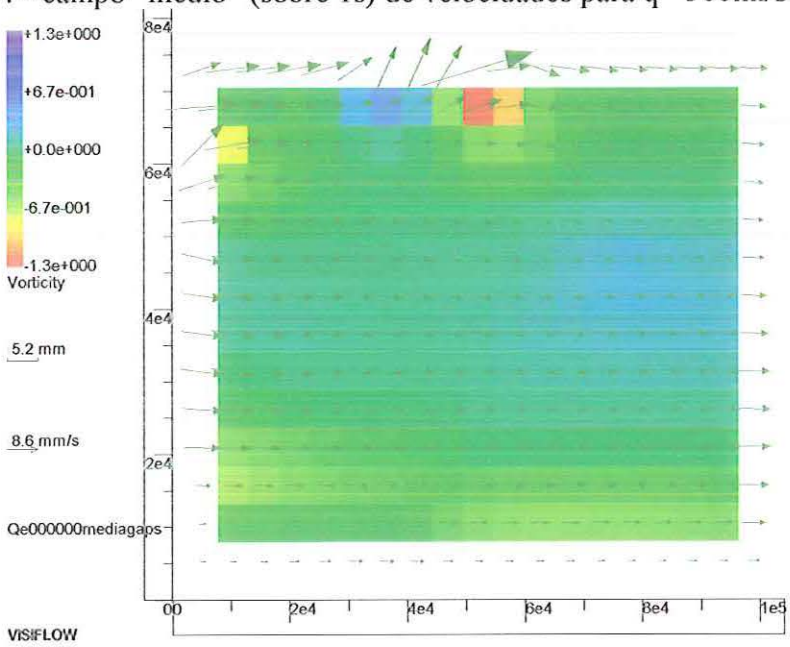


Figura 95 – Vorticidade "média" (sobre 1s) para q=300 ml/s e posição2

Observa-se nos campos de velocidades para o ensaio pt2, uma intensa turbulência. Na seção 2, ocorre um destacamento da pluma e a espessura da pluma aumenta com o tempo mas agora mais vagarosamente que no início do escoamento, devido a região dominada pela quantidade de movimento.

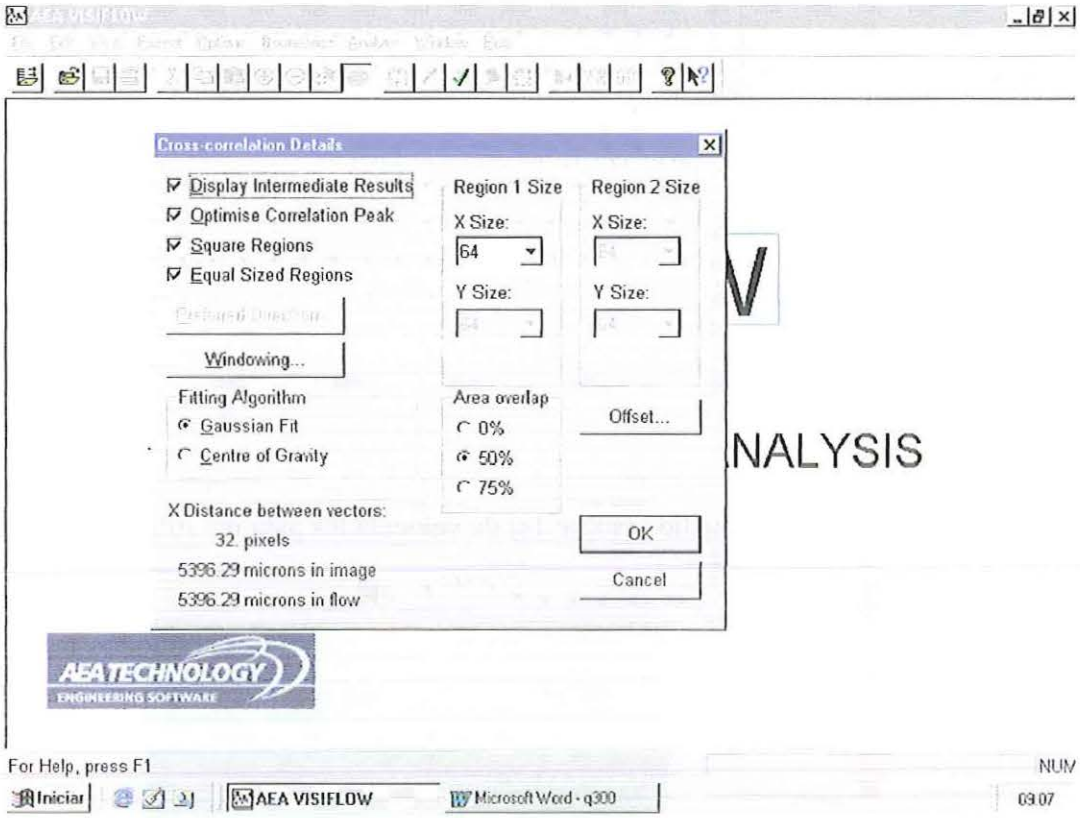


Figura 96 – Detalhes da correlação cruzada para o ensaio pt2 e posição1.

O programa Visiflow possui dentro do comando Analyse opções tais como : fonte da imagem (image source), método de análise (analysis method), calibração do escoamento (set flow calibration), a opção VCR que registra as imagens, a análise do escoamento (flow analysis), entre outras. Todas essas opções possuem ícones de atalho na barra de ferramentas. A figura 96 ilustra uma destas opções. Entre os detalhes de correlação apresentados, há opções para o tipo de regiões (quadrada ou não, e seus tamanhos em pixel) onde as partículas estão inseridas para o cálculo do vetor nesta região. Há também a opção de porcentagem de sobreposição destas pequenas áreas de

cálculo, além do tipo de aproximação estatística usada para este método de correlação cruzada.

5.2.2.1.7 VELOCIDADES TRANSVERSAIS Q=50ML/S E POSIÇÃO 2

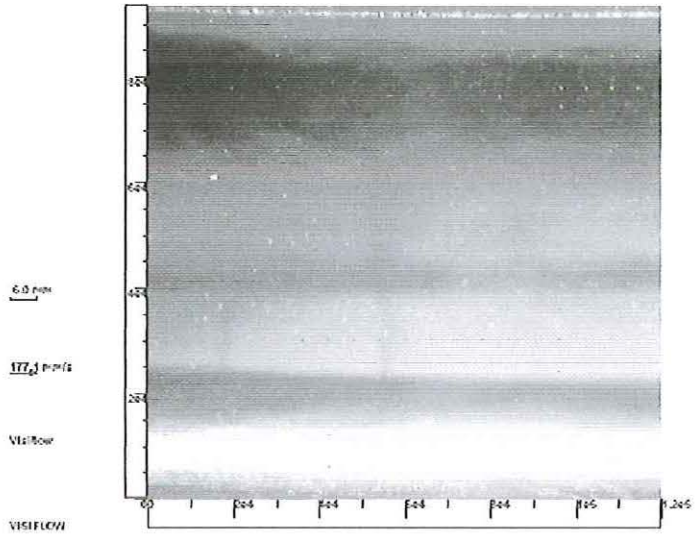


Figura 97 - posição 2, q= 50ml/s e foto qt2008.tif

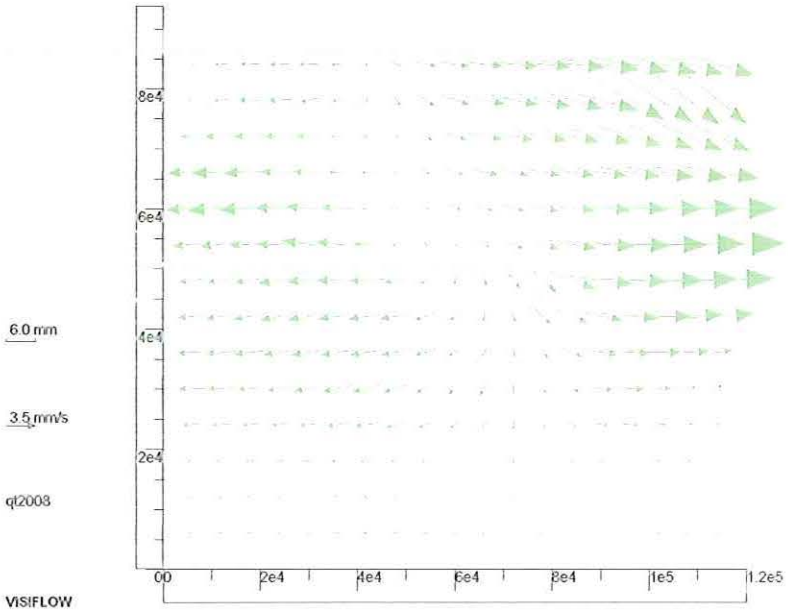


Figura 98 - campo de velocidades para qt2007.tif e qt2008.tif

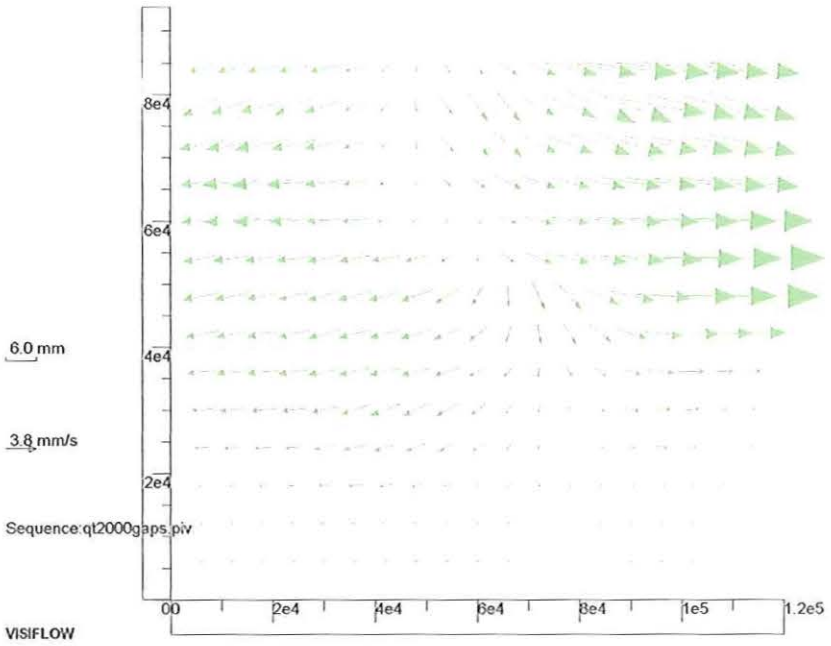


Figura 99 - Campo "médio " (sobre 1s) de velocidades para q= 50ml/s e posição2

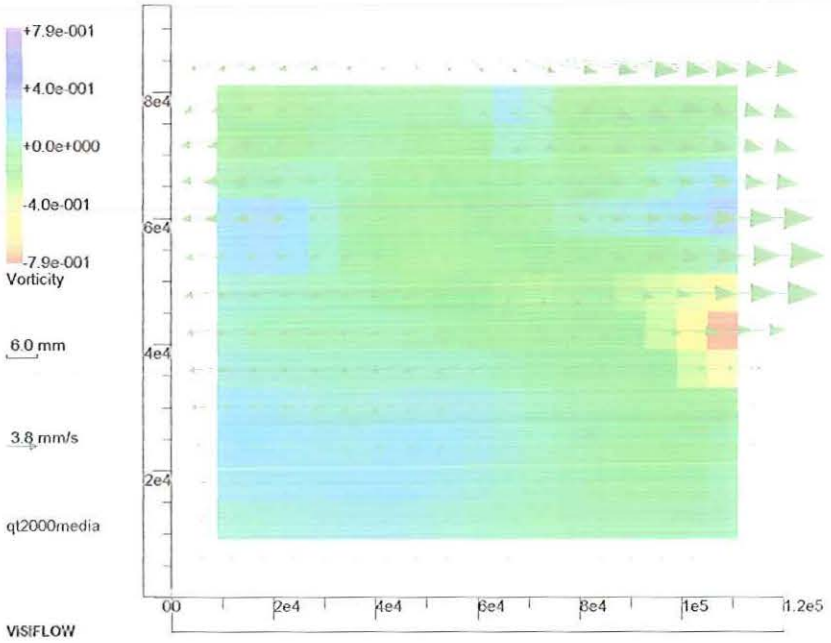


Figura 100 – Vorticidade "média" (sobre 1s) para q=50 ml/s e posição2

EESC - USP Biblioteca CAMPUS DE S. CARLOS

As figuras 97 a 100 mostram que a pluma apresenta velocidade transversal nula próximo ao centro do tanque. Contudo, há deslocamento em torno do eixo de simetria do mesmo. Apesar desses deslocamentos, o campo de velocidades é bem comportado.

Nota-se que a componente vertical da velocidade é marcadamente negativa (de cima para baixo) na região central do escoamento e que as maiores velocidades horizontais (em módulo) situam-se na metade superior do escoamento, junto à pluma.

5.2.2.1.8 VELOCIDADE TRANSVERSAL Q=150ML/S E POSIÇÃO 2

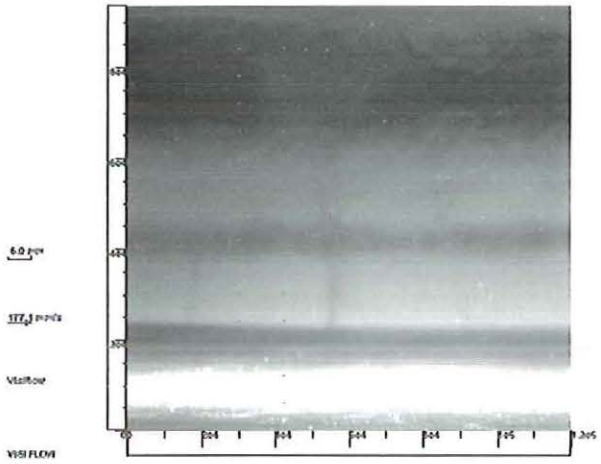


Figura 101 - Posição 2, q = 150ml/s e foto qt1004.tif

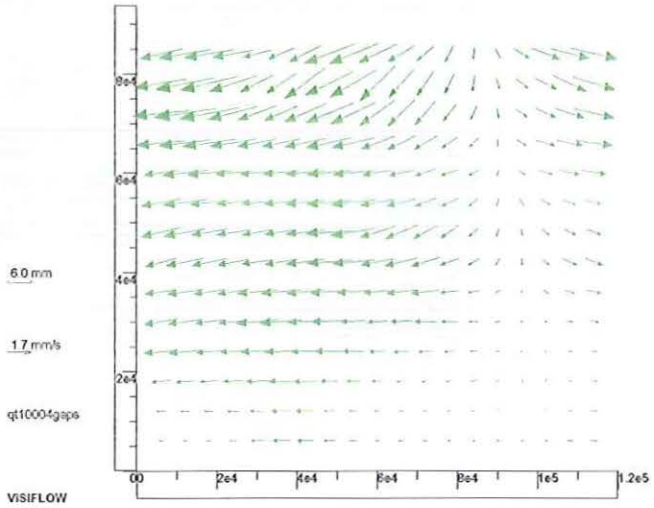


Figura 102 - Campo de velocidades para fotos qt1003.tif e qt1004.tif

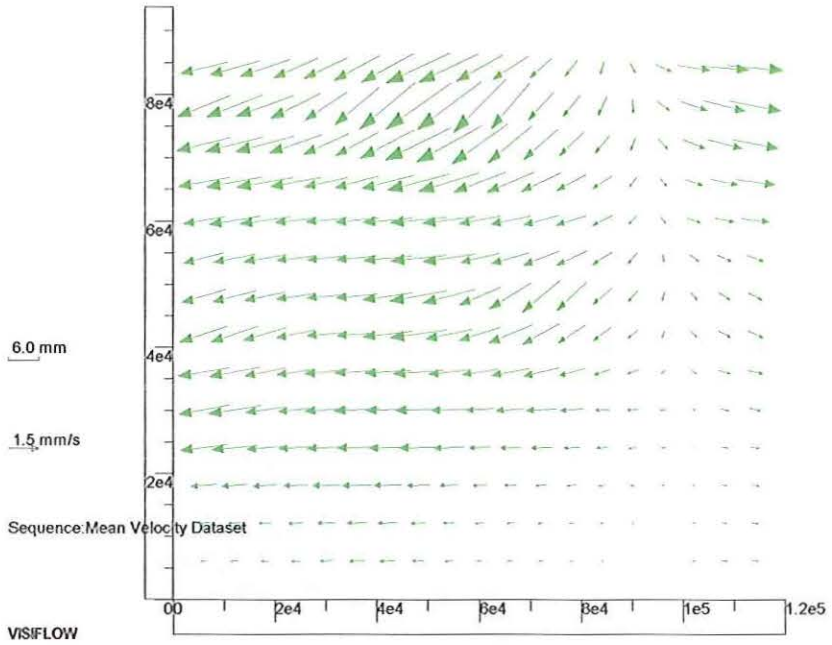


Figura 103 - Campo "médio" (sobre 1s) de velocidades transversais para q=150ml/s e posição 2

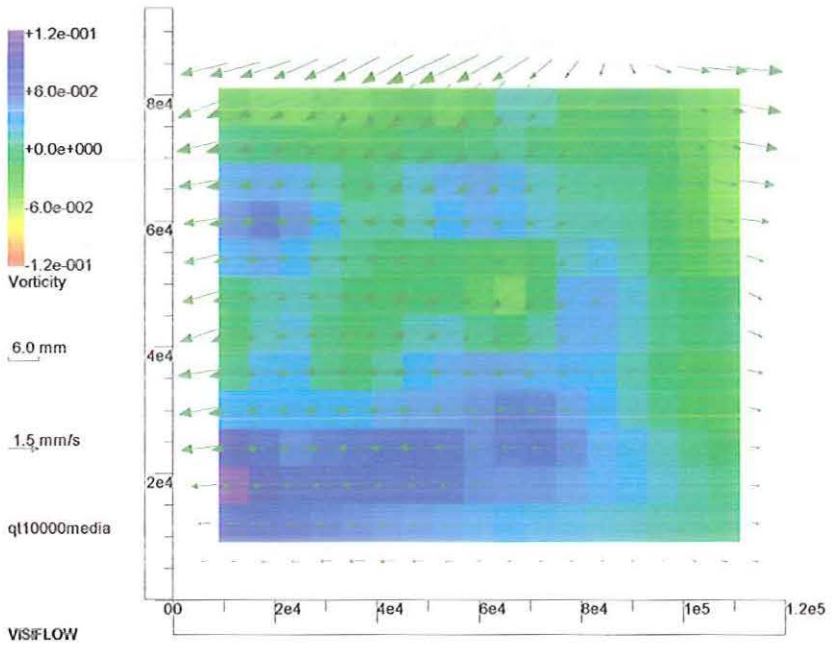


Figura 104 – Vorticidade "média" (sobre 1s) para q=150ml/s e posição2.

Observa-se que as características gerais do escoamento mantêm o padrão descrito no ítem 5.2.3.7.

5.2.1.9 VELOCIDADE TRANSVERSAL – Q=300ML/S E P OSIÇÃO 2.

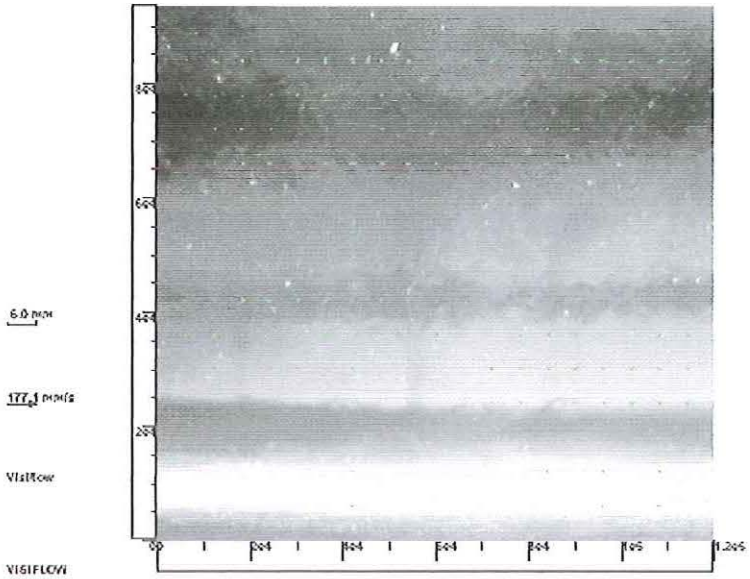


Figura 105 - Posição 2, q=300ml/s e foto qt7008.tif

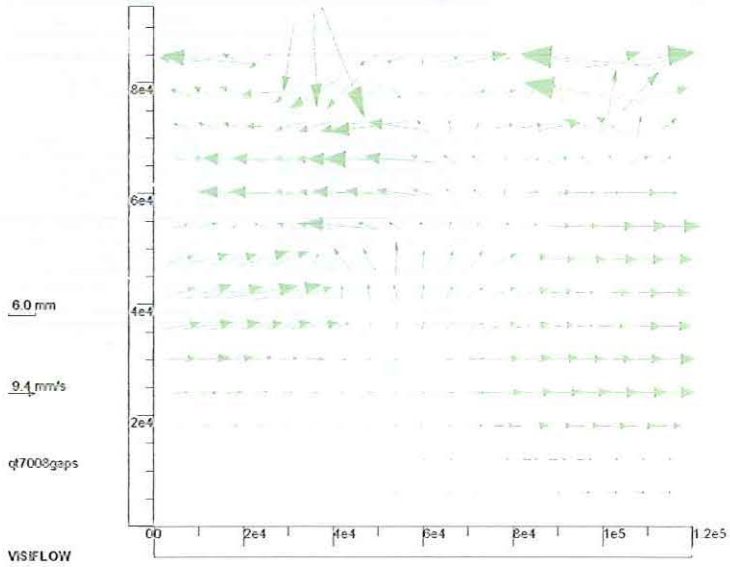


Figura 106 - Campo de velocidades para fotos qt7007.tif e qt7008.tif

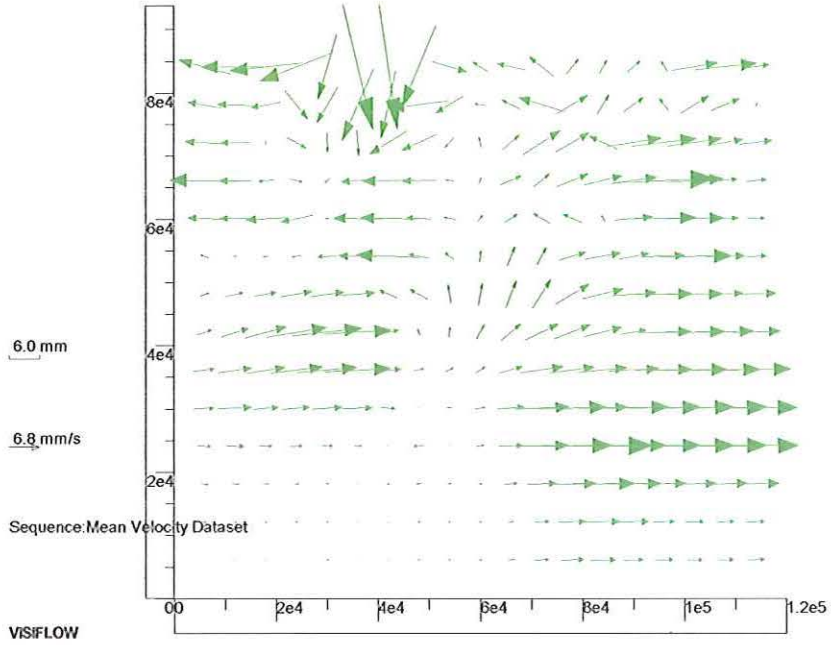


Figura 107 - Campo "médio" (sobre 1s) de velocidades transversais para q= 300ml/s e posição 2

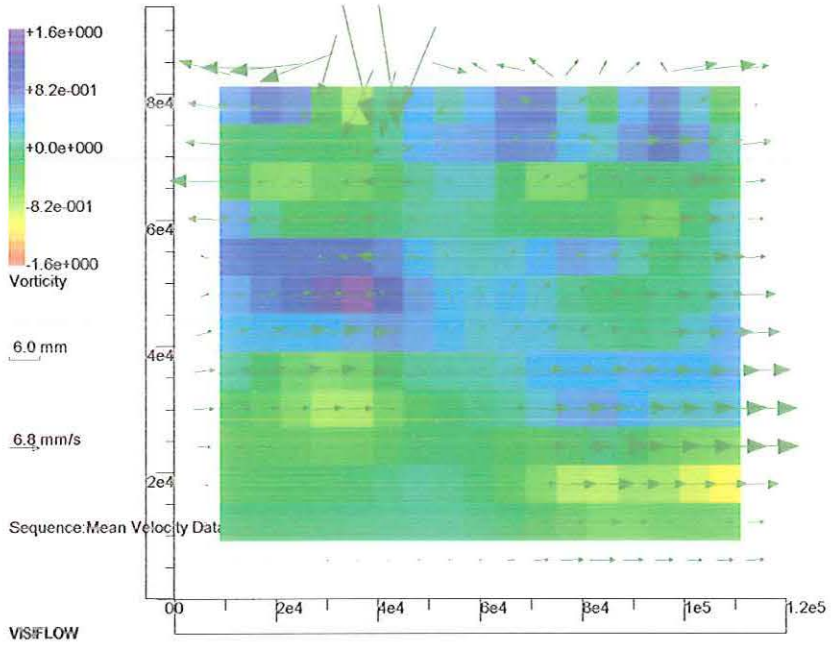


Figura 108 – Vorticidade "média" (sobre 1s) para q= 300ml/s e posição 2

Verifica-se, nas figuras 105 a 108, que houve quebra do padrão bem-comportado observado nas menores vazões. O escoamento é desordenado, apresentando intensa "mistura".

5.2.2.2. Plumas térmicas com corantes.

Os ensaios com plumas térmicas tingidas foram feitos com o uso de máquina fotográfica digital e filmadora VHS.

Esses ensaios foram feitos para se monitorar o comportamento global da pluma, uma vez que o equipamento a Laser registrava o comportamento de uma seção do escoamento. Foram realizados três ensaios com as mesmas vazões e condições gerais descritas no ítem 5.2.3, de forma a gerar elementos de comparação com as plumas salinas e fornecer subsídios para as futuras quantificações e simulações.

Os gráficos das figuras a seguir mostram o espalhamento das plumas, bem como valores das velocidades longitudinais e transversais das mesmas para os ensaios denominados de ptt1, ptt2 e ptt3.

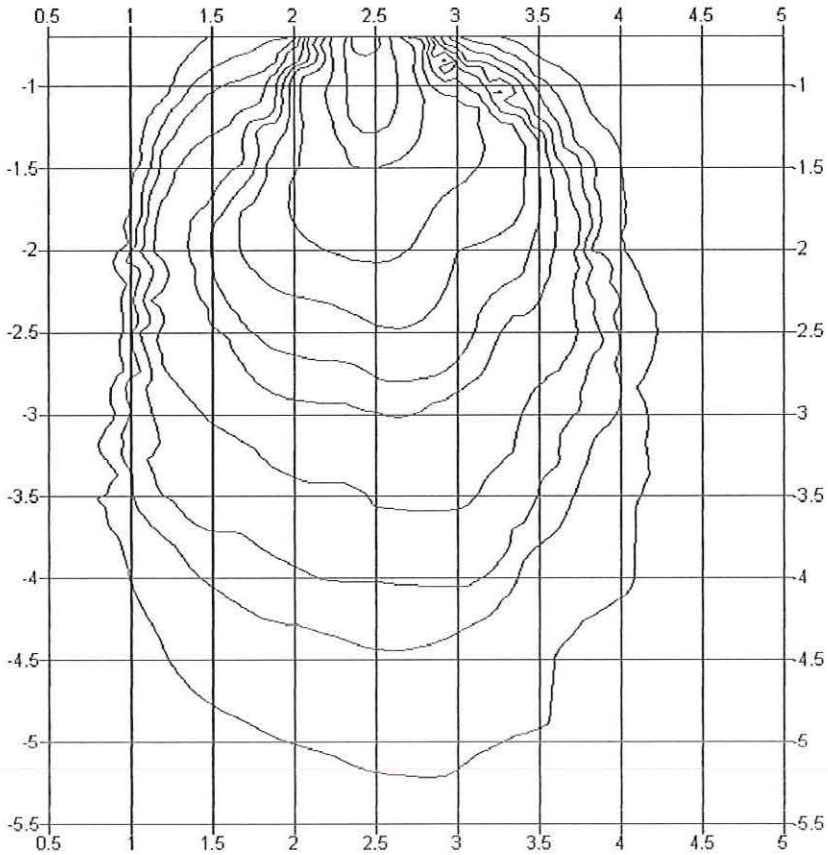


Figura 109 – Diagrama do espalhamento da pluma para o ensaio ptt1.

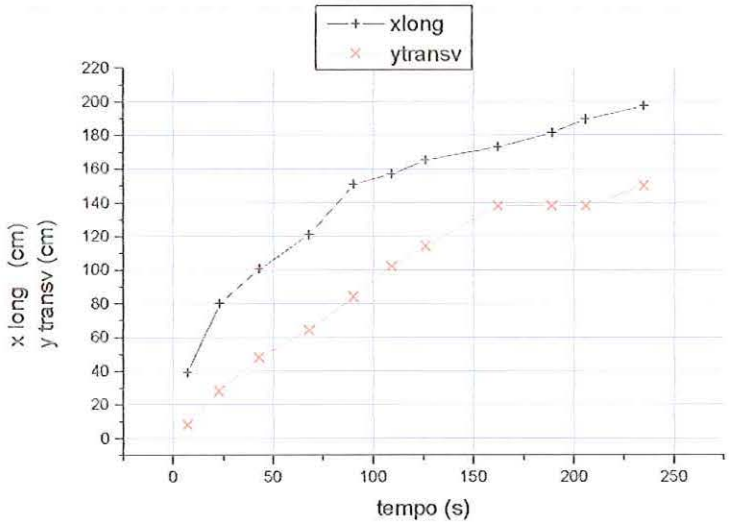


Figura 110– Espalhamento da pluma para o ensaio ptt1.

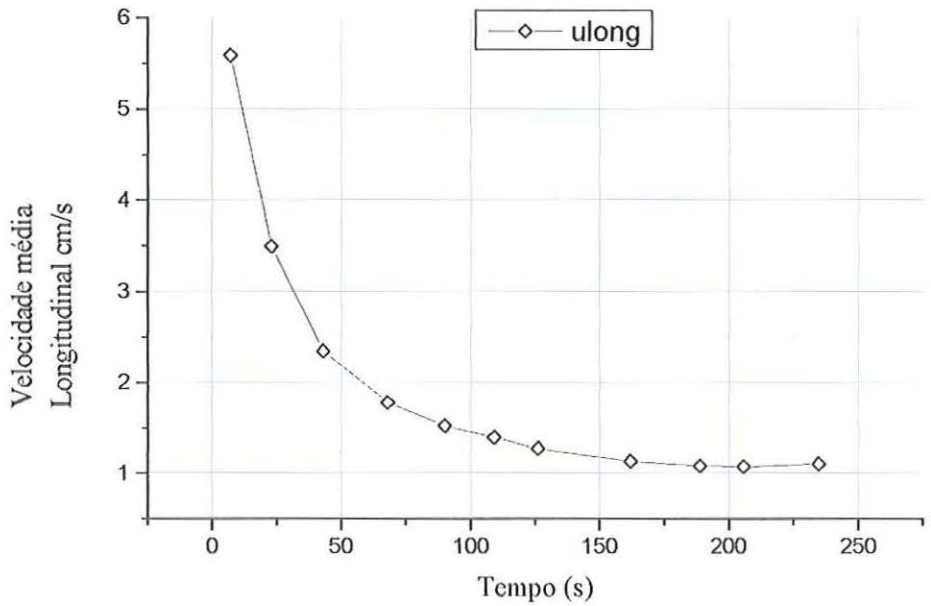


Figura 111 – Velocidade média longitudinal para o ensaio ptt1.

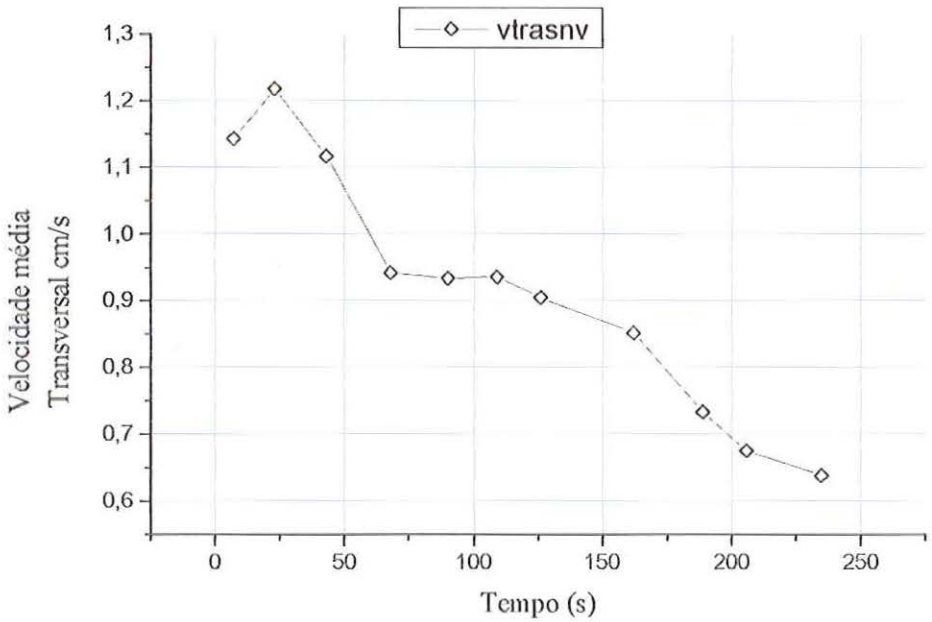


Figura 112 – Velocidade média transversal para o ensaio ptt1.

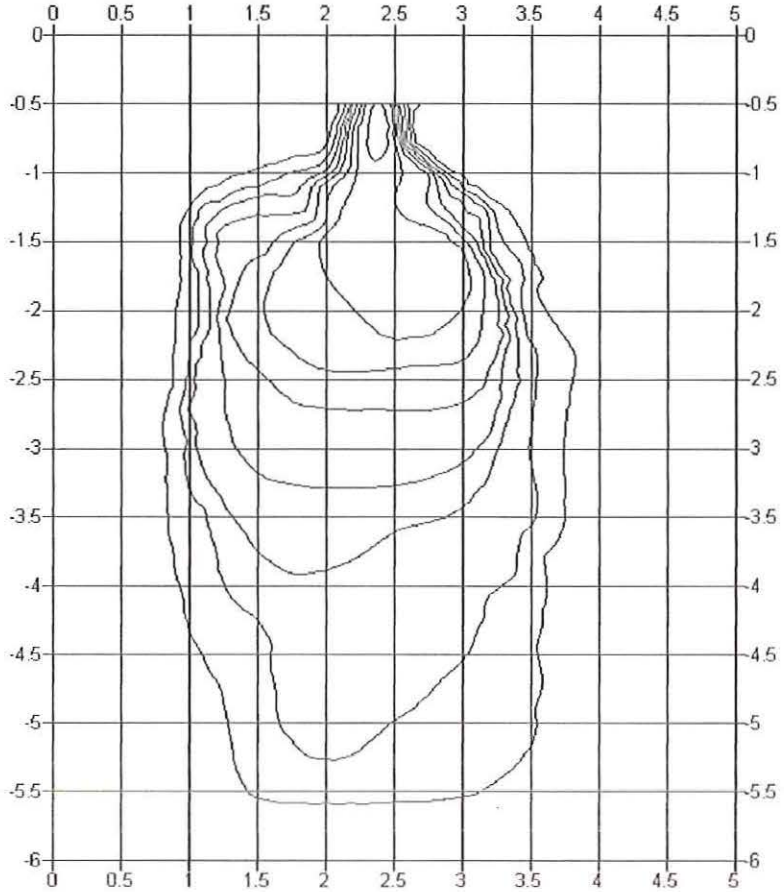


Figura 113 – Diagrama do espalhamento da pluma para o ensaio ptt2.

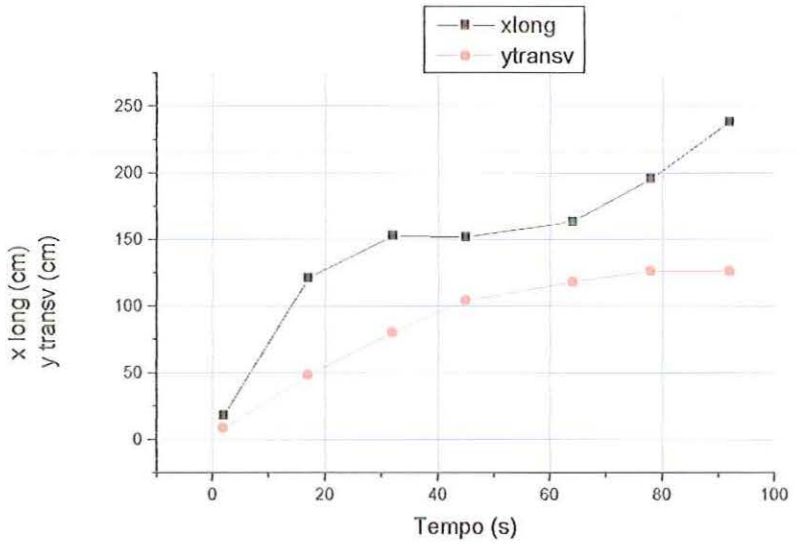


Figura 114– Espalhamento da pluma para o ensaio ptt2.

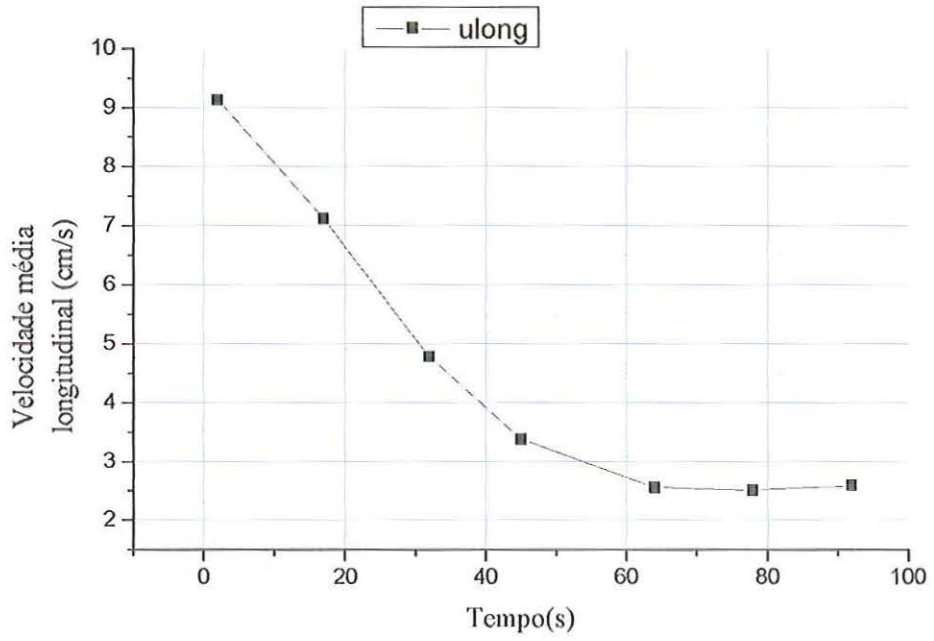


Figura 115– Velocidade média longitudinal para o ensaio ptt2.

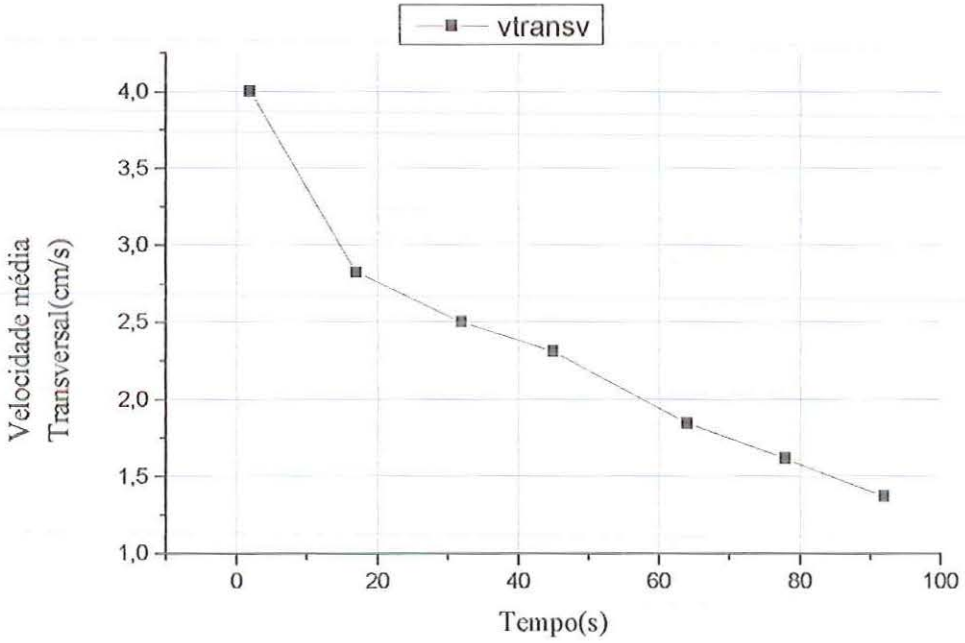


Figura 116– Velocidade média transversal para o ensaio ptt2.

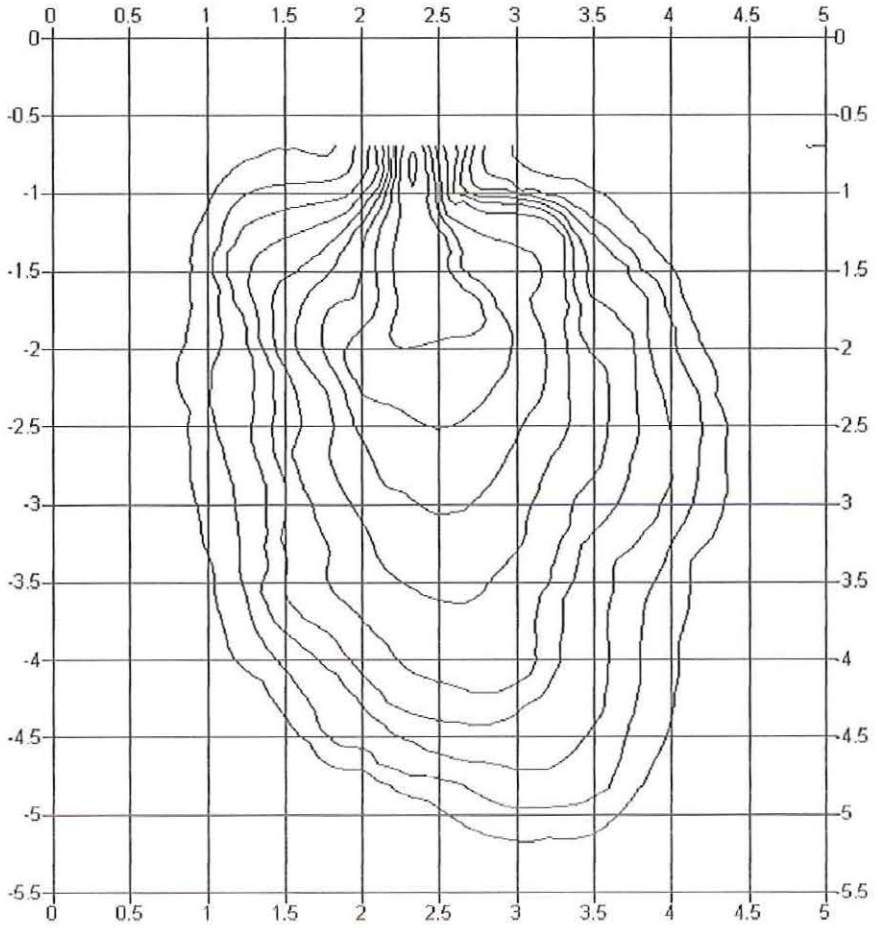


Figura 117 – Diagrama do espalhamento da pluma para o ensaio ptt3.

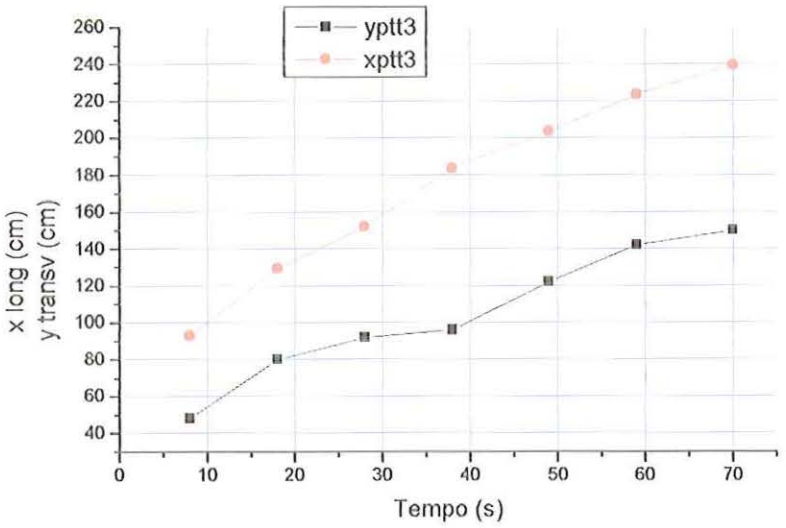


Figura 118– Espalhamento da pluma para o ensaio ptt3.

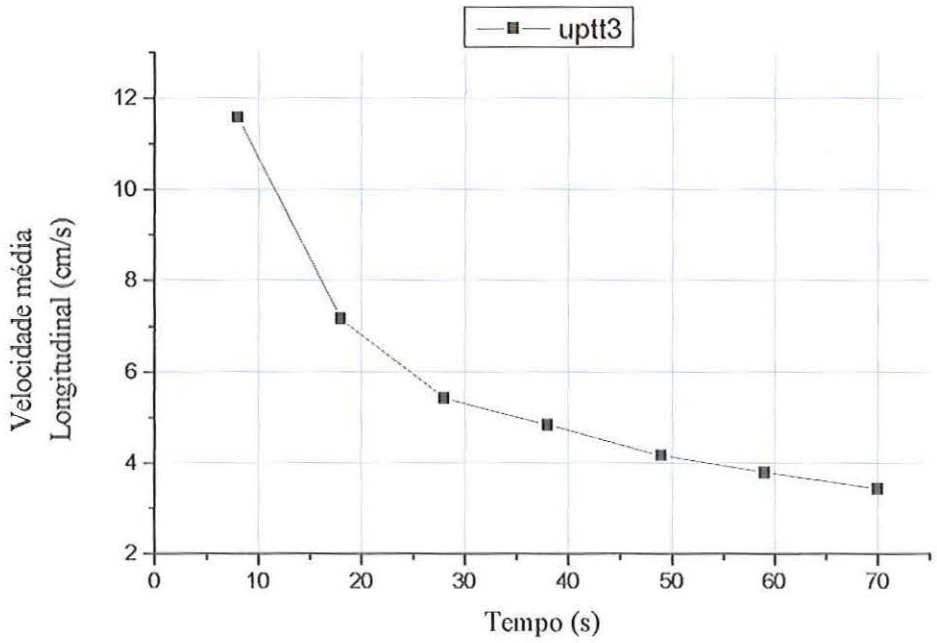


Figura 119 – Velocidade média longitudinal para o ensaio ptt3.

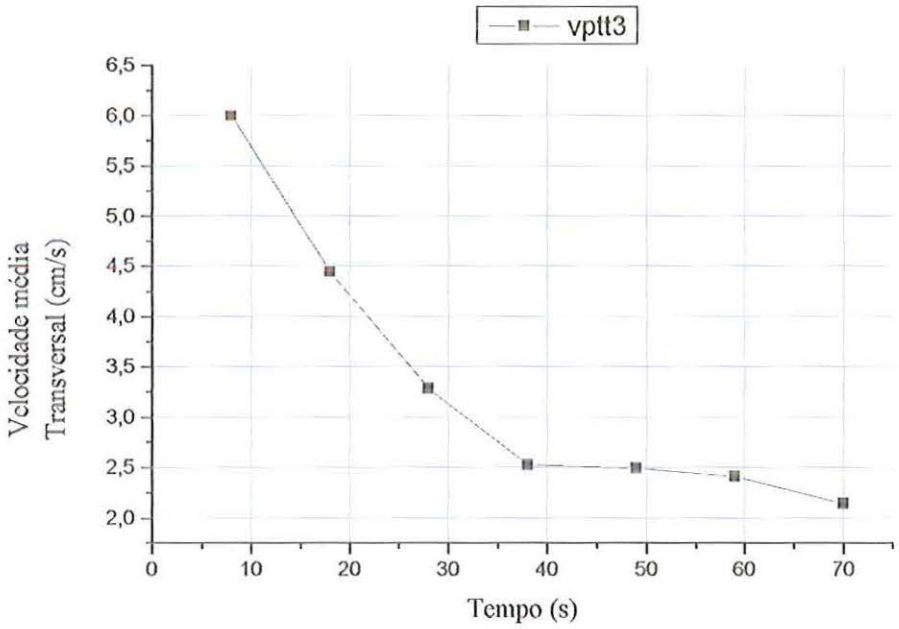


Figura 120 – Velocidades médias transversais para o ensaio ptt3.

5.3 Intrusões.

Os ensaios com intrusões foram feitos com o uso de máquina fotográfica digital e filmadora VHS. Esses ensaios de intrusão foram aqueles que exigiram mais cuidado em sua execução, uma vez que implicavam em utilizar duas densidades e cores diferentes no tanque de experimentos, devidamente segregadas, e uma densidade intermediária com cor distinta para compor o "rio" que adentrava no tanque.

As condições de densidade e cor foram atingidas, porém a evolução das intrusões mostrou-se arredia a padronizações geométricas quando o escoamento ocorria já na interface de densidades.

Observou-se, como pode ser visto nas figuras deste capítulo, que antes do descolamento, as correntes de fundo, na grande maioria dos experimentos, diminuíam de largura. Esta característica geométrica, vinculada à formação da intrusão (descolamento) pode, então ser melhor analisada.

Como dito anteriormente no ítem 5.1.2, foram mantidos os valores de densidades do meio ambiente e da corrente intrusiva e variaram-se os valores das vazões. As fotografias mostram que as intrusões apresentaram comportamentos diversos para mesmas condições de ensaios (mesma vazão, mesma temperatura, mesma densidade, etc), na fase de escoamento interfacial.

Na foto da figura 120, tém-se uma visualização da estratificação ambiente com a camada mais densa colorida pelo azul de metileno e a camada menos densa de água pura. Vê-se que a interface é de variação abrupta da densidade, uma escolha que visou facilitar os estudos, permitindo a concentração dos esforços nos registros de evolução lateral das intrusões.

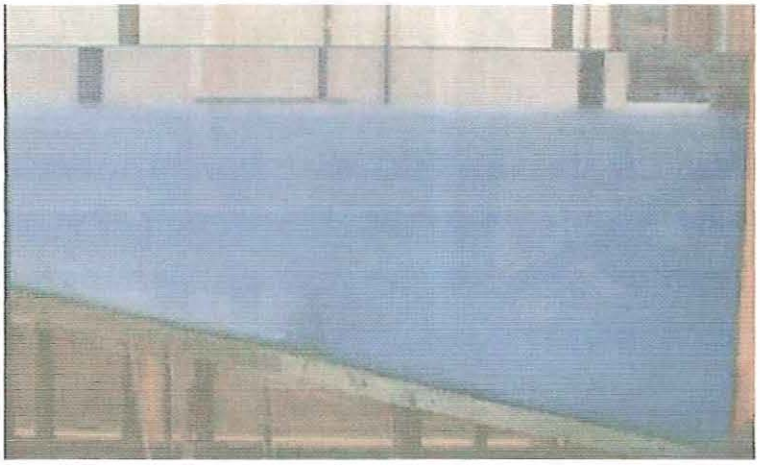


Figura 121 – Estratificação em duas camadas para o ensaio de intrusão.

A seguir são mostradas as fotos dos ensaios i1, i2 e i3, nota-se que as intrusões começam a se formar a partir de ≅ 100 cm da fonte. Até então, tem-se um comportamento de corrente de fundo devido a estratificação ambiente.

5.3.1 Situação para vazão de 50ml/s.

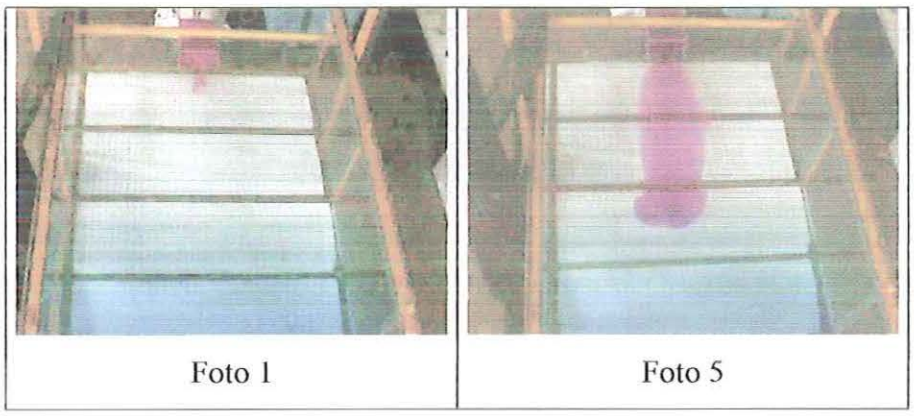


Foto 1	Foto 5

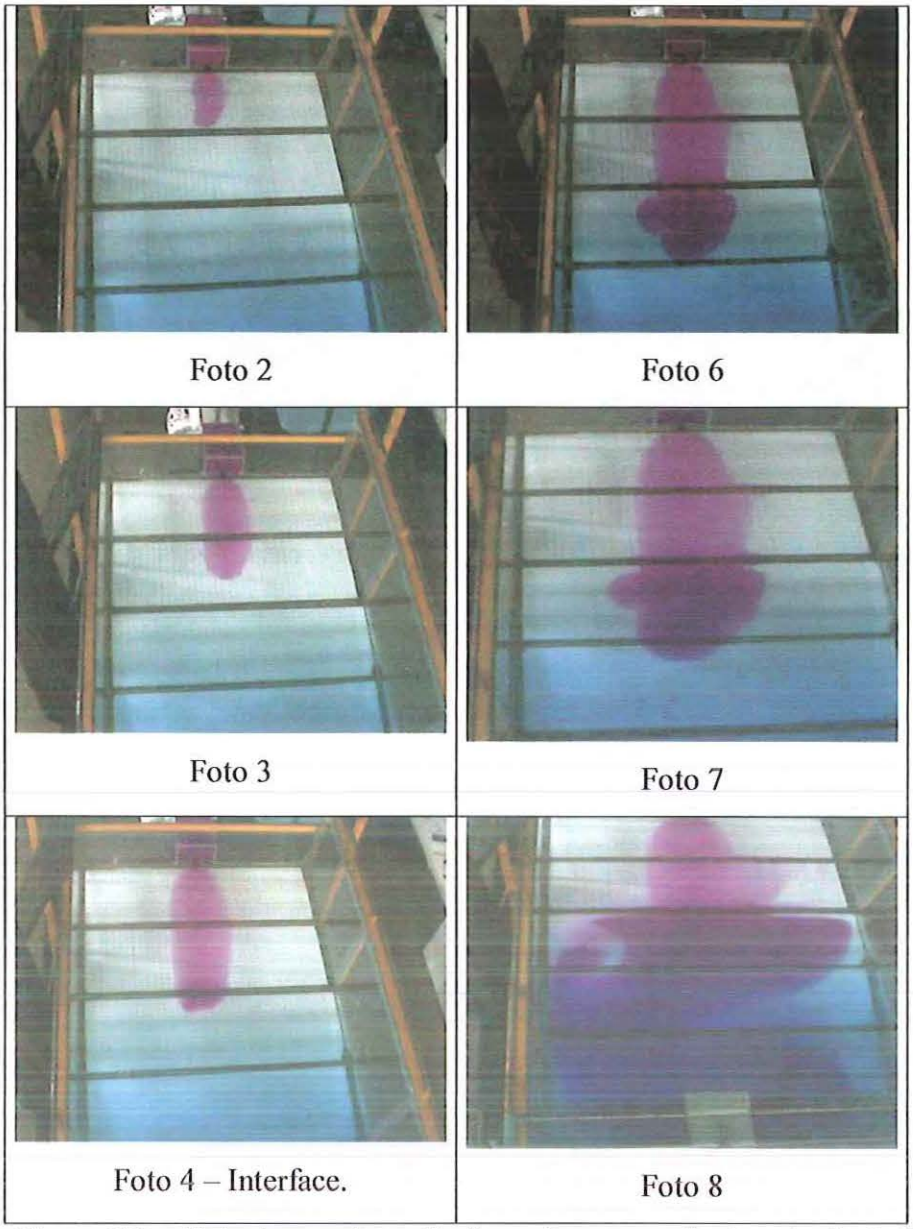


Figura 122 – Foto de uma intrusão formada com vazão de entrada de 50ml/s.

A figura 122 mostra a evolução temporal de uma intrusão de 50ml/s. As características que podem ser ditas repetitivas são:

- O escoamento de fundo forma-se, havendo alargamento do mesmo ao longo da dimensão longitudinal (fotos 1 a 4 da figura 122).
- Próximo ao descolamento da corrente de fundo, para formar a intrusão, há diminuição da largura (fotos 5 a 8 da figura 122).

- No descolamento forma-se inicialmente uma área de geometria próxima a circular, que posteriormente se expande (fotos 5, 6 e 7 da figura 122).
- A expansão é regida pelas condições momentâneas do escoamento, podendo assumir as mais diferentes formas. A foto 8 da figura 122 mostra uma expansão lateral muito forte, com expansão longitudinal irregular.

Outros experimentos apresentaram configurações diferentes para os mesmos valores de vazão de entrada, temperatura, densidade e umidade relativa do ar. As figuras 123 e 124 mostram exemplos de ensaios para vazão de 50 ml/s que ilustram o comentado.

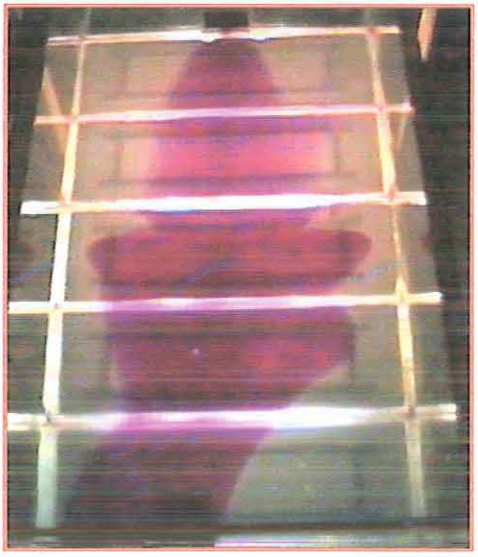


Figura 123 – Intrusão formada para vazão de entrada de 50ml/s.

Figura 124 – Foto de uma intrusão formada para q=50 ml/s.

A figura 123 mostra uma expansão lateral menos pronunciada, porém ocorrendo em "dois estágios" , para depois avançar longitudinalmente, avançando para à esquerda na figura (vazão de 50ml/s).

A figura 124 mostra um intrusão plasticamente bonita, formando dois vórtices laterais e sem expansão lateral inicial. O deslocamento, neste experimento, é para à direita na figura, também para a vazão de 50ml/s.

As características que se repetem mantêm-se para a região do descolamento.

5.3.2 Situação para vazão de 150ml/s.

As fotografias apresentadas na figura 125 (para vazão de 150ml/s) foram recuperadas de filme VHS, o que compromete sua qualidade (as fotografias originais foram extraviadas no disquete flexível).

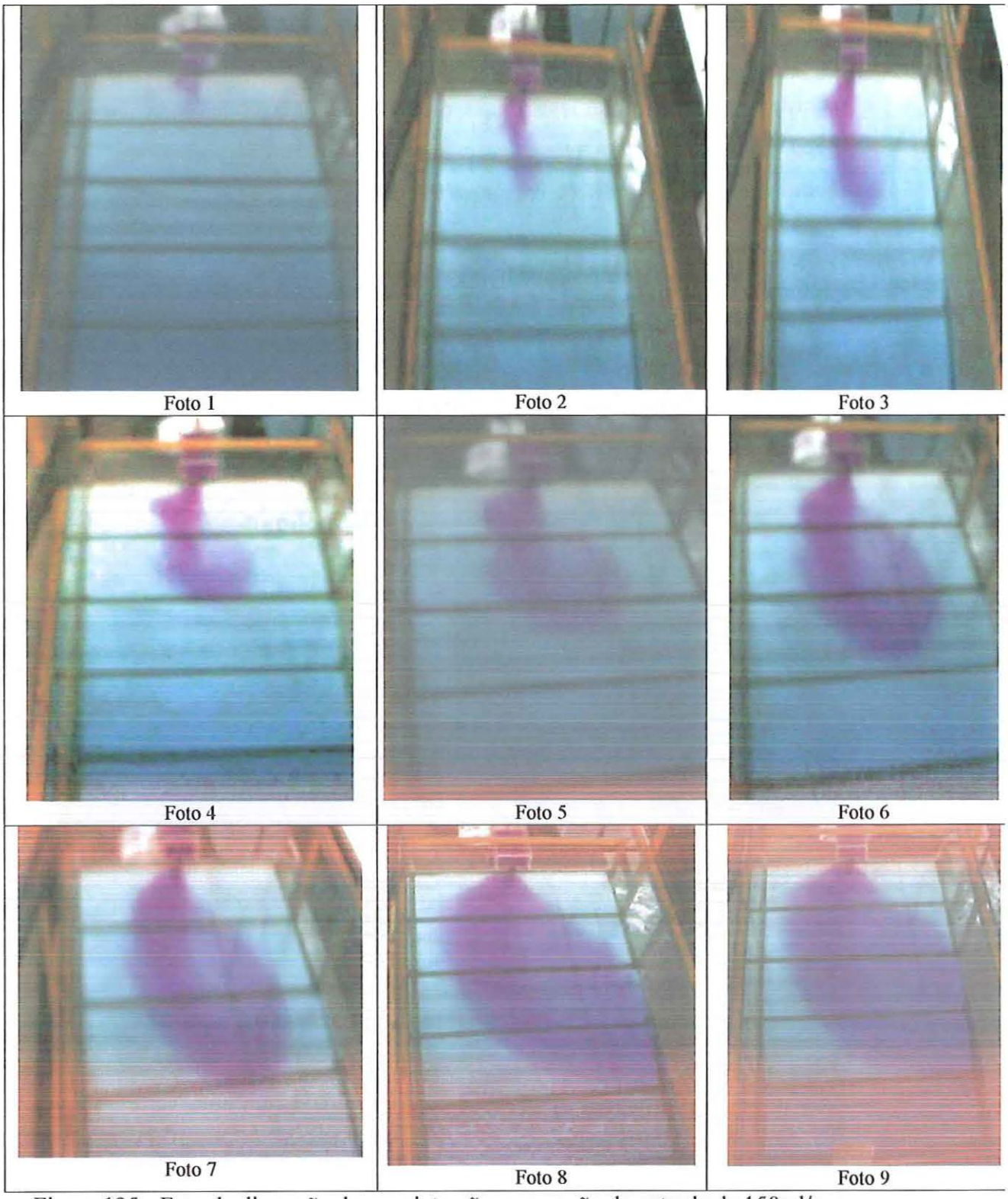
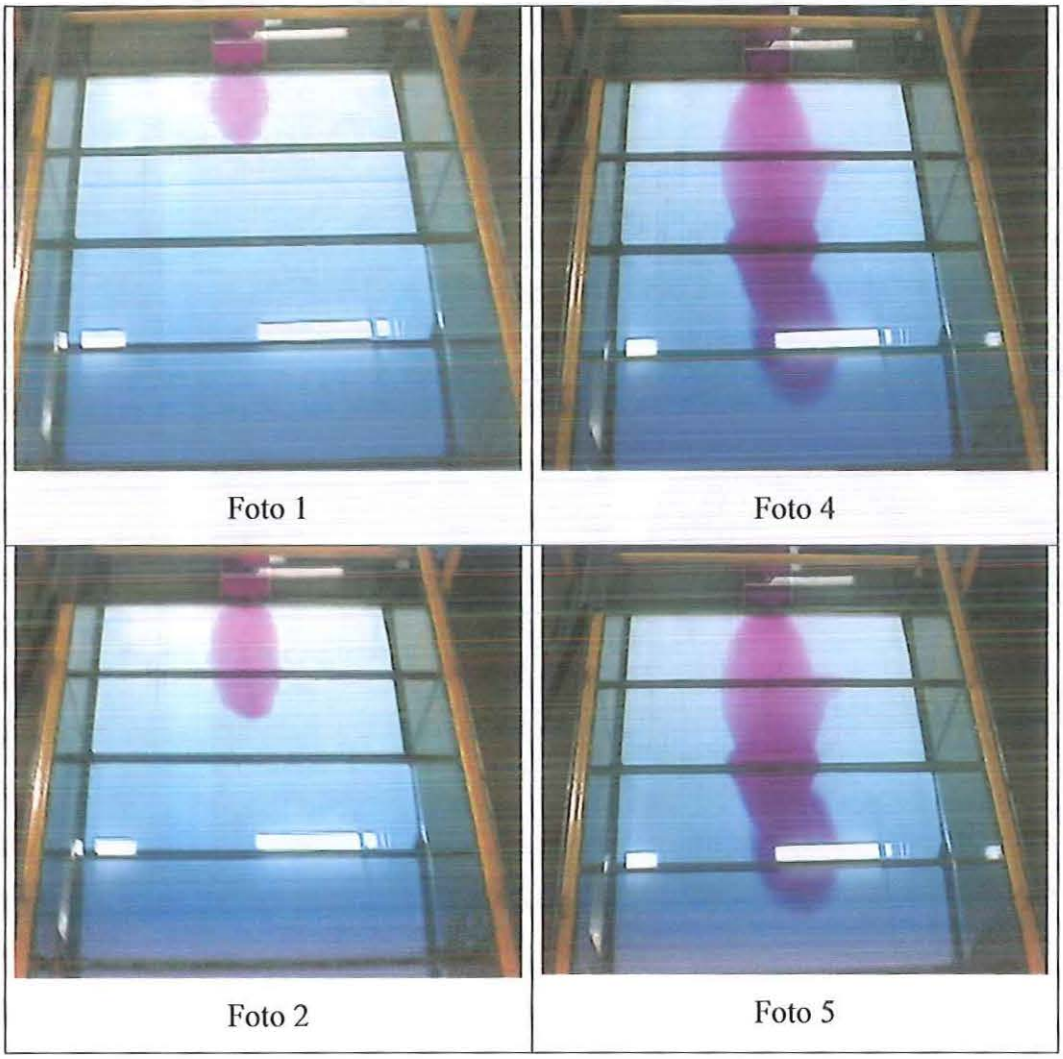


Figura 125 - Foto da dispersão de uma intrusão com vazão de entrada de 150ml/s.

Verifica-se comportamento muito distinto da vazão de 50ml/s, não havendo, neste caso, a formação da região de alargamento e estreitamento da corrente de fundo. A característica desta intrusão foi mais próxima das plumas, havendo um alargamento geral progressivo. Uma recirculação pode ser observada (vórtice em sentido anti-horário), que não se verificou em outros experimentos.

5.3.3 Situação para vazão de 300ml/s

As características gerais antes mencionadas são novamente observadas. A seqüência de fotos da figura 126 permite atestar esta afirmação.



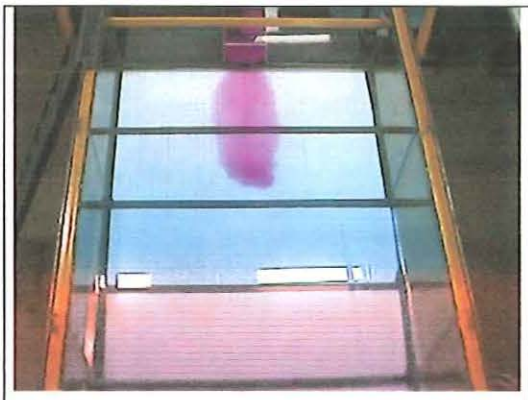


Foto 3

Foto 6

Figura 126 – Foto da dispersão de uma intrusão com vazão de entrada de 300ml/s.

Observa-se que se forma uma região de alargamento após o descolamento, mas com rápido avanço da intrusão na direção longitudinal (fotos 4 e 5 da figura 126).

Com o passar do tempo o alargamento torna-se mais pronunciado e a forma assunida a jusante serpenteia de acordo com vórtices que se formam na interface.

A figura 127 mostra um segundo ensaio com a vazão de 300ml/s, que apresentou rápida expansão após o ponto de descolamento e uma estrutura de vórtices totalmente diferente daquela mostrada na figura 126.

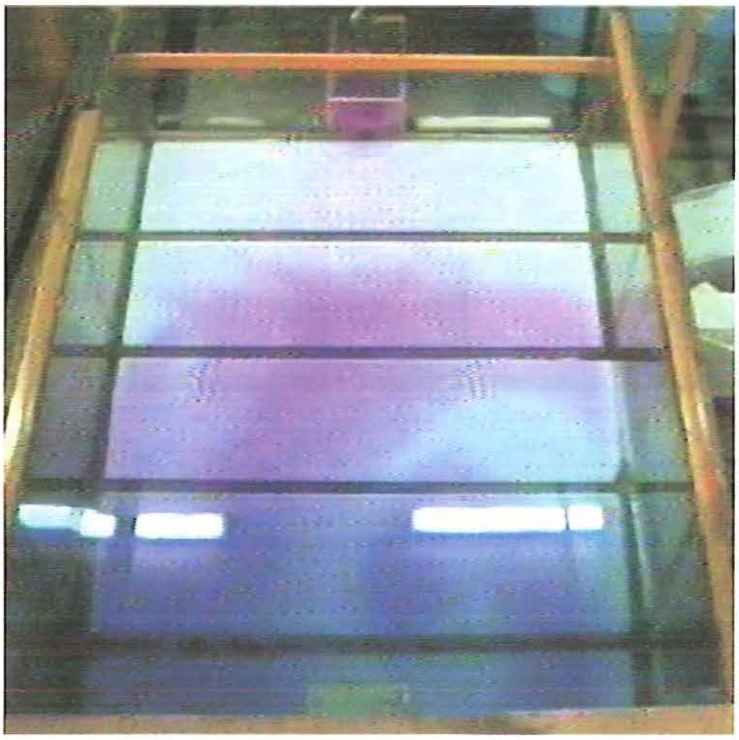


Figura 127 - Foto da dispersão de uma intrusão com vazão de entrada de 300ml/s.

As figuras 126 e 127 mostram ensaios com mesmas condições de realização, mas com resultados diferentes.

5.4 Correntes de fundo com obstáculos.

Sabe-se que em reservatórios artificiais o rio, quando mais denso que a água do meio, segue preferencialmente pelo antigo leito, enquanto a geometria assim permitir (não houve sedimentação excessiva, por exemplo). Em reservatórios naturais (lagos), a morfologia do fundo foi estabelecida geralmente por condições impostas há tempos muito distantes, envolvendo épocas de glaciação e degelo, por exemplo.

Entretanto, apesar dos caminhos preferenciais, podem ocorrer situações nas quais as correntes de fundo encontrem obstáculos topográficos (protuberâncias), que são envolvidas lateralmente pelo movimento do fluido escoando. Neste caso, torna-se interessante observar que tipo de comportamento estas correntes apresentam que podem explicar eventuais fenômenos junto a esses obstáculos.

Devido às facilidades experimentais da bancada em uso, os objetivos do presente trabalho foram ampliados para também estudar os padrões de escoamento que ocorrem junto a obstáculos.

Os padrões observados estão aqui devidamente apresentados. A seqüência de imagens é arrolada de acordo com a vazão imposta, com o diâmetro e tipo de obstáculo.

5.4.1 Escoamentos em torno de obstáculos circulares.

Foram inicialmente conduzidos experimentos exploratórios, efetuados sem registro e apenas para verificar se a fina corrente de fundo apresenta respostas observáveis com obstáculos em seu caminho. Os objetos utilizados não seguiam uma geometria definida (tratava-se de pedaços de metal existentes no laboratório).

Tendo-se observado alterações no desenvolvimento das correntes, elaborou-se uma seqüência experimental com as seguintes características, descritas na tabela 3, vinculada a obstáculos circulares.

Diâmetro / Vazão	50mm	60mm	100mm	200mm
50ml/s	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX
220ml/s	XXXXX	XXXXX	XXXXX	XXXXX

Tabela 3 – Experimentos conduzidos com obstáculos circulares.

Em todos os casos experimentados, observaram-se os seguintes procedimentos e comportamentos gerais:

1. A água do reservatório sempre foi mantida limpa, sem sal e sem corante.
2. A água do rio (corrente de fundo) sempre foi tingida com permanganato de potássio e mantida com uma densidade de 1,050 com o uso de sal.
3. A declividade do fundo foi mantida em 4^0.

4. Utilizou-se azul de metileno para marcar uma quantidade de água imediatamente a jusante do obstáculo.
5. A corrente de fundo foi formada para todas as vazões e diâmetros da tabela 3.
6. A corrente de fundo envolveu sempre o obstáculo, descolando-se deste em um ponto ao longo do seu perímetro.
7. Observou-se a formação de vórtice com geometria do tipo ferradura a montante do obstáculo, devido a "acumulação" de material mais denso nesta região. As figura 125 a 128 explicam o comentário.

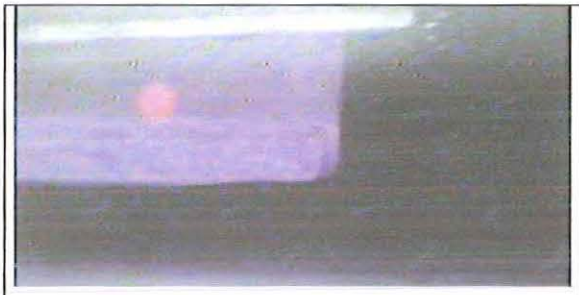
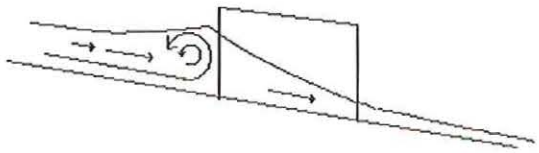
	

Figura 128 – Fotografia mostrando a acumulação de material a montante do cilindro (Vazão de entrada de 50ml/s e diâmetro de 100mm).	Figura 129 – Esquema do que acontece a montante do cilindro (comportamento médio).

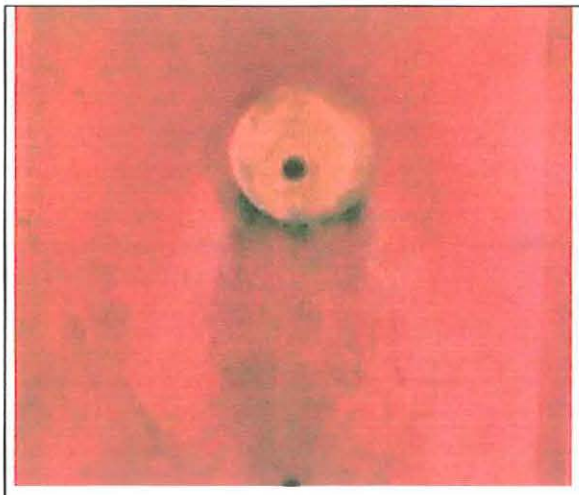
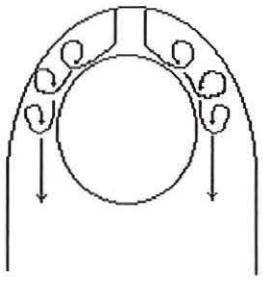
	

Figura 130 – Fotografia superior mostrando a acumulação de material a montante do cilindro)	Figura 131– Esquema do que acontece a montante do cilindro (vórtice com geometria tipo ferradura – comportamento médio).

8 Em todos os casos, houve reversão do escoamento a jusante do obstáculo.

9 Em todos os casos, houve recirculação a jusante do obstáculo com duas células.

10 Em todos os casos a intrusão de fluido do meio ocorreu na região de recirculação, diluindo a mancha azul.

11 Em todos os casos, houve fuga de fluido da região de recirculação para o meio, eliminando-se a mancha azul com o passar do tempo.

12 Não houve observação de instabilidades do tipo "esteiras de von Karman".

A figura 131 mostra um resumo esquemático do que acontece.

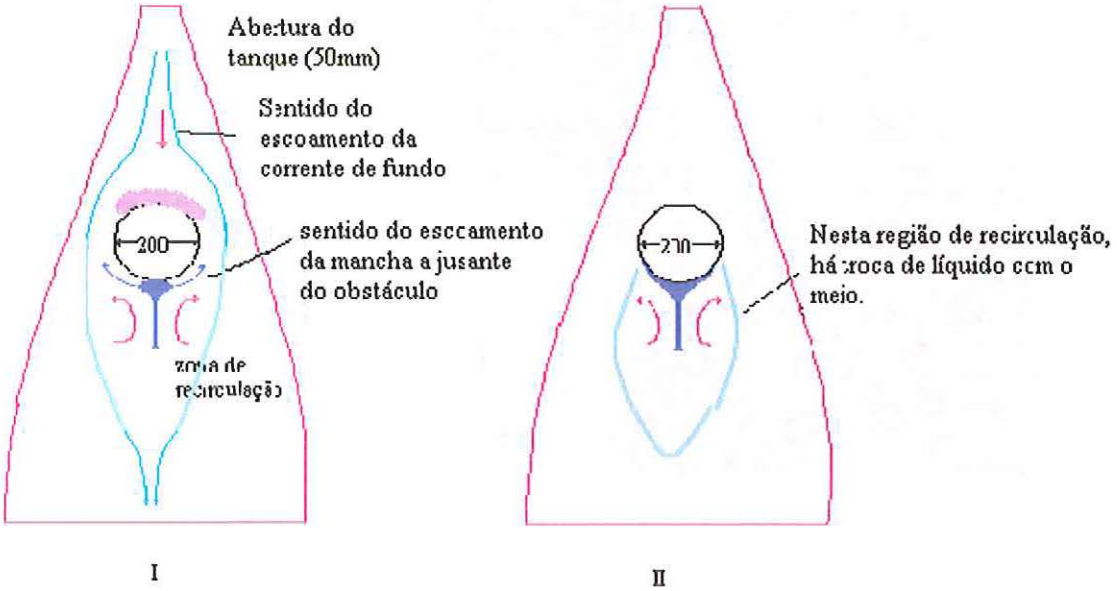


Figura 132 - O diagrama mostra o movimento de uma mancha (solução de água, sal e azul de metileno) a jusante do obstáculo. Na parte (I) do diagrama, uma parte desta escoa no sentido oposto do escoamento da corrente de fundo para logo a seguir cicunscrever o perímetro do obstáculo e então se deslocar no sentido da corrente. A parte II do diagrama mostra a região onde ocorre esta recirculação.

A seguir mostra-se a seqüência de imagens obtidas para cada situação de observação.

5.4.1.1 ENSAIO DE CORRENTE DE FUNDO COM Q= 220 ML/S E ϕ=200MM.

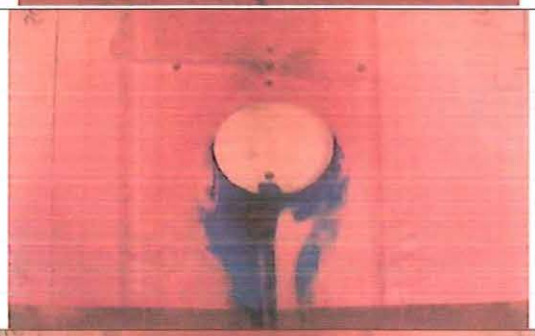
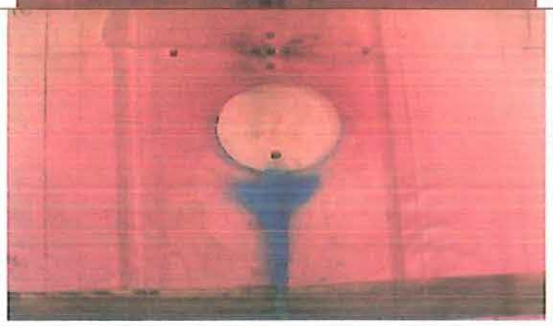
	No primeiro momento, a mancha azul à jusante do obstáculo escoa no sentido preferencial do movimento da corrente de fundo. Observa-se o alongamento da mancha.
	Posteriormente a mancha azul reverte seu movimento. Esta foto mostra o movimento ascendente da mancha devido ao surgimento da zona de recirculação, com o deslocamento ocorrendo em oposição próxima ao "meio" do círculo. Há uma maior quantidade de azul de metileno desviado à esquerda do escoamento
	Intensa recirculação com troca de líquidos, mistura em ambos os lados do obstáculo Observa-se que a mancha azul desloca-se no perímetro do obstáculo, em sentido contrário ao escoamento externo.
	Quase total dispersão da mancha azul ascendente o que se efetiva com o passar do tempo.

Figura 133 – Corrente de fundo com vazão de 220ml/s e ϕ=200mm.

5.4.1.2 ENSAIO COM CORRENTE DE FUNDO Q=50ML/S E ϕ= 200MM.

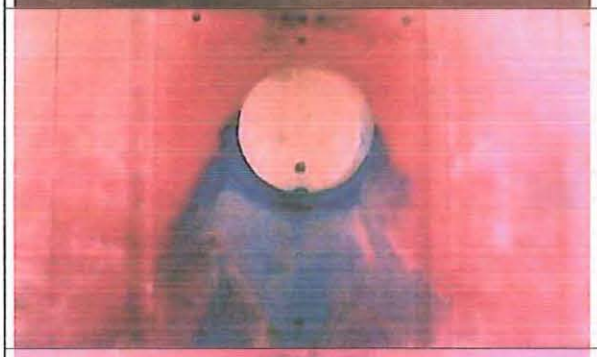
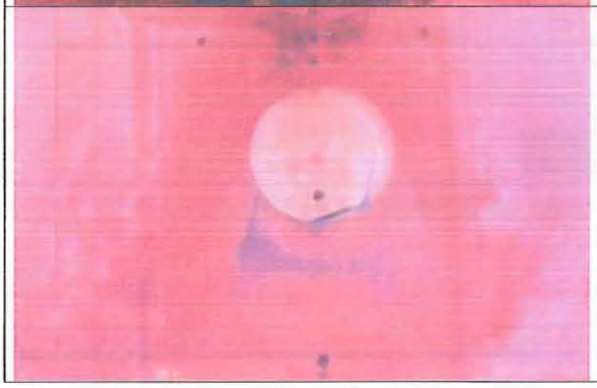
	Foi usado o mesmo cilindro do experimento 5.3.2.1. Nota-se que houve o movimento descendente inicial e já há um pequeno movimento ascendente da mancha azul. Isto pode ser observado melhor no do lado esquerdo do obstáculo.
	Interessante recuo total da mancha azul com a formação da zona de recirculação. O deslocamento junto ao perímetro do obstáculo é evidente, ficando claro o ponto de deslocamento.
	Ocorrência da diluição da mancha azul em ambos os lados do obstáculo, com a recirculação evidenciada a jusante.
	Após aguardar o tempo de diluição (mistura), vê-se quase total diluição da mancha azul. Na zona de recirculação vê-se uma região com menor concentração do corante pvermelho à jusante do obstáculo. Isto pode significar uma redução na espessura da corrente, ou intrusão de água das camadas superiores menos densas.

Figura 134 – Corrente de fundo com vazão 50ml/e ϕ =200mm.

5.4.1.3 EXPERIMENTO COM CORRENTE DE FUNDO Q=50ML/S E ϕ= 50MM.

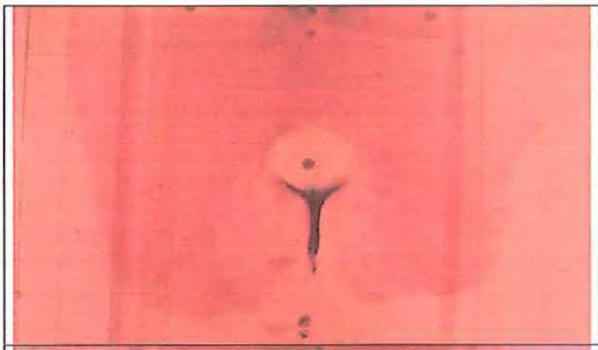
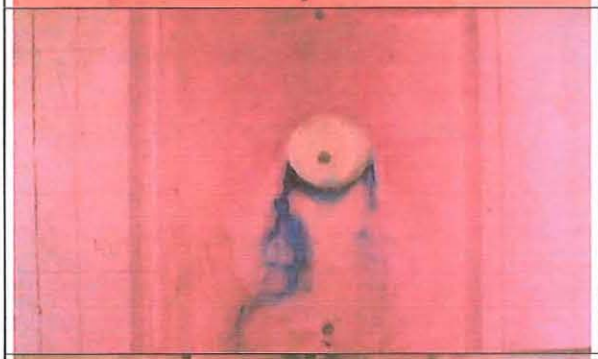
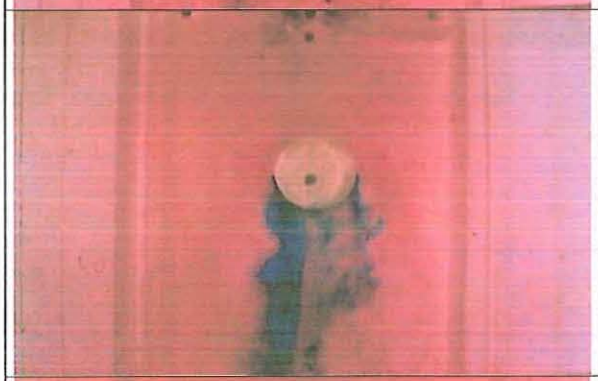
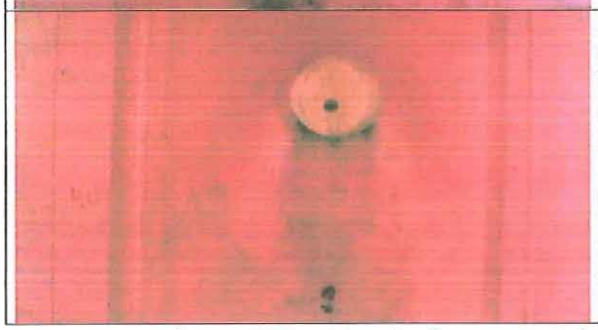
	Este foi o menor dos obstáculos utilizados no ensaio de corrente de fundo. Uma parte da mancha azul se desloca no sentido da corrente enquanto outra parte já apresenta movimentos ascendentes nas laterais do cilindro.
	Nesta fase do ensaio, ocorreu um movimento preferencial da mancha azul para o lado esquerdo do obstáculo.
	Vê-se uma intensa mistura na região de recirculação do fluido.
	Ocorre dispersão da mancha a jusante do cilindro.

Figura 135 – Ensaio de corrente de fundo com Q=50ml/s e ϕ = 50mm

5.4.1.4 EXPERIMENTO COM CORRENTE DE FUNDO, Q=220ML/S E ϕ=50 MM

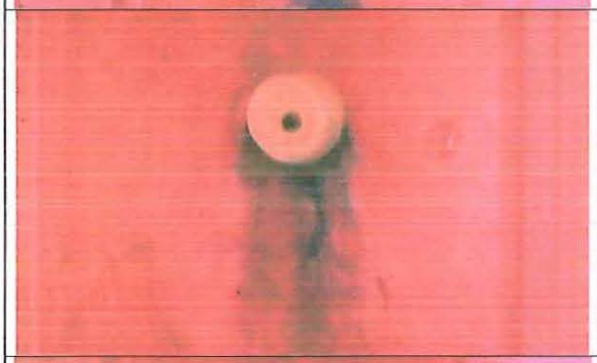
	Observa-se o alongamento da mancha azul a jusante do obstáculo.
	Ocorrem movimentos ascendentes em torno do perímetro do obstáculo e no sentido contrário ao escoamento da corrente.
	Com o passar do tempo, observa-se mistura e diluição da mancha na zona de recirculação.
	Finalmente há diluição e eliminação da mancha azul a jusante do obstáculo.

Figura 136 – Ensaio de corrente de fundo com Q= 220ml/s e ϕ=50mm.

5.4.1.5 EXPERIMENTO DE CORRENTE DE FUNDO, Q=50ML/S E ϕ= 100MM.

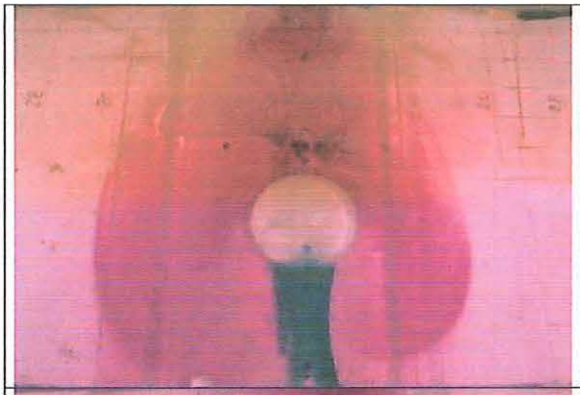
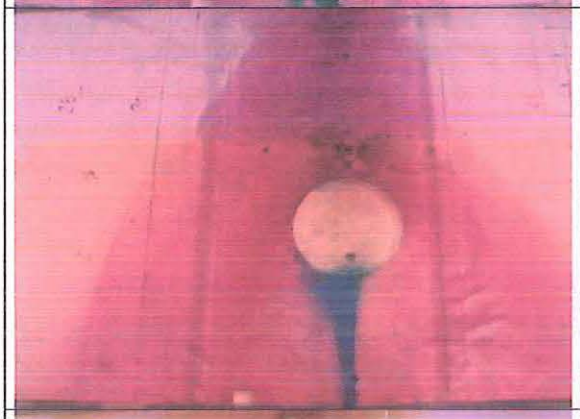
	Alongamento da mancha azul e formação de dois "bolsões" do escoamento da corrente. Trata-se do início da formação da região de recirculação.
	Observa-se o movimento ascendente da mancha azul. Neste caso isto ocorre preferencialmente pelo lado esquerdo do obstáculo. Observa-se igualmente o deslocamento ao longo do perímetro do obstáculo, até o ponto de deslocamento.
	Dissipação da mancha azul seguindo o sentido do movimento da corrente.

Figura 137 – Corrente de fundo com vazão de entrada de 50ml/se ϕ=100mm

5.4.1.6 EXPERIMENTO DE CORRENTE DE FUNDO,Q=220ML/E ϕ=100MM.

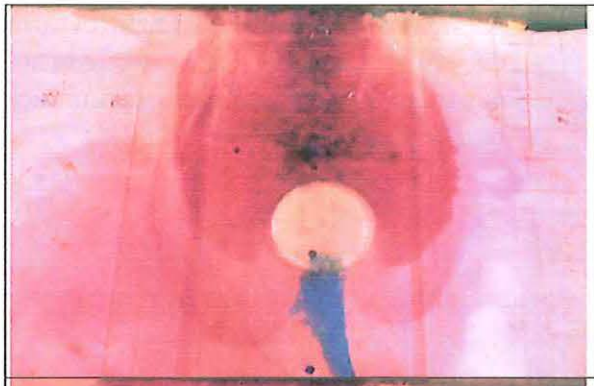
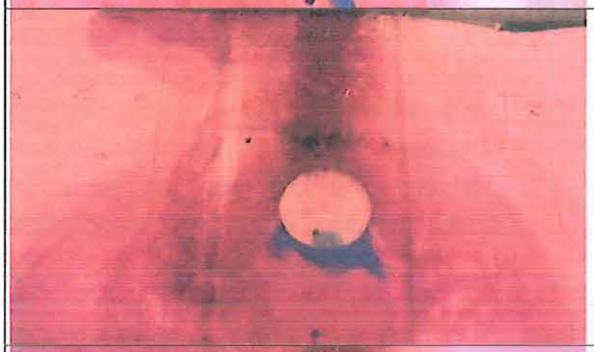
	Início do escoamento da corrente de fundo e da mancha azul a jusante do obstáculo, que segue o movimento externo.
	Movimento ascendente da mancha em torno do perímetro do cilindro. Observa-se, neste exemplo, a retração total da mancha azul. Os pontos de descolamento mostram-se posicionados mais a jusante do obstáculo.
	Disipação da mancha azul.

Figura 138 – Corrente de fundo com vazão de entrada de 220ml/s e ϕ=100mm.

5.4.1.7 EXPERIMENTO DE CORRENTE DE FUNDO,Q=50ML/S E ϕ= 60MM.

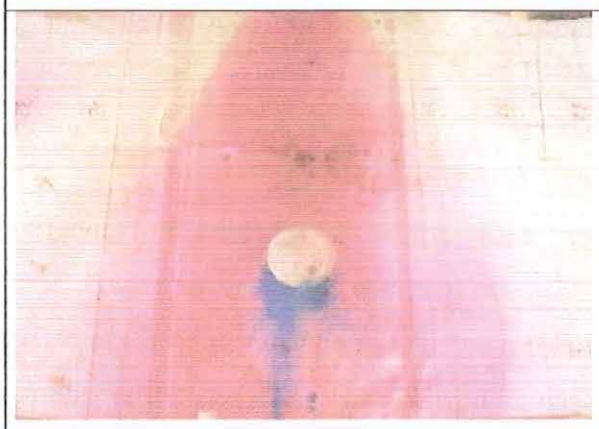
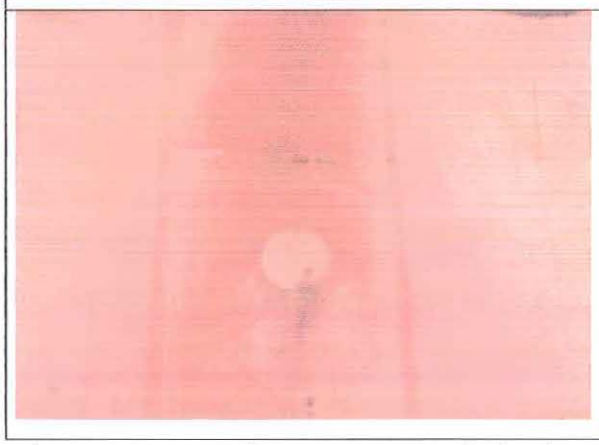
	Início do ensaio com movimento da mancha azul, a jusante do cilindro, no sentido do escoamento.
	Ocorre movimento ascendente preferencial da mancha azul pelo lado esquerdo do cilindro para daí seguir o escoamento da corrente, após atingir o ponto de descolamento.
	Dissipação quase total da mancha azul. Observa-se regiões mais claras na zona de recirculação. Há provável intrusão de água limpa das camadas superiores.

Figura 139 – Ensaio com corrente de fundo com Q=50ml/s eϕ=60mm.

5.4.1.8 EXPERIMENTO DE CORRENTE DE FUNDO,Q=220ML/E ϕ= 60MM

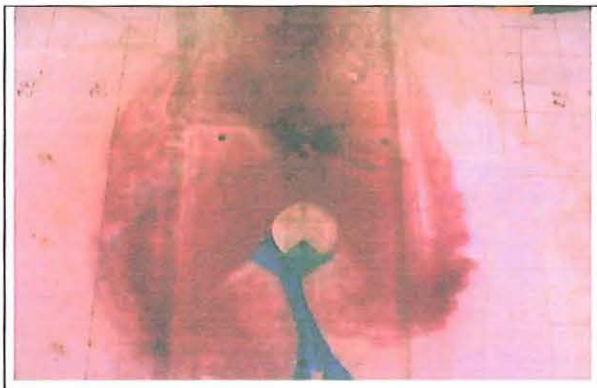
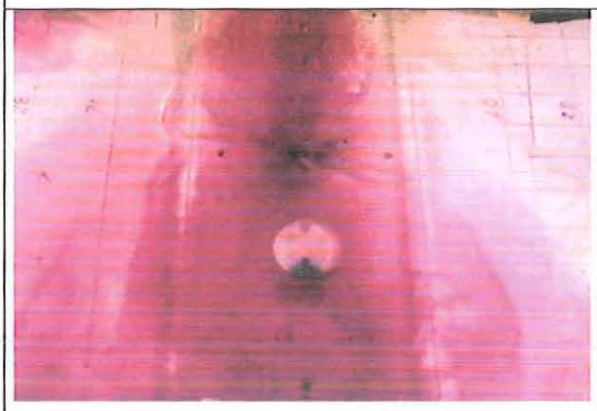
	Devido ao alto valor da vazão, ocorre rapidamente a ascensão da mancha azul, com seu deslocamento ao longo do perímetro do cilindro. Parte da mancha azul segue escoando a jusante, com o escoamento principal.
	Dispersão da mancha azul e estabelecimento do escoamento da corrente.

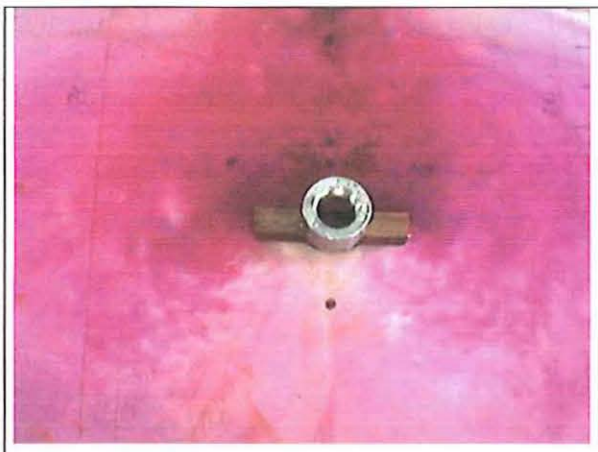
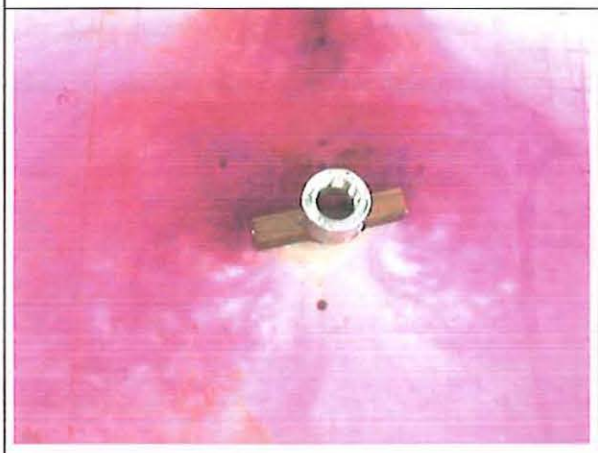
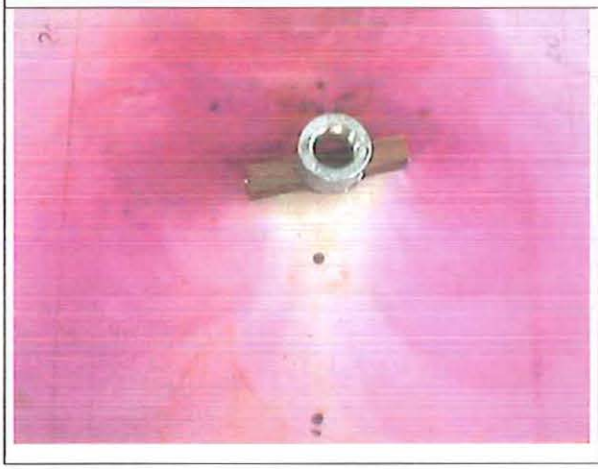
Figura 140 – Ensaio de corrente de fundo com Q=220ml/s e ϕ=60mm.

Vê-se que os experimentos aqui arrolados mostraram comportamentos semelhantes. A seqüência de imagens mostra que, nas condições de ensaio, formam-se sempre regiões de recirculação Contudo, para configurações peculiares de barreiras no leito do rio pôde-se observar a formação de um funil de fluido não perturbado à jusante do obstáculo poligonal, como nas fotografias a seguir.

5.4.2 Escoamentos em torno de barreiras.

Os experimentos seqüenciais com cilindros representam o corpo central desta parte dos trabalhos. Contudo, para verificar se outras geometrias do obstáculo produzem o mesmo padrão de escoamento, utilizou-se um obstáculo plano de 10 cm de comprimento colocado transversalmente à corrente de fundo com vazão de 220ml/s.

A seqüência de imagens ilustra a experimentação feita.

	Início do escoamento. Não há ainda estabelecimento de uma situação permanente.
	Por falha na fixação, ocorreu um pequeno movimento do obstáculo. Observa-se movimento envolvente do fluido da corrente, gerando a região de recirculação.
	Observação de ondas vorticosas nas extremidades do obstáculo. A região de jusante aparece mais clara mostrando a presença de água limpa (sem corante) das camadas superiores do escoamento.

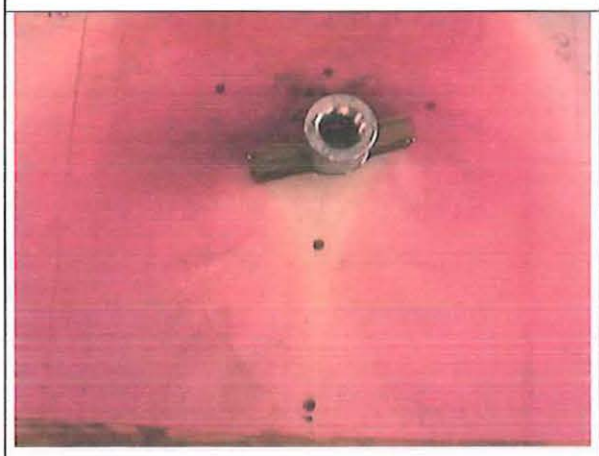
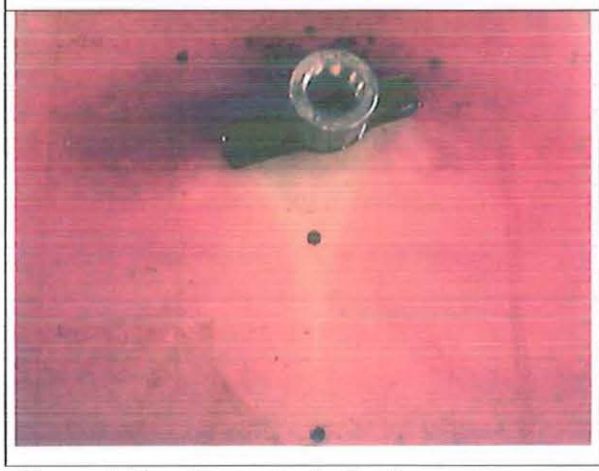
	Estabelece-se uma configuração tipo funil à jusante do obstáculo, composta pela água limpa.
	Mantêm-se a configuração tipo funil, que diminui de largura na direção do escoamento da corrente de fundo.
	Esta configuração permaneceu constante ao longo do trajeto percorrido pela corrente de fundo até o final do tanque experimental.

Figura 141 – Corrente de fundo em torno de um objeto com geometria plana.

Verifica-se, portanto, com os obstáculos utilizados, a possibilidade de intrusão mais acentuada da água de camadas superiores na corrente de fundo.

Estudos detalhados são considerados necessários para esclarecer os aspectos fluido-dinâmicos e de transporte aqui envolvidos.

5.5 Singularidades

O item singularidades é aqui introduzido para evidenciar que os estudos experimentais podem trazer à luz eventos inesperados, os quais podem redirecionar pesquisas ou fomentar novos estudos. No caso dos escoamentos influenciados por diferenças de densidades entre parcelas vizinhas de fluido, o aparecimento de situações imprevistas mostrou-se razoavelmente profuso. Uma classificação dos eventos ocorridos não é ainda possível (para a autora), mas a descrição dos mesmos, até onde isso é possível, é aqui apresentada. O estudo detalhado dessas singularidades foge ao escopo do presente trabalho de doutorado. Embora interessantes e "plasticamente atraentes", o tempo necessário para o pleno entendimento dos fenômenos que interferem na obtenção das imagens aqui apresentadas transcende os parcos anos de obtenção de um título de Doutor. Espera-se que a menção dos fenômenos possa fomentar novos trabalhos.

Nas imagens subseqüentes foram aplicados filtros adequados para evidenciar os fenômenos observados. Esses filtros correspondem a tratamentos posteriores das imagens, com os programas comerciais existentes no mercado e disponibilizados para os usuários.

5.5.1 - Estrutura de escoamento na entrada do reservatório

Para alguns experimentos de plumas verificou-se que imediatamente a jusante da entrada do "rio" no reservatório formava-se uma região clara, algo como uma "mancha" mais clara no ambiente tingido. A figura 134 mostra a obtenção de uma dessas "manchas" para o experimento rodado com a vazão de 20 ml/s, densidade de 1,050 e temperaturas de 28^0C.

Figura 142, à esquerda: Obtenção da "mancha" clara a jusante da entrada do reservatório.
Figura 143, acima: Detalhes da "mancha" clara para as condições experimentais descritas.

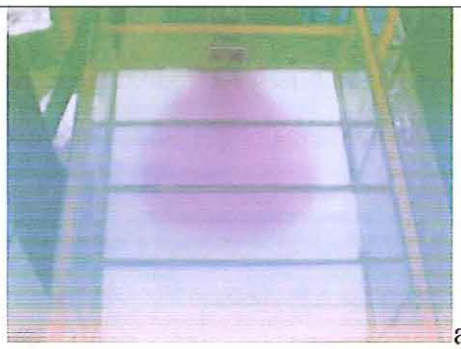
Com o intuito de melhor registrar as características observadas, foram feitas fotografias da região afetada propriamente dita, obtendo-se as imagens das figuras 142 e 143. Observa-se que a mancha é percorrida por ondas mais espessas de material tingido, o que mostra que esta mancha representa uma região de menor profundidade no ambiente do reservatório. Adicionalmente, observa-se na figura 143 uma estrutura mais escura que forma um V com abertura para jusante da entrada. Embora não se tenha buscado explicar com detalhes esta formação, entende-se que o seu aparecimento segue o esquema da figura 143.

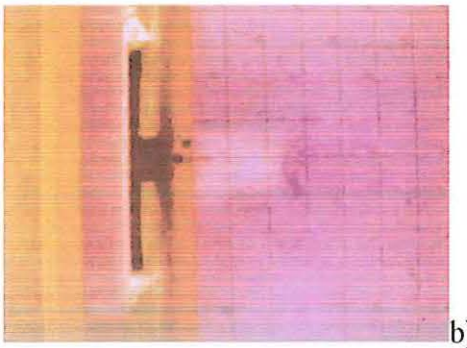
A estrutura em V parece estar vinculada a uma região de recirculação que se forma como um "ressalto hidráulico", após a região mais rasa. Esta recirculação inicia junto à mancha clara, formando aí um vértice. As condições do escoamento à direita e à esquerda deste vértice são tais que a profundidade da água paulatinamente cresce (a mancha deixa de existir). Provavelmente o posicionamento da célula de recirculação (região de recirculação) adapta-se de acordo com as profundidades conjugadas antes e

depois do "ressalto", gerando a figura em V observada. Embora se tenha efetuado uma busca na literatura acerca desse tipo de estrutura, esta busca foi reduzida em decorrência do tempo escasso. Assim, não havendo momentaneamente uma explicação mais embasada, mantém-se a descrição aqui apresentada.

Figura 144 - Explicação simplificada da estrutura vista nas figuras 141 e 142

Um experimento conduzido para a vazão de 50ml/s, densidade de 1,050 e temperaturas de 25^0C permitiu obter imagens de diferentes ângulos desta mancha, visando registrar a estrutura mencionada. As fotos da figura 145 mostram as mesmas características já citadas.


a)


b)

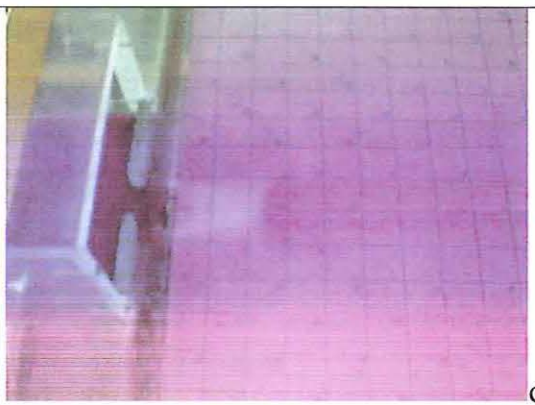

c)

Figura 145 a: Obtenção da "mancha" clara a jusante da entrada do reservatório.
Figuras 145 b e c: Detalhes da "mancha" clara para as condições experimentais descritas. Observa-se a formação da estrutura em V, com abertura para jusante. Neste caso utilizou-se uma fotografia da pluma em formação (pluma com alto grau de simetria, como pode ser visto).

A formação das estruturas mencionadas não foi motivo de aprofundamento no presente trabalho. Contudo, foi possível observar a sua formação e a sua repetibilidade, o que pode ser tema de futuros estudos, caso venha a se mostrar relevante, por exemplo, no entendimento dos processos de mistura que ocorrem na entrada de reservatórios e lagos.

É talvez importante ressaltar que o fenômeno observado na região de entrada do tanque (ou reservatório, no caso real), embora localizado, mostra que o equacionamento desses escoamentos deve ser tri-dimensional. Baseia-se essa afirmação no fato de se verificar diferentes profundidades ao longo de um mesmo corpo de água, de haverem recirculações e alturas conjugadas (tipo ressalto) que se desenvolvem ao longo de uma disposição geométrica em V (portanto, uma estrutura de recirculação em

planos verticais que se desenvolve ao longo do plano horizontal), além de haver uma região na qual toda a profundidade do líquido tem densidade do "rio", enquanto que em outras regiões há separação clara dos líquidos de diferentes origens.

A formulação numérica aqui adaptada para o estudo das plumas é bi-dimensional. Assim, a mesma aplica-se mais à reprodução do comportamento macroscópico observado do que ao entendimento mais detalhado do mesmo. Embora isto seja talvez uma limitação da formulação adotada, vale lembrar que a simplicidade é uma característica almejada em todos os modelos que criamos. Adicionalmente, o fato de ter sido possível reproduzir de forma geral o comportamento das plumas utilizando apenas um coeficiente de difusão turbulenta mostra que os experimentos se situaram em uma mesma "categoria" de escoamento. Isto é, a reprodução não necessitou de explicações adicionais para casos distintos.

5.5.2 - Deslocamentos laterais em experimentos com plumas

A repetibilidade dos experimentos com plumas foi comprovada em experimentos exploratórios, nos quais se observou a evolução geral das plumas para as mesmas condições de escoamento. Não obstante, alguns experimentos sofreram a ação de perturbações que definiram o desenvolvimento posterior das plumas. Vale frisar que o enchimento do tanque sempre era feito de modo semelhante, sendo que os experimentos com o "rio" sempre partiam do pressuposto de situação de repouso da água do tanque. Contudo, como se pode ver nas figuras do experimento feito com vazão de 100ml/s, densidade de 1,050 e temperaturas de 26^0C, uma perturbação com componente de velocidade transversal (eventualmente induzida pela própria vazão penetrante no reservatório) produziu um desenvolvimento de pluma que atingiu a parede esquerda do tanque em sua totalidade antes de atingir a parede direita em qualquer posição ao longo do tanque. Observa-se que não houve um movimento de recirculação (não há retorno da pluma em posições mais a jusante). Há apenas o movimento lateral que uniu a pluma à parede esquerda do tanque. Situações como esta foram raras nos experimentos de

plumas, mas o seu registro é considerado importante para balizar os estudos que visem modelar ou justificar comportamentos de plumas.

a)

b)

c)

Figura 146: Três momentos de uma pluma com singularidade: a) Instante inicial, b) Momento no qual se percebe a perturbação com componente de velocidade transversal, c) Desenvolvimento final.

5.5.3 - Assimetrias nos experimentos com intrusões

Os experimentos com intrusões mostraram-se mais arredios à repetibilidade da forma geométrica desses escoamentos. Conforme já mencionado no texto, foram observados padrões, que permitem uma quantificação inicial do processo de descolamento das correntes de fundo para formar as intrusões. De qualquer forma, esses padrões permitem descrever qualitativamente esse processo, o que permite que simulações futuras possam considerar as características aqui descritas.

Contudo, verificou-se que, nos experimentos de intrusões, as condições experimentais devem ser muito bem controladas, uma vez que pequenas alterações podem implicar em instabilidades que conduzem a padrões geométricos distintos ou únicos (plasticamente atraentes, porém eventualmente indesejáveis) no decorrer dos experimentos.

Os experimentos com intrusões foram feitos utilizando a mesma estrutura vertedora elaborada para os experimentos com plumas. Esta característica já altera o desenvolvimento natural da intrusão, uma vez que a massa tingida que atinge a seção de jusante do reservatório passa a se acumular junto a esta seção.

Por outro lado, a água superficial com menor densidade deve escoar sobre o vertedor, mantendo a cota da superfície da água no tanque. O que se observou foi a relevância do efeito da tensão superficial no escoamento sobre o extravasor. Como o processo de esgotamento passou a ser dependente de uma elevação do nível de água em todo o tanque, as vazões ensaiadas faziam com que esta elevação fosse muito lenta, gerando a tradicional curvatura da água devido à tensão superficial junto à soleira do extravasor. Inicialmente houve rompimento preferencial da película superficial devido a não-horizontalidade (mínima) da soleira. Posteriormente, corrigindo esta deficiência, embora não houvesse preferência na posição do rompimento inicial, ele podia ocorrer em uma posição e manter-se na mesma por um tempo suficientemente longo e interferir no escoamento da intrusão.

Essas características fizeram com que se considerasse, na análise dos dados, apenas o trecho inicial dos escoamentos na análise das intrusões. Os desenvolvimentos além do descolamento do fundo dependem de condições como acumulação, esgotamento por extravasor, simetria no esgotamento (conforme comentado), muito sujeitas a instabilidades.

A figura 147 mostra o desenvolvimento de uma intrusão que apresenta o efeito provável de duas causas: esgotamento preferencial por rompimento não-homogêneo da película superficial sobre a soleira do vertedor e tendência de acumulação na parede de jusante do tanque.

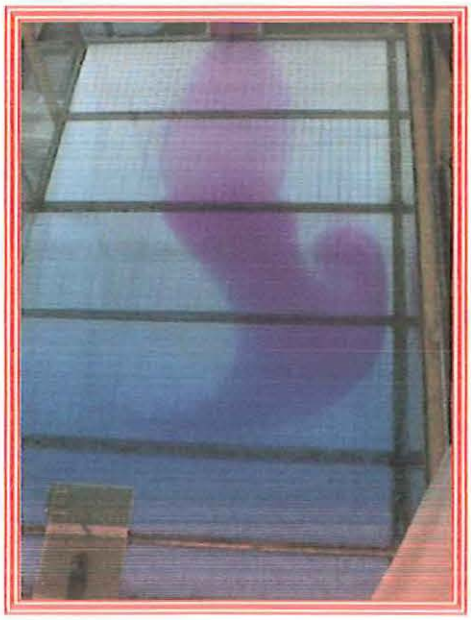


Figura 147 - Assimetria observada em experimento com intrusão. Vazão de 150ml/s, temperaturas de 23^0C.

5.5.4 - Considerações finais

Trabalhos experimentais como este desenvolvido na presente pesquisa devem servir de inspiração para o estudo detalhado dos fenômenos de Mecânica dos Fluidos. A expectativa dos resultados, fundamentada em uma pré-análise decorrente de descrições da literatura, acompanhada da observação e da constatação dos nossos acertos e erros de pré-avaliação, representa uma forma de crescimento única. A visão teórica, absolutamente fundamental para qualquer projeto e qualquer previsão, deve sempre buscar no seio da experimentação a base para as suas hipóteses e para as suas conclusões.

Inicialmente projetada para ser uma forma de comprovar tendências encontradas na literatura, a presente pesquisa evoluiu para a situação de buscar dados que subsidiem proposições futuras, uma vez que os resultados mostraram-se mais "ricos"

em detalhes do que suposto *a priori*. A sensação final, com a reunião dos resultados obtidos, é de um grande crescimento pessoal no que tange ao reconhecimento da complexidade dos fenômenos naturais vinculados a este tema e admiração para com a liberdade da natureza em nos apresentar seus comportamentos, independente de nossas hipóteses simplificadoras (ou tolhedoras).

Capítulo 6 – Análise de resultados

Como ocorreu no capítulo 5, na descrição dos resultados experimentais, o presente capítulo é subdividido para os resultados de plumas, intrusões e instabilidades nas correntes de fundo.

De forma geral, a análise dos resultados de plumas mostra que a simulação reproduz bem a realidade observada. Para as intrusões buscou-se analisar o colapso da corrente de fundo, espacialmente localizado onde inicia a intrusão. Finalmente, as instabilidades das correntes de fundo em torno de obstáculos são analisadas apenas qualitativamente, evidenciando os comportamentos descritos no capítulo 5.

6.1 Plumas.

Na análise dos resultados de plumas vale a mesma classificação adotada no capítulo 5, lembrando que **p** é o símbolo do ensaio seguido de dois coeficientes, sendo o primeiro coeficiente referente a densidade do fluido ambiente podendo ser 1, 2 e 3 com d_1=1,013, d_2 =1,020 e d_3=1,050 respectivamente, e o segundo coeficiente referente ao valor da vazão de entrada, podendo ser 1, 2 e 3 para vazões (Q) 50, 150 e 300ml/s respectivamente.

As simulações das plumas foram efetuadas com o modelo descrito no ítem 4.10, capítulo de materiais e métodos. As características construtivas do modelo permitiram que o domínio de cálculo fosse adotado como uma metade do escoamento real, de um lado do eixo longitudinal do mesmo.

Admitiu-se, nos cálculos, simetria do escoamento médio e da mancha gerada pela pluma. O esquema da figura 148, elucida o comentado.

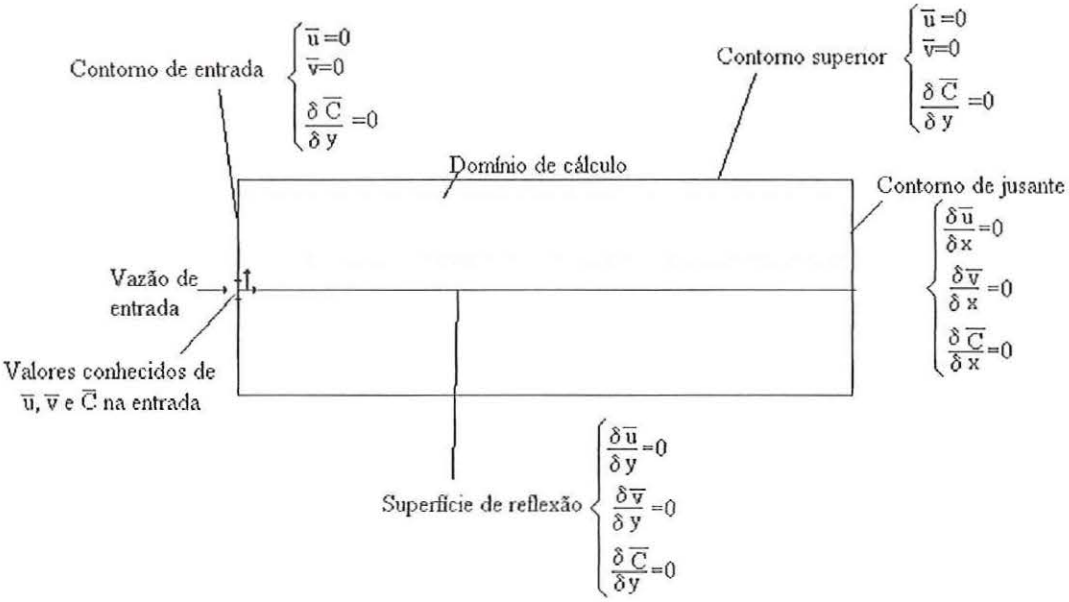


Figura 148 – Domínio de cálculo com contornos adotados no presente estudo.

A velocidade $\bar{u}$ na entrada é dada pelas condições experimentais.

Observou-se que, para a geometria adotada, o uso de $\bar{v}=0$ na entrada implicava em operações de multiplicação e divisão por zero que inviabilizavam a solução.

Assim, uma velocidade diferente de zero, foi adotada. Pela reflexão na linha central do escoamento, a mesma velocidade atua no sentido oposto para a metade inferior da figura x.

Desta forma, o esquema numérico passou a possuir três parâmetros de ajuste: vt (viscosidade turbulenta), Dt (difusividade turbulenta) e $\overline{v_0}$, onde $\overline{v_0}$ indica a velocidade transversal na entrada do escoamento.

Em escoamentos turbulentos, geralmente adota-se o número de Schmidt (Sc_t) próximo à unidade. Este procedimento também foi adotado no presente estudo, tendo-se:

$$Sc_t = \frac{\nu_t}{D_t} = 1 \qquad (6.1)$$

Logo $\nu_t = D_t$ (6.2)

Sendo Sct – número de Schmidt

νt – viscosidade turbulenta

Dt – difusividade turbulenta

Conseqüentemente, restaram dois parâmetros de ajuste, Dt(=νt) e $\overline{v_0}$.

Através de um processo de tentativa e erro, no qual se buscou compatibilizar os comportamentos gerais das plumas estudadas com os cálculos efetuados, o seguinte par de valores mostrou-se adequado:νt= Dt=0,15 e $\overline{v_0}$ =0,167.

O acompanhamento das dimensões das plumas foi feito utilizando, para a definição das fronteiras da mesma, critério semelhante ao utilizado para camadas-limite ou para plumas gaussianas. Em camadas-limite de concentração geralmente considera-se que a borda da camada (δ) foi atingida quando a seguinte relação é satisfeita:

$$\frac{C(\delta)-C_s}{C_\infty - C_s} = 0{,}95 \qquad (6.3)$$

onde C(δ) é a concentração na borda da camada-limite, C_∞ é a concentração distante da superfície de referência e C_s é a concentração nesta superfície. Geralmente, o valor 0,99 é também por vezes usado.

Em plumas gaussianas considera-se que a borda é atingida para largura da pluma de quatro vezes o desvio padrão, o que implica em considerar 95% da massa lançada como compondo a pluma. Também neste caso o valor 99 % é por vezes utilizado.

Na presente análise considerou-se as frentes de avanço da pluma definidas pela relação :

$$\frac{\overline{C}_{frente} - \overline{C}_{entrada}}{\overline{C}_{meio} - \overline{C}_{entrada}} = 0{,}99 \qquad (6.4)$$

Muito embora seja possível efetuar ajustes de $\overline{v_0}$ e D_t para cada situação de escoamento, optou-se por reproduzir o comportamento geral das plumas para cada vazão devido ao fato de se verificar que todo o escoamento é tri-dimensional, o que

implica em ser mais adequado elaborar um programa mais detalhado, que está fora do escopo deste trabalho.

6.1.1 Situações p11, p21, p31 e ptt1.

As figuras 149 a 152 mostram a comparação das evoluções experimentais e calculadas das plumas p11, p21, p31 e ptt1.

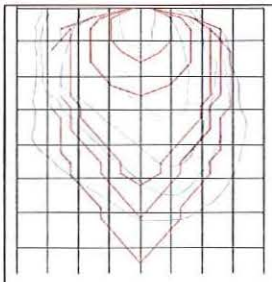
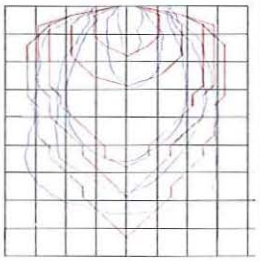
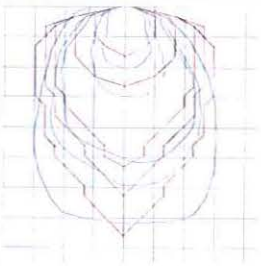
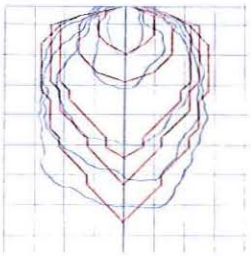
			

Figura 149 –Comparação do espalhamento medido/cal calculado para a situação p11.	Figura 150 –Comparação do espalhamento medido/cal calculado para a situação p21.	Figura 151 –Comparação do espalhamento medido/cal calculado para a situação p31.	Figura 152 –Comparação do espalhamento medido/cal calculado para a situação p41.

As diferenças nos detalhes evidenciam que se buscou a simulação das características globais. Essas características ficam melhor retratadas na análise conjunta dos dados das figuras 153 , 154, 155 e 156.

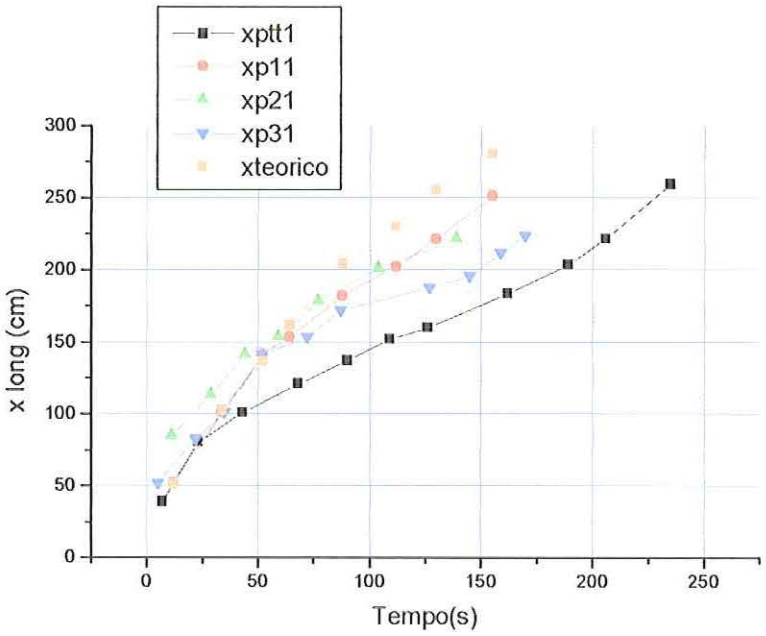


Figura 153 – Espalhamento longitudinal para os ensaios com plumas indicados.

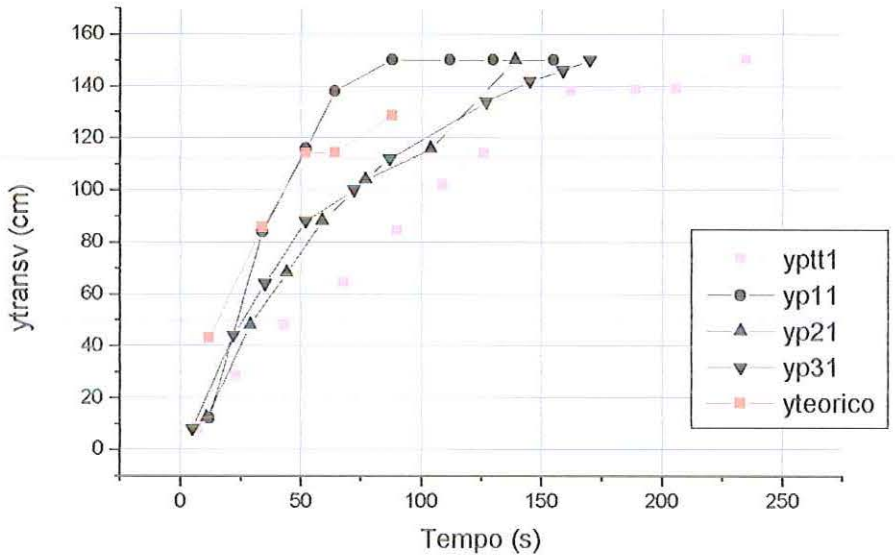


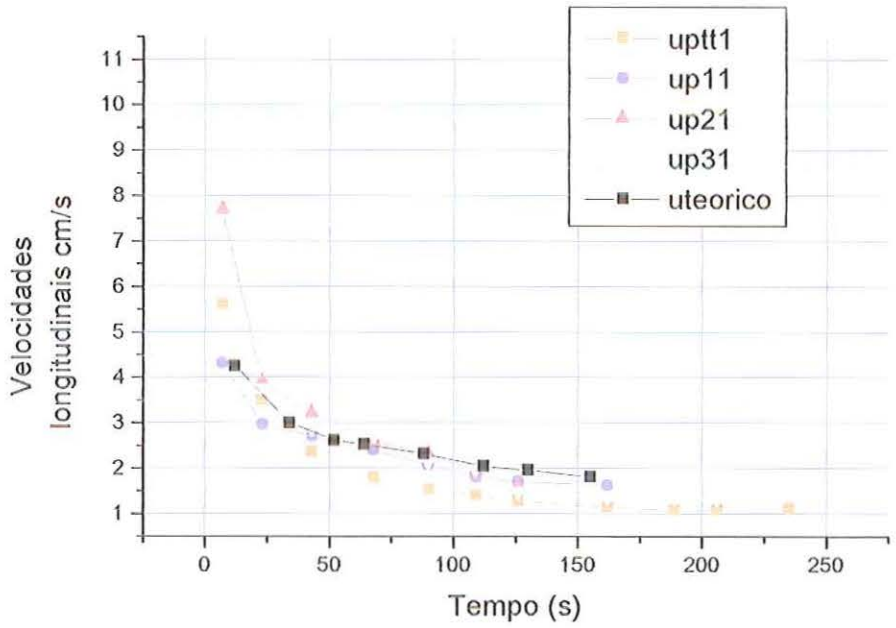
Figura 154– Espalhamento transversal para os ensaio com plumas indicados

As figuras 153 e 154 mostram a evolução temporal da máxima dimensão longitudinal e da máxima dimensão lateral das plumas.

Observa-se que o comportamento geral é mantido, não havendo posicionamento preferencial das curvas das plumas salinas, que as diferencie de forma efetiva.

A pluma térmica, por sua vez, mostrou-se mais "atrasada" em relação às plumas salinas (posição x abaixo das demais na figura 153) e mais "estreita" (posição y abaixo das demais na figura 154). Como este comportamento é inverso daquele obtido para a pluma teórica, verifica-se que as maiores diferenças entre previsão e medição ocorreram justamente para pluma térmica.

A pluma teórica mostrou-se geralmente mais "adiantada" e mais "larga" que as demais plumas. Note-se que as figuras 149 a 152 mostram uma tendência da pluma teórica ter uma "ponta" mais pronunciada. Tal comportamento exige mais detalhamento e ajustes no modelo usado.



Figuras 155 – Velocidades longitudinais médias para todos os ensaios de plumas

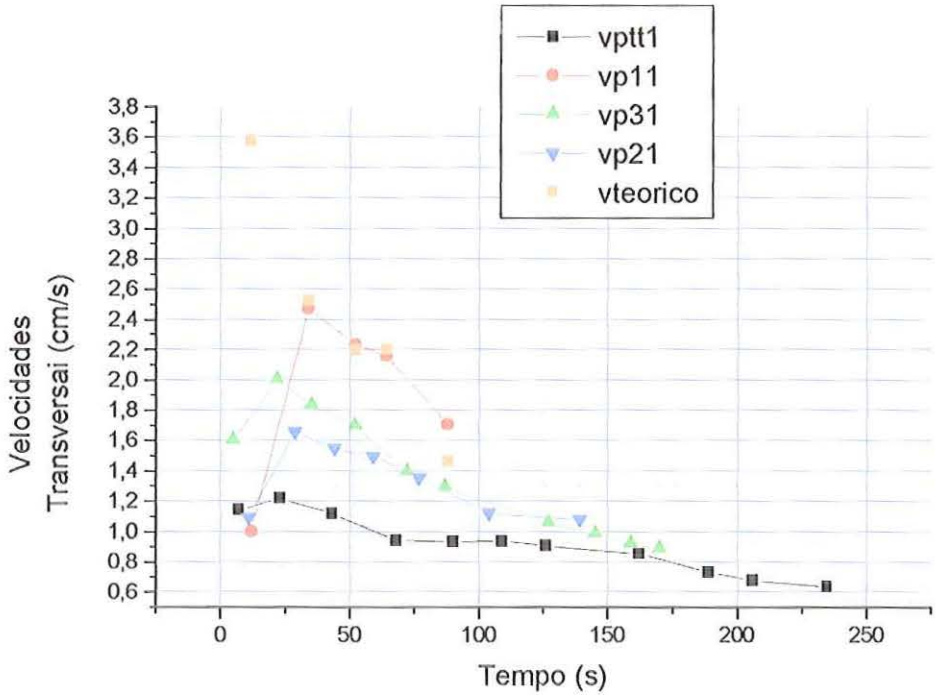


Figura 156 – Velocidades transversais médias para todos os ensaios com plumas.

As figuras 155 e 156 mostram as velocidades médias de avanço das frentes longitudinal e transversal.

A figura 155 mostra excelente superposição de valores de velocidade média longitudinal para todos os experimentos, havendo também boa aderência aos valores calculados.

A figura 156 mostra que as velocidades médias transversais, embora comportamentalmente semelhantes, apresentaram variações nos seus valores. Neste caso, os valores teóricos apresentam-se maiores em geral do que os valores medidos. Adicionalmente, as curvas experimentais mostram regiões de máximo, não reproduzidas pela curva teórica.

6.1.2 Situações p12, p22, p32 e ptt2.

As figuras 157, 158, 159, 160 mostram a comparação das evoluções experimentais e calculadas das plumas p12, p22, p32 e ptt2.

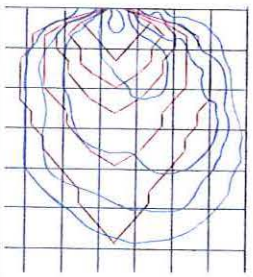
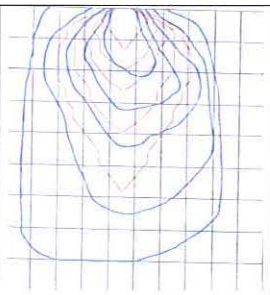
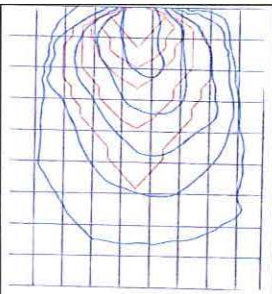
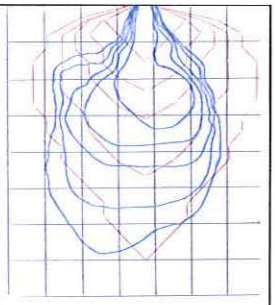
			

Figura 157 –Comparação do espalhamento medido/cal calculado para a situação p12.	Figura 158 –Comparação do espalhamento medido/cal calculado para a situação p22.	Figura 159 –Comparação do espalhamento medido/cal calculado para a situação p32.	Figura 160 –Comparação do espalhamento medido/cal calculado para a situação ptt2.

Novamente, as diferenças nos detalhes evidenciam que se buscou a simulação das características globais. As características mencionadas ficam melhor retratadas na análise conjunta feita com base nas figuras 161, 162, 163 e 164.

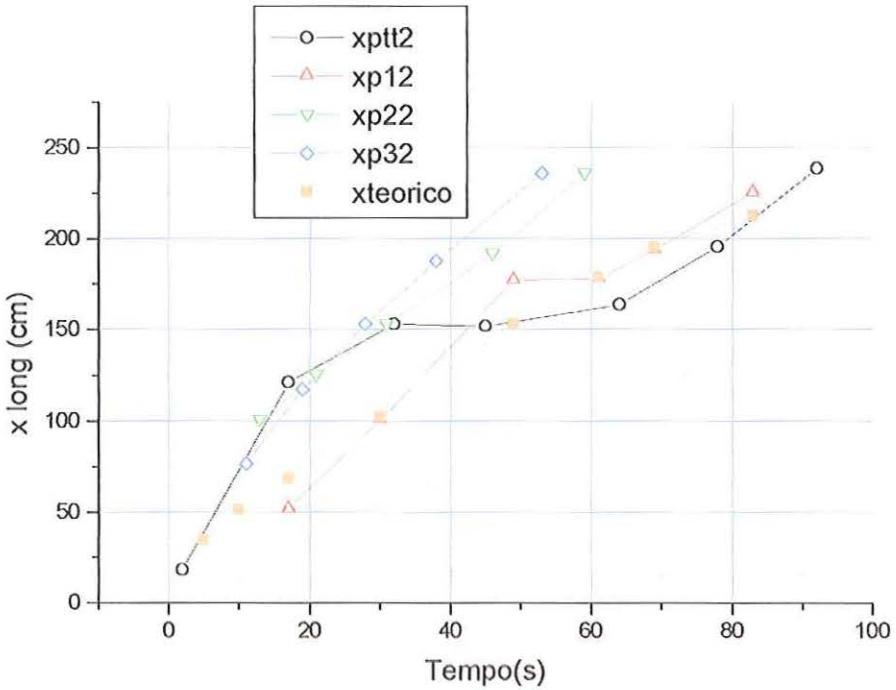


Figura 161 – Espalhamento longitudinal para os ensaios com plumas indicados.

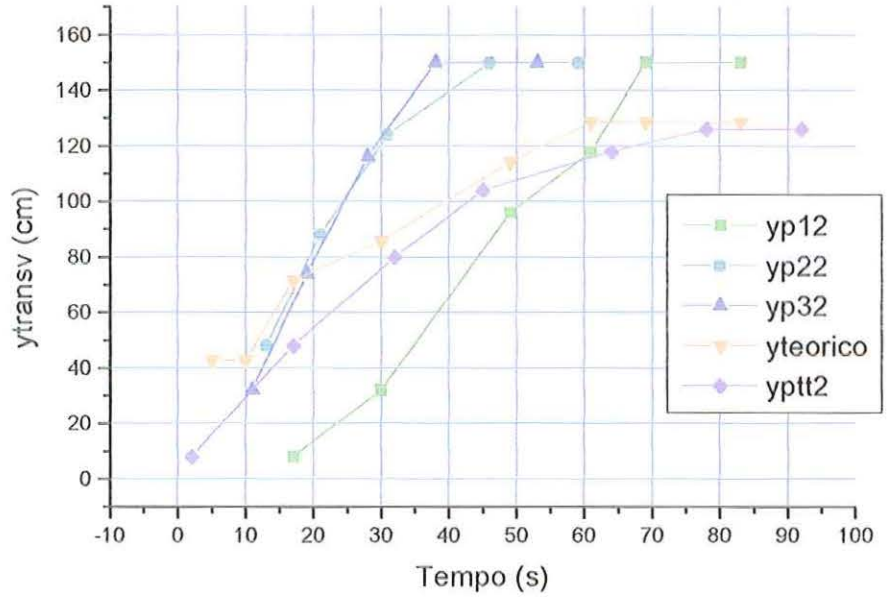


Figura 162– Espalhamento transversal para os ensaios de plumas indicados

As figuras 161 e 162 que registram os deslocamentos longitudinais e transversais, mostram que os experimentos p22 e p32 apresentam comportamentos semelhantes, enquanto que o experimento p12 aproximou-se mais da evolução da pluma térmica e da previsão teórica. Os comportamentos gerais foram semelhantes, a menos do deslocamento longitudinal da situação ptt2, que mostrou uma inflexão pronunciada.

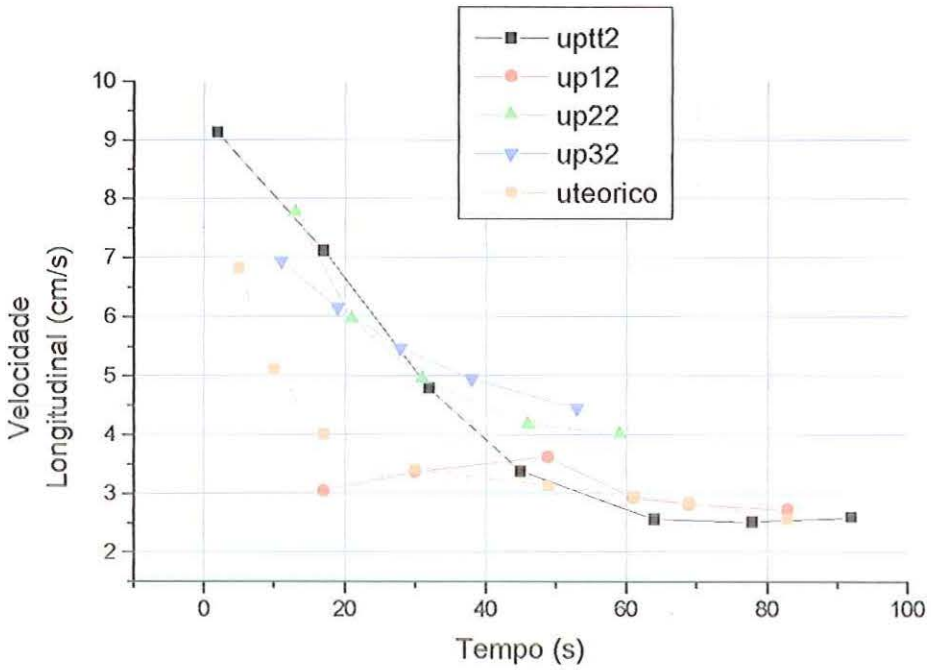


Figura 163 – Velocidade longitudinal média para os ensaios de plumas indicados.

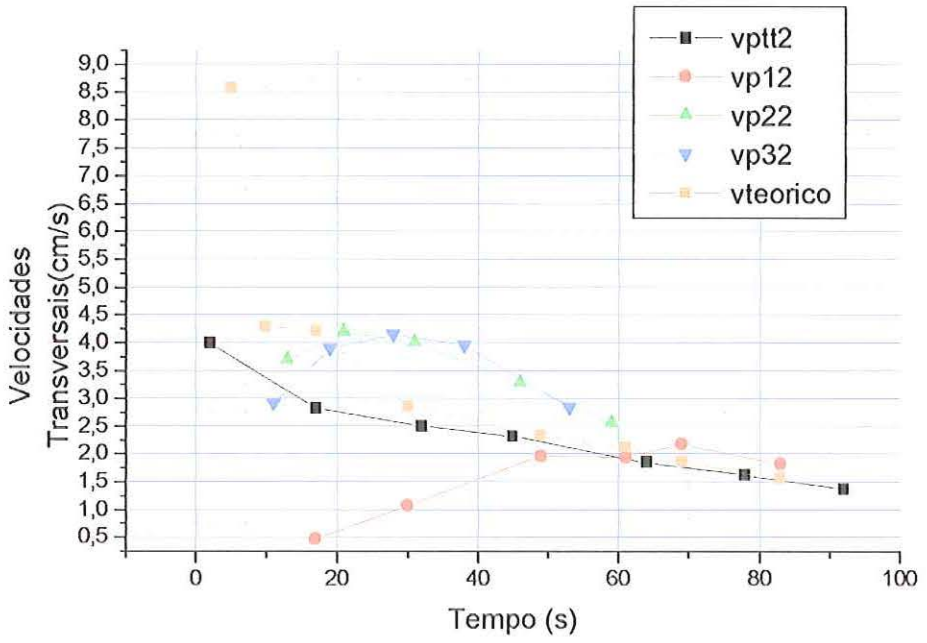


Figura 164– Velocidades transversais médias para os ensaios de plumas indicados.

Os dados de velocidade longitudinal média não se mostraram tão agrupados como no caso anterior (fig 163). A curva para a situação ptt2 "corta" todas as demais. O comportamento geral ainda é reproduzido pela previsão, embora com valores mais distantes dos observados nos primeiros 30 segundos. A curva para a situação p12 não mostrou o decaimento das outras curvas. As situações p22 e p32 mostram excelente superposição.

A figura 164 mostra que as plumas salinas mantém a característica de apresentarem uma região de máximo para a velocidade média transversal. Novamente as situações p22 e p32 estão superpostas. Nesta situação, a previsão teórica e a pluma térmica não apresentam máximos e evoluem de forma semelhante.

6.1.3 Situação p13, p23, p33 e ptt3.

Trata-se de um conjunto de dados no qual a previsão teórica manteve-se em posições "mais intermediárias" da nuvem de resultados experimentais.

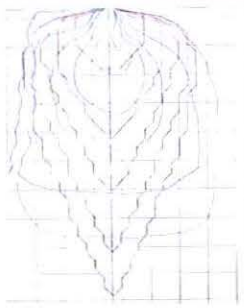
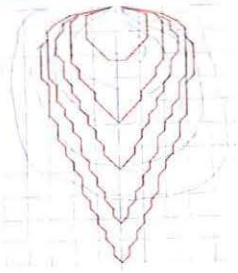
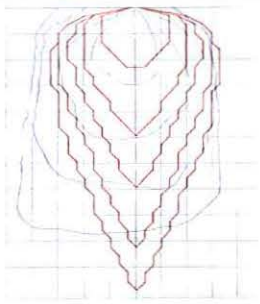
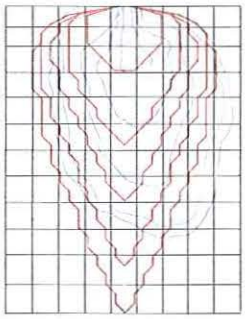
			

Figura 165 –Comparação do espalhamento medido/cal calculado para a situação p13.	Figura 166 –Comparação do espalhamento medido/cal calculado para a situação p23.	Figura 167 –Comparação do espalhamento medido/cal calculado para a situação p33.	Figura 168 –Comparação do espalhamento medido/cal calculado para a situação ptt3.

As figuras 165, 166, 167 e 168 mostram a comparação das evoluções experimentais e calculadas das plumas p13, p23, p33 e ptt3.

Mais uma vez vale o comentário de que as diferenças evidenciam que se buscou a simulação das características globais. As características mencionadas ficam melhor retratadas na análise conjunta feita com base nas figuras 169 a 172.

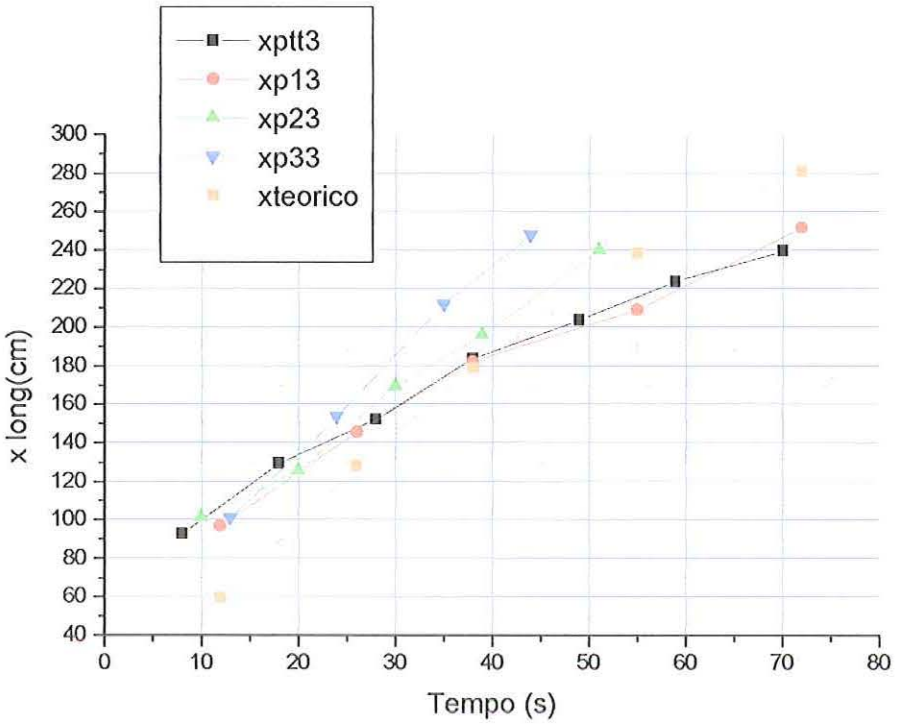


Figura 169– Espalhamento longitudinal para os ensaios de pluma com Q=300ml/s

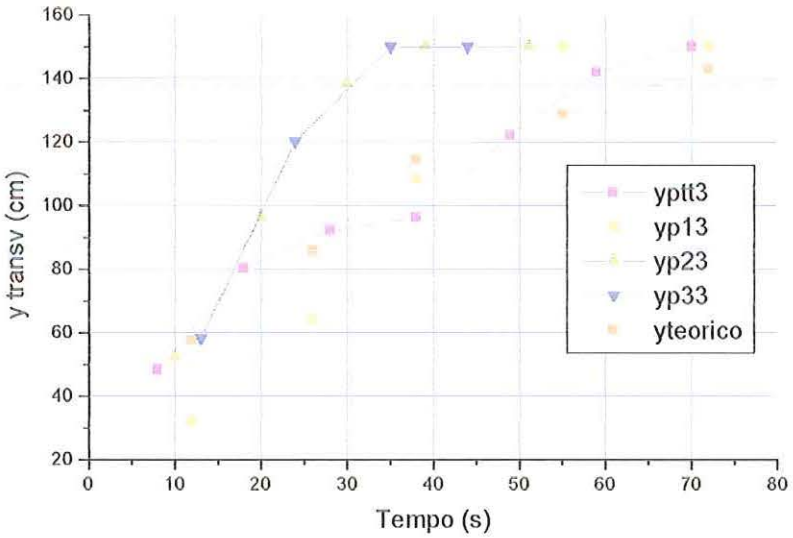


Figura 170– Espalhamento transversal para os ensaios de plumas com q=300ml/s

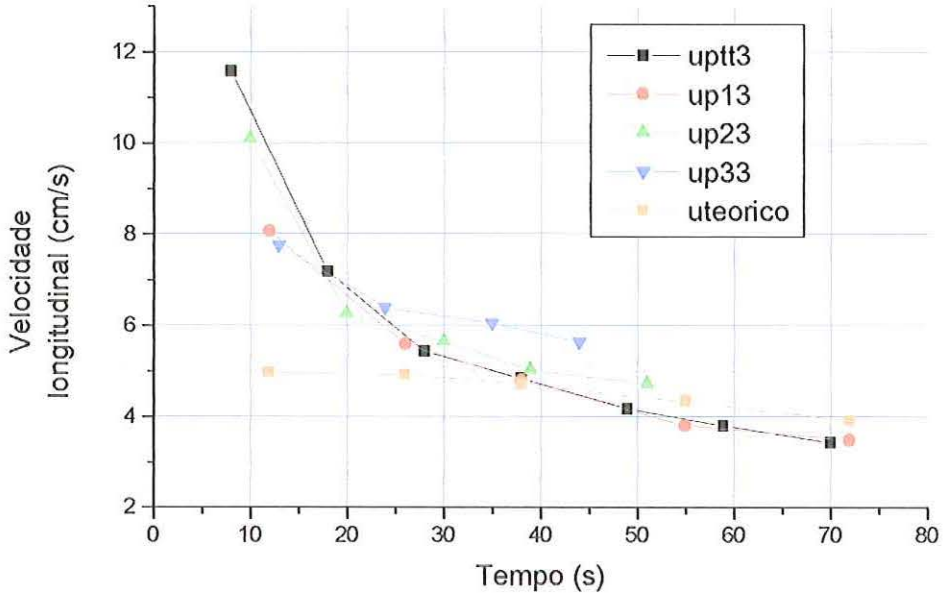


Figura 171 – Velocidade longitudinal para os ensaios de plumas com q=300ml/s

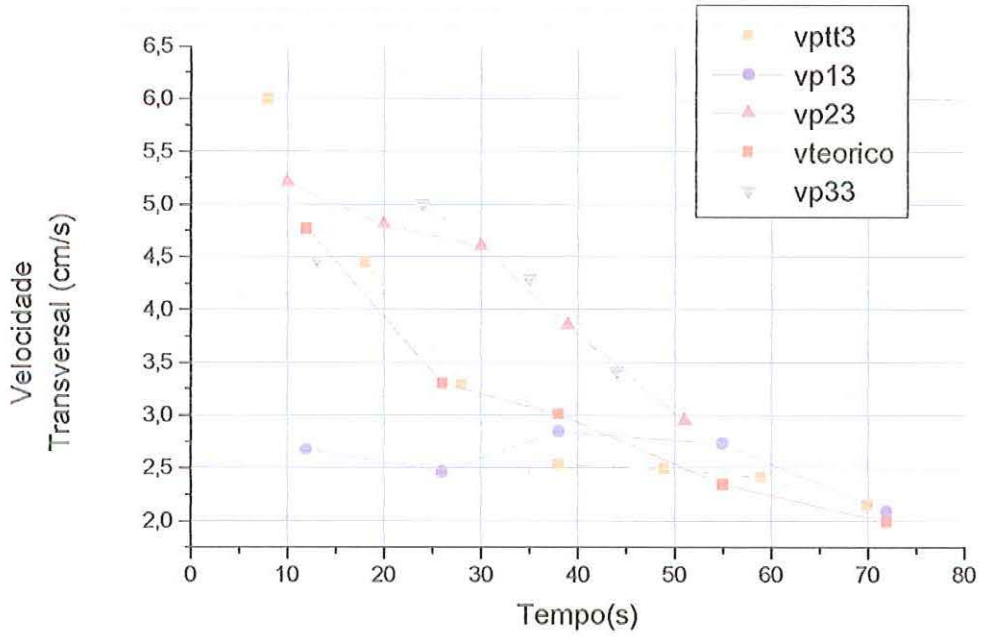


Figura 172 – Velocidade Transversal para os ensaios de plumas com q=300ml/s

A análise conjunta das figuras 169 a 172 permite atestar a afirmação de que as curvas teóricas acompanham de forma geral as nuvens de dados.

Interessantemente a velocidade longitudinal média calculada não mostra o decréscimo característico dos outros casos (figura 171), enquanto que há melhor superposição com o comportamento das curvas para velocidade transversal média (figura 172)

6.1.4 Comportamentos gerais.

Observou-se que os comportamentos das diferentes plumas não se segregam preferencialmente. Em outras palavras, as posições relativas das curvas alternam-se nos experimentos realizados. Entende-se que mais experimentos devem ser realizados para cada situação, buscando-se avaliar o comportamento médio em cada caso, o que deverá permitir alcançar descrições de comportamentos relativos mais precisas.

Verificou-se, por outro lado que modelos bidimensionais simples permitem acompanhar o desenvolvimento observado experimentalmente.

O modelo utilizado permitiu o ajuste de dois parâmetros. O uso de situações isotrópicas permite ajustar Dt para as direções longitudinal e transversal independentemente.

Contudo, vale frisar que os registros dos campos de velocidade com PIV mostram que o escoamento gerado através das plumas é tri-dimensional em toda a sua extensão, com correntes secundárias induzidas nas seções transversais e com perfis de velocidades longitudinais distintos para as plumas e o meio sob as mesmas (ver figuras 72 a 108 do capítulo 5).

Adicionalmente, as singularidades observadas nas regiões de entrada do tanque mostram que qualquer equacionamento que pretenda explicar ou reproduzir esta região dever ser tridimensional (figuras 142, 143 e 145 do capítulo 5).

Não obstante as restrições levantadas, e mantendo a linha de trabalho vinculado à busca de ferramentas úteis que reproduzem a realidade macroscópica observada com um mínimo de parâmetros de ajuste, pode se dizer que modelos

bidimensionais como aquele aqui utilizado representam uma opção viável. Neste sentido, o presente trabalho cumpriu com seus objetivos iniciais.

6.2 - Intrusões

O estudo de intrusões, como já comentado, mostrou que os padrões geométricos repetitivos puderam ser observados com maior propriedade na fase de escoamento de fundo (correntes de fundo ou correntes densas). Após o descolamento da corrente de fundo, pequenas perturbações nas condições do escoamento no tanque estabeleciam padrões geométricos próprios para as intrusões, que podiam diferir significativamente de experimento para experimento.

Como conseqüência, buscou-se verificar como são descritos, na literatura, os padrões de correntes de fundo e a descrição do seu comportamento (geométrico) em regiões de descolamento para intrusões. O objetivo principal foi localizar previsões para regiões com escoamentos de fundo em regiões com densidade do meio estratificada. Em outras palavras, buscou-se verificar se o equacionamento do colapso da corrente de fundo em regiões de penetração em meios densos está disponível.

O texto de Barbosa (1999) mostrou-se bastante completo ao compilar as soluções teóricas para escoamentos em correntes de fundo. Nas palavras do autor: "seguindo a proposição de Tsihrintzis e Alavian (1996), na qual todos os escoamentos com correntes de densidade (correntes densas, correntes de fundo, na nossa terminologia) podem ser fracionados em regiões onde se tem sempre uma força motriz e outra resistente (são trabalhadas somente as de maior magnitude), é montada a tabela 4 em que há o estabelecimento do tipo de regime de entrada do reservatório, o tipo de declive-com classificações similares às dos escoamentos em canais com superfície livre-, o tipo de regime de escoamento possível para cada configuração,... e os valores...(da) largura da corrente".

A tabela 4 é aqui apresentada com as equações para a largura da corrente de fundo, extraída da tabela 3.1 mais completa de Barbosa (1999), que apresenta equações para comprimento da corrente e componentes de velocidade. Observa-se que são considerados declives neutros, suaves e fortes, escoamentos subcríticos e supercríticos e diferentes regimes de ação de forças preponderantes (pressão-inércia, pressão-atrito, inércia-atrito, gravidade-atrito e gravidade-inércia.

Considerando apenas a variável tempo, percebe-se que a largura da corrente de fundo cresce com o tempo ou permanece estável. Evidentemente apenas o efeito sobreposto de todas as variáveis permite quantificar detalhadamente a evolução da largura das correntes, mas, no presente estudo, apenas o aspecto qualitativo está sendo perseguido. As previsões, contudo, parecem se ater a correntes mais densas que o meio.

Os símbolos utilizados por Barbosa para a tabela 4 são:

L – comprimento da corrente de densidade.	b – largura da corrente de densidade
cl – coeficiente empírico para o comprimento da corrente de densidade	cb – coeficiente empírico para a largura da corrente de densidade
B – fluxo de diferença de densidade	t – tempo
θ - inclinação do declive	C – coeficiente de atrito
h – espessura da corrente de densidade	Ri – número de Richardson

Os símbolos subscritos se referem a :

o – fonte ou entrada.

pi – pressão-inércia

pv - pressão-atrito

iv - inércia-atrito

Declive	Escoamento na Entrada	Regime	L	b
Horizontal	Subcrítico	pressão-inércia	$cl_{pi}\left(B_o t^5 \cos\theta\right)^{1/4}$	$cb_{pi}\left(B_o t^3 \cos\theta\right)^{1/4}$
		pressão-atrito	$cl_{pv}\left(\frac{C_g B_o^3 t^6 \cos\theta^3}{C_g^4 h}\right)^{1/11}$	$cb_{pv}\left(\frac{C_g B_o^2 h^3 t^6 \cos^2\theta}{C_g^3}\right)^{1/11}$
	Supercrítico	inércia-atrito	$cl_{iv}\left(\frac{C_g B_o t^5 \cos\theta}{C_g h Ri}\right)^{1/5}$	$cb_{iv}\frac{h}{C_g}$
		pressão-atrito	$cl_{pv}\left(\frac{C_g B_o^3 t^6 \cos\theta^3}{C_g^4 h}\right)^{1/11}$	$cb_{pv}\left(\frac{C_g B_o^2 h^3 t^6 \cos^2\theta}{C_g^3}\right)^{1/11}$
Suave	Subcrítico	pressão-inércia	$cl_{pi}\left(B_o t^5 \cos\theta\right)^{1/4}$	$cb_{pi}\left(B_o t^3 \cos\theta\right)^{1/4}$
		pressão-atrito	$cl_{pv}\left(\frac{C_g B_o^3 t^6 \cos\theta^3}{C_g^4 h}\right)^{1/11}$	$cb_{pv}\left(\frac{C_g B_o^2 h^3 t^6 \cos^2\theta}{C_g^3}\right)^{1/11}$
		gravidade-atrito	$cl_{gv}\left(\frac{C_g B_o^3 t^6 \operatorname{sen}^4\theta}{C_g^4 h^5 \cos\theta}\right)^{1/7}$	$cb_{gv}\left(\frac{C_g B_o h^5 t^5 \cos^2\theta}{C_g^2 \operatorname{sen}\theta}\right)^{1/7}$
	Supercrítico	inércia-atrito	$cl_{iv}\left(\frac{C_g B_o t^5 \cos\theta}{C_g h Ri}\right)^{1/5}$	$cb_{iv}\frac{h}{C_g}$
		pressão-atrito	$cl_{pv}\left(\frac{C_g B_o^3 t^6 \cos\theta^3}{C_g^4 h}\right)^{1/11}$	$cb_{pv}\left(\frac{C_g B_o^2 h^3 t^6 \cos^2\theta}{C_g^3}\right)^{1/11}$
		gravidade-atrito	$cl_{gv}\left(\frac{C_g B_o^3 t^6 \operatorname{sen}^4\theta}{C_g^4 h^5 \cos\theta}\right)^{1/7}$	$cb_{gv}\left(\frac{C_g B_o h^5 t^5 \cos^2\theta}{C_g^2 \operatorname{sen}\theta}\right)^{1/7}$
Forte	Subcrítico	pressão-inércia	$cl_{pi}\left(B_o t^5 \cos\theta\right)^{1/4}$	$cb_{pi}\left(B_o t^3 \cos\theta\right)^{1/4}$
		gravidade-inércia	$cl_{gi}\left(\frac{B_o^2 t^6 \operatorname{sen}^3\theta}{h^3 \cos\theta}\right)^{1/8}$	$cb_{gi}\left(\frac{B_o h t^3 \cos^2\theta}{\operatorname{sen}\theta}\right)^{1/8}$
		gravidade-atrito	$cl_{gv}\left(\frac{C_g B_o^3 t^6 \operatorname{sen}^4\theta}{C_g^4 h^5 \cos\theta}\right)^{1/7}$	$cb_{gv}\left(\frac{C_g B_o h^5 t^5 \cos^2\theta}{C_g^2 \operatorname{sen}\theta}\right)^{1/7}$
	Supercrítico	inércia-atrito	$cl_{iv}\left(\frac{C_g B_o t^5 \cos\theta}{C_g h Ri}\right)^{1/5}$	$cb_{iv}\frac{h}{C_g}$
		gravidade-atrito	$cl_{gv}\left(\frac{C_g B_o^3 t^6 \operatorname{sen}^4\theta}{C_g^4 h^5 \cos\theta}\right)^{1/7}$	$cb_{gv}\left(\frac{C_g B_o h^5 t^5 \cos^2\theta}{C_g^2 \operatorname{sen}\theta}\right)^{1/7}$

Tabela 4 – Tipos de regime equações para o desenvolvimento da corrente de fundo retirado da tese de Barbosa (1999).

Declive	Escoamento na Entrada	Regime	u	v
Horizontal	Subcrítico	pressão-inércia	$cl_{pi}\left(B_o t^{-1}\cos\theta\right)^{1/4}$	$cb_{pi}\left(B_o t^{-1}\cos\theta\right)^{1/4}$
		pressão-atrito	$cl_{pa}\left(\frac{C_g B_o^3 t^{-2}\cos\theta^3}{C_g^4 h}\right)^{1/11}$	$cb_{pa}\left(\frac{C_g B_o^2 h^3 t^{-5}\cos^2\theta}{C_g^3}\right)^{1/11}$
	Supercrítico	inércia-atrito	$cl_{ia}\left(\frac{C_g B_o\cos\theta}{C_g hRi}\right)^{1/3}$	$cb_{ia}\frac{ht^{-1}}{C_g}$
		pressão-atrito	$cl_{pa}\left(\frac{C_g B_o^3 t^{-2}\cos\theta^3}{C_g^4 h}\right)^{1/11}$	$cb_{pa}\left(\frac{C_g B_o^2 h^3 t^{-5}\cos^2\theta}{C_g^3}\right)^{1/11}$
Suave	Subcrítico	pressão-inércia	$cl_{pi}\left(B_o t^{-1}\cos\theta\right)^{1/4}$	$cb_{pi}\left(B_o t^{-1}\cos\theta\right)^{1/4}$
		pressão-atrito	$cl_{pa}\left(\frac{C_g B_o^3 t^{-2}\cos\theta^3}{C_g^4 h}\right)^{1/11}$	$cb_{pa}\left(\frac{C_g B_o^2 h^3 t^{-5}\cos^2\theta}{C_g^3}\right)^{1/11}$
		gravidade-atrito	$cl_{ga}\left(\frac{C_g B_o^3 t^2\,\mathrm{sen}^4\theta}{C_g^4 h^5\cos\theta}\right)^{1/7}$	$cb_{ga}\left(\frac{C_g B_o h^4 t^4\cos^2\theta}{C_g^2\,\mathrm{sen}\,\theta}\right)^{1/7}$
	Supercrítico	inércia-atrito	$cl_{ia}\left(\frac{C_g B_o\cos\theta}{C_g hRi}\right)^{1/3}$	$cb_{ia}\frac{ht^{-1}}{C_g}$
		pressão-atrito	$cl_{pa}\left(\frac{C_g B_o^3 t^{-2}\cos\theta^3}{C_g^4 h}\right)^{1/11}$	$cb_{pa}\left(\frac{C_g B_o^2 h^3 t^{-5}\cos^2\theta}{C_g^3}\right)^{1/11}$
		gravidade-atrito	$cl_{ga}\left(\frac{C_g B_o^3 t^2\,\mathrm{sen}^4\theta}{C_g^4 h^5\cos\theta}\right)^{1/7}$	$cb_{ga}\left(\frac{C_g B_o h^4 t^4\cos^2\theta}{C_g^2\,\mathrm{sen}\,\theta}\right)^{1/7}$
Forte	Subcrítico	pressão-inércia	$cl_{pi}\left(B_o t^{-1}\cos\theta\right)^{1/4}$	$cb_{pi}\left(B_o t^{-1}\cos\theta\right)^{1/4}$
		gravidade-inércia	$cl_{gi}\left(\frac{B_o^2 t\,\mathrm{sen}^4\theta}{h^4\cos\theta}\right)^{1/5}$	$cb_{gi}\left(\frac{B_o ht^{-2}\cos^2\theta}{\mathrm{sen}\,\theta}\right)^{1/5}$
		gravidade-atrito	$cl_{ga}\left(\frac{C_g B_o^3 t^2\,\mathrm{sen}^4\theta}{C_g^4 h^5\cos\theta}\right)^{1/7}$	$cb_{ga}\left(\frac{C_g B_o h^4 t^4\cos^2\theta}{C_g^2\,\mathrm{sen}\,\theta}\right)^{1/7}$
	Supercrítico	inércia-atrito	$cl_{ia}\left(\frac{C_g B_o\cos\theta}{C_g hRi}\right)^{1/3}$	$cb_{ia}\frac{ht^{-1}}{C_g}$
		gravidade-atrito	$cl_{ga}\left(\frac{C_g B_o^3 t^2\,\mathrm{sen}^4\theta}{C_g^4 h^5\cos\theta}\right)^{1/7}$	$cb_{ga}\left(\frac{C_g B_o h^4 t^4\cos^2\theta}{C_g^2\,\mathrm{sen}\,\theta}\right)^{1/7}$

Tabela 4 – Continuação da tabela de tipos de regime e equações para o desenvolvimento da corrente de fundo de Barbosa (1999).

Na presente abordagem buscou-se, inicialmente, considerar o fato observado de que a largura da corrente de fundo diminui após ter atingido um valor máximo (antes de formar a intrusão). Neste caso, a figura 173 permite limitar o nosso campo de estudo. O presente trabalho baseou-se nas considerações de Schulz (2002), que elaborou alguns procedimentos simplificados para esta situação.

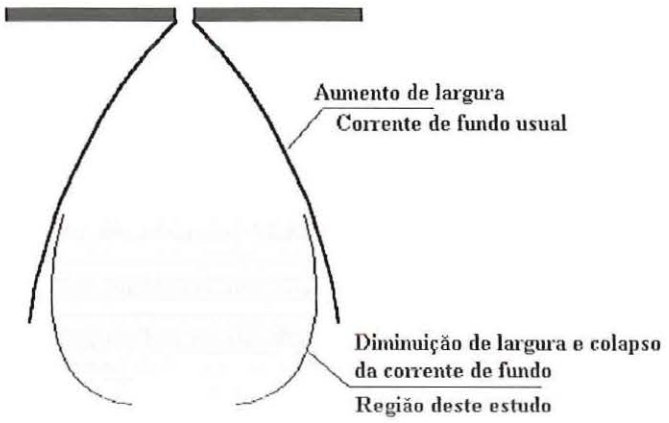


Figura 173: Definição da região na qual se aplica o presente estudo

O estudo de Schulz (2002) compreendeu inicialmente duas regiões de trabalho, com diferentes esforços relevantes:

- A primeira região compreende velocidades maiores, sendo justificado o uso conjunto de esforços de cisalhamento de fundo (tensões de cisalhamento) e de pressões no equacionamento da quantidade de movimento.

- A segunda região compreende baixas velocidades (podendo estas serem anuladas, uma vez que há o colapso da corrente de fundo), sendo justificado o uso apenas de esforços de pressão no equacionamento da quantidade de movimento.

Na apresentação aqui feita, utilizou-se apenas a primeira região, uma vez que as hipóteses simplificadoras são bastante restritivas e se busca apenas uma

primeira visão qualitativa que permita inferir se os mecanismos básicos estão compreendidos.

6.2.1 - A situação de escoamento na região com cisalhamento relevante

As considerações tecidas e aqui complementadas, utilizam hipóteses de trabalho bastante simplificadas, que visam inicialmente verificar se o fato observado admite reprodução considerando mecanismos básicos. Uma simplificação é considerar que na área de estudo não há mistura entre os fluidos com diferentes densidades, isto é, não há penetração de água do meio na corrente de fundo. Outra simplificação é considerar uma aproximação que é semelhante a admitir a tensão de cisalhamento proporcional ao quadrado da velocidade, isto é,

$$\tau = C U^2 \tag{6.5}$$

onde τ é a tensão de cisalhamento, U é a velocidade média do escoamento e C é uma constante. Usualmente, em escoamentos turbulentos sobre placas planas, a "constante" C é apresentada envolvendo a potência -1/4 da velocidade, o que faz com que a tensão seja proporcional à velocidade elevada ao expoente 1,75. Considerou-se este expoente suficientemente próximo a 2,0, o que simplifica os cálculos posteriores.

O esquema da figura 174 permite seguir os passos da formulação proposta.

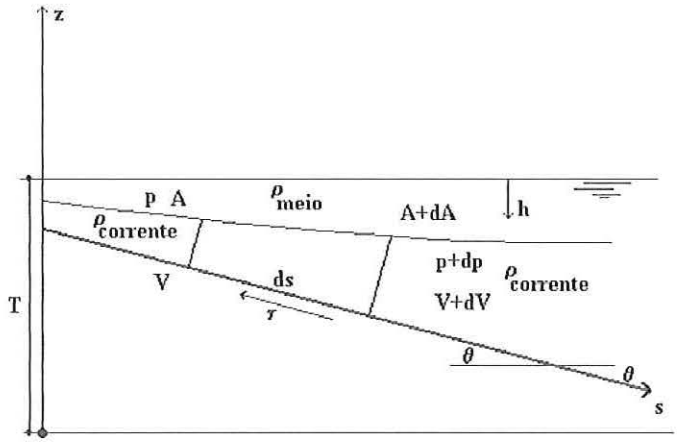


Figura 174: Volume considerado para a formulação proposta

A equação integral da Quantidade de Movimento é escrita na seguinte forma:

$$F_S = \frac{\partial}{\partial t}\int_{VC} V_S \rho \, dVol + \int_{SC} V_S \rho \left(\vec{V}.d\vec{A}\right) \qquad (6.6)$$

F_S é o somatório das forças que atuam na direção S e V_S é a velocidade na direção S. Na presente aproximação considera-se regime permanente. Isto resume a equação 6.6 para:

$$F_S = \int_{SC} V_S \rho \left(\vec{V}.d\vec{A}\right) \qquad (6.7)$$

Cada membro da equação deve ser tratado separadamente. As forças atuantes no volume de controle, expressas no primeiro membro, são forças de pressão e de tensão de cisalhamento. Tem-se, então:

$$F_S = pA - (p+dp)(A+dA) + (p+\frac{dp}{2})dA - F_\tau + \Delta\rho \, g \operatorname{sen}\theta \, ds(A+\frac{dA}{2}) \qquad (6.8)$$

Eliminando as parcelas que se anulam e desprezando as parcelas que possuem o produto de dois elementos infinitesimais, resulta:

$$F_S = -Adp - F_\tau + A\Delta\rho g \operatorname{sen}\theta\, ds \tag{6.9}$$

Para o segundo membro, tem-se:

$$\int_{SC} V_S \rho\left(\vec{V}.d\vec{A}\right) = -\rho_{corrente} V^2 A + \rho_{corrente}(V + dV)^2 (A + dA) \tag{6.10}$$

Resulta:

$$\int_{SC} V_S \rho\left(\vec{V}.d\vec{A}\right) = \rho_{corrente} VAdV \tag{6.11}$$

A rigor, a equação 6.11 integra um perfil de velocidade elevado ao quadrado, e não uma velocidade constante. Assim, há um coeficiente de correção a ser inserido no resultado, para levar em conta o fato de a velocidade não ser constante. Tem-se:

$$\int_{SC} V_S \rho\left(\vec{V}.d\vec{A}\right) = C_2 \rho_{corrente} VAdV \tag{6.12}$$

O índice 2 apenas visa lembrar que se trata de um coeficiente decorrente de uma operação de elevação ao quadrado.

Na passagem da equação 6.10 para a equação 6.11 foi utilizada a equação da continuidade para regime permanente, que produz:

$$\int_{SC} \rho\left(\vec{V}.d\vec{A}\right) = -\rho_{corrente} VA + \rho_{corrente}(V + dV)(A + dA) = 0 \tag{6.13}$$

ou, de outra forma:

$$\rho_{corrente} VA = \rho_{corrente} (V + dV)(A + dA) \tag{6.14}$$

Unindo as equações 6.9 e 6.12, resulta:

$$-Adp - F_\tau + A\Delta\rho\, g \operatorname{sen}\theta\, ds = C_2 \rho_{corrente} VAdV \tag{6.15}$$

Para avaliar a força F_τ, utilizou-se, em adição às equações da Quantidade de Movimento e da Continuidade, a equação da Energia, escrita na forma:

$$\dot{Q} + \dot{W} = \frac{\partial}{\partial t}\int_{VC} e\rho\, dVol + \int_{SC}\left(\frac{V^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} + u\right)\rho\left(\vec{V}.d\vec{A}\right) \tag{6.16}$$

Sendo o regime permanente, a equação se resume a:

$$\dot{Q} + \dot{W} = \int_{SC}\left(\frac{V^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} + u\right)\rho\left(\vec{V}.d\vec{A}\right) \tag{6.17}$$

Q representa o calor fornecido ao volume de controle e W a taxa de trabalho realizada pelo mesmo, a partir de forças de cisalhamento F_τ. z é a cota a partir de um nível de referência e u é a energia interna de origem térmica. Desenvolvendo esta expressão, tem-se:

$$\dot{W} = -\rho_{corrente}\frac{V^2}{2}VA + \rho_{corrente}\frac{(V + dV)^2}{2}(V + dV)(A + dA) -$$

$$-\int_A \left(gz+\frac{p}{\rho}\right)\rho V dA + \int_{A+dA}\left(gz+\frac{p}{\rho}\right)\rho V dA - u\rho_{corrente}VA +$$

$$+(u+du)\rho_{corrente}(V+dV)(A+dA)-\dot{Q} \qquad (6.18)$$

Utilizando a equação da continuidade, simplificando as parcelas que se anulam e desprezando as parcelas que envolvem o produto de dois elementos infinitesimais, tem-se:

$$\dot{W} = \rho_{corrente}VAVdV + \rho_{corrente}VAdu - \dot{Q} \qquad (6.19)$$

A rigor, a equação 6.19 integra um perfil de velocidade elevado ao cubo, e não uma velocidade constante. Assim, há também aqui um coeficiente de correção a ser inserido no resultado, para levar em conta o fato de a velocidade não ser constante. Tem-se:

$$\dot{W} = C_3\rho_{corrente}VAVdV + (\rho_{corrente}VAdu - \dot{Q}) \qquad (6.20)$$

O índice 3 apenas visa lembrar que se trata de um coeficiente decorrente de uma operação de elevação ao cubo.

A parcela entre parêntesis da equação 6.20 representa uma perda de energia ocorrida ao longo do escoamento. As perdas, em escoamentos livres e confinados, são usualmente quantificadas a partir da "perda de carga" desses escoamentos, obtida por meios semi-empíricos. A forma usual de apresentação desta parcela é $\rho gVAh_p$, onde h_p é a perda de carga. Utilizando, por analogia, esta forma de representação, tem-se:

$$\dot{W} = C_3\rho_{corrente}VAVdV + \rho_{corrente}gVAh_p \qquad (6.21)$$

A perda de carga é usualmente quantificada com auxílio do "fator de atrito" de um escoamento, o que é também aqui seguido por analogia, na forma:

$$h_p = f\frac{L}{D}\frac{V^2}{2g} \tag{6.22}$$

L é o comprimento da região em questão (ds) e D é o seu diâmetro hidráulico, enquanto f é o fator de atrito. No presente trabalho, admite-se, por simplicidade, que

$$h_p = C\frac{dsV^2}{g} \tag{6.23}$$

Isto é, o efeito do diâmetro hidráulico e do fator de atrito é considerado constante. C é uma constante que envolve as dimensões da aceleração da gravidade e do diâmetro hidráulico. O uso desta relação na equação 6.21 produz:

$$\dot{W} = C_3\rho_{corrente}VAVdV + C\rho_{corrente}VAV^2ds \tag{6.24}$$

As parcelas da equação 6.18 com a forma

$$-\int_A\left(gz+\frac{p}{\rho}\right)\rho VdA + \int_{A+dA}\left(gz+\frac{p}{\rho}\right)\rho VdA$$

anulam-se mutuamente, considerando efeitos de pressão vinculados somente ao meio (massa específica do meio), conforme pode ser visto na seqüência:

$$-\int_A \left(gz+\frac{p}{\rho}\right)\rho V dA + \int_{A+dA}\left(gz+\frac{p}{\rho}\right)\rho V dA =$$

$$-\int_A (gz+gh)\rho V dA + \int_{A+dA}(gz+gh)\rho V dA =$$

$$-\int_A gT\rho V dA + \int_{A+dA} gT\rho V dA = -\rho_{corrente} gTVA + \rho_{corrente} gT(V+dV)(A+dA)$$

T é a soma entre a cota e a distância à superfície em qualquer ponto das seções A e $A+dA$ (ver figura 174, sendo constante. Com a aplicação da equação da Continuidade, resulta:

$$-\rho_{corrente} gTVA + \rho_{corrente} gT(V+dV)(A+dA) = -\rho_{corrente} gTVA + \rho_{corrente} gTVA = 0$$

A equação 6.24 mostra a potência dissipada pelo efeito das forças de cisalhamento. Portanto, tem-se:

$$\dot{W} = F_\tau V = C_3 \rho_{corrente} VAVdV + C\rho_{corrente} VAV^2 ds$$

Ou seja, a força pode ser quantificada como:

$$F_\tau = C_3 \rho_{corrente} VAdV + C\rho_{corrente} V^2 Ads \qquad (6.25)$$

Unindo as equações 6.15 e 6.25, resulta:

$$-Adp - C_3 \rho_{corrente} VAdV - C\rho_{corrente} V^2 Ads + A\Delta\rho\, g \operatorname{sen}\theta\, ds = C_2 \rho_{corrente} VAdV \quad (6.26)$$

A equação 6.26 é a equação governante (simplificada) para o escoamento considerado. Para integrá-la algumas considerações subseqüentes são necessárias. A pressão é obtida a partir do meio externo, como

$$p = \rho_{meio}\, g h_0 + \rho_{meio} g s \operatorname{sen}\theta \tag{6.27}$$

h_0 é a profundidade de referência em s=0

As equações 6.27 e 6.26 produzem após rearranjos:

$$(\Delta\rho - \rho_{meio}) g \operatorname{sen}\theta ds - C\rho_{corrente} V^2 ds = (C_2 + C_3)\rho_{corrente} V dV \tag{6.28}$$

Ou:

$$\left[\frac{(\Delta\rho - \rho_{meio})}{\rho_{corrente}} g \operatorname{sen}\theta - CV^2\right] ds = (C_2 + C_3) V dV \tag{6.29}$$

Ou, ainda:

$$\left[\frac{(\Delta\rho - \rho_{meio})}{\rho_{corrente}} g \operatorname{sen}\theta - \Omega_1\left(\frac{V^2}{2}\right)\right] ds = \Omega_2 d\left(\frac{V^2}{2}\right) \tag{6.30}$$

Ω_1 e Ω_2 são constantes.

$$\left[\left(1 - 2\frac{\rho_{meio}}{\rho_{corrente}}\right) g \operatorname{sen}\theta - \Omega_1\left(\frac{V^2}{2}\right)\right] ds = \Omega_2 d\left(\frac{V^2}{2}\right) \tag{6.31}$$

Para a integração separam-se as variáveis:

$$-ds = \Omega_2 \frac{d\left(\frac{V^2}{2}\right)}{\left[\left(2\frac{\rho_{meio}}{\rho_{corrente}} - 1\right) g \operatorname{sen}\theta + \Omega_1\left(\frac{V^2}{2}\right)\right]} \tag{6.32}$$

A integração produz:

$$-s = \Omega_2 \ln\left[\left(2\frac{\rho_{meio}}{\rho_{corrente}} - 1\right) g \operatorname{sen}\theta + \Omega_1\left(\frac{V^2}{2}\right)\right] + \Omega_3 \tag{6.33}$$

Ω_3 é uma constante de integração.

$$\Omega_4 e^{-\frac{s}{\Omega_2}} + \frac{2}{\Omega_1}\left(1 - 2\frac{\rho_{meio}}{\rho_{corrente}}\right) g \operatorname{sen}\theta = V^2 \tag{6.34}$$

Ω_4 é uma constante sempre positiva. A equação 6.34 mostra que a velocidade decresce em aumentando s. Com os coeficientes obtidos, vê-se que a velocidade se anula em algum ponto do escoamento. Novamente frisa-se que a formulação aqui apresentada é simplificada, buscando-se apenas verificar se os comportamentos esperados podem ser reproduzidos com este tipo de abordagem.

Em termos de representação da área transversal da corrente de fundo, utilizando a definição da vazão, tem-se:

$$A^2 = \frac{Q^2}{\Omega_4 e^{-\frac{s}{\Omega_2}} + \frac{2}{\Omega_1}\left(1 - 2\frac{\rho_{meio}}{\rho_{corrente}}\right) g \operatorname{sen}\theta} \tag{6.35}$$

Vê-se que a área da seção transversal aumenta, tendendo ao infinito quando a velocidade se anula.

6.2.2 - Relação complementar para largura e altura da corrente

A equação 6.35 , além de apenas aproximativa, informa pouco sobre a evolução da largura da corrente de fundo. Para complementar a informação acerca da largura, buscou-se calcular o dispêndio de energia (potência dissipada) com o aumento da área transversal em ambas as direções, vertical e horizontal (transversal). Como as velocidades horizontais transversais são pequenas, desprezou-se o efeito de cisalhamento de fundo neste equacionamento.

O equacionamento é montado sobre o esquema da figura 175.

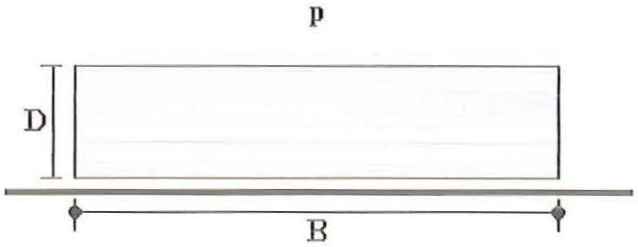


Figura 175 - Área da seção transversal em uma corrente de fundo

A potência dissipada pode ser calculada como segue:

Força atuante para cima:

$$dF_{cima} = p_{cima} dA = \rho_{meio} g B ds H \qquad (6.36)$$

B é a largura da seção transversal, ds é o comprimento que compõe o elemento de área e H é a profundidade da água até a parte superior da corrente de fundo.

Potência atuante para deslocamento para cima:

$$d\dot{W}_{cima} = dF_{cima}V_{cima} = p_{cima}dA\frac{dD}{dt} = \rho_{meio}gBdsH\frac{dD}{dt} \tag{6.37}$$

Força atuante para os lados:

$$dF_{lados} = 2p_{lados}dA = 2\rho_{meio}gds\int_{H}^{H+D} hdh = \rho_{meio}gds\left(2HD + D^2\right) \tag{6.38}$$

Potência atuante para deslocamento para os lados:

$$d\dot{W}_{lados} = dF_{lados}V_{lados} = \rho_{meio}gds\left(2HD + D^2\right)\frac{dB}{dt} \tag{6.39}$$

Potência total:

$$d\dot{W} = d\dot{W}_{cima} + d\dot{W}_{lados} \tag{6.40}$$

$$d\dot{W} = \rho_{meio}gBdsH\frac{dD}{dt} + \rho_{meio}gds\left(2HD + D^2\right)\frac{dB}{dt} \tag{6.41}$$

Ou, rearranjando:

$$d\dot{W} = \rho_{meio}gHds\left[B\frac{dD}{dt} + \left(2D + \frac{D^2}{H}\right)\frac{dB}{dt}\right] \tag{6.42}$$

Considerando uma situação na qual a potência dissipada atinge um máximo, ou mínimo, ou uma situação de constância ao longo do escoamento (uma otimização), tem-se:

$$\left[BdD + \left(2D + \frac{D^2}{H} \right) dB \right] = 0 \tag{6.43}$$

De outra forma:

$$2\frac{dB}{B} = -\frac{dD}{D + \frac{D^2}{2H}} \tag{6.44}$$

A integração desta equação produz:

$$B = K\sqrt{\frac{2H + D}{D}} \tag{6.45}$$

Esta relação mostra um decréscimo de B para um acréscimo de D.

Utilizando a equação 6.35 em conjunto com a equação 6.45 resulta:

$$2HD + D^2 = \frac{(Q/K)^2}{\Omega_4 e^{-\frac{s}{\Omega_2}} + \frac{2}{\Omega_1}\left(1 - 2\frac{\rho_{meio}}{\rho_{corrente}}\right) g \operatorname{sen}\theta} \tag{6.46}$$

Ou, isolando D:

$$D = -H + \sqrt{H^2 + \frac{(Q/K)^2}{\Omega_4 e^{-\frac{s}{\Omega_2}} + \frac{2}{\Omega_1}\left(1 - 2\frac{\rho_{meio}}{\rho_{corrente}}\right) g \operatorname{sen}\theta}} \tag{6.47}$$

Observa-se que o aumento da área reflete-se no aumento de D, tendendo este ao infinito. Pela relação 6.45 vê-se que B necessariamente decresce, o que representa a realidade observada.

6.2.3 - Discussão acerca das aproximações propostas

Inicialmente vale lembrar que a equação 6.47 resulta de hipóteses simplificadoras que, apesar de levarem à condição de aumento da área transversal, consideraram os termos de pressão vinculados apenas ao meio externo e não à massa específica da própria corrente que se desloca. Esta série de hipóteses conduz ao coeficiente 2 que multiplica a razão entre as massas específicas. Nesse caso, tanto a situação de meio menos denso que a corrente como de meio mais denso que a corrente conduz à anulação da velocidade em um ponto do eixo s. Contudo, esta anulação é esperada apenas na situação de meio mais denso do que a corrente, quando de fato há colapso da corrente de fundo.

Diferentes considerações vinculadas à massa específica (pressão) na equação da energia podem alterar este coeficiente e aproximá-lo de 1,0 (um). Neste caso, a equação 6.36 (com coeficiente modificado) seria mais adequada, uma vez que a corrente tenderia a uma área transversal constante ao longo de s (velocidade constante) para massas específicas do meio menores que a da corrente; e tenderia para o colapso (velocidade nula) para massas específicas do meio maiores que a da corrente. O fator 2 faz com que o colapso ocorra para ambas as situações. Prevê-se que tal restrição deverá ser eliminada em futuro próximo, a partir do refinamento desta solução.

Independente deste fato, verifica-se que o aumento da área "para infinito" ocorre no aumento da espessura da corrente, enquanto que a velocidade da corrente junto ao fundo do reservatório se anula. Isto é coerente com a realidade observada, que representa o descolamento da corrente de fundo para formar a intrusão. Esquematicamente, a observação permite traçar o diagrama simplificado da figura 176.

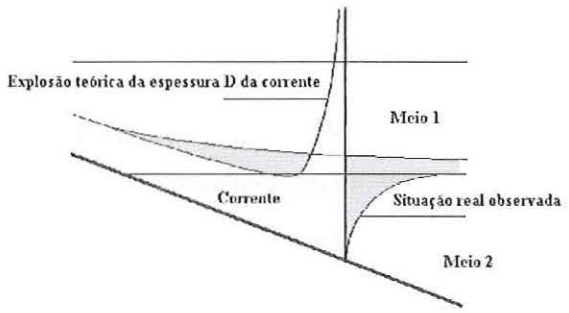


Figura 176: Tendência à explosão da espessura para corrente atingindo um meio mais denso que ela própria.

A explosão é contida porque o meio acima é menos denso que a corrente. Assim, ao invés de subir, a corrente se adequa à nova situação de escoamento.

Percebe-se que o equacionamento que conduz à explosão da espessura da corrente é adequado para representar o colapso da corrente de fundo e o seu descolamento. A velocidade da corrente densa realmente se anula no ponto de descolamento. A tendência à ascenção é correta e é observada, bem como a diminuição da largura da corrente. Assim, qualitativamente tem-se uma primeira proposta de equacionamento que reproduz alguns aspectos observados.

A figura 176 mostra que a massa da corrente que, teoricamente, ascende, de fato é desviada para a nova situação de escoamento, onde outras condições vigoram.

A presente aproximação é uma primeira tentativa de explicação, no contexto deste estudo, acerca dos comportamentos observados nos experimentos conduzidos para as intrusões, no que tange especificamente ao comportamento próximo ao ponto de descolamento. Espera-se que esta aproximação represente motivo de aprofundamentos futuros e refinamentos que, conforme mencionado, são necessários.

6.3 Correntes de fundo em torno de obstáculos.

Como já mencionado, esta parte do trabalho decorre da conveniência experimental e representa um ganho adicional inicialmente não projetado.

As imagens apresentadas no ítem 5.4 mostram evoluções que são conhecidas na área de mecânica dos fluidos. Contudo, é preciso enfatizar que os comportamentos de recirculação ocorrem em uma fina camada de fluido que escoa junto ao fundo do tanque. Os efeitos viscosos atuam na parte inferior desta camada (junto ao fundo) e na parte superior (induzindo movimento à massa de fluido superior, muito mais espessa).

Apesar deste somatório de esforços inibidores do movimento (decorrentes da viscosidade), formam-se as regiões de recirculação usuais em escoamentos a jusante de corpos. Vale frisar que as vazões foram aumentadas de forma exploratórias além dos valores indicados na tabela 3, porém sem registros de valores e de imagens.

Buscou-se, nesta exploração, verificar a existência de instabilidades do tipo von Karman, mas nada neste sentido foi observado. Assim, pode-se inferir que tais instabilidades são inibidas pelo conjunto de efeitos viscosos que atua na camada fina de escoamento de fundo, para as situações descritas no capítulo 5 e para vazões exploratórias maiores.

O registro dos vórtices tipo ferradura e das regiões de recirculação mostra que essas características são relevantes para os escoamentos de fundo a jusante de obstáculos, podendo interferir em fenômenos de transporte de sedimentos, gerando, por exemplo, zonas de deposição desses sedimentos.

A interessante interação entre os fluidos do meio e da corrente de fundo, associadas ao transporte de sedimentos junto a obstáculos, representa um campo de estudos que, na opinião da autora, merece estudos mais aprofundados.

6.4 Comentários finais.

Diferentes tipos de análises foram conduzidas para diferentes tipos de correntes de densidade. Entende-se que cada fenômeno em separado é envolvente e merecedor de aprofundamentos mais nobres do que aqueles aqui atingidos.

Frisa-se que, se as análises efetuadas tornaram-se menos detalhistas do que eventualmente desejado, isto se deve à permanente busca de uma visão mais abrangente, que é característica da autora.

Talvez se possa afirmar que a pesquisa permite o convívio de diferentes tipos de trabalhos, que variam entre extremos como aqueles que oferecem respostas a questões que necessitam de respostas. O presente estudo, a despeito dos esforços de orientador e orientada, parece que foi enriquecido por tendências que levam ao segundo tipo mencionado.

Não obstante, os esforços e recursos dispendidos foram aplicados com seriedade e paixão, e os resultados experimentais são fatos que enriquecem nosso conhecimento.

Capítulo 7 – Conclusões e recomendações.

O objetivo deste trabalho foi de efetuar um estudo experimental de escoamentos de correntes de densidade classificados na literatura como plumas, intrusões e correntes de fundo em torno de obstáculos.

Foi dada uma alta relevância a visualização dos escoamentos, realizando-se ensaios de laboratório utilizando-se material fotográfico e de vídeo e equipamento à Laser com o método não intrusivo PIV – velocimetria por processamento de imagem.

7.1 Escoamentos superficiais (plumas).

Foram feitos ensaios com escoamento superficial (plumas), gerados por soluções salinas e também por um sistema de aquecimento de água , onde foi possível a obtenção de dados de evolução da frente e da largura do espalhamento da mancha, quando injetada continuamente em ambiente fluido inclinado e estagnado. Foi feita uma simulação destes escoamentos (leves) considerando-se a hipótese de bidimensionalidade horizontal, muito embora os escoamentos simulados não possam descrever os detalhes (singularidades) decorrentes do fato de a realidade ser tri-dimensional. Foi utilizado o método numérico de diferenças finitas para a discretização das equações governantes do escoamento em estudo.

Observou-se do gráfico de velocidades médias longitudinais das plumas que para vazão de entrada de 50 ml/s, houve uma proximidade de valores de velocidades para plumas de diferentes salinidades, enquanto que as plumas térmicas se dispersaram com velocidades um pouco abaixo das demais. As plumas salinas de

densidade d1 apresentaram as maiores velocidades transversais chocando-se com as paredes laterais do tanque, aproximadamente 40s após seu lançamento.

As velocidades transversais para os escoamentos em meio ambiente de maior densidade, apresentaram-se em torno de 1,15 cm/s em média.

Para os ensaios com vazão de entrada de 150ml/s, observou-se que os valores teóricos (dados de simulação) de velocidade longitudinal se aproxima dos valores correspondentes a plumas térmicas tingidas e plumas salinas escoando em ambiente de menor densidade e que a curva teórica para velocidades transversais apresentou valores similares aos da pluma térmica tingida.

Notou-se nos experimentos com máxima vazão de entrada, um comportamento semelhante entre as curvas de pluma salina escoando em meio leve e as plumas térmicas tingidas.

Concluiu-se assim que os resultados das simulações mostraram-se promissores, muito embora admitindo-se hipóteses simplificadoras e se utilizando o mesmo coeficiente de ajuste (coeficiente de viscosidade turbulenta) nas duas direções do escoamento.

Os dados obtidos representam material adequado para futuras simulações.

7.2 Escoamentos intrusivos.

Observou-se dos experimentos de intrusões que houve configurações geométricas diferentes para ensaios realizados em mesmas condições de escoamento.

Buscou-se no capítulo 6, análise de resultados, estudar o comportamento de uma corrente de fundo em regiões de penetração em ambiente estratificado, onde se pode observar pelos ensaios experimentais uma diminuição na largura da corrente após ter atingido um valor máximo para logo em seguida escoar na interface.

Foi feito um desenvolvimento de equações obtendo-se uma previsão que mostra que ocorre um aumento da espessura da corrente (a corrente se adequa ao novo ambiente) com diminuição da largura. A velocidade junto ao fundo do tanque se anula, ou seja, ocorre o descolamento da corrente de fundo para a formação da intrusão.

Conclui-se que o equacionamento desenvolvido mostrou-se adequado para uma primeira representação do colapso da corrente de fundo e o seu descolamento quando atinge ambiente estratificado.

A aproximação apresentada é uma tentativa de explicação do comportamento observado para o ensaio de intrusões e que, conforme mencionado no capítulo 6, represente motivo de refinamentos futuros.

7.3 Corrente de fundo em torno de obstáculos.

Os estudos realizados com correntes de fundo em torno de obstáculos cilíndricos mostraram um padrão geométrico semelhante para todos os ensaios.

O comportamento do fluido a jusante dos obstáculos foi avaliado pelo movimento de uma solução salina densa marcada pelo corante azul de metileno depositada nesta região.

Em geral, houve primeiramente o escoamento desta mancha azul no sentido do escoamento da corrente de fundo. Em seguida, ocorreu ascensão desta em torno do perímetro do obstáculo devido ao surgimento de uma zona de recirculação estável. Finalmente, ocorreu a dispersão da mancha, o que se efetivava com o passar do tempo.

Verificou-se que os efeitos viscosos inibem o surgimento de esteiras de von Karman nas correntes de fundo. Contudo a existência de vórtices do tipo ferradura e regiões de recirculação mostram que fenômenos de transporte (como de sedimentos)

podem ter como conseqüência zonas de acumulação de material a jusante desses obstáculos.

7.4 Recomendações.

Para os estudos de plumas, a bancada existente mostrou-se amplamente adequada. Os resultados mostraram tendências que necessitam ser melhor detalhadas. Sugere-se que estudos repetitivos sejam realizados para obter o desenvolvimento médio das plumas para cada situação. Adicionalmente, modelos tridimensionais de escoamento podem reproduzir as singularidades e distribuições de velocidades observadas, o que deve melhorar a qualidade das previsões.

Para o estudo de intrusões, a bancada existente necessita ser readequada, com estruturas de extravazamento projetadas para evitar a dependência com fenômenos de tensão superficial e de acumulação de material na parede de jusante.

Os estudos de escoamentos de correntes de fundo em torno de obstáculos são aqui qualitativos. Sugere-se que trabalhos sistemáticos sejam realizados, vinculando os comportamentos observados a adimensionais relevantes para esses casos.

Anexo A

A seguir são mostradas as seqüências de fotografias feitas com máquina digital da marca Sony, para o registro da evolução de plumas geradas por diferentes salinidades e diferentes temperaturas marcadas com corante (permanganato de potássio).

Juntamente com as fotografias, foram feitas filmagens para o aumento da precisão das dispersões e obtenção dos tempos de cada foto.

O presente estudo visa a visualização de escoamentos como subsídio necessário para o melhor entendimento do fenômeno.

As figuras 1 a 2 mostram um conjunto de fotos em seqüência da evolução da pluma para o ensaio p11 e a figura 3 mostra a espessura da mesma quando em regime permanente.

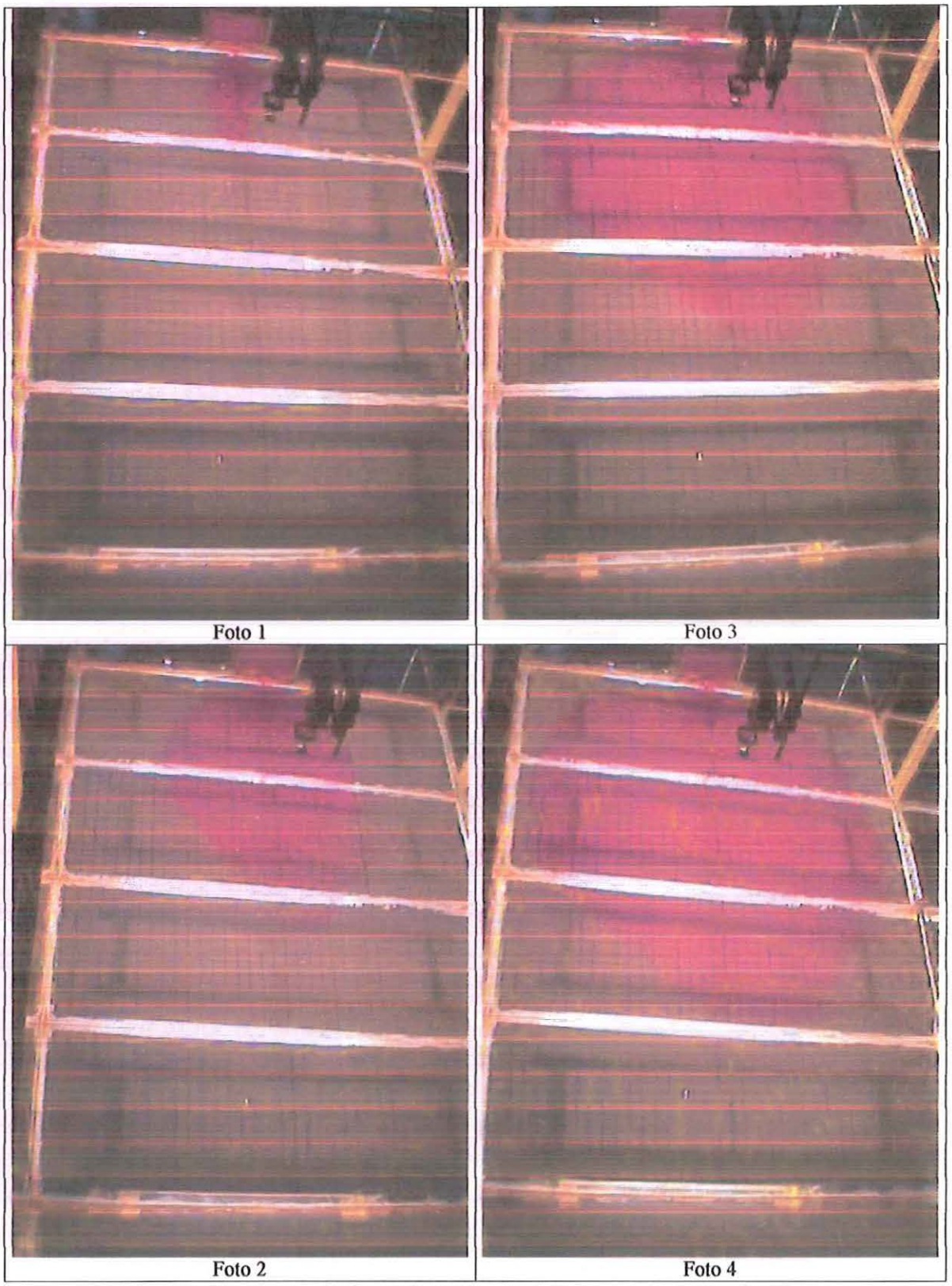


Figura 1 – Conjunto de fotos da evolução da pluma para o ensaio p11.

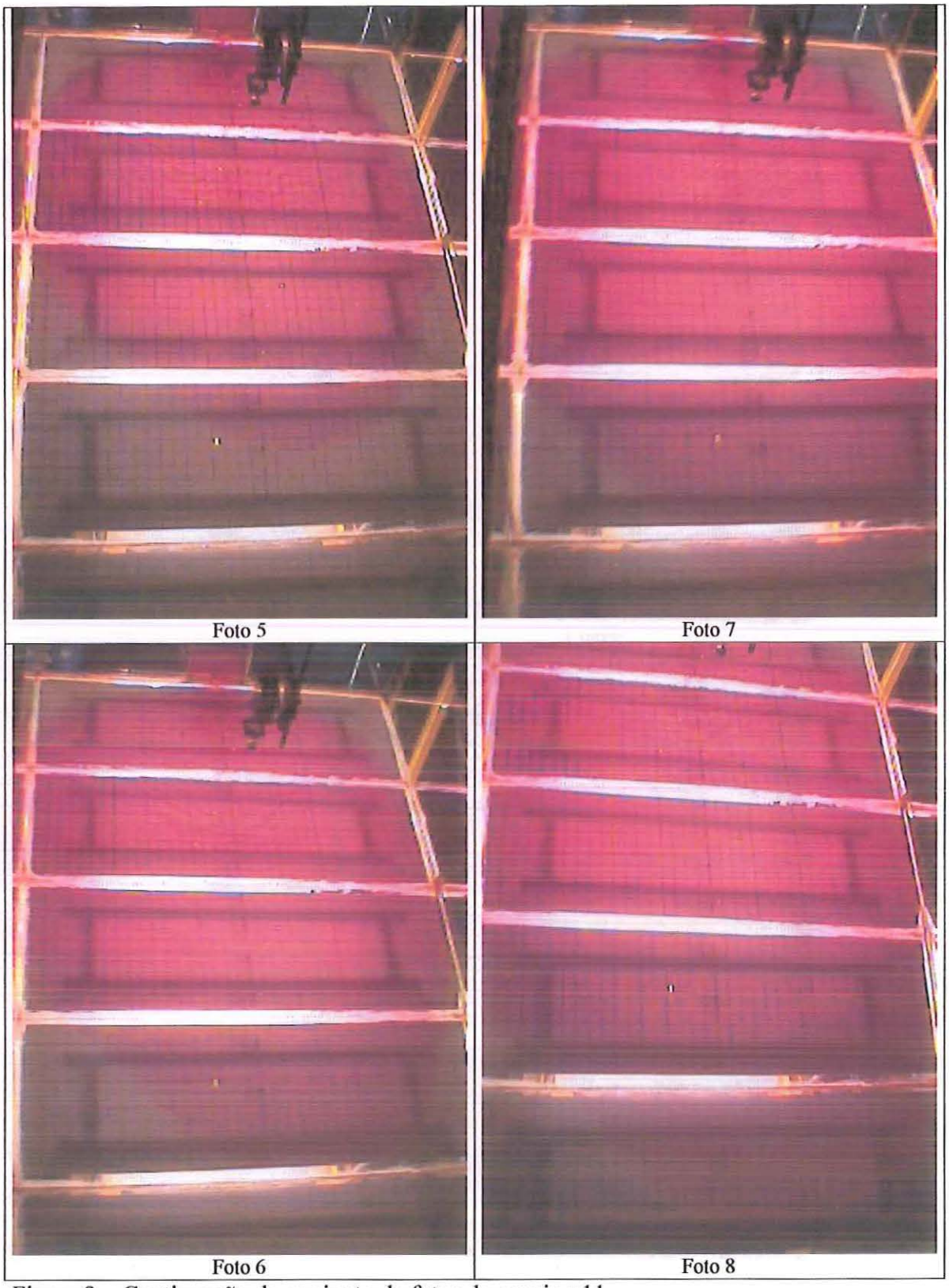


Figura 2 – Continuação do conjunto de fotos do ensaio p11.

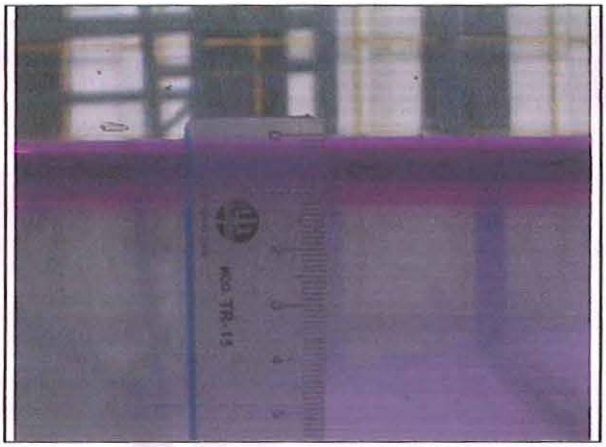


Figura 3– Espessura da pluma para o ensaio p11.

A figura 3 mostra a espessura da pluma (parte vermelha da fotografia) de aproximadamente 2cm. Nota-se que a espessura da corrente foi medida quando do escoamento da pluma em regime permanente.

As figuras 4 e 5 mostram a evolução da pluma para o ensaio p12 e a figura 6 mostra a espessura em um dos pontos de medida. A espessura da pluma para este ensaio (p12) é função do tempo e não um valor único. A espessura média da pluma para este experimento foi de 2,63 cm.

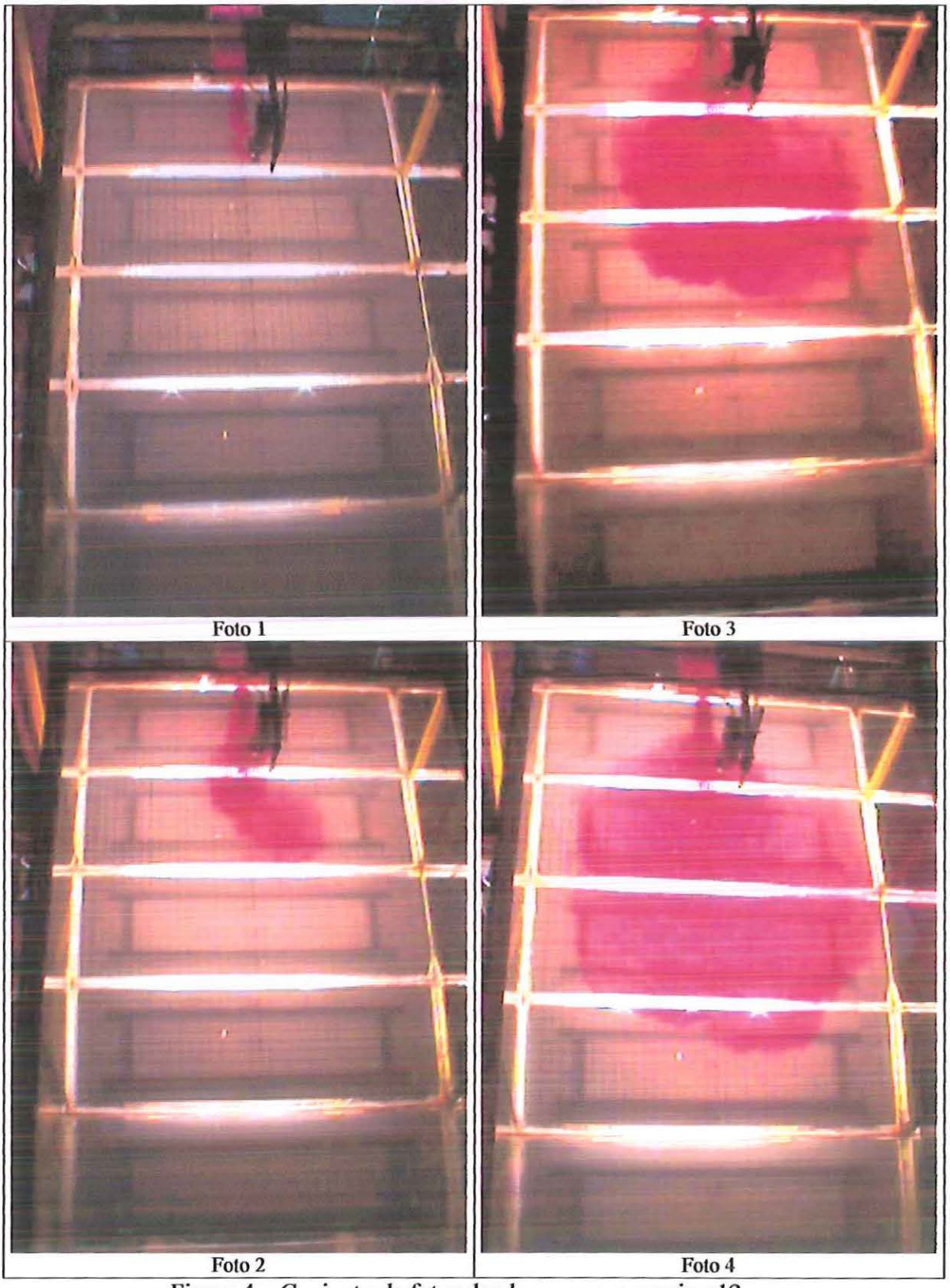


Figura 4 – Conjunto de fotos da pluma para o ensaio p12.

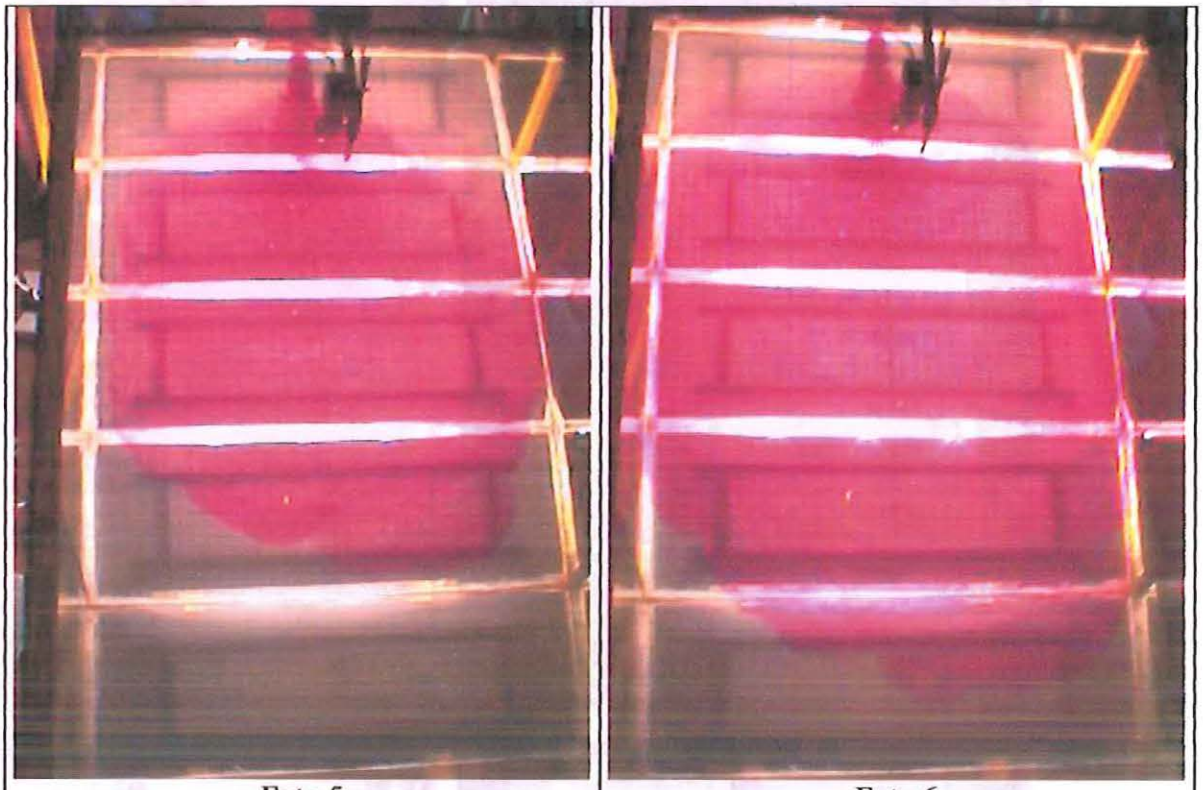


Foto 5 Foto 6

Figura 5 – Continuação da seqüência de fotos do ensaio p12.

Foto 7

Figura 6 – Espessura da pluma para o ensaio p12.

As figuras 7 e 8 mostram a evolução da pluma para o ensaio p13. A figura 9 mostra a espessura média da pluma.

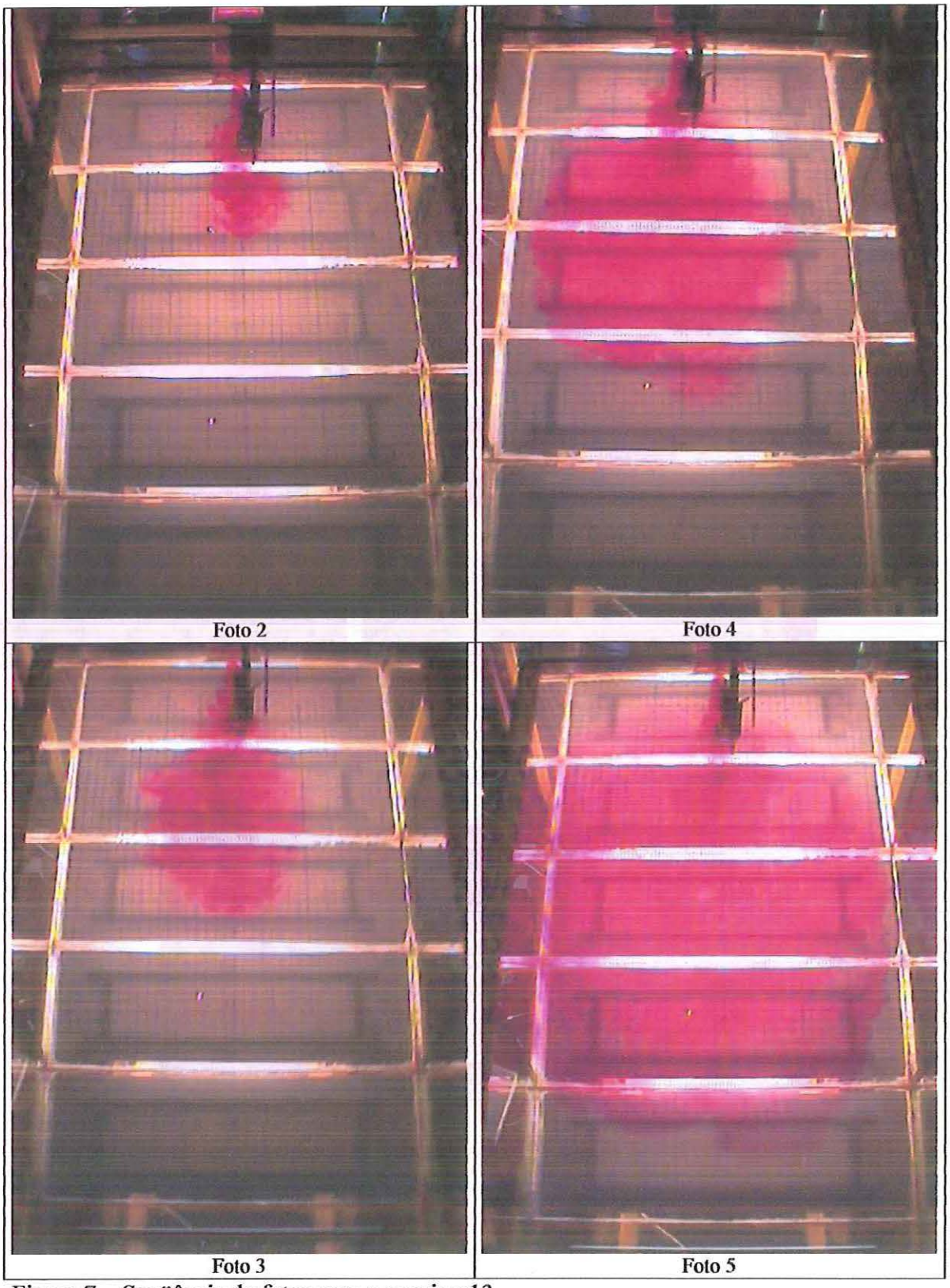


Figura 7 – Seqüência de fotos para o ensaio p13.

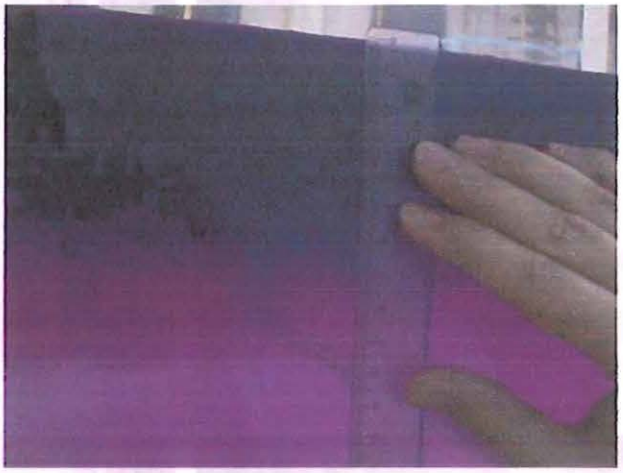


Figura 8 – Espessura média da pluma para o ensaio P13.

Como no ensaio p12, houve variação da espessura com o tempo e a figura 218 mostra um dos valores da espessura que se aproximou da média calculada. Ressalta-se que os experimentos com vazões 2 e 3 possuem rápido escoamento e que na maioria das vezes os valores da espessuras foram tomados diretamente com a régua e não fotografados.

As figuras 9 e 10 mostram a evolução da pluma para o ensaio P21. A espessura da pluma para este ensaio foi de 0,5 cm como mostra a figura 11.

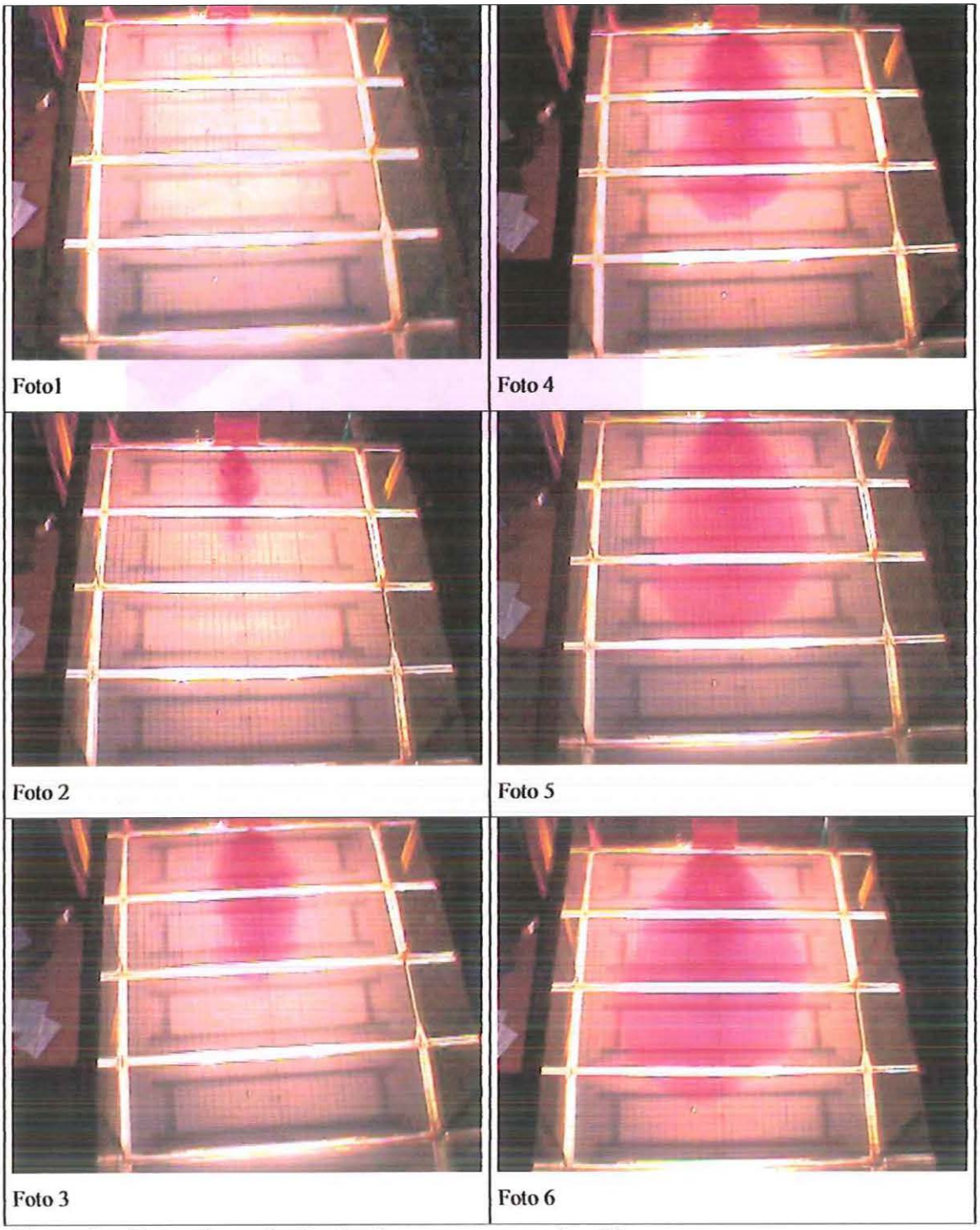


Figura 9 – Fotos da evolução da pluma para o ensaio p21.

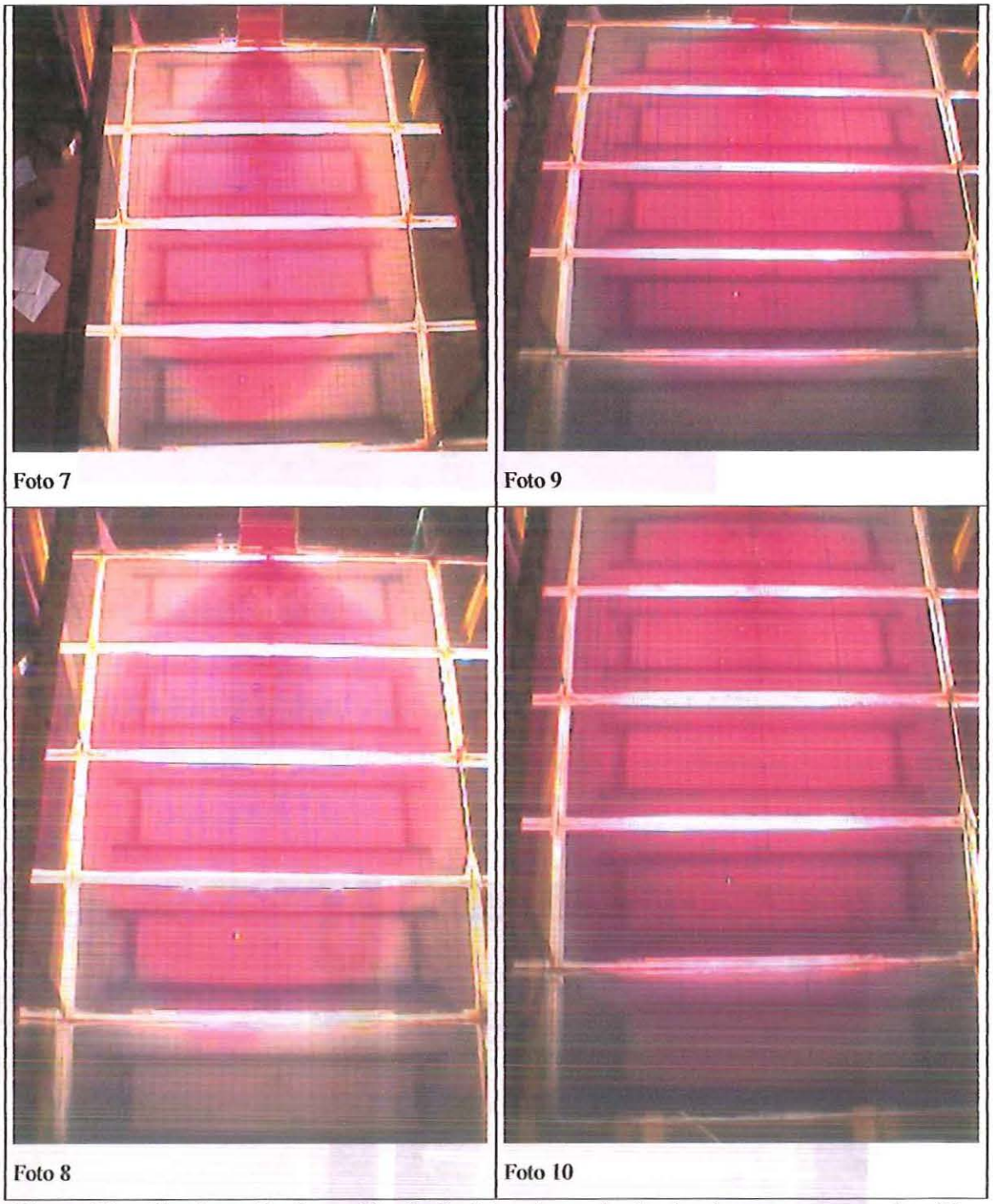


Figura 10 – Continuação da seqüência de fotos da evolução da pluma para o ensaio p21.

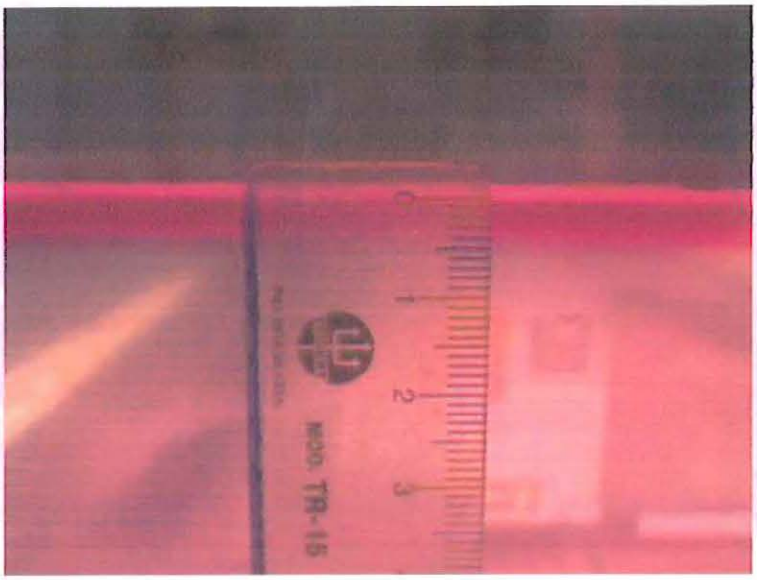


Figura 11 - Espessura da pluma para o ensaio P21.

Para este ensaio (p21), a espessura se manteve constante ao longo de todo o escoamento (0,5 cm).

A figura 11 mostra a evolução da frente da pluma e de sua largura para o ensaio p22. A espessura média da pluma para o ensaio p22 foi de 2 cm como mostra a figura 12.

Foto 1

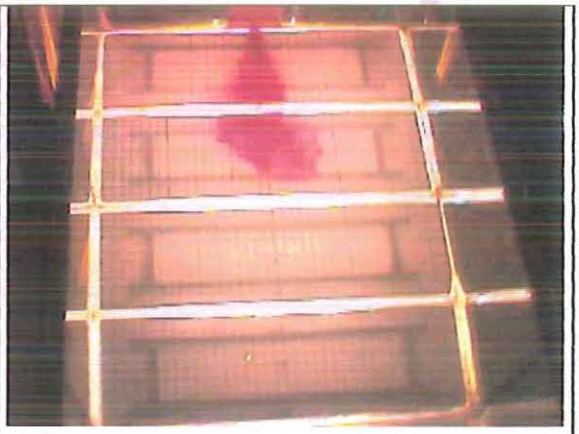


Foto 2

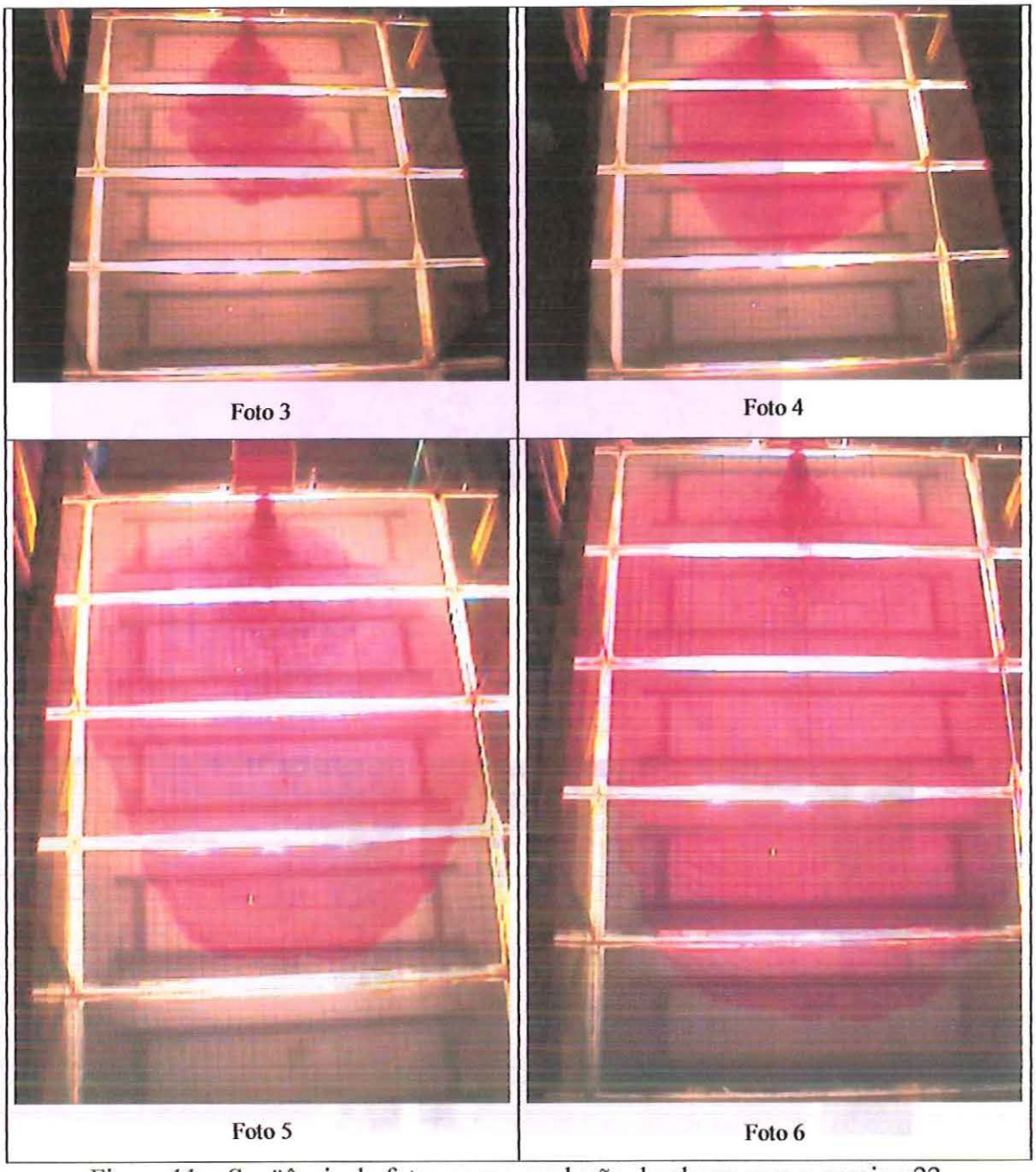


Figura 11 – Seqüência de fotos com a evolução da pluma para o ensaio p22.

Figura 12 – Espessura média da pluma para o ensaio P22.

A figura 13 mostra a evolução da frente da pluma e de sua dispersão lateral para o ensaio p23. A espessura média da pluma para o ensaio p23 foi de ≅4,5cm

Foto 1

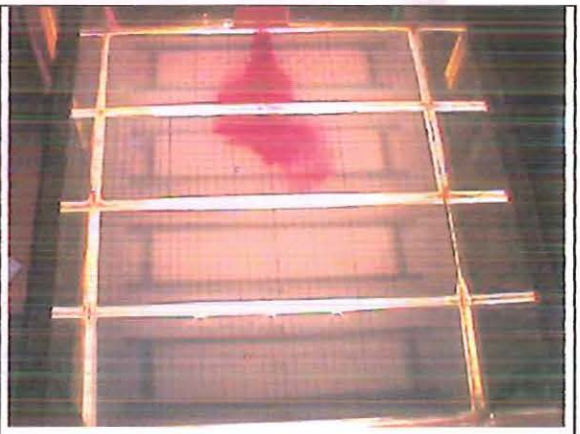


Foto 2

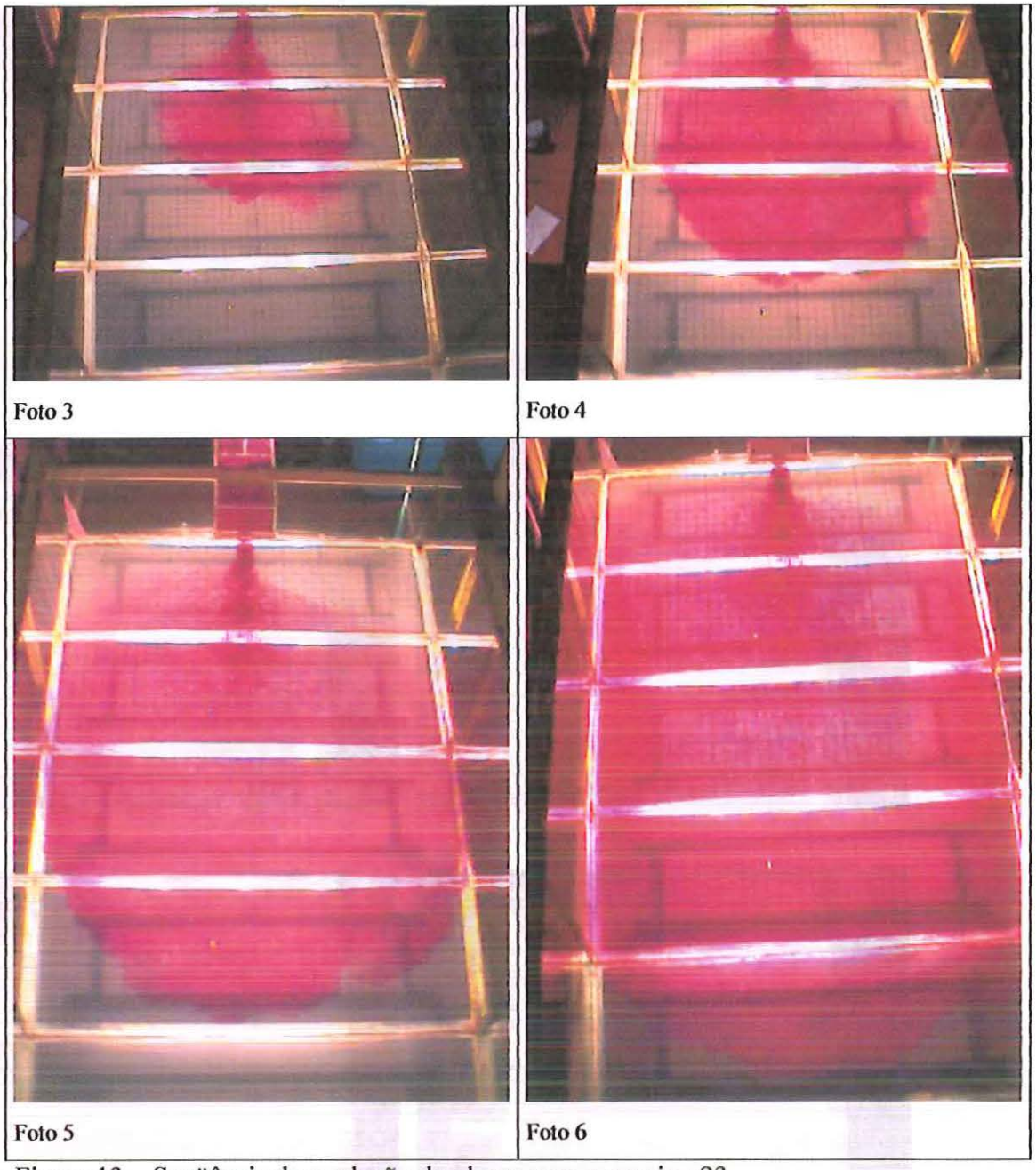


Figura 13 – Seqüência da evolução da pluma para o ensaio p23.

As fotografias da figura14 mostram a evolução da pluma para o ensaio p31 e o valor registrado para a espessura da corrente foi de 0,6 cm.

Foto 1

Foto 2

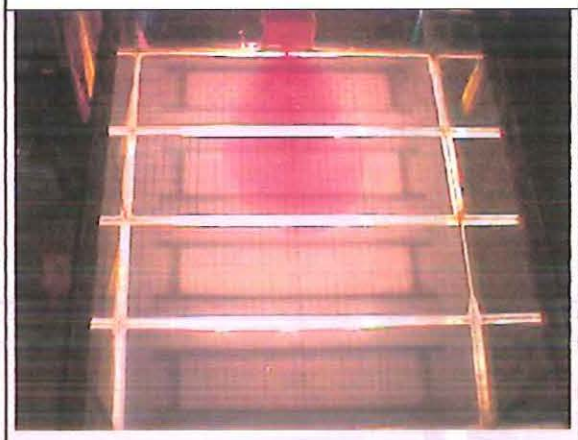


Foto 3

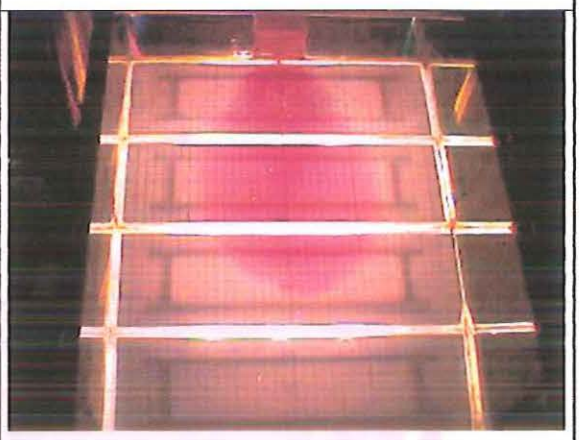


Foto 4

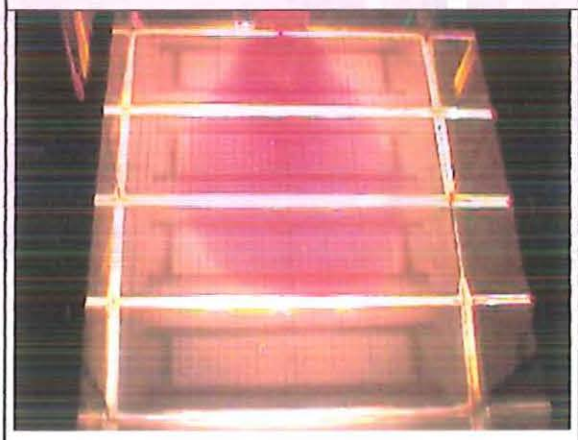


Foto 5

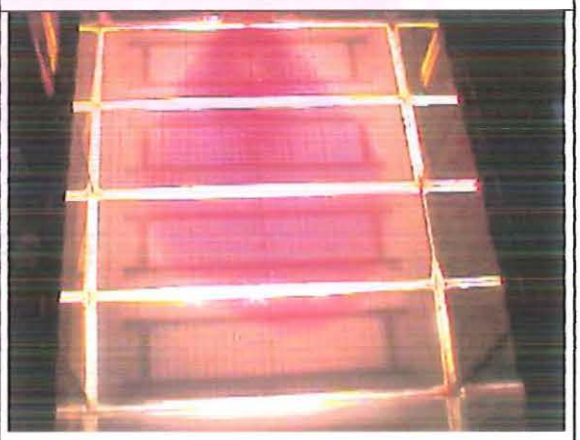


Foto 6

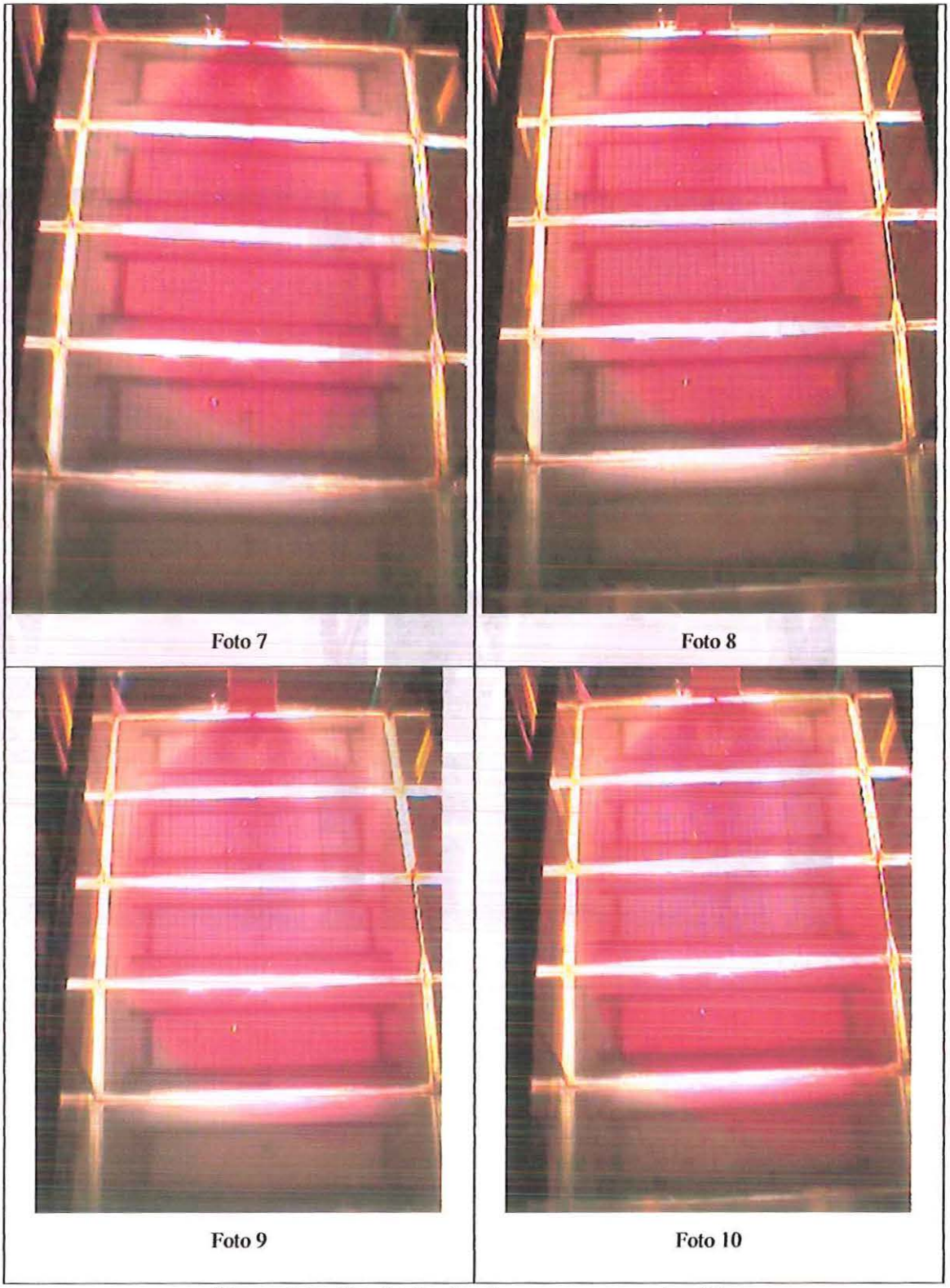


Figura 14 – Evolução da pluma para o ensaio p31.

A figura 15 mostra o comportamento da pluma para o ensaio p32. A espessura média da pluma para o ensaio (p32) foi de ≅2cm como mostra a figura 16.

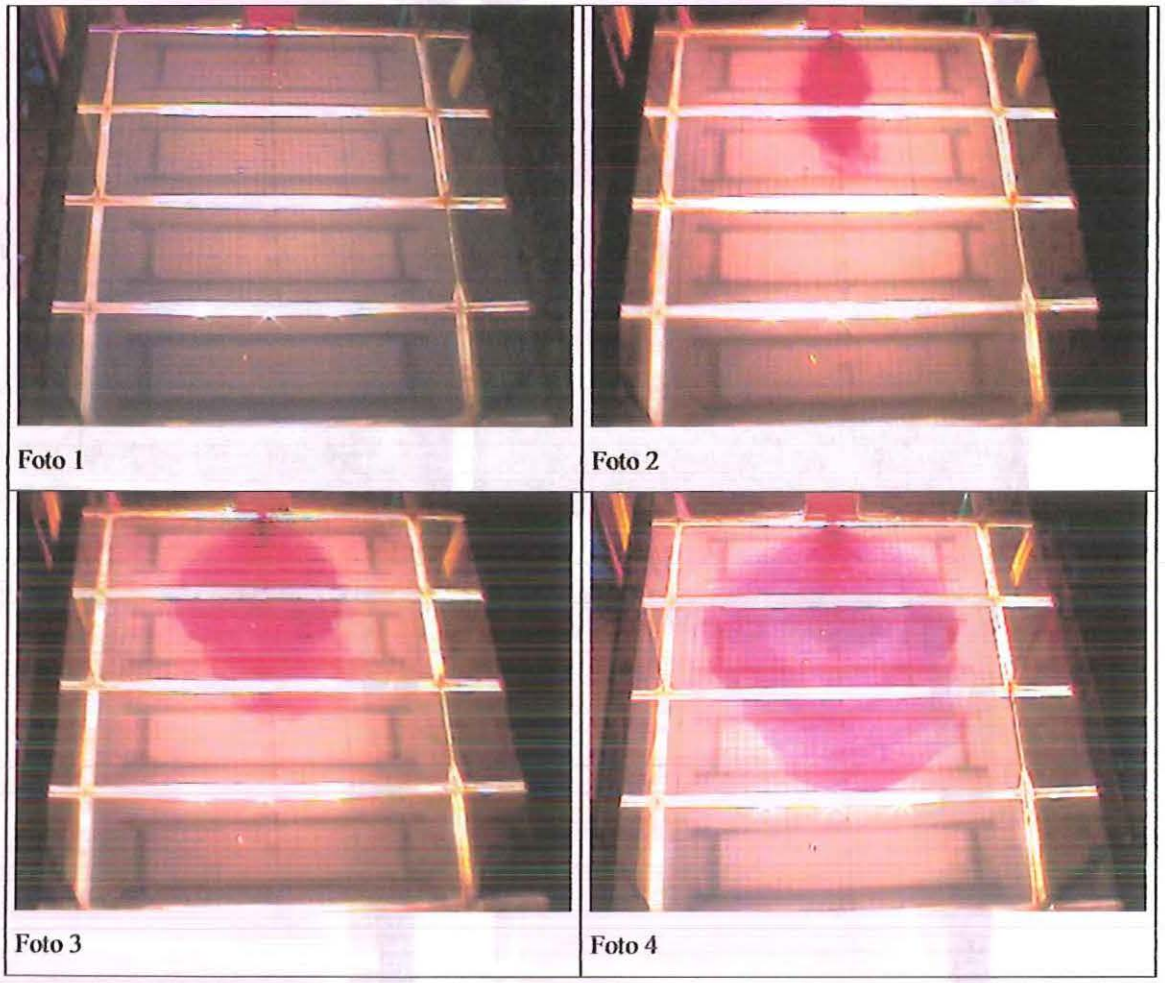


Foto 1 Foto 2

Foto 3 Foto 4

EESC - USP Biblioteca CAMPUS DE S. CARLOS

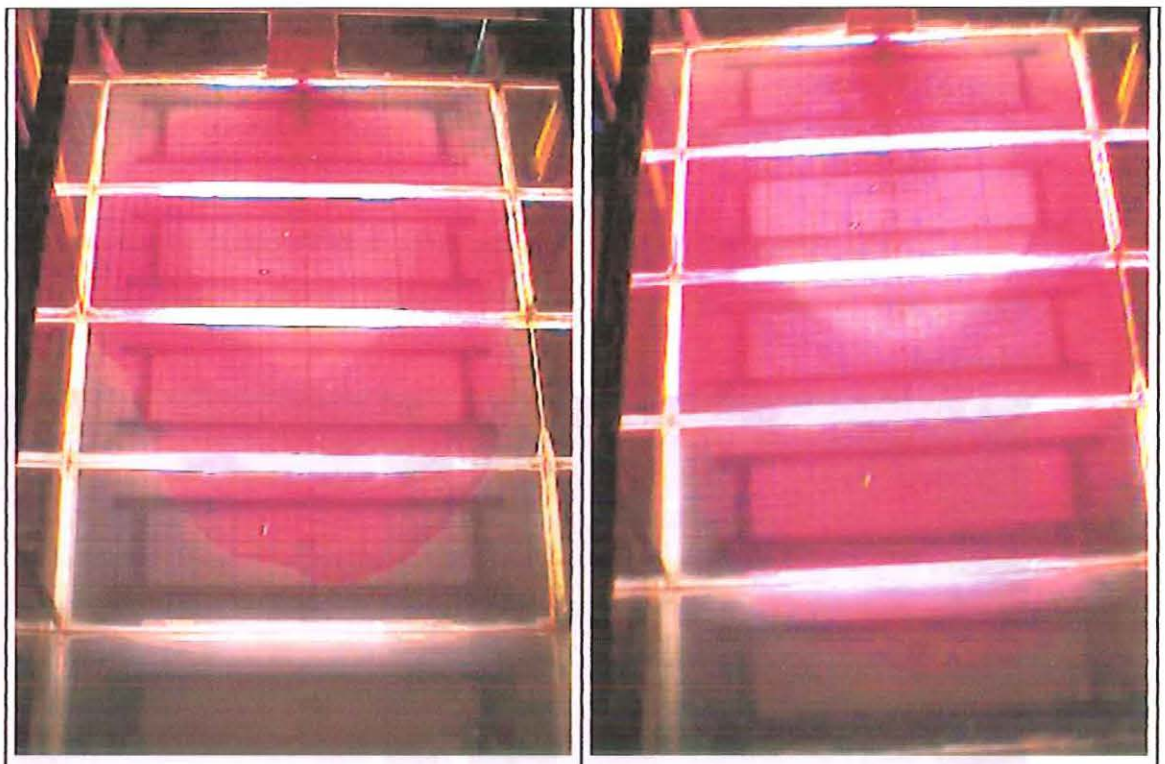


Foto 5 Foto 6

Figura 15 – Seqüência de fotos da evolução da pluma para o ensaio p32.

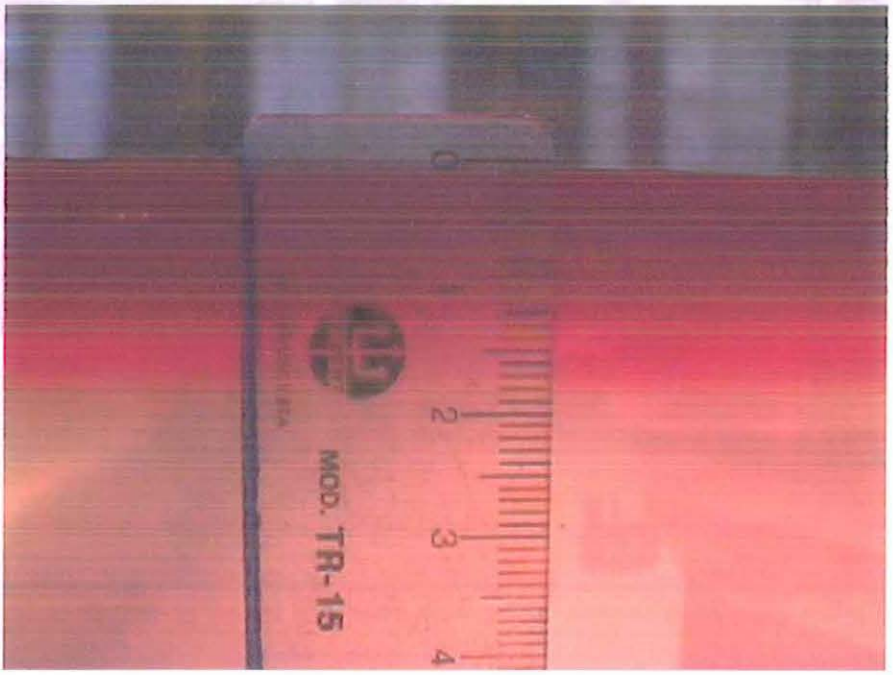


Figura 16 – Espessura da pluma para o ensaio p32.

No experimento p32, houve variação da espessura da pluma ao longo do tempo.A figura 16 mostra um dos valores medidos. A espessura para este experimento é função do tempo e não um valor único.

As fotografias da figura 17 mostram valores da frente da pluma e das dispersões laterais para o ensaio p33. A figura 18 mostra um dos valores intermediários da espessura.

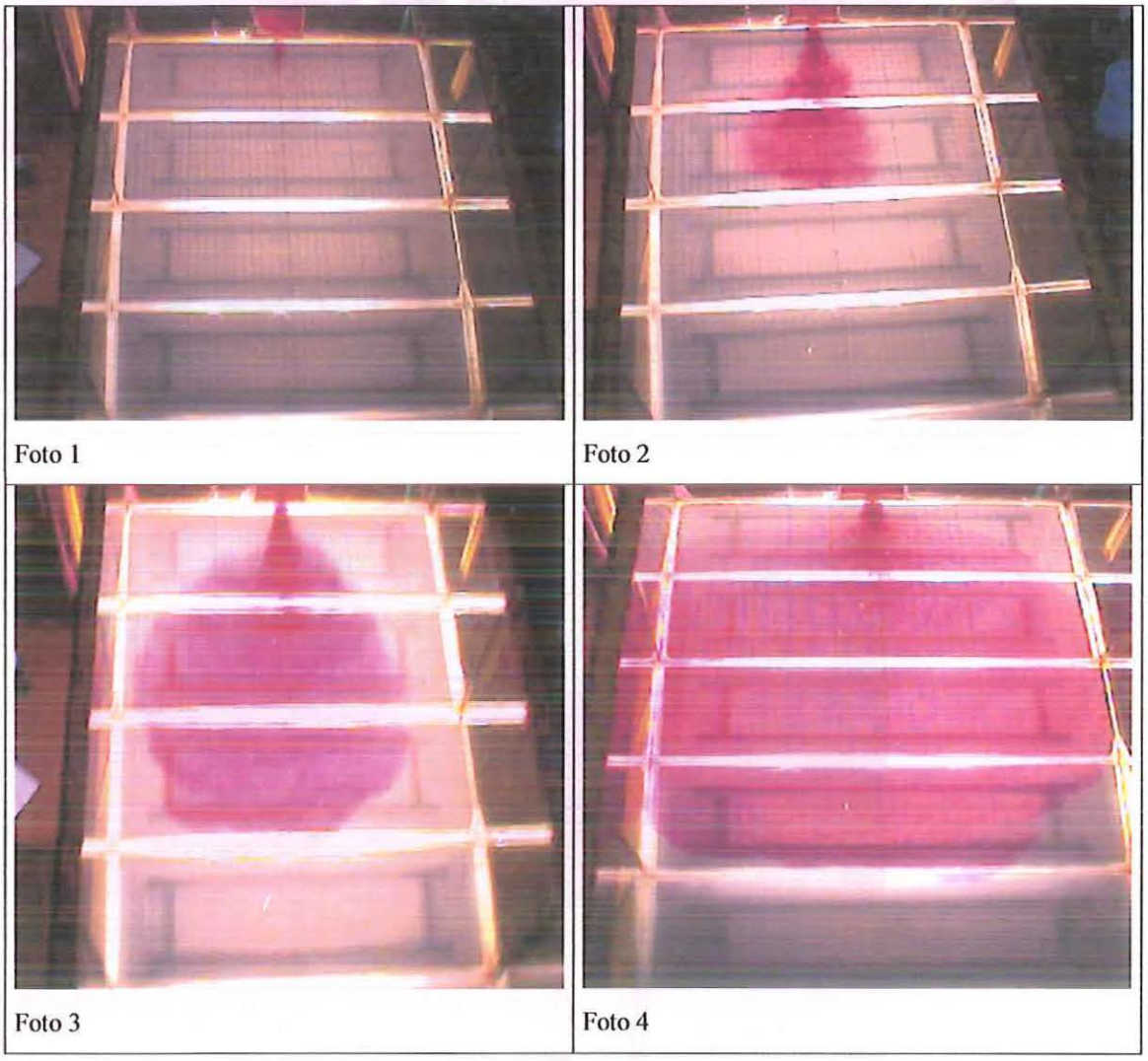


Figura 17 – Seqüência de fotografias da pluma para o ensaio p33.

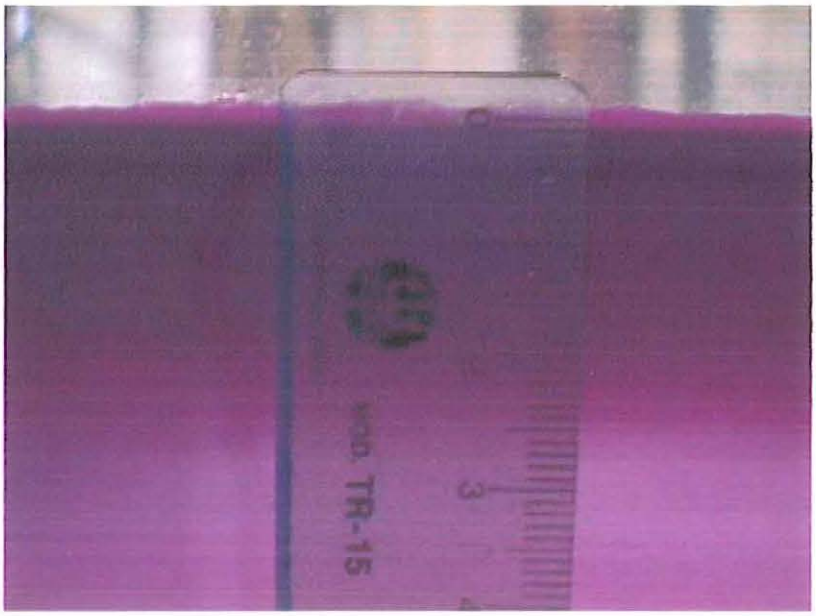


Figura 18 – Espessura da pluma para o ensaio p33.

204

Anexo B

Como visto no capítulo 4, Materiais e métodos, foi elaborado um programa em linguagem Fortran para a reprodução do experimento real de plumas salinas. Para tanto, adaptou-se o modelo numérico desenvolvido por Américo (1997), originalmente escrito para escoamentos laminares e sem transferência de massa. Foi introduzida a viscosidade turbulenta, a equação de transporte turbulento de massa e a difusividade turbulenta. O programa utilizado se apresenta a seguir:

```
program tanque

      Integer ncx,ncy,i,j,t,tmax,ny
      Real(8) u(0:1000,0:1000),v(0:1000,0:1000), c(0:1000,0:1000)
      Real(8) un(0:1000,0:1000),vn(0:1000,0:1000), cn(0:1000,0:1000)
   Real(8) Talfa,alfa,mi,aux,bux,cux,dux,u_inicial,v_inicial
      Real(8) c_inicial,dx, dy, dt
   Open(23, File='arq_veluv.dat', Status = 'old')

c     ----- Entradas
      alfa = 0.1D0
      mi = 0.15D0
      u_inicial = 10.0D0
      v_inicial = 0.167D0
      c_inicial = 1.00D0
      tmax =  160
      ncx = 40
      ncy = 21
      dx = 8.5D0
```

```
      dy = 7.1428571428571428571D0
      dt = 1.0D0
      ny=11

c     ----- inicializa velocidades

    Do 5 i=0,(ncx+1)

        do 7 j=0,(ncy+1)

          u(i,j) = 0.0D0
              v(i,j) = 0.0D0
              c(i,j) = 0.0D0
  7   continue

  5 continue

c         ----- final da inicialização das velocidades


c         ----- Inicio do looping principal

        write(*,*)'PROGRAMA RODANDO .....'

        Do 1 t = 1,tmax


       Do 13 i = 1,ncx

              Do 15 j = 1, ncy
```

```
c     ---- Tratamento do contorno

      If ((i.eq.1).and.(j.eq.1)) then

            u(i-1,j) = -u(i,j)
            u(i,j-1) = -u(i,j)
            v(i-1,j) = -v(i,j)
            v(i,j-1) = -v(i,j)
            c(i-1,j) = -c(i,j)
            c(i,j-1) = -c(i,j)
      Else
            If ((i.eq.1).and.(j.eq.ncy)) then

                  u(i-1,j) = -u(i,j)
                  u(i,j+1) = -u(i,j)
                  v(i-1,j) = -v(i,j)
                  v(i,j+1) = -v(i,j)
                  c(i-1,j) = -c(i,j)
                  c(i,j+1) = -c(i,j)

            Else
                  If ((i.eq.ncx).and.(j.eq.1)) then

                        u(i+1,j) = -u(i,j)
                        u(i,j-1) = -u(i,j)
                        v(i+1,j) = -v(i,j)
                        v(i,j-1) = -v(i,j)
                        c(i+1,j) = -c(i,j)
                        c(i,j-1) = -c(i,j)

                  Else
                        If ((i.eq.ncx).and.(j.eq.ncy)) then
```

```
            u(i+1,j) = -u(i,j)
            u(i,j+1) = -u(i,j)
            v(i+1,j) = -v(i,j)
            v(i,j+1) = -v(i,j)
            c(i+1,j) = -c(i,j)
            c(i,j+1) = -c(i,j)

        Else
            If (i.eq.1) then

                u(i-1,j) = -u(i,j)
                v(i-1,j) = -v(i,j)
                c(i-1,j) = -c(i,j)

            Else
                If (i.eq.ncx) then

                    u(i+1,j) = -u(i,j)
                    v(i+1,j) = -v(i,j)
                    c(i+1,j) = -c(i,j)

                Else
                    If (j.eq.1) then

                        u(i,j-1) = -u(i,j)
                        v(i,j-1) = -v(i,j)
                        c(i,j-1) = -c(i,j)

                    Else
                        If (j.eq.ncy) then
```

```
                                                    u(i,j+1) = -u(i,j)
                                                    v(i,j+1) = -v(i,j)
                                                    c(i,j+1) = -c(i,j)
                                                endif

                                            endif

                                        endif

                                    endif

                                endif

                            endif

                        endif

                    endif

c           ---- final do tratamento do contorno


c -Condição inicial constante no tempo-Vazão de entrada-na direção x(u)
c - condição inicial - concentração


                    If ((i.eq.1).and.(j.eq.ny)) then

                                u(i-1,j) = u_inicial
                                v(i-1,j) = v_inicial
                                c(i-1,j) = c_inicial
```

```
        endif

c        -- Final da condição incial --


c      ----cálculo da componente u(i,j) na direção x --

        If (j.lt.ny) then

                aux = u(i,j)*( u(i,j) - u(i-1,j) ) / (dx)
                bux = v(i,j)*( u(i,j) - u(i,j-1) ) / (dy)

        else
                if (j.gt.ny) then

                        aux = u(i,j)*( u(i+1,j) - u(i,j) ) / (dx)

                        bux = v(i,j)*( u(i,j+1) - u(i,j) ) / (dy)
                else

                aux = u(i,j)*( u(i+1,j) - u(i-1,j) ) / (2*dx)

                        bux = v(i,j)*( u(i,j+1) - u(i,j-1) ) / (2*dy)

                endif

    endif

                        cux = ( u(i+1,j) - 2*u(i,j) + u(i-1,j) ) / (dx*dx)

                        dux = ( u(i,j+1) - 2*u(i,j) + u(i,j-1) ) / (dy*dy)
```

```
                    Talfa = alfa*u(i,j) + (1-alfa)*(u(i+1,j)+u(i-1,j))/2

                    un(i,j) = Talfa + dt*(-aux-bux+mi*(cux+dux))


c     ----cálculo da componente v(i,j) na direção y --

      if (j.lt.ny) then
            aux = u(i,j)*( v(i,j) - v(i-1,j) ) / (dx)

            bux = v(i,j)*( v(i,j) - v(i,j-1) ) / (dy)
      else
        if (j.gt.ny) then

          aux = u(i,j)*( v(i+1,j) - v(i,j) ) / (dx)

            bux = v(i,j)*( v(i,j+1) - v(i,j) ) / (dy)

            else
                    aux = u(i,j)*( v(i+1,j) - v(i-1,j) ) / (2*dx)

                    bux = v(i,j)*( v(i,j+1) - v(i,j-1) ) / (2*dy)

            endif
      endif
                    cux = ( v(i+1,j) - 2*v(i,j) + v(i-1,j) ) / (dx*dx)

                    dux = ( v(i,j+1) - 2*v(i,j) + v(i,j-1) ) / (dy*dy)

                    Talfa = alfa*v(i,j) + (1-alfa)*(v(i,j+1)+v(i,j-1))/2
```

```
                    vn(i,j) = Talfa + dt*(-aux-bux+mi*(cux+dux))

c     ---- final do calculo das velocidades em um nível

c       ---- inicio do cálculo das concentrações
      If (j.lt.ny) then

        aux = u(i,j)*(c(i,j)-c(i-1,j))/(dx)

            bux = v(i,j)*(c(i,j)-c(i,j-1))/(dy)

            else
                  If (j.gt.ny) then

                        aux = u(i,j)*(c(i+1,j)-c(i,j))/(dx)


                        bux = v(i,j)*(c(i,j+1)-c(i,j))/(dy)

                  else

                        aux = u(i,j)*(c(i+1,j)-c(i-1,j))/(2*dx)

                        bux = v(i,j)*(c(i,j+1)-c(i,j-1))/(2*dy)

                  endif

      endif

    cux = (c(i+1,j)-2*c(i,j)+c(i-1,j))/(dx*dx)
```

```
      dux = (c(i,j+1)-2*c(i,j)+c(i,j-1))/(dy*dy)

      Talfa=alfa*c(i,j)+(1-alfa)*(c(i+1,j)+c(i-1,j)+c(i,j+1)+c(i,j-1))/4

      cn(i,j) = Talfa+dt*(-aux-bux+mi*(cux+dux))


c          ----  final do calculo das concentrações

   15  Continue

   13  Continue

c          --- atualize as velocidades

         Do 30 i=1,ncx

          Do 31 j=1,ncy

                    u(i,j) = un(i,j)
                    v(i,j) = vn(i,j)
                    c(i,j) = cn(i,j)
   31      Continue

   30 Continue

c    --  final da atualização das velocidades


c ---- Impressão dos resultados

         write(23,*)'Passo de tempo = ', t
```

```
      write(23,*)'Tempo (s) = ', t*dt

      Do i = 1,ncx
        Do j = 1,ncy

      if ((t.eq.12).or.(t.eq.26).or.(t.eq.38).or.(t.eq.55).or.(t.eq.72)
      *.or.(t.eq.112).or.(t.eq.130).or.(t.eq.155)) then


c     If (j.eq.ny) then

    write(23,117) i,j,c(i,j)
  117 Format(3x,i2,2x,i2,3x,f15.10)

c     endif

      endif

        Enddo
      Enddo

c ------ final da impressão dos resultados


   1 Continue

c         --- final do looping principal

      Close(23)

    Stop
    End
```

Ensaio p11 e ptt1
μt=0,15
d1
u0=5,88235
v0=0,167

Pluma salina

x exp (cm)	xteórico(cm)	Tempo(s)	yexp	yteórico	T(s)
51,58	51	12	12	42,84	12
100,78	102	34	84	85,68	34
141,07	136	52	116	114,24	52
153,03	161,5	64	138	114,24	64
181,89	204	88	150	128,52	88
201,73	229,5	112			
221,13	255	130			

Pluma térmica

xptt1	Tptt1	yptt1
39,13278	7	8
80,39326	23	28
100,77841	43	48
121,00274	68	64
137,06769	90	84
151,96556	109	102
159,85895	126	114
183,6268	162	138
203,53082	189	138,5
221,51758	206	139
259,70768	235	150

Parte de baixo (simetria)

Tempo 12s	Tempo 34s	Tempo 52(s)	Tempo 64s	Tempo 88s
Contorno da Célula (i,j)	Contorno da Célula (i,j)	Contorno da Célula (i,j)	Contorno da Célula (i,j)	Contorno da Célula (i,j)
1,8	1,7	1,6	1,6	1,6
2,8	2,5	2,4	2,4	2,3
3,8	3,5	3,4	3,3	3,3
4,8	4,5	4,4	4,3	4,2
5,9	5,5	5,3	5,3	5,2
6,11	6,5	6,3	6,3	6,2
	7,6	7,4	7,3	7,2
	7,7	8,4	8,3	8,2
	10,8	9,5	9,4	9,2
	11,9	10,5	10,4	10,3
	12,11	11,6	11,4	11,3
		12,7	12,5	12,3
		13,8	13,6	13,3
		14,9	14,7	14,4
		15,9	15,7	15,4
		16,11	16,8	16,5
			17,9	17,6
			18,1	18,7
			19,11	19,7
				20,8
				21,9
				22,1
				23,11

Ensaio p12 e ptt2

$\mu t=0,15$

d2

$u_0=6,67$

$v_0=0,167$

Pluma salina *Pluma térmica*

x exp (cm)	xteórico(cm)	Célula(i,j)	Tempo(s)	yexp	yteórico	Tempo s	xptt2	Tptt2	yptt2
	34	4,11	5		42,84	5	18,2535	2	8
	51	6,11	10		42,84	10	121,0027	17	48
51,58	68	8,11	17	8	71,4	17	153,0319	32	80
100,78	102	12,11	30	32	85,68	30	151,9656	45	104
176,85	153	18,11	49	96	114,24	49	163,8112	64	118
177,86	178,5	21,11	61	118	128,52	61	195,5588	78	126
193,84	195,5	23,11	69	150	128,52	69	238,5668	92	126
224,95	212,5	25,11	83	150	128,52	83			

T 5s	T 10s	T 17s	T 30s	T 492(s)	T 61s	T 69s	T 83s
Célula (i,j)	Célula (i,j)	Célula (i,j)	Célula (i,j)	Célula (i,j)	Célula (i,j)	Célula (i,j)	Célula (i,j)
1,8	1,8	1,7	1,7	1,6	1,6	1,5	1,5
2,9	2,7	2,6	2,5	2,4	2,4	2,3	2,3
3,1	3,8	3,6	3,5	3,4	3,3	3,3	3,2
4,11	4,8	4,7	4,5	4,3	4,2	4,2	4,2
	5,9	5,7	5,5	5,3	5,2	5,2	5,2
	6,11	6,8	6,5	6,3	6,2	6,2	6,2
		7,9	7,6	7,3	7,3	7,2	7,2
		8,11	8,7	8,4	8,3	8,2	8,2
			9,7	9,4	9,3	9,3	9,2
			10,8	10,5	10,3	10,3	10,2
			11,9	11,5	11,4	11,3	11,2
			12,11	12,6	12,5	12,4	12,3
				13,7	13,5	13,4	13,3
				14,8	14,6	14,5	14,3
				15,8	15,7	15,5	15,4
				16,9	16,7	16,6	16,5
				17,1	17,8	17,7	17,5
				18,11	18,9	18,8	18,6
					19,1	19,8	19,6
					20,1	20,9	20,7
					21,11	21,1	21,8
						22,1	22,8
						23,11	23,9
							24,1
							25,11

Ensaio p13 e ptt3

$\mu t=0,15$

d3

$u_0=10$

$v_0=0,167$

Pluma salina

x exp (cm)	xteórico(cm)	Tempo(s)	yexp	yteórico	Tempo s
96,7143	59,5	12	12	57,12	12
145,06232	127,5	26	26	85,68	26
181,88568	178,5	38	38	114,24	38
208,85928	238	55	55	128,52	55
251,26888	280,5	72	72	142,8	72

Pluma térmica

xptt3	Tptt3	yptt3
92,64375	8	48
129,04787	18	80
151,96556	28	92
183,6268	38	96
203,53082	49	122
223,52029	59	142
239,57148	70	150

Cont.

Tempo 12s	Tempo 26s	Tempo 38s	Tempo 55s	Tempo 72(s)	Tempo 72(s)
Célula (i,j)	Célula (i,j)	Célula (i,j)	Célula (i,j)	Célula (i,j)	Célula (i,j)
1,7	1,6	1,6	1,5	1,5	31,1
2,7	2,5	2,4	2,3	2,3	32,1
3,7	3,5	3,4	3,2	3,2	33,11
4,7	4,5	4,3	4,2	4,2	
5,8	6,5	5,3	5,2	5,1	
6,9	7,5	6,3	6,2	6,1	
10,1	8,6	7,4	7,2	7,1	
	9,6	8,4	8,2	8,1	
	10,7	9,4	9,2	9,1	
	11,8	10,5	10,3	10,2	
	12,8	11,5	11,3	11,2	
	13,9	12,6	12,3	12,2	
	14,1	13,6	13,4	13,2	
	15,11	14,7	14,4	14,2	
		15,7	15,5	15,3	
		16,8	16,5	16,3	
		17,8	17,6	17,3	
		18,9	18,6	18,4	
		19,9	19,6	19,4	
		20,1	20,7	20,5	
		21,11	21,7	21,5	
			22,8	22,6	
			23,8	23,6	
			24,9	24,6	
			25,9	25,7	
			26,1	26,7	
			27,1	27,8	
			28,11	28,8	
				29,9	
				30,9	

Ensaio p21
Qmax=50ml/s e d_2=1,020
massa específica da solução = 18,4 g/L aos 25 C
$y_1=4^0$ hent = 1,6cm
$y_2=12^0$ b = 5cm e h = 4 cm
tambiente = 25 C
W = 76 %

y1	y2	h	L	xlong	T(s)	ytransv
0		1,6	1,428704	1,428704	0	0
80		7,180518	4,678123	84,48325	11	12
108		9,133699	5,195264	112,9322	29	48
136		11,08688	5,399435	141,0681	44	68
148		11,92396	5,392406	153,0319	59	88
149,63	22,37	16,71098	0,21547	171,7266	77	104
149,63	45,37	21,49295	0,554708	194,5633	104	116
149,63	66,37	25,8591	0,964779	215,5144	139	150

uexp(cm/s)	vexp(cm/s)
7,680295	1,090909
3,894213	1,655172
3,206094	1,545455
2,593761	1,491525
2,230216	1,350649
1,870801	1,115385
1,550464	1,079137

M(Kg)	T(s)	Q(cm^3/s)
3,733	60,1	48,88519
3,758	60,25	49,17842
3,734	60,27	48,7639

	Espessura (cm)
P1	0,4
P2	0,4
P3	0,4

As siglas P1, P2 e P3 referem-se a três posições distintas da parede da canaleta onde se faziam as leituras de espessura da corrente.

Ensaio p22
Qmax=150ml/s e d2=1,020
massa específica da solução = 18,3 g/L aos 22,6 C
hent = 1,6cm
b = 5cm e h = 4 cm y1=4^0
tambiente = 23C y2=12^0
W=83%

y1	y2	h	L	xlong	T(s)	ytransv
48		4,948311	3,697133	51,58021	3	12
96		8,296621	5,012259	100,7784	13	48
120		9,970777	5,320787	125,0285	21	88
148		11,92396	5,392406	153,0319	31	124
149,63	42,37	20,86922	0,503856	191,578	46	150
149,63	86,37	30,01733	1,441193	235,5538	59	150

uexp(cm/s)	vexp(cm/s)
17,1934	4
7,752185	3,692308
5,953737	4,190476
4,936512	4
4,164738	3,26087
3,992437	2,542373

M(Kg)	T(s)	Q(cm3/s)
3,804	19,63	153,2858
3,764	19,45	152,6478
3,887	20,61	150,0243

	Espessura (cm)
P1	1
P2	2,2
P3	2,9

Ensaio p23
Qmax=300ml/s e d2=1,020
massa específica da solução = 18g/L aos 21,8 C
hent = 1,6cm
b = 5cm e h = 4 cm y1=4^0
tambiente = 23,5 ^{0}C y2=12^0
W=83%
Tp=22 ^{0}C

y1	y2	h	L	xlong	T(s)	ytransv
24		3,274155	2,683805	26,62534	2	12
96		8,296621	5,012259	100,7784	10	52
120		9,970777	5,320787	125,0285	20	96
164	14,37	13,04006	5,295771	168,8963	30	138
196	46,37	21,70087	0,572094	195,5588	39	150
240	90,37	30,84898	1,546278	239,5715	51	150

uexp(cm/s)	vexp(cm/s)
13,31267099	6
10,07784078	5,2
6,251423652	4,8
5,629875838	4,6
5,014328149	3,846153846
4,697479941	2,941176471

M(Kg)	T(s)	Q(cm3/s)
4,006	10,82	296,7652
3,981	10,7	297,757
4,0134	10,8	298

	Espessura (cm)
P1	4
P2	5,9
P3	5,9

Ensaio p31
Qmax=50ml/s e d3=1,050
massa específica da solução = 34,3g/L aos 22,5^0 C
hent = 1,6cm
b = 5cm e h = 4 cm y1=4^0
tambiente = 23 ^{0}C y2=12^0
W=83%
Tp=22 ^{0}C

y1	y2	h	L	xlong	T(s)	ytransv	u long	vtransv
48		4,948311	3,697133	51,58020755	5	8	10,31604	1,6
78		7,041005	4,629071	82,43906642	22	44	3,74723	2
96		8,296621	5,012259	100,7784078	35	64	2,879383	1,828571
136		11,08688	5,399435	141,0681458	52	88	2,712849	1,692308
148		11,92396	5,392406	153,0318855	72	100	2,125443	1,388889
149,63	22,37	16,71098	0,21547	171,7266322	87	112	1,973869	1,287356
149,63	38,37	20,03757	0,439106	187,6006297	127	134	1,47717	1,055118
149,63	46,37	21,70087	0,572094	195,5587978	145	142	1,348681	0,97931
149,63	62,37	25,02745	0,879453	211,5165188	159	146	1,330293	0,918239
149,63	74,37	27,52239	1,145455	223,5202917	170	150	1,314825	0,882353

	Espessura (cm)	M(Kg)	T(s)	Q(cm3/s)
P1	0,1	3,86	60,25	50,871369
P2	0,3	3,784	59,82	49,966566
P3	0,3	3,791	60,13	49,825378

distância(mm)	Opacidade	Smooth
0	0	9,4
2	10	9,66667
4	15	10,14286
6	10	10,125
8	12	10,33333
10	11	11,66667
12	13	12
14	10	11,44444
16	12	11,77778
18	12	10,88889
20	13	9,88889
22	10	8,88889
24	13	8,55556
26	4	8
28	2	6,77778
30	4	5,55556
32	7	4,66667
34	7	3,66667
36	1	3,66667
38	2	4
40	2	4,22222
42	4	3,88889
46	4	4,11111
48	5	4,66667
50	6	5,11111
52	4	5,11111
54	9	5,11111
56	6	5,44444
58	6	5,77778
60	2	6
62	4	6,44444
64	7	6,55556
66	8	6,55556
68	8	6,44444
70	8	7,11111
72	10	7,33333
74	6	7,66667
76	5	7,77778
78	8	8
80	6	8,55556
82	10	8,88889
84	9	9,88889
86	10	10,88889
88	13	11,77778
90	13	12,88889
92	15	14
94	14	14,625
96	16	15,28571
98	16	15,66667
100	20	16,2

Ensaio p32

Qmax=150ml/s e d3=1,050

massa específica da solução = 35,7g/L aos 23,25^0 C

hent = 1,6cm

b = 5cm e h = 4 cm y1=4^0

tambiente = 24 ^{0}C y2=12^0

W=68%

Tp=23 ^{0}C

y1	y2	h	L	xlong	T(s)	ytransv	u long	v transv
16		2,716104	2,292474	18,2535	0	8	#DIV/0!	#DIV/0!
72		6,622466	4,472152	76,29676	11	32	6,936069	2,909091
112		9,412725	5,243472	116,9706	19	74	6,15635	3,894737
148		11,92396	5,392406	153,0319	28	116	5,465424	4,142857
149,63	38,37	20,03757	0,439106	187,6006	38	150	4,936859	3,947368
149,63	86,37	30,01733	1,441193	235,5538	53	150	4,444411	2,830189

	Esp (cm)	T(s)
P1	1,3	225
P2	1,8	257
P3	1,9	280

M(Kg)	T(s)	Q(cm3/s)
3,813	20,47	147,4353
3,83	20,56	147,6167
3,648	19,05	149,7638
3,694	20,13	144,0139

Dist (cm)	Opac	Smooth
2	36	30,4
4	34	30
6	23	30,57143
8	27	32,5
10	32	32,88889
12	28	33,33333
14	34	33,33333
16	46	34,55556
18	36	36,77778
20	40	37,22222
22	34	39
24	34	39,22222
26	47	37,88889
28	36	36,88889
30	44	35,33333
32	36	35
34	34	33,66667
36	27	32
38	26	32,11111
40	31	30
42	22	29,11111
46	32	29
48	37	29,66667
50	25	30
52	28	30,11111
54	33	30,77778
56	33	30,11111
58	29	29,66667
60	32	30,44444
62	28	30,44444
64	26	35,33333
66	33	35,11111
68	32	35,55556
70	28	35,88889
72	77	37,44444
74	31	38,77778
76	33	39,66667
78	35	40,77778
80	42	41,66667
82	38	37,11111
84	41	38
86	42	39,11111
88	36	39,44444
90	36	38,88889
92	39	39
94	43	38,71429
96	38	38,16667
98	37	38,6

Ensaio p33

Qmax=300ml/s e d3=1,050

massa específica da solução = 34,6g/L aos 22,8^0 C

hent = 1,6cm

b = 5cm e h = 4 cm y1=4^0

tambiente = 23,5 ^{0}C y2=12^0

W=68%

Tp=22,5 ^{0}C

y1	y2	h	L	xlong	T(s)	ytransv	ulong	v transv
16		2,716104	2,292474	18,2535	0	8	#DIV/0!	#DIV/0!
96		8,296621	5,012259	100,7784	13	58	7,752185	4,461538
148		11,92396	5,392406	153,0319	24	120	6,376329	5
149,63	62,37	25,02745	0,879453	211,5165	35	150	6,043329	4,285714
149,63	98,37	32,51227	1,766078	247,6165	44	150	5,627647	3,409091

	Esp (cm)
P1	2,8
P2	3
P3	4,9

M(Kg)	T(s)	Q(cm3/s)
3,958	10,64	297,2744
3,972	10,62	299,1525

Dist (cm)	Opac	Smooth
0	0	18,4
2	21	21
4	27	23,14286
6	26	25,625
8	18	26,66667
10	34	30,66667
12	36	32,44444
14	43	33,11111
16	35	34
18	36	35,33333
20	37	35,22222
22	33	34,55556
24	34	33,22222
26	30	33
28	33	32,33333
30	30	32,22222
32	31	32,66667
34	33	32,44444
36	30	32,66667
38	36	33
40	37	33,44444
42	32	33,66667
46	32	34
48	36	34,22222
50	34	33,77778
52	33	33,77778
54	36	34,22222
56	32	34,66667
58	32	34,66667
60	37	34,77778
62	36	34,88889
64	36	35
66	36	35,88889
68	35	36,44444
70	34	36,44444
72	37	37
74	40	37,88889
76	37	38,11111
78	37	38,11111
80	41	38,77778
82	44	39,33333
84	38	39,55556
86	35	40
88	40	40,375
90	42	40,28571
92	42	39,66667
94	41	40

VAZÃO DE 50 ML/S E POSIÇÃO 1.

Figura 1 - Posição 1, q=50ml/s e foto Ql000.tif.

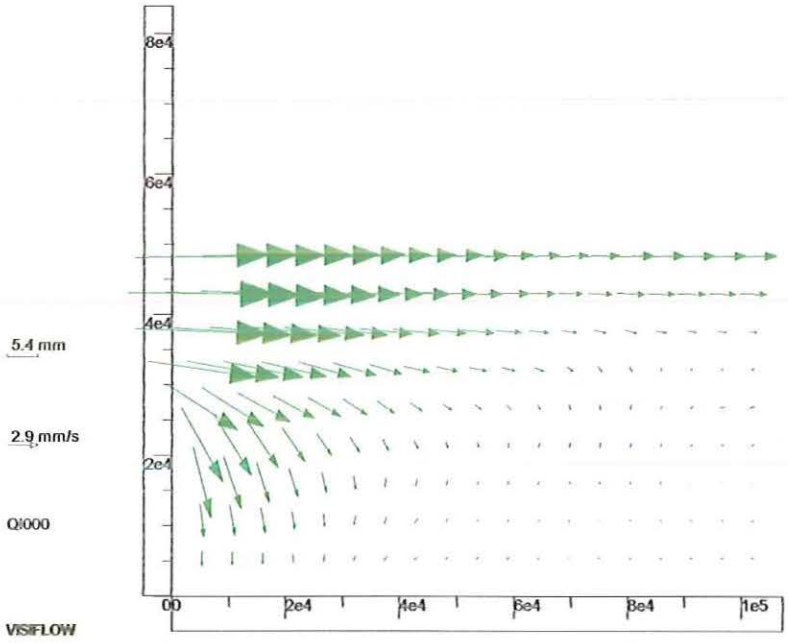


Figura 2 - Campo instantâneo de velocidades para Ql000.tif e Ql001.tif para q= 50ml/s.

Figura 3 - Posição 1 q=50ml/s Ql002.tif

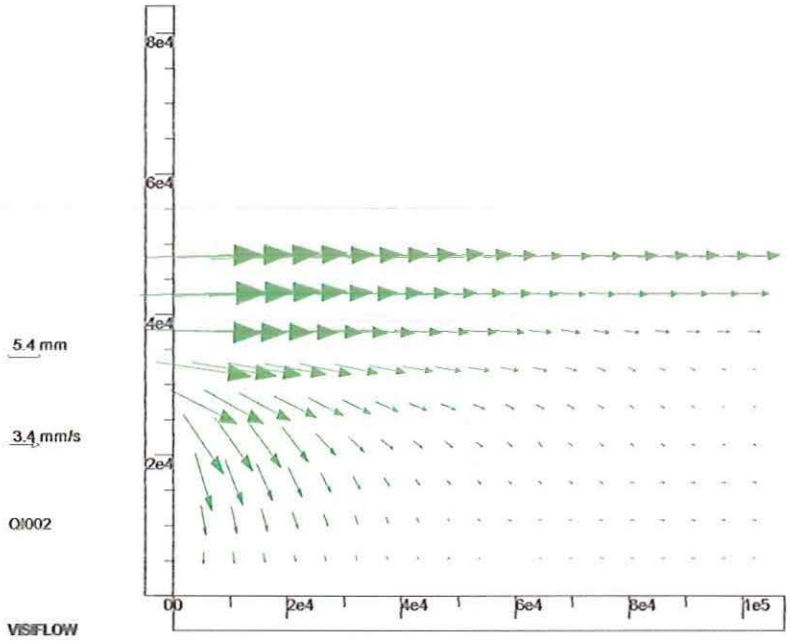


Figura 4-Campo de velocidades para Ql001.tif e Ql002.tif para q= 50ml/s

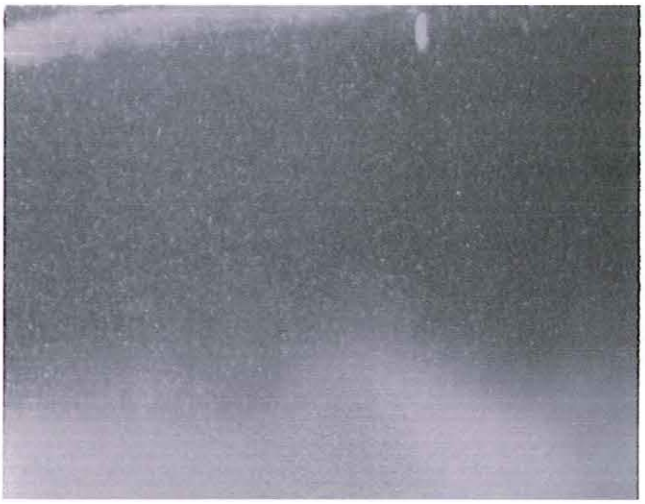


Figura 5 - Posição 1 q=50ml/s Ql004.tif

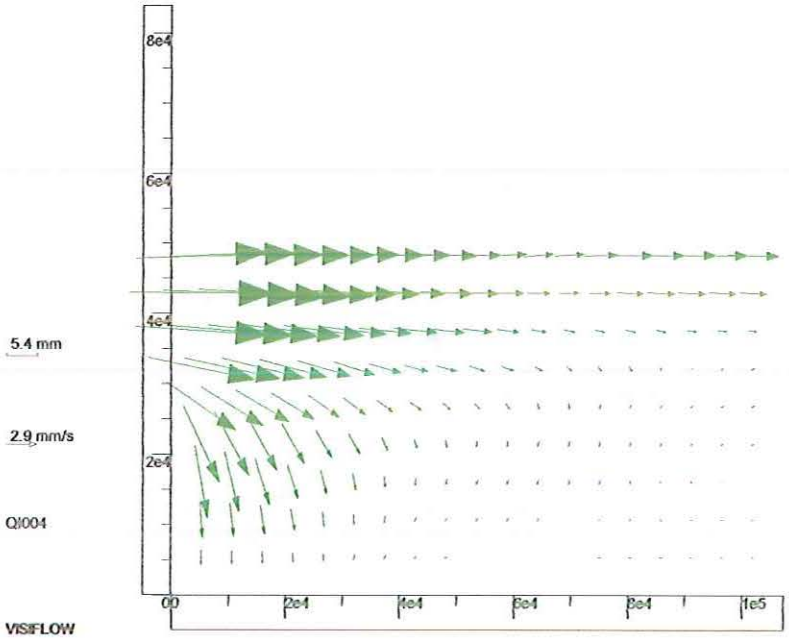


Figura 6 - Campo de velocidades para Ql003.tif e Ql004.tif

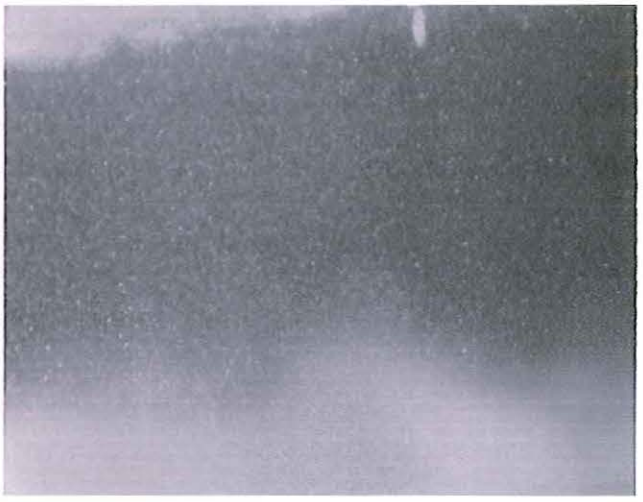


Figura 7– Posição 1 q=50ml/s Ql006.tif

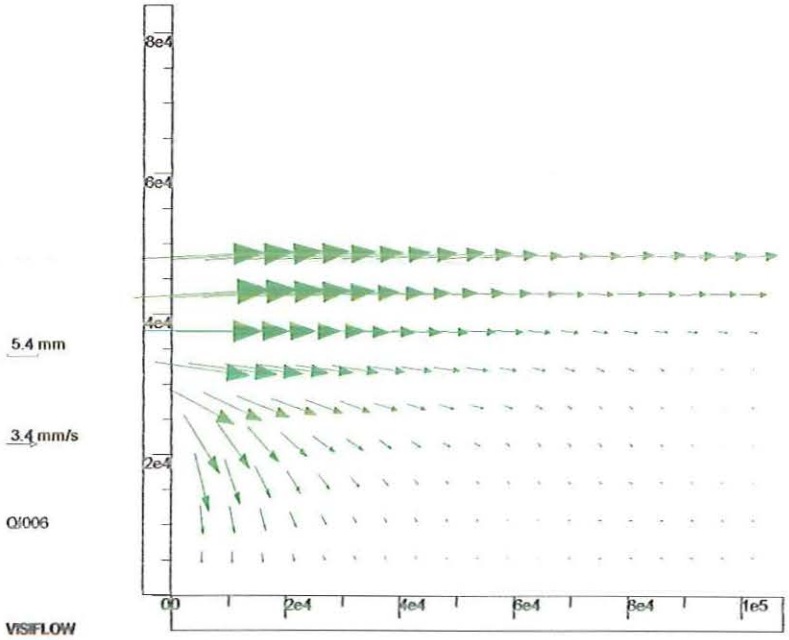


Figura 8 - Campo de velocidades para Ql005.tif e Ql006.tif

Figura 9 – Posição 1, q=50ml/s e Ql008.tif

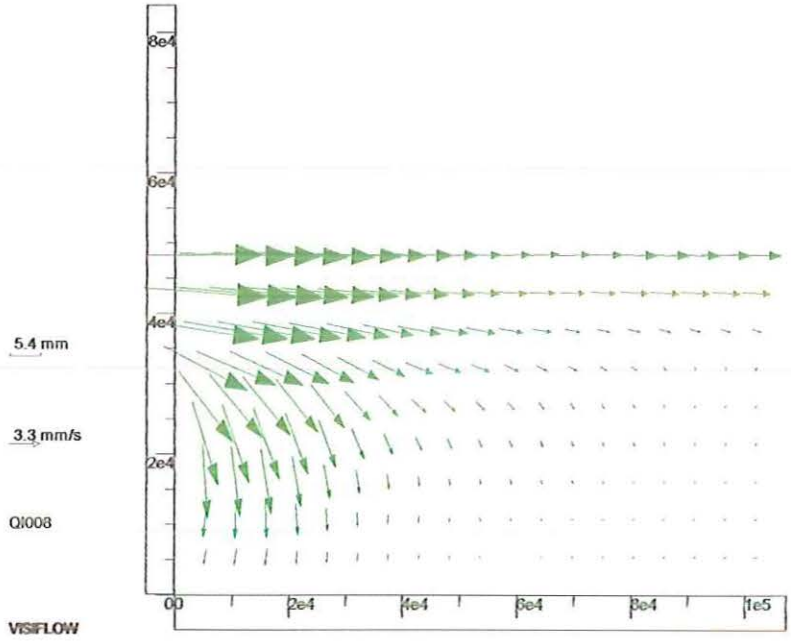


Figura 10 - Campo de velocidades para Ql007.tif e Ql008.tif

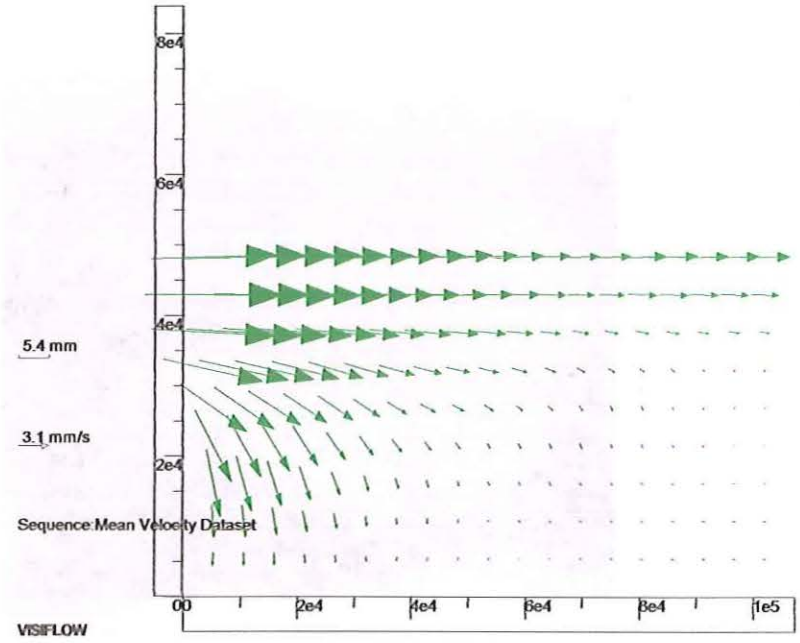


Figura 11 - Campo "médio de velocidade para q= 50ml/s

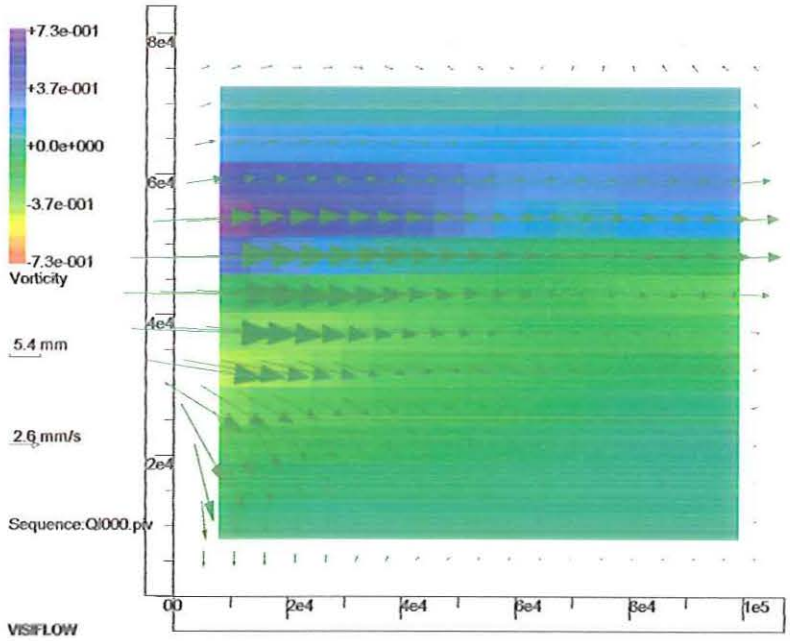


Figura 12 - Vorticidade "média" para q=50 ml/s

VAZÃO DE 50ML/S E POSIÇÃO 2.

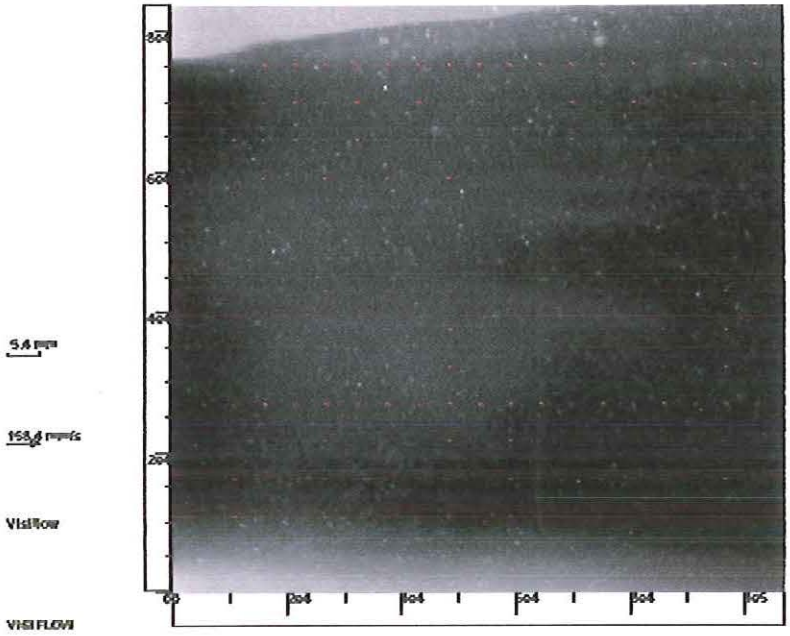


Figura 1 - Posição 2, q= 50ml/s e foto Qr000.tif.

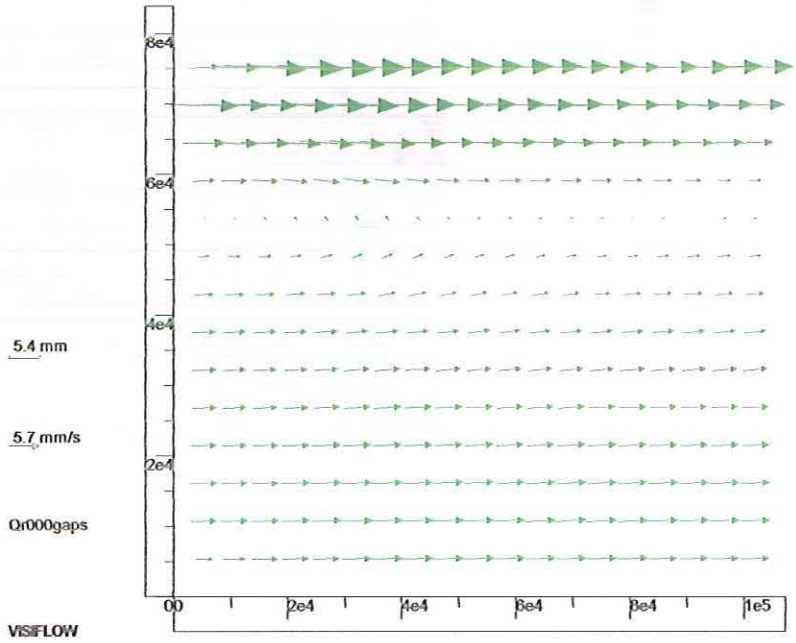


Figura 2 - Campo de velocidades para Qr000.tif e Qroo1.tif

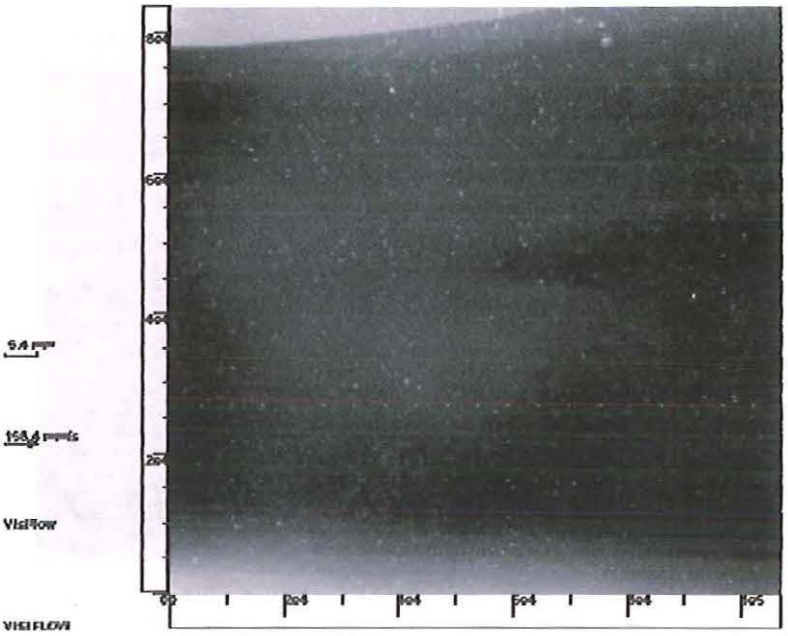


Figura 3 -posição2, q=50 ml/s e foto Qr002.tif.

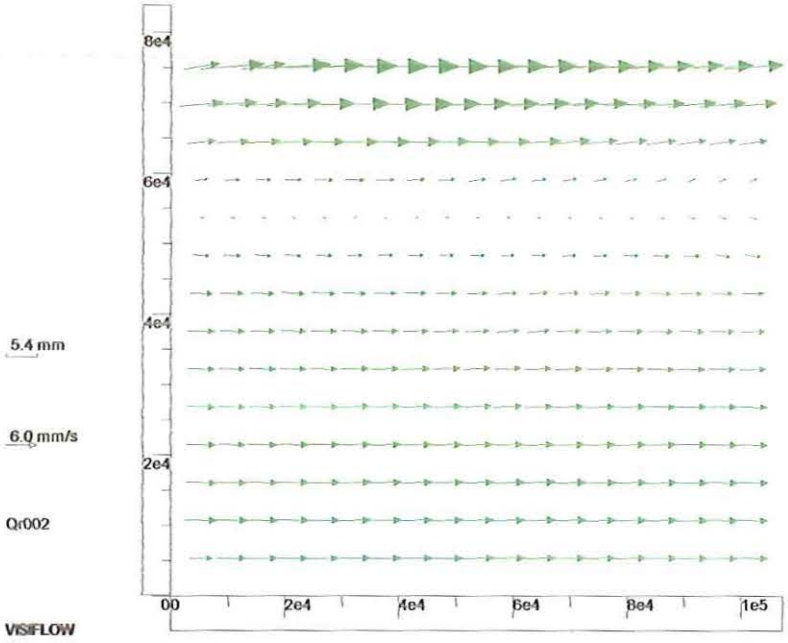


Figura 4 - Campo de velocidades para Qr001.tif e Qr002.tif.

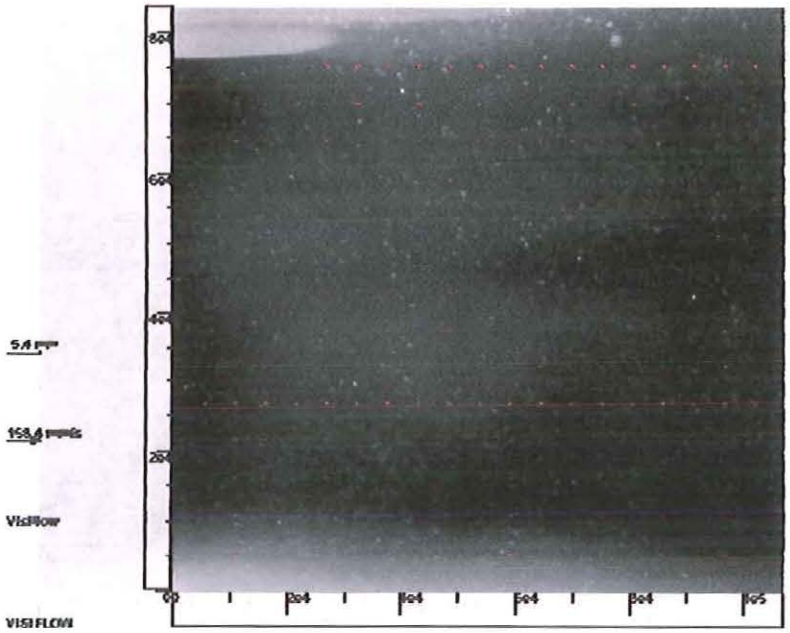


Figura 5 -posição 2, q= 50ml/s e foto Qr004.tif.

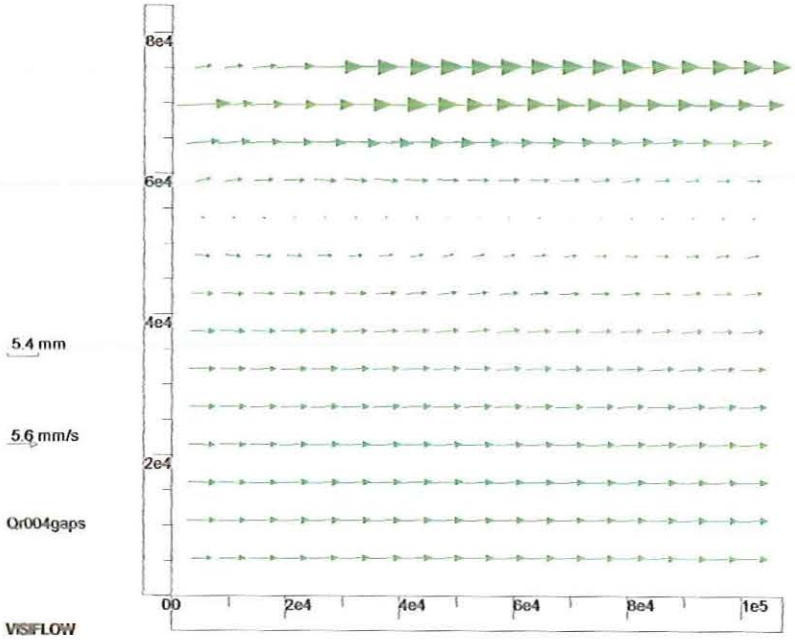


Figura 6 - Campo de velocidades para fotos Qr003.tif e Qr004.tif

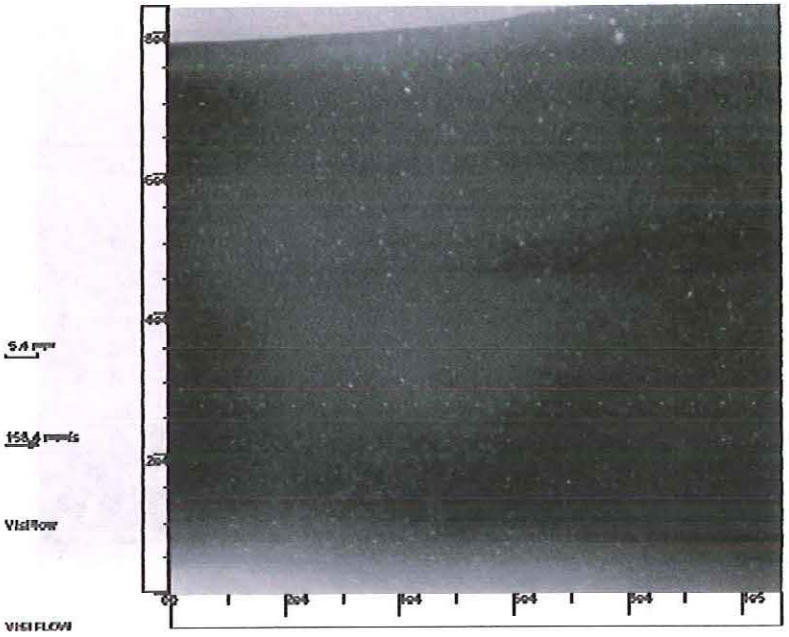


Figura 7 -posição 2, q= 50 ml/s e foto Qr006.tif.

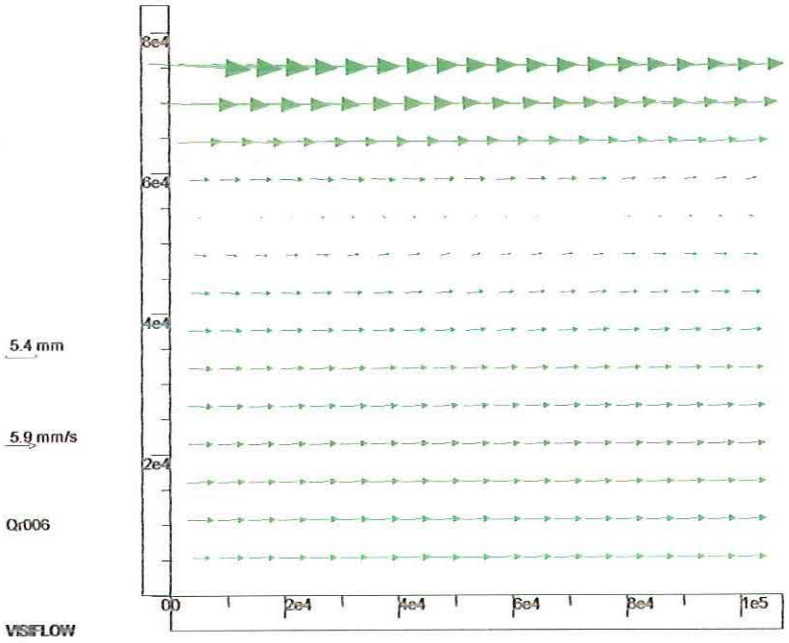


Figura 8 - Campo de velocidades para Qr005.tif e Qr006.tif.

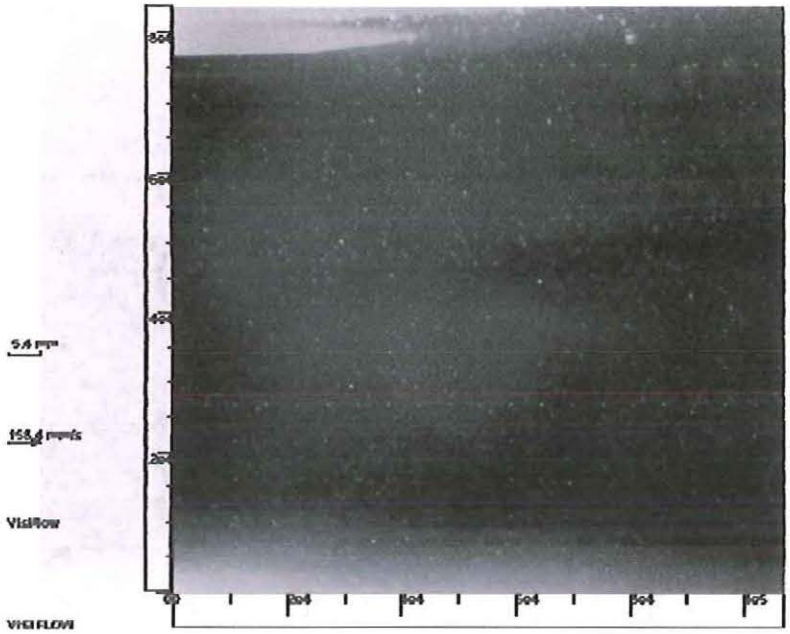


Figura 9 - Posição 2, q= 50 ml/s e Qr008.tif.

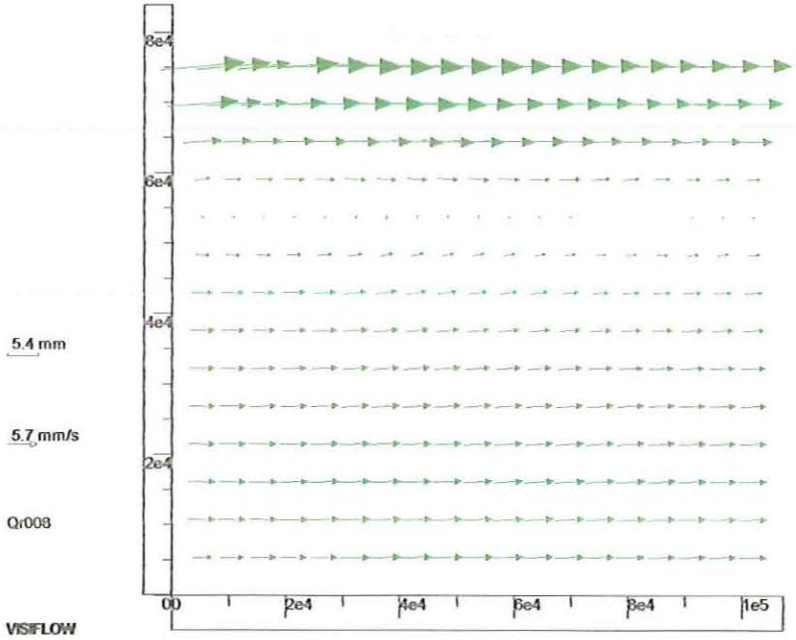


Figura 10 - Campo de velocidades para Qr007.tif e Qr008.tif.

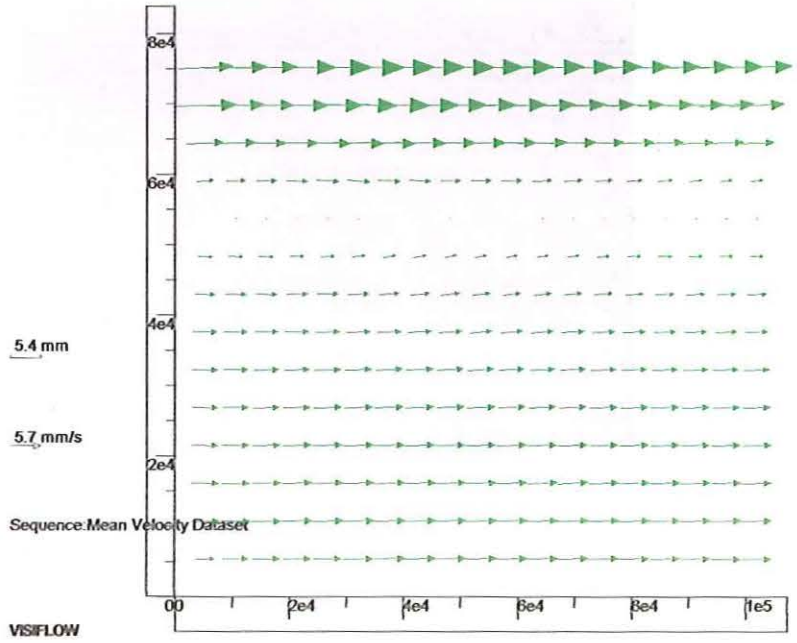


Figura 11 - Campo médio de velocidades para q=50 ml/s e posição2.

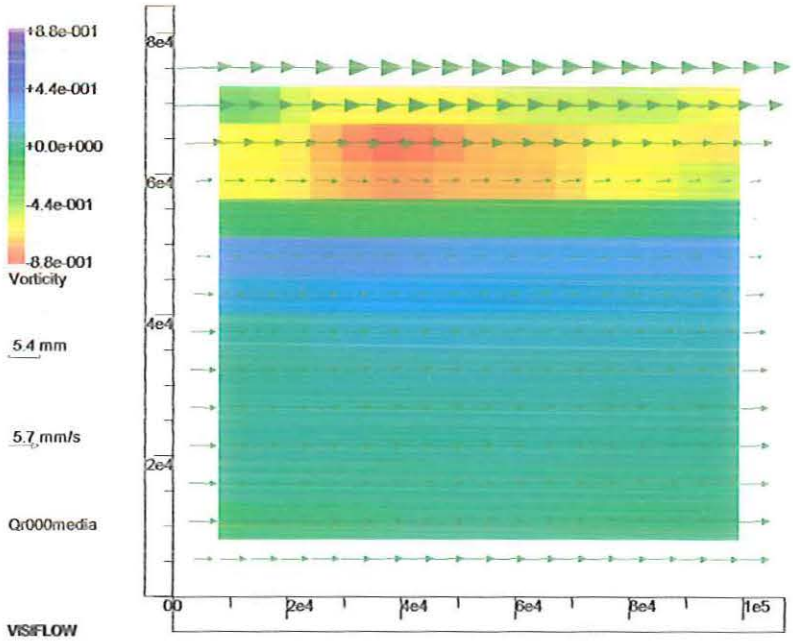


Figura 12 - Vorticidade para q= 50ml/s e posição2.

VELOCIDADES TRANSVERSAIS-VAZÃO DE 50 ML/S E POSIÇÃO 2.

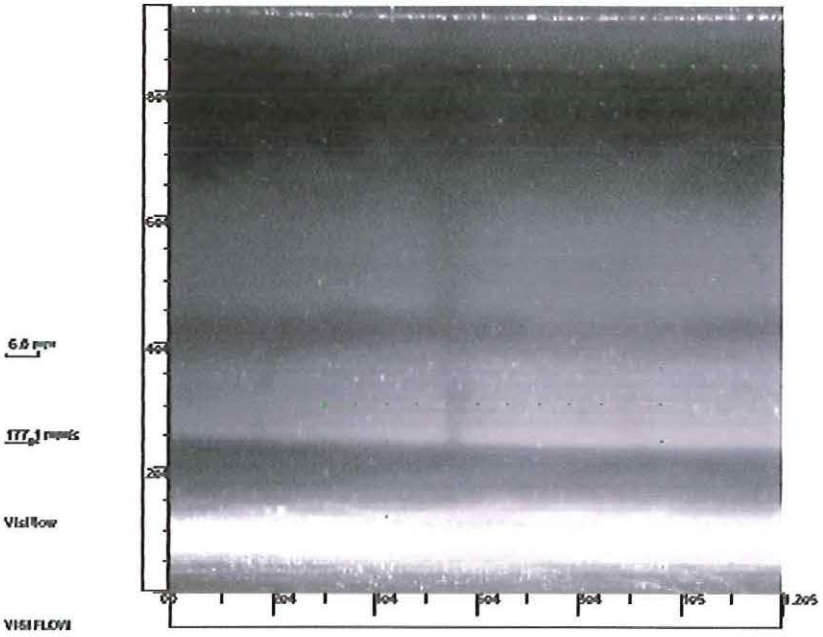


Figura 1 - Posição2, q=50 ml/s efoto qt2000.tif

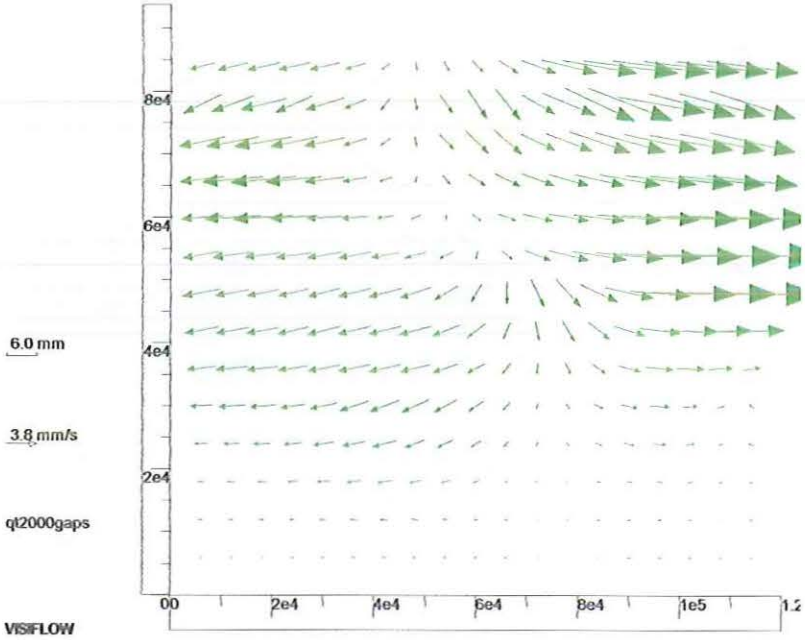


Figura 2 -Campo de velocidade para fotos qt2000.tif e qt2001.tif

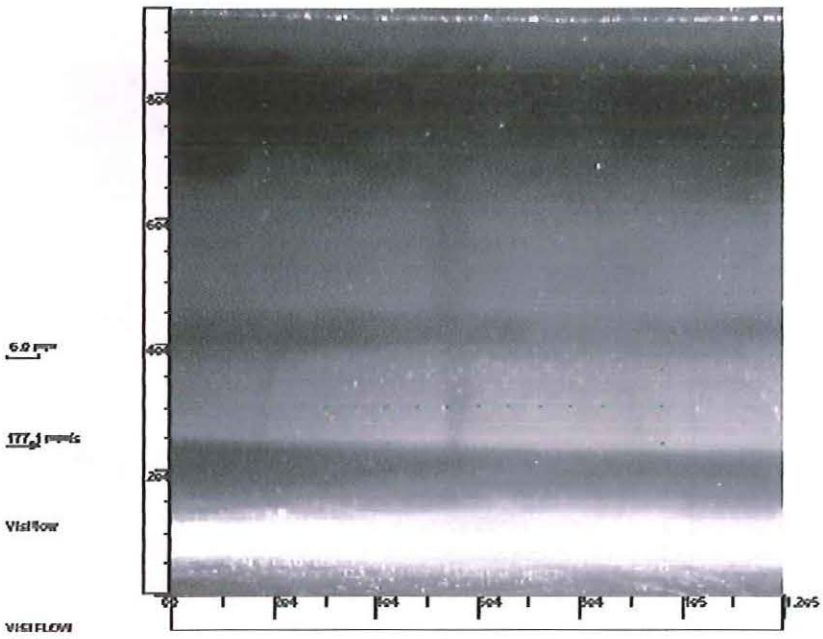


Figura 3 - Posição2, q=50 ml/s e foto qt2002.tif.

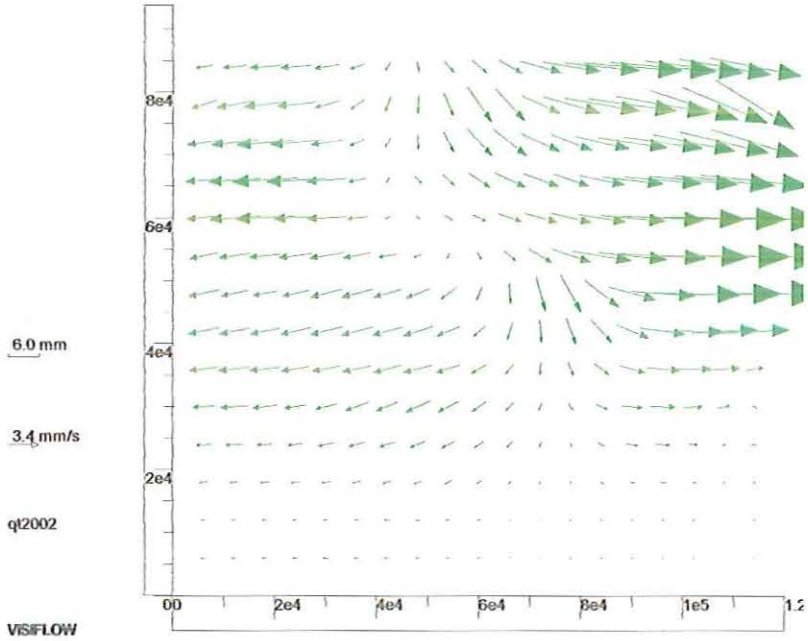


Figura 4 - Campo de velocidades para qt2001.tif e qt2002.tif.

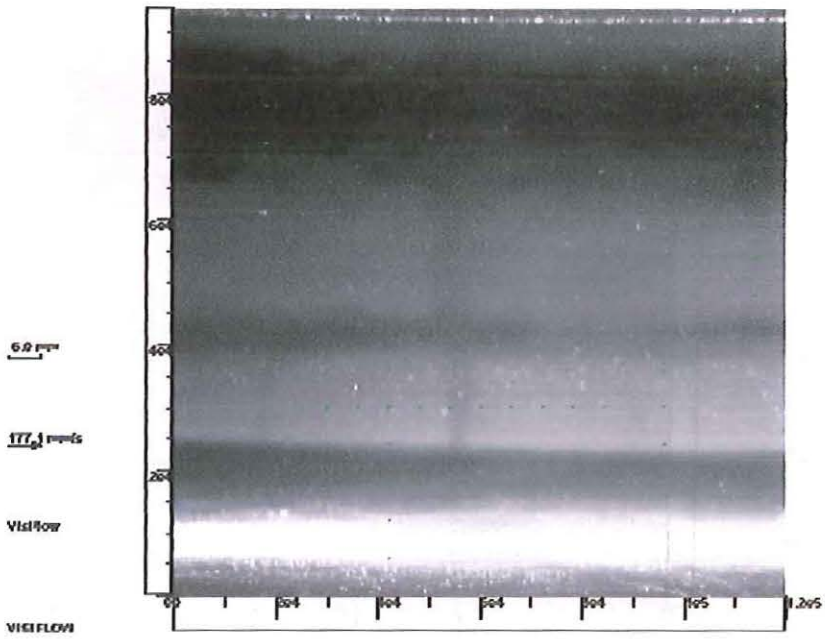


Figura 5 -posição 2, q= 50ml/s e foto qt2004.tif.

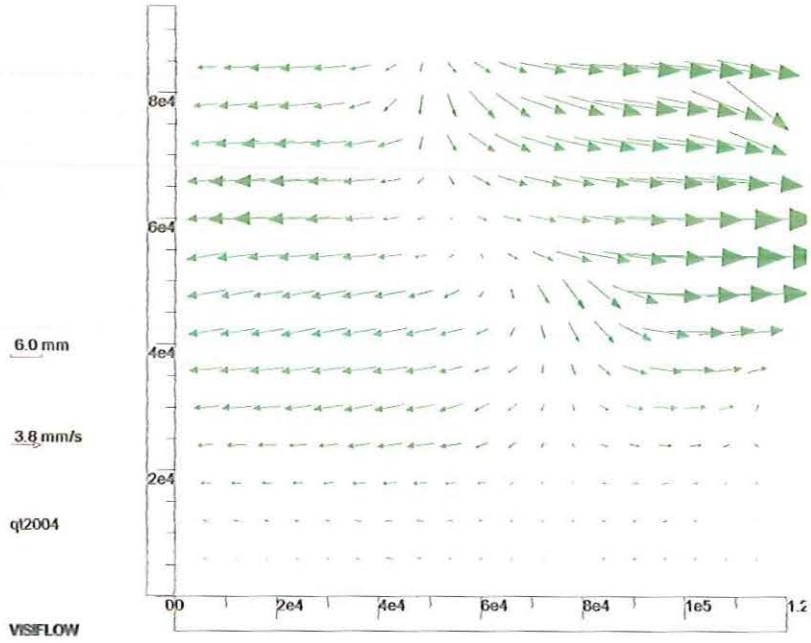


Figura 6 - Campo de velocidades para fotos qt2003.tif e qt2004.tif.

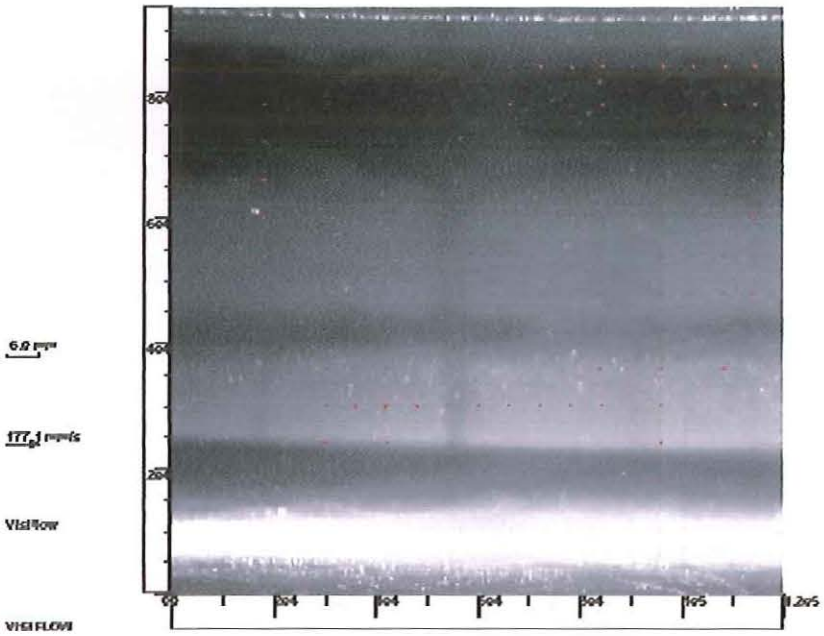


Figura 7 - posição 2, q=50ml/s e foto qt2006.tif.

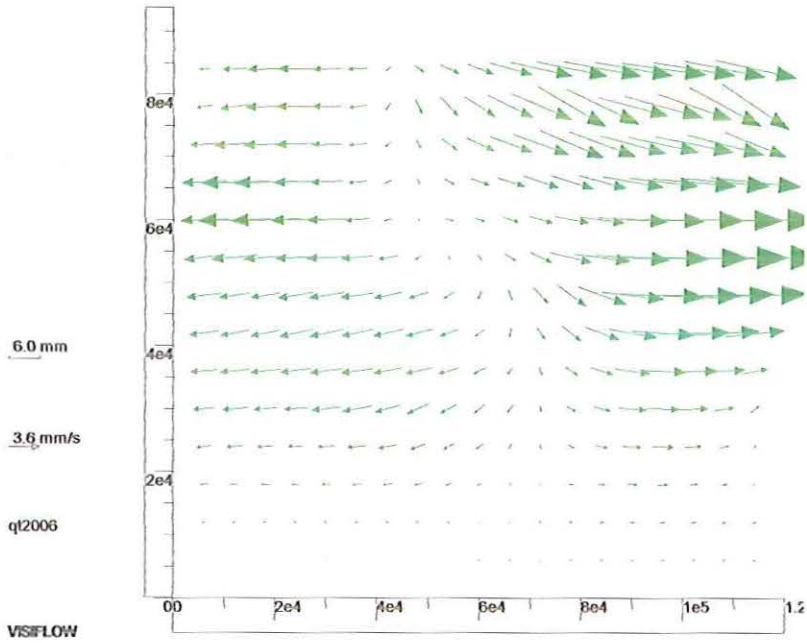


Figura 8 - Campo de velocidades para qt2005.tif e qt2006.tif.

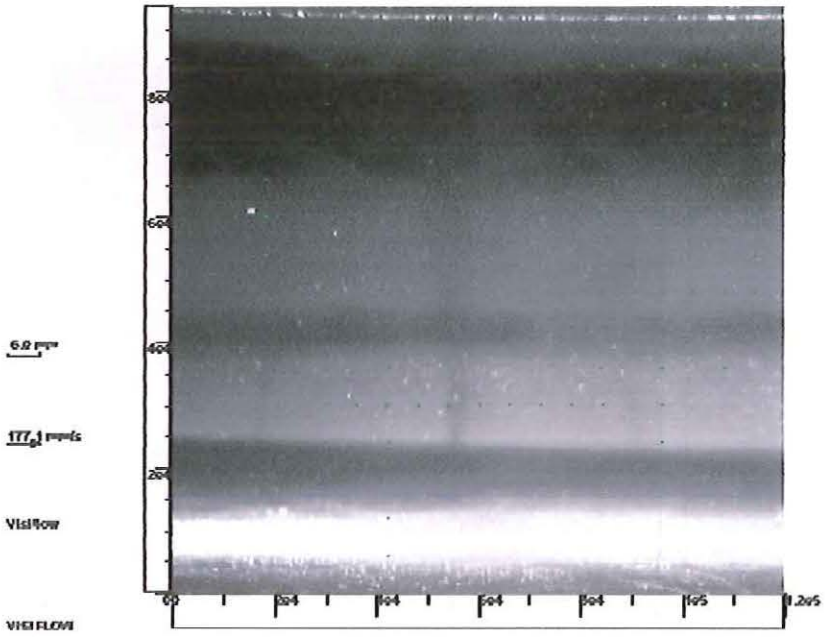


Figura 9 - posição 2, q= 50ml/s e foto qt2008.tif .

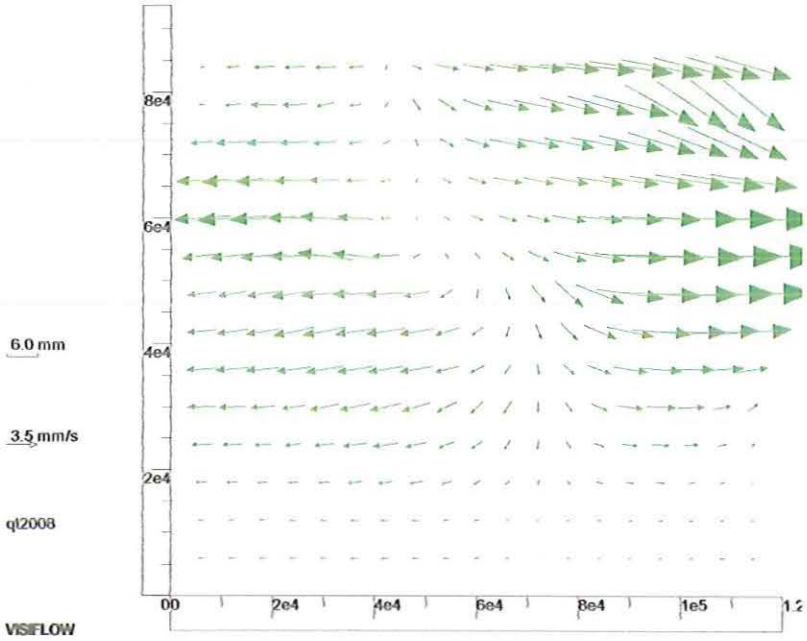


Figura 10 - campo de velocidades para qt2007.tif e qt2008.tif.

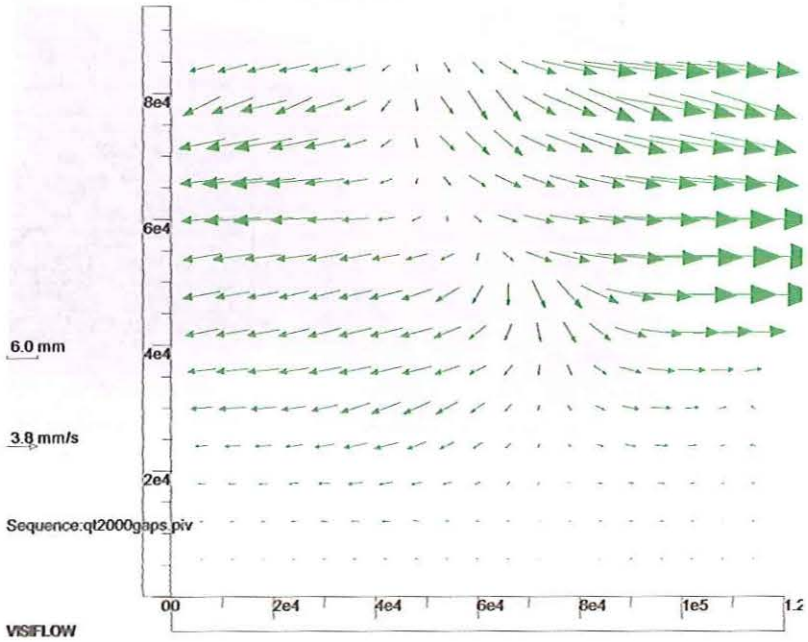


Figura 11 - Campo médio de velocidades para q= 50ml/s e posiçào2.

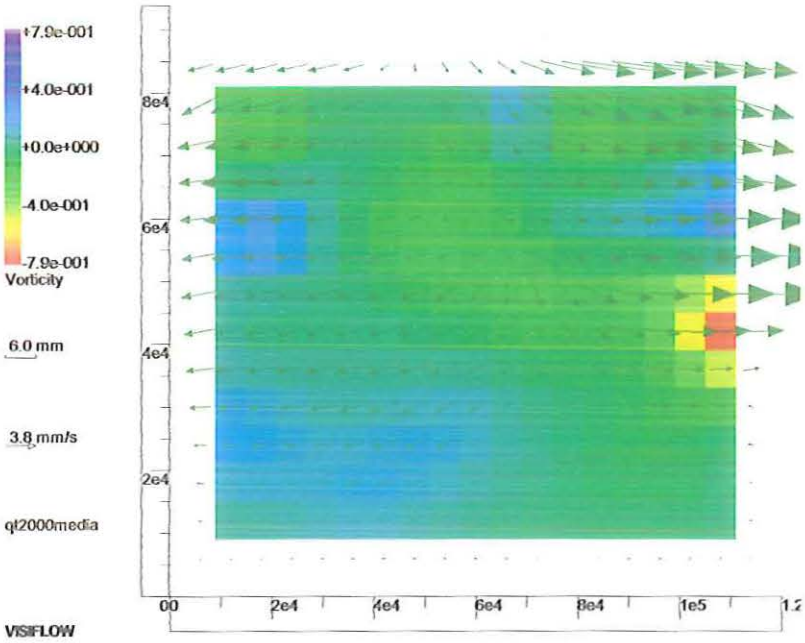


Figura 12 - Vorticidade para q=50 ml/s e posição2.

VAZÃO DE 150 ML/S-POSIÇÃO 1

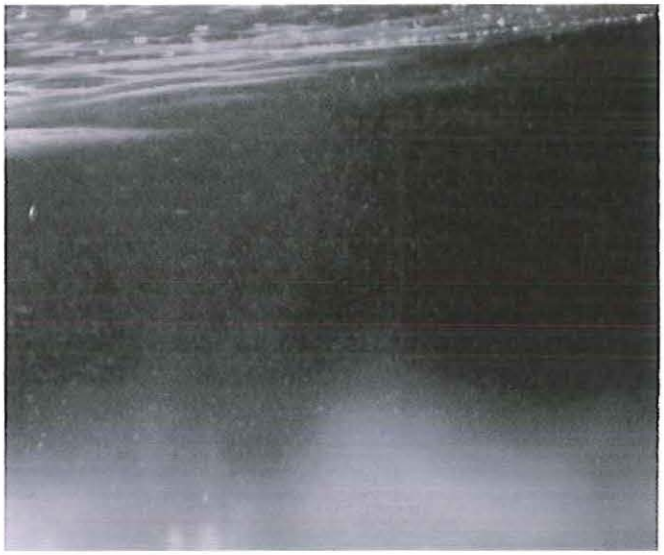


Figura 1-Posição 1 q=150 ml/s Qa2000.tif

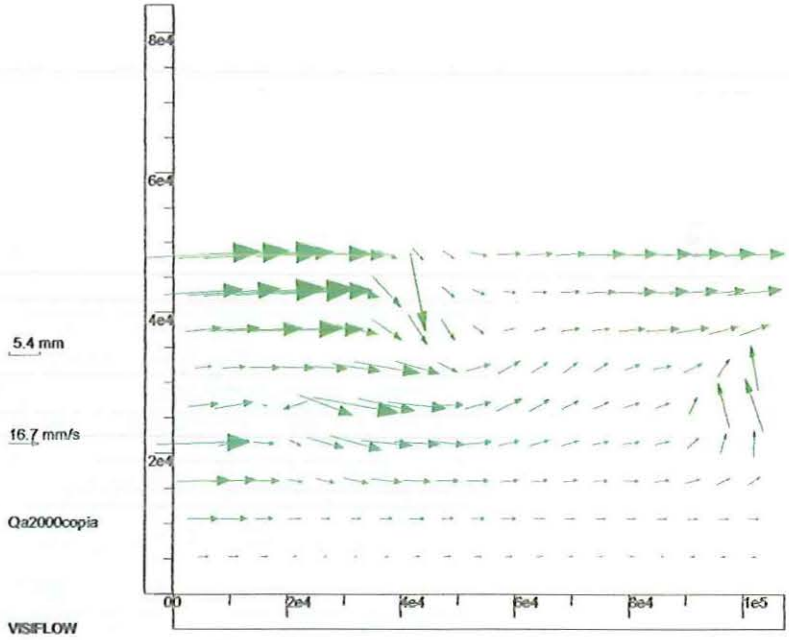


Figura 2- Campo de velocidade instantâneo da foto Qa2000.tif e Qa2001.tif

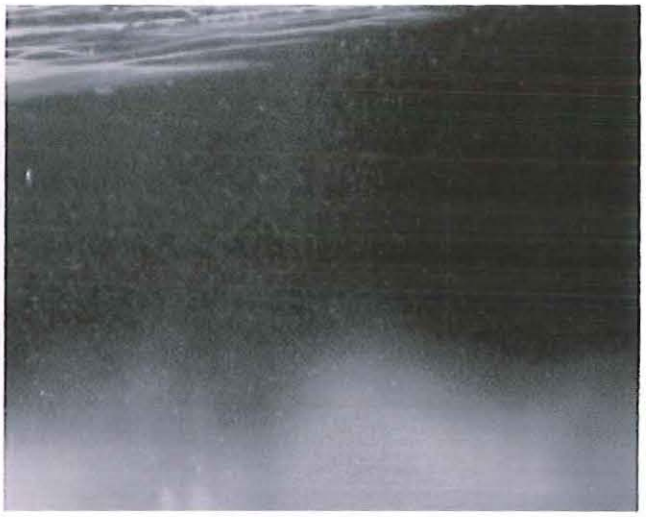


Figura 3-Posição 1 q – 150ml/s Qa2002.tif

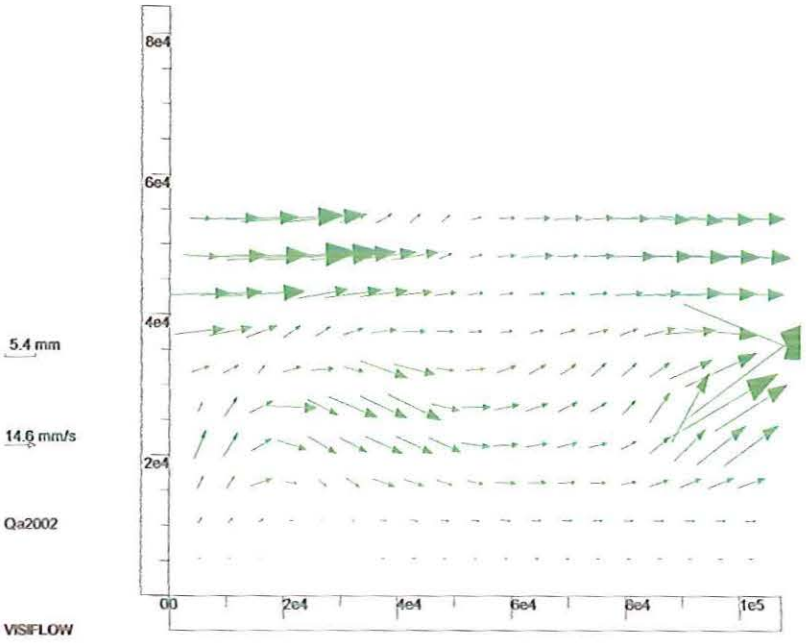


Figura 4- Campo de velocidades para Qa2001.tif e Qa2002.tif

Figura 5 - Posição 1 q= 150ml/s Qa2004.tif

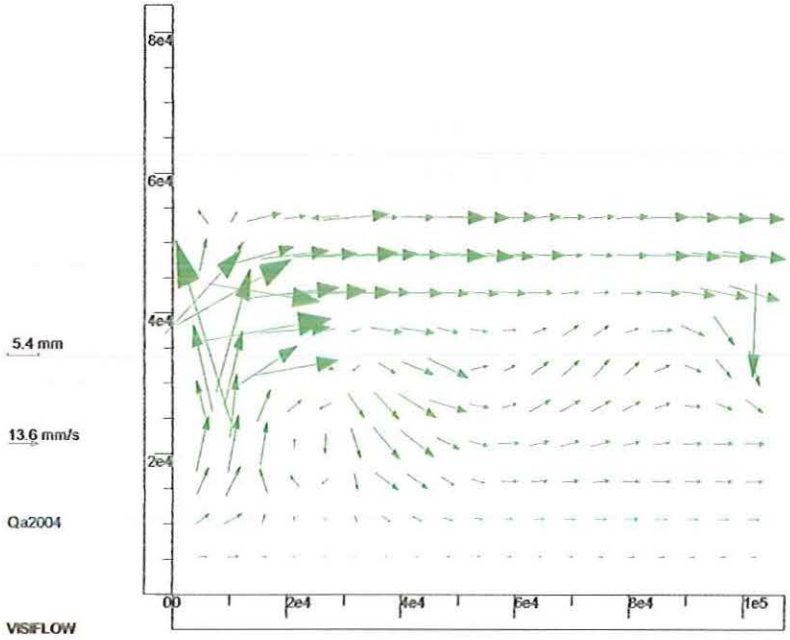


Figura 6 - Campo de velocidades para Qa2003.tif eQa2004.tif

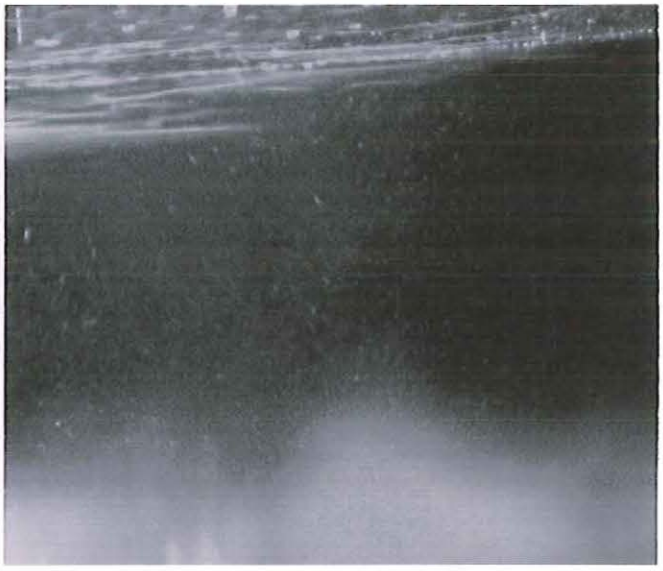


Figura 7 - Posição 1 q= 150 ml/s Qa2006.tif

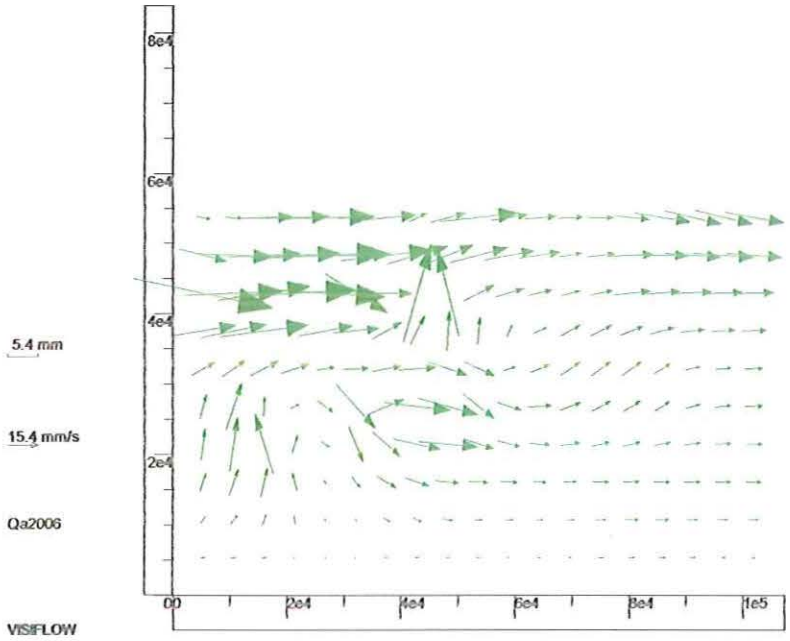


Figura 8 - Campo de velocidades para Qa2005.tif eQa2006.tif

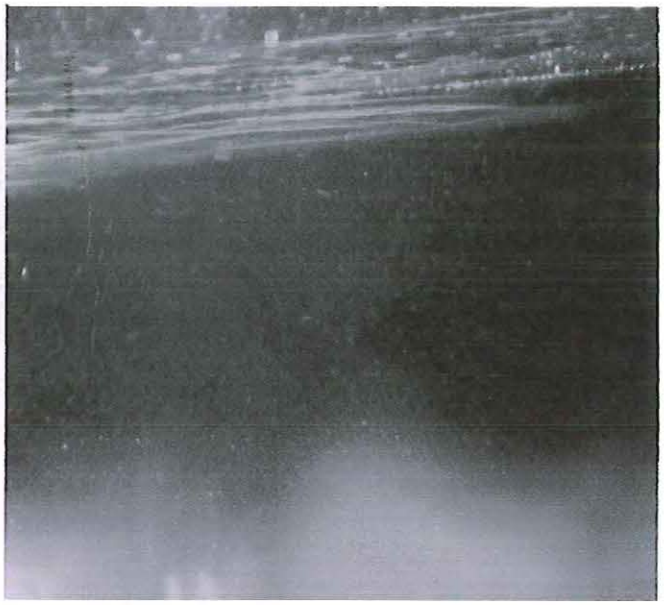


Figura 9 - posição 1 q= 150 ml/s e qa2008.tif

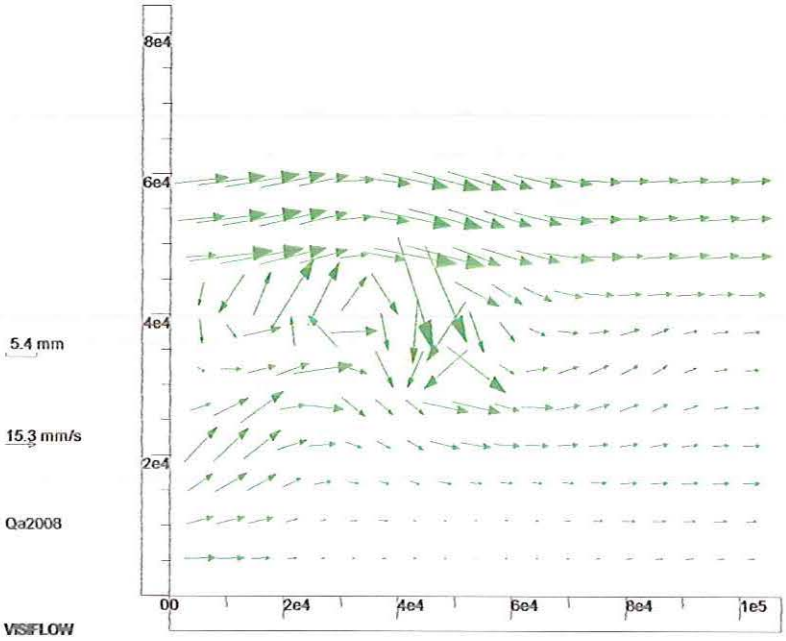


Figura 10 - Campo de velocidades para Qa2007.tif e Qa2008.tif

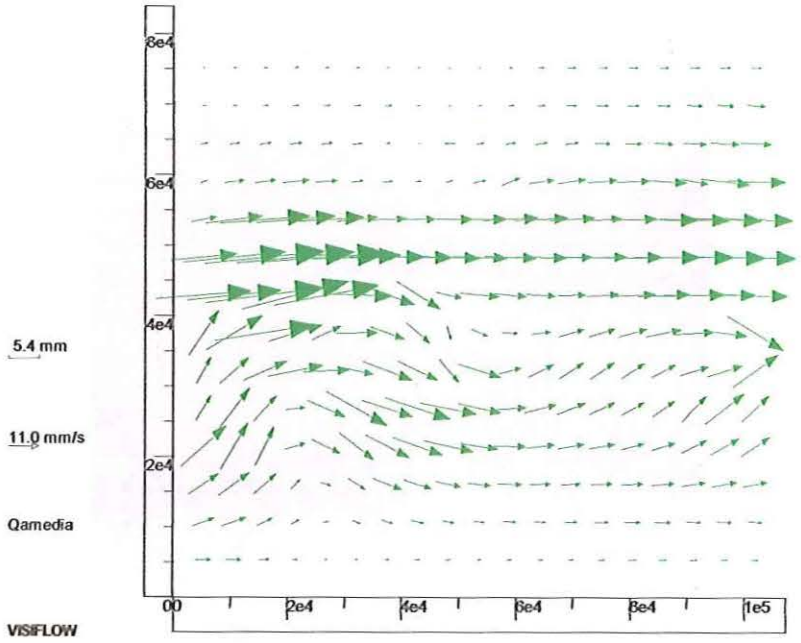


Figura 11 - Campo médio de velocidades para q= 150ml/s e posição 1.

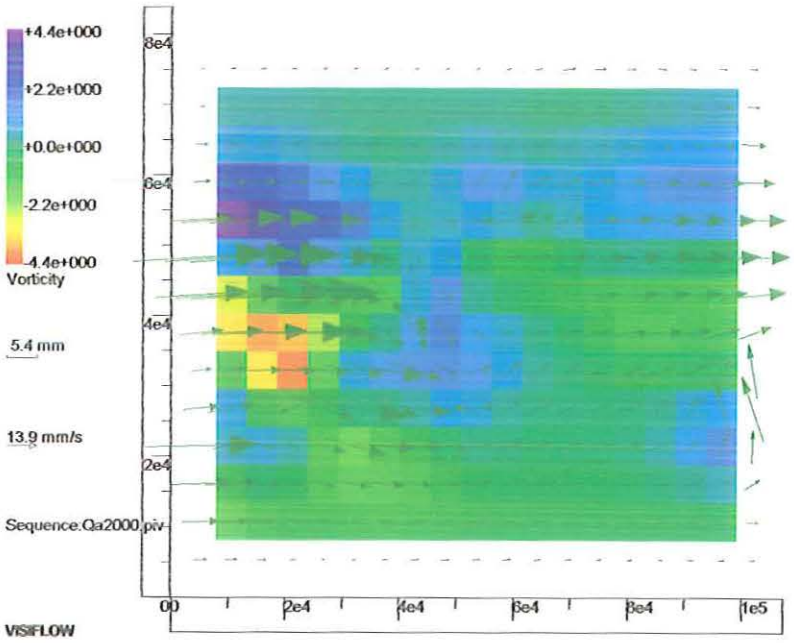


Figura 12 - Vorticidade para q=150ml/s e posição 1.

VAZÃO DE 150 ML/S E POSIÇÃO 2.

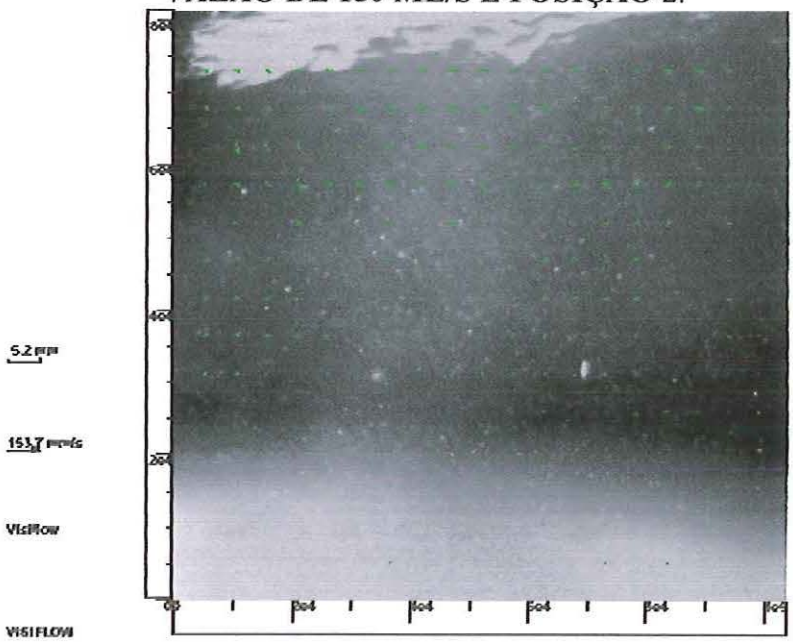


Figura 99 - Posição 2, q= 150 ml/s e sold000.tif

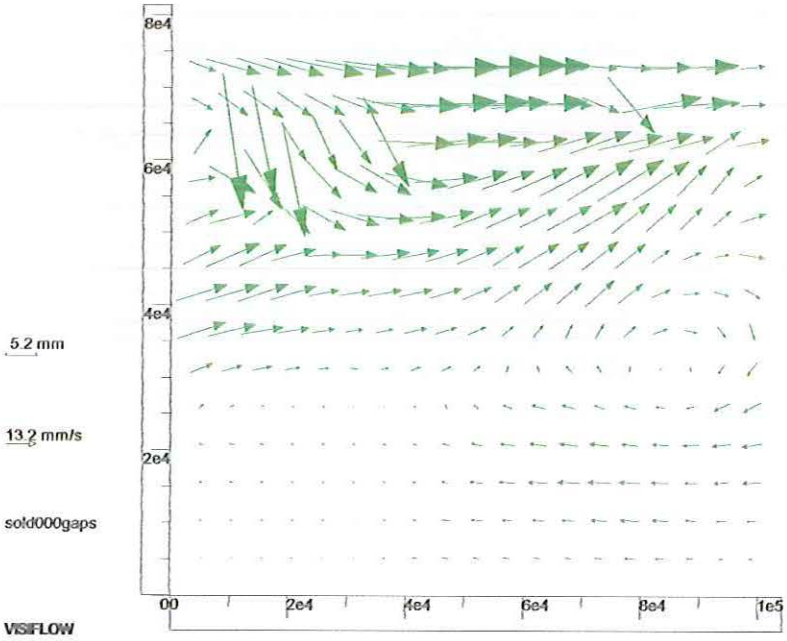


Figura 100 - Campo de velocidades para sold000.tif e sold001.tif

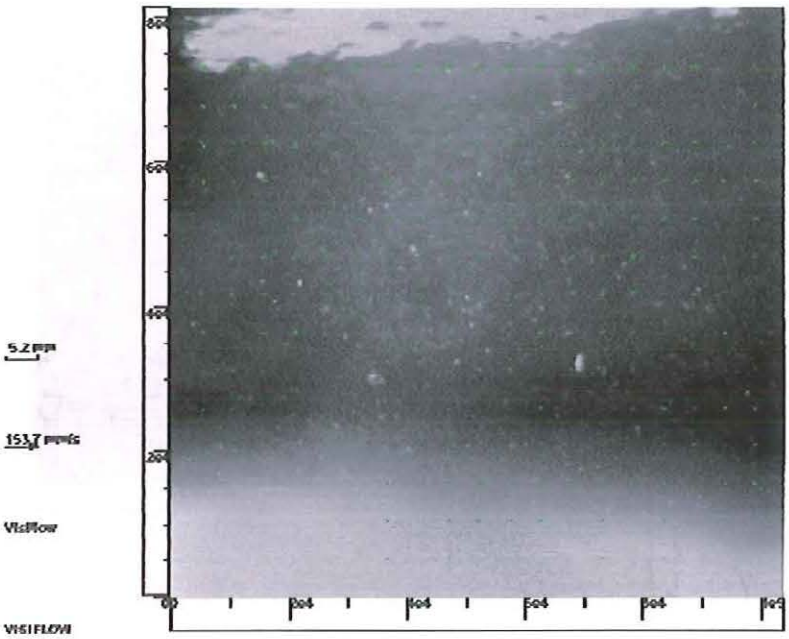


Figura 101 -Posição 2, q= 150ml/s e foto sold002.tif

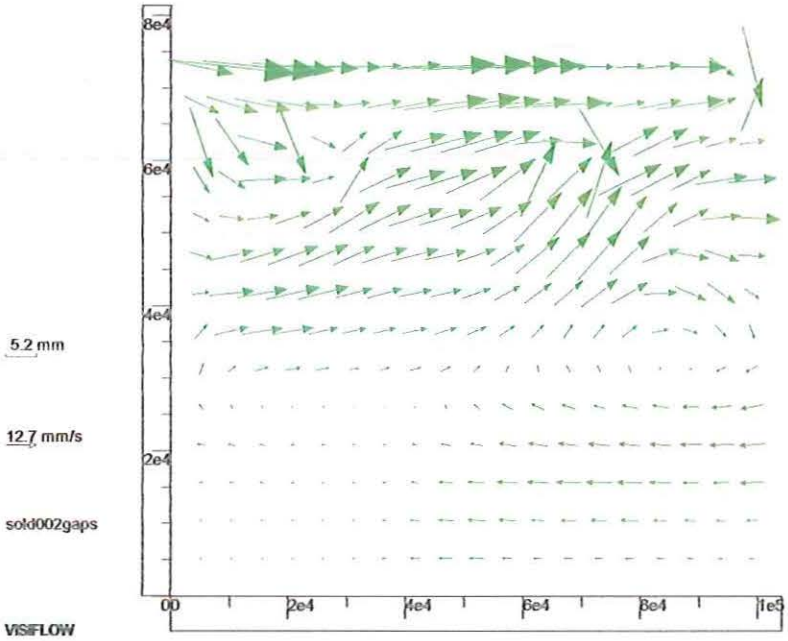


Figura 102 - Campo de velocidades para q= 150ml/s, posição 2 e fotos sold001.tif e sold002.tif

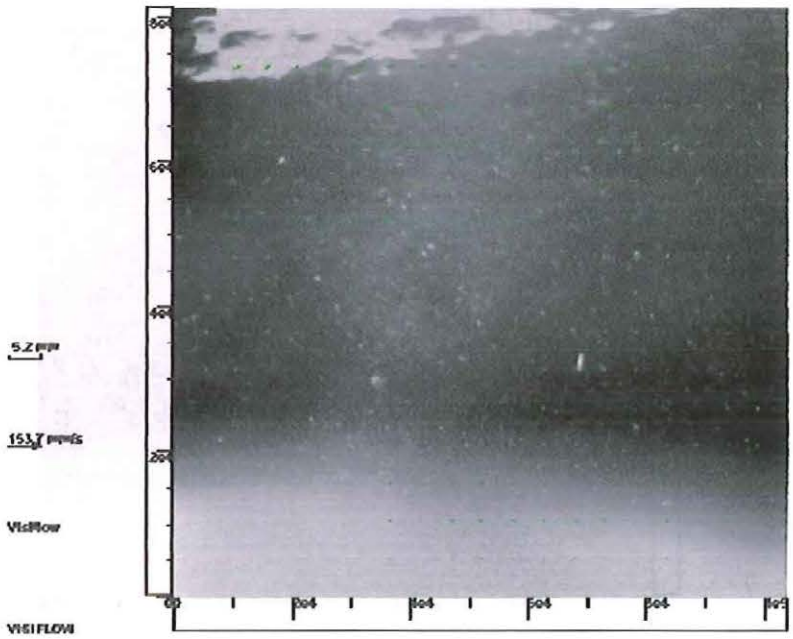


Figura 103 - Posição2, q= 150ml/s e foto sold004.tif

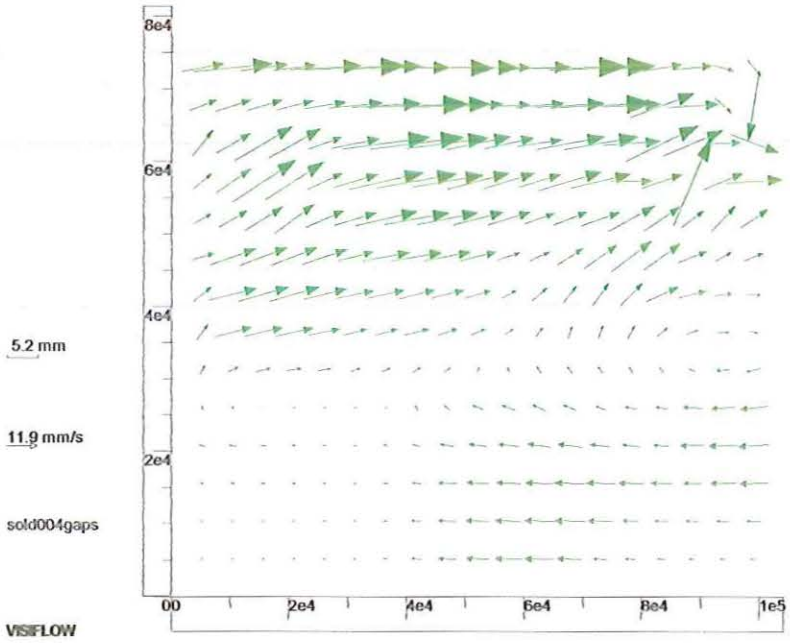


Figura 104 - Campo de velocidades para sold003.tif e sold004.tif

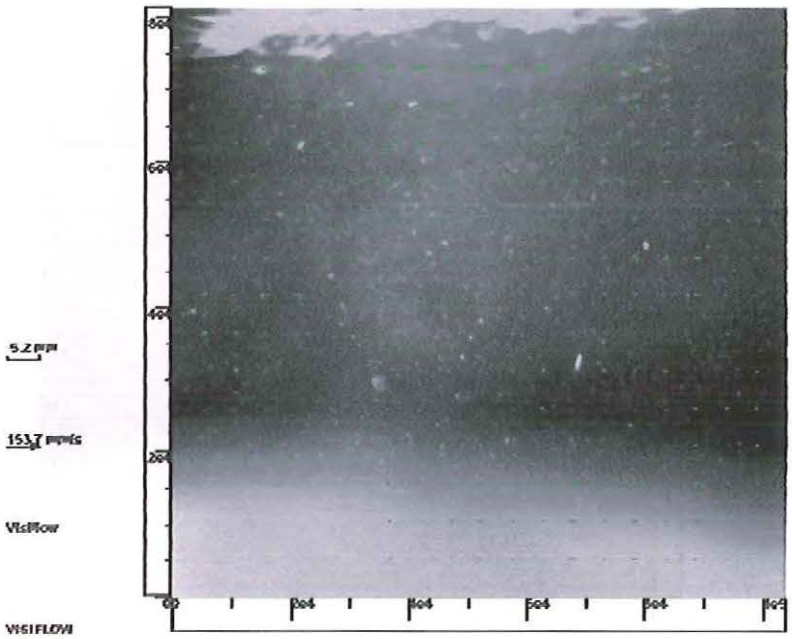


Figura 105 - Posição2, q=150 ml/s e foto sold006.tif.

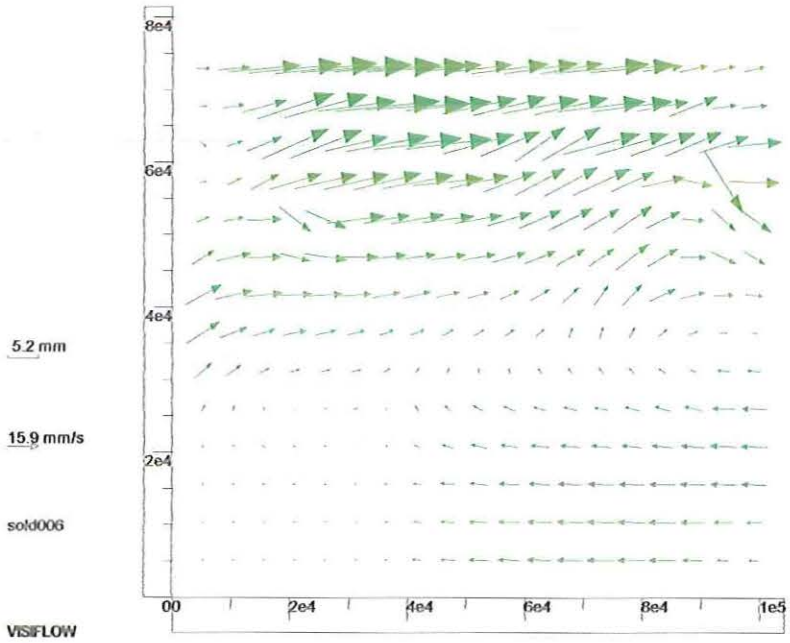


Figura 106 - Campo de velocidades para sold005.tif e sold006.tif.

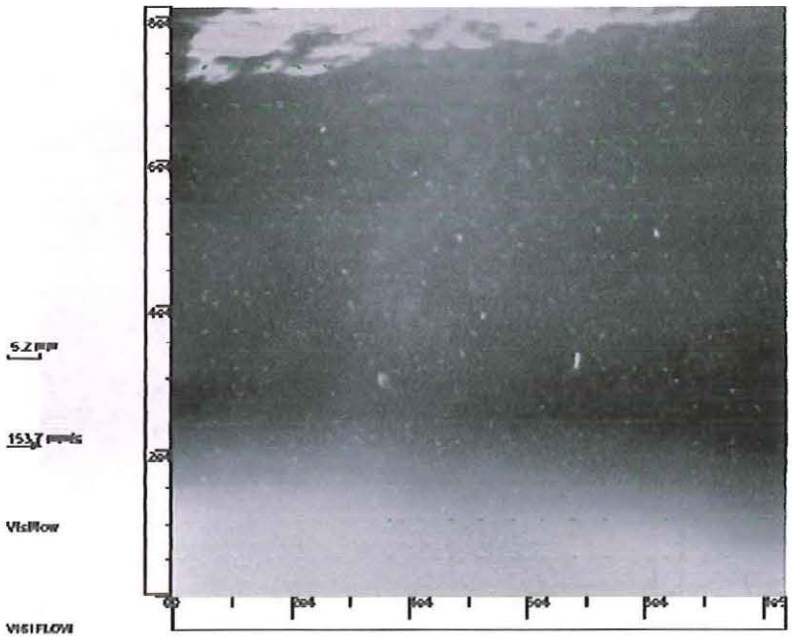


Figura 107 - posição2, q=150 ml/s e foto sold008.tif

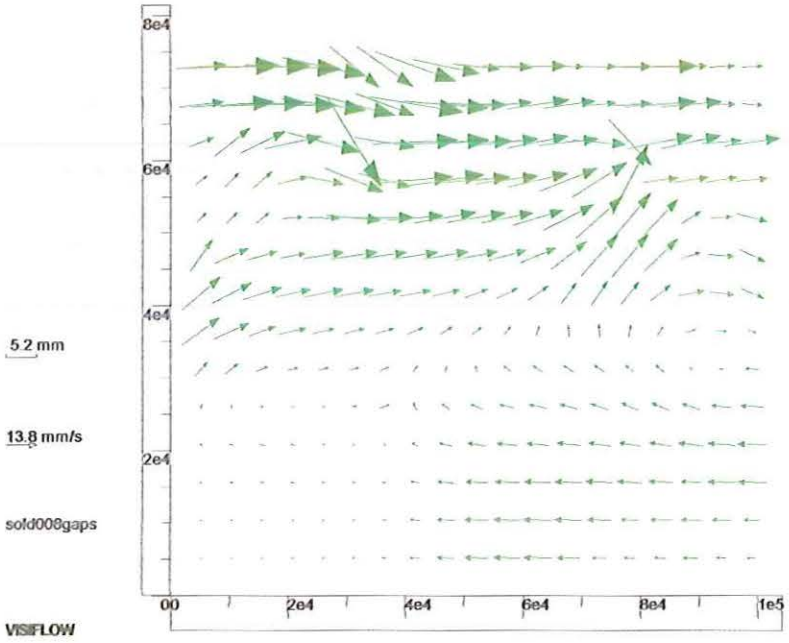


Figura 108 -Campo de velocidades para sold007.tif e sold008.tif

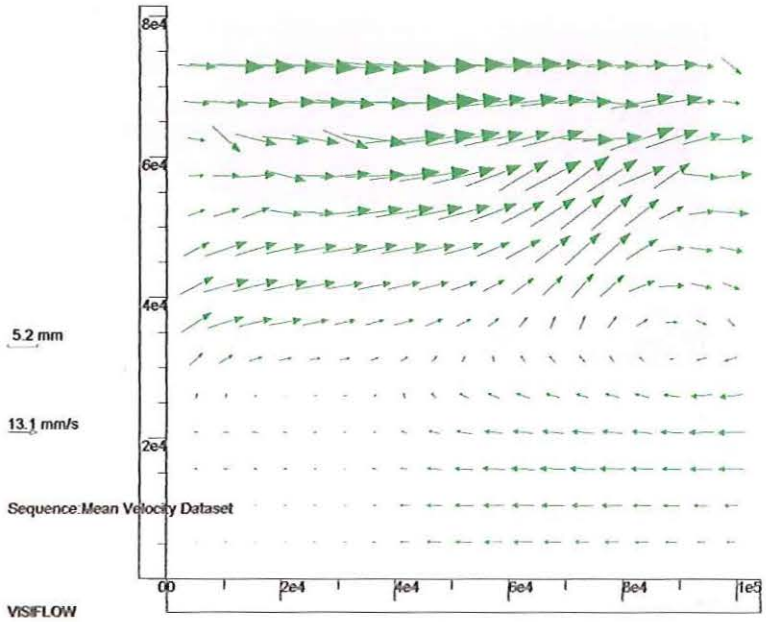


Figura 109 -Campo médio de velocidades para q=150 ml/s e posição 2.

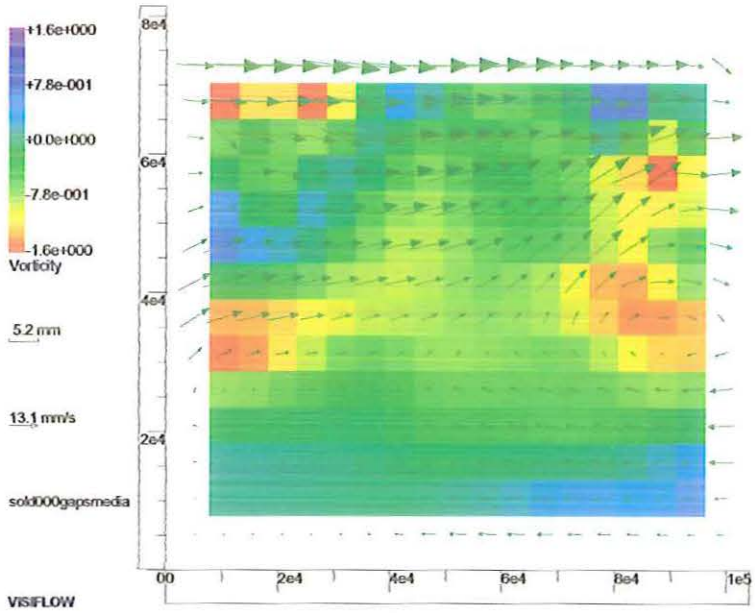


Figura 110 - Vorticidade para q= 150ml/s e posição2.

VAZÃO DE 150 ML/S E POSIÇÃO 2.

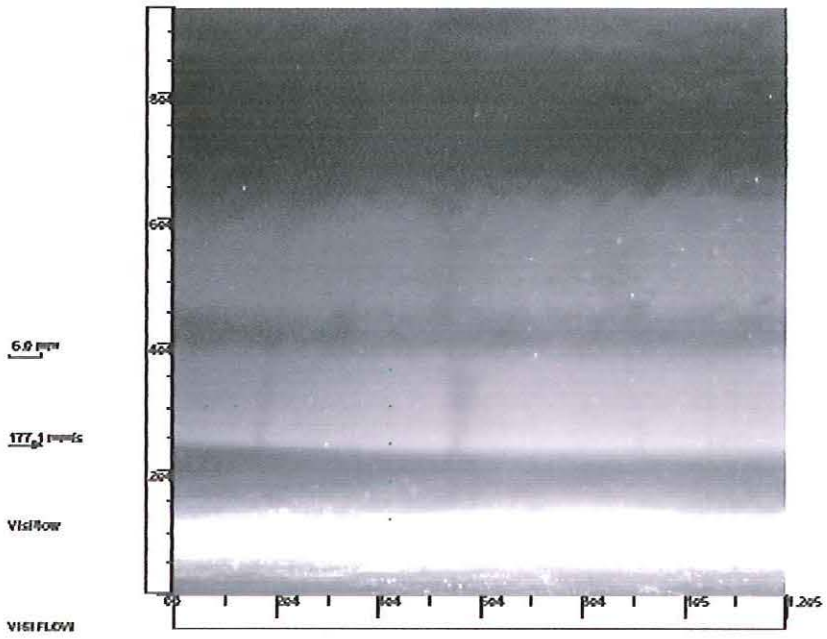


Figura 1 -Posição 2, q = 150ml/s e foto qt1000.tif

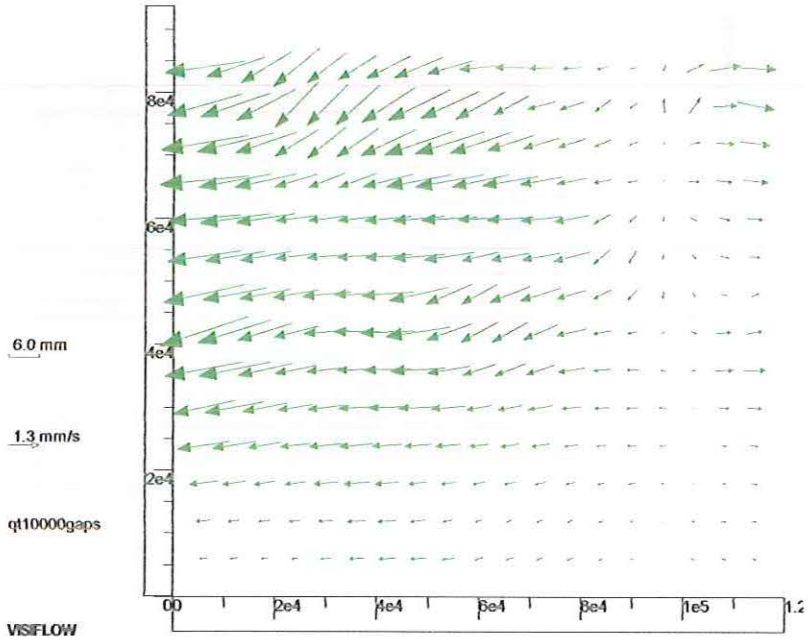


Figura 2 –Campo de velocidades para fotos qt1000.tif e qt1001.tif

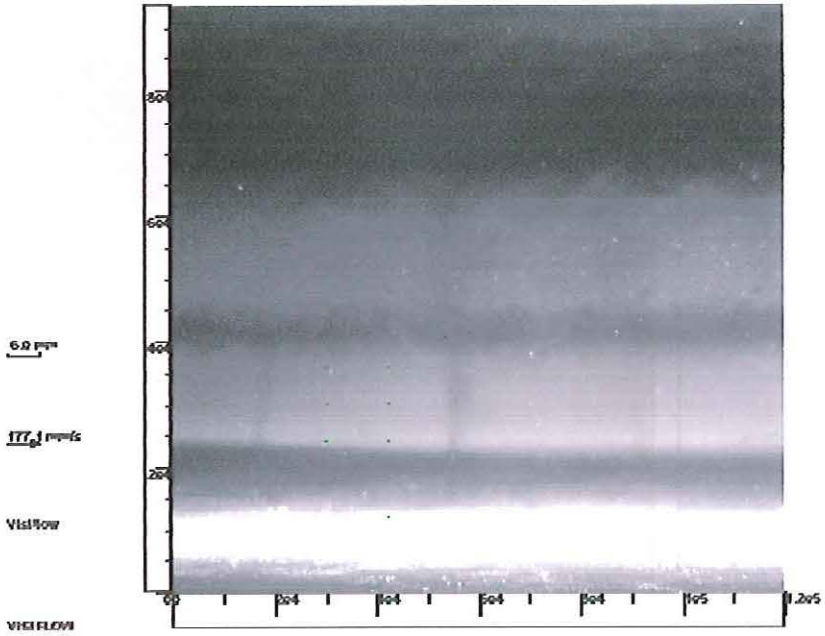


Figura 3 - Posição 2, q = 150ml/s e foto qt1002.tif

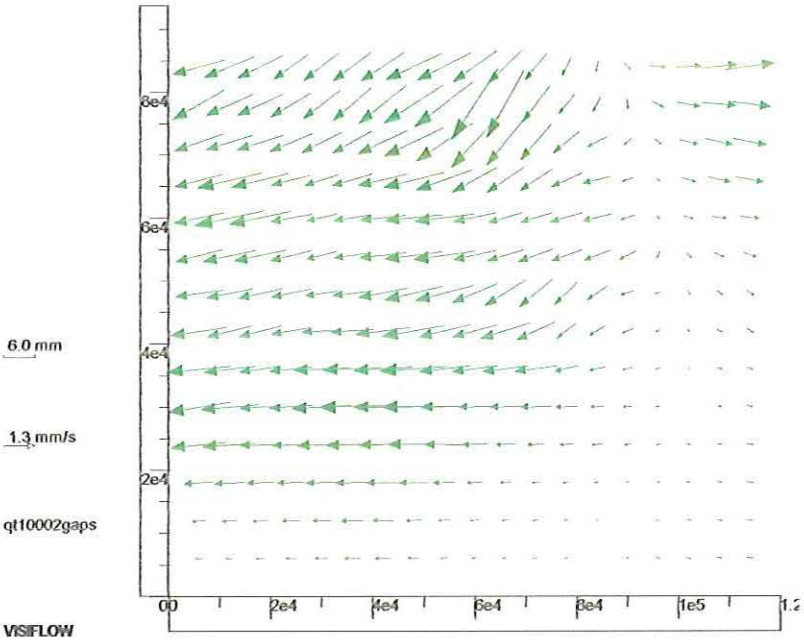


Figura 4 – Campo de velocidades para fotos qt1001.tif e qt1002.tif

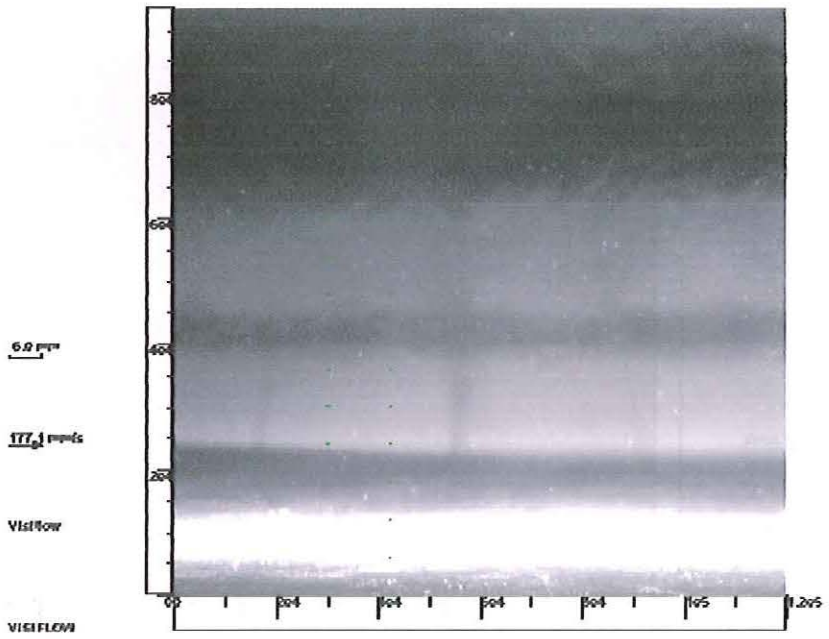


Figura 5 - Posição 2, q = 150ml/s e foto qt1004.tif

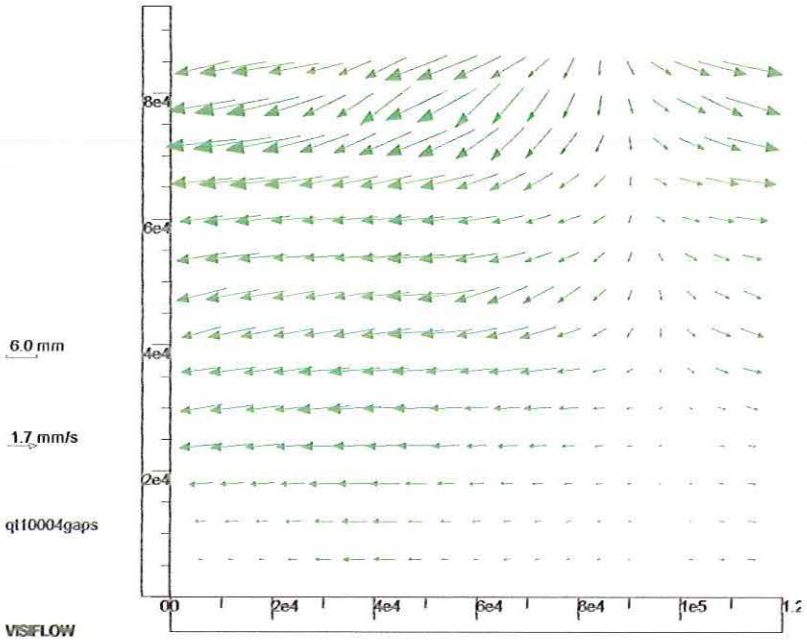


Figura – 6 – Campo de velocidades para fotos qt1003.tif e qt1004.tif.

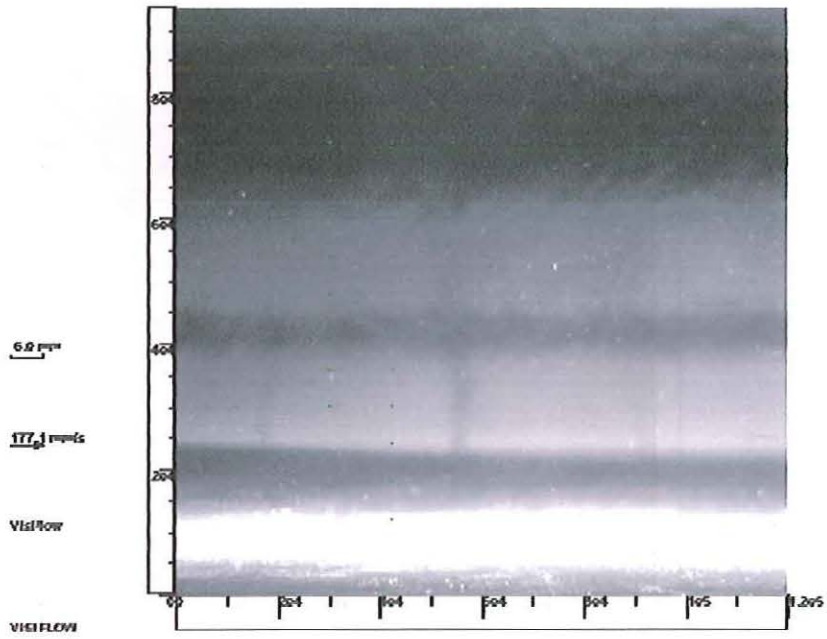


Figura 7 - Posição 2, q = 150ml/s e foto qt1006.tif

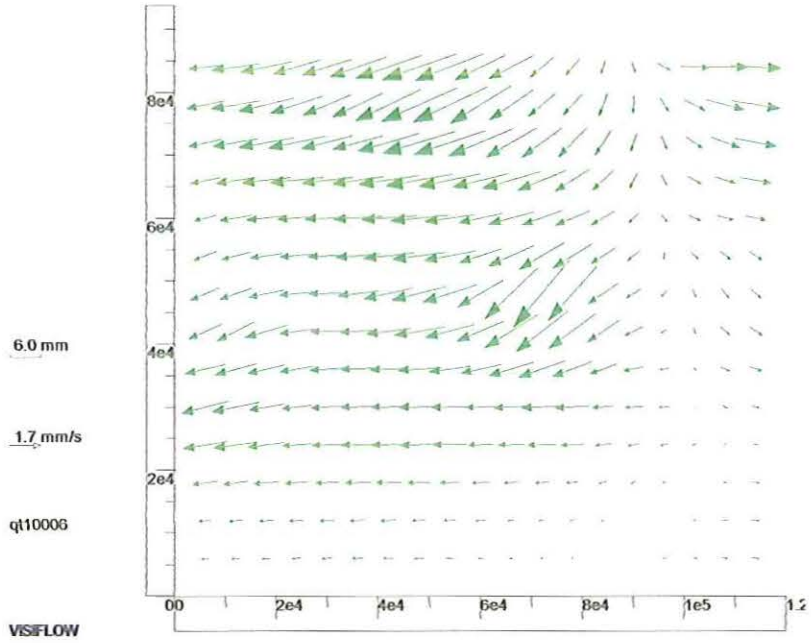


Figura 8 – Campo de velocidades para fotos qt1005.tif e qt1006.tif

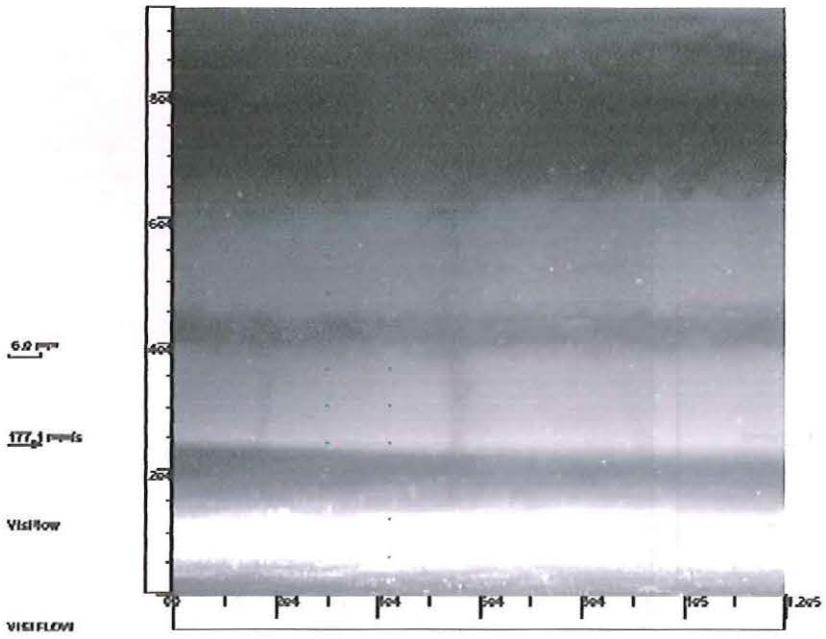


Figura 9 - Posição 2, q = 150ml/s e foto qt1008.tif

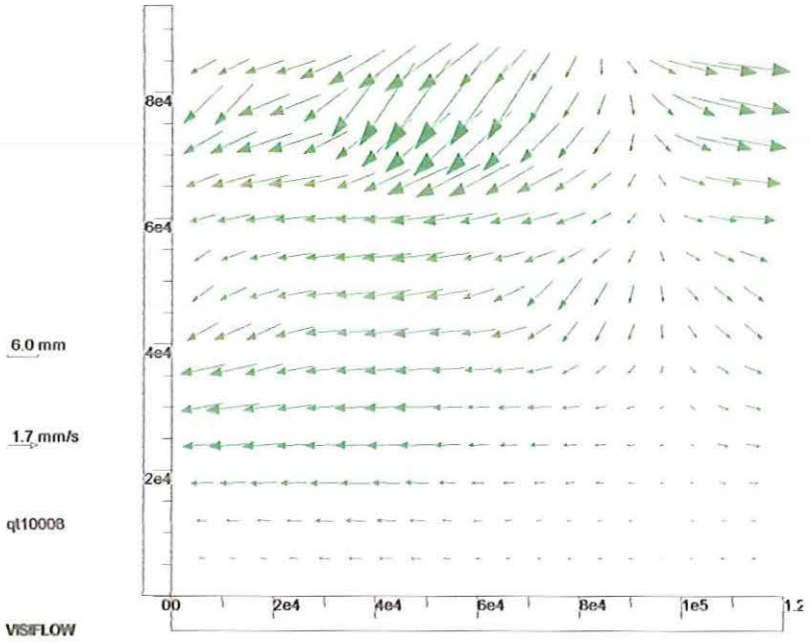


Figura 10 – Campo de velocidades para fotos qt1007.tif e qt1008.tif

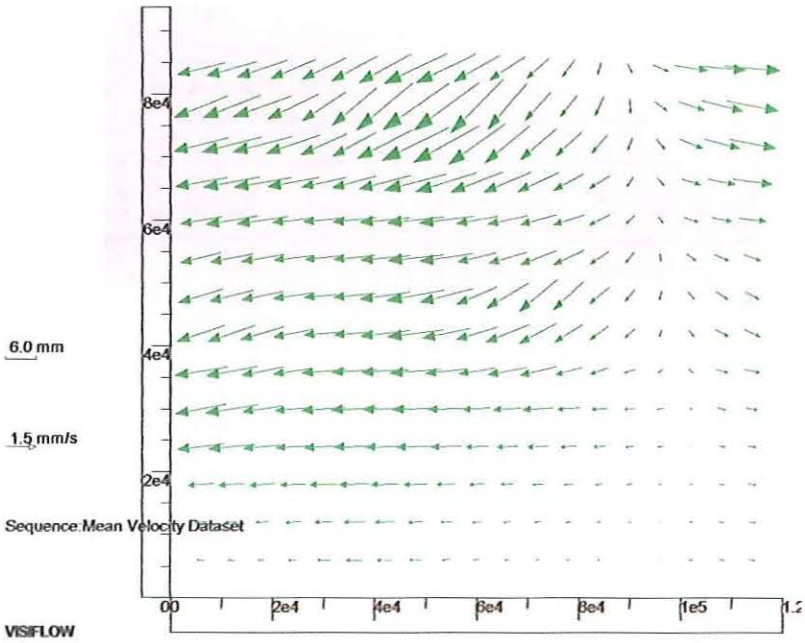


Figura 11 – Campo médio de velocidades transversais para q=150ml/s e posição 2.

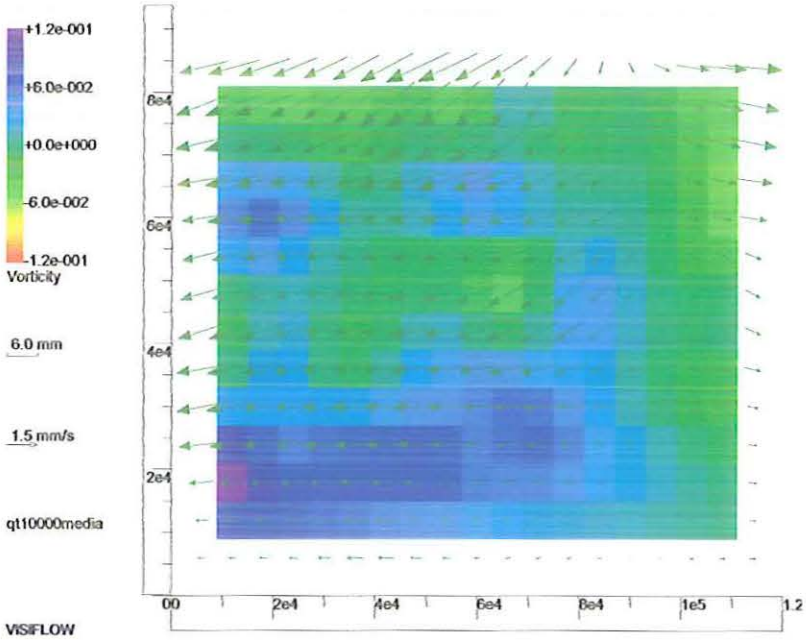


Figura 12 -Vorticidade para q=150ml/s e posição2.

VAZÃO DE 300 ML/S E POSIÇÃO 1

Figura 1-Posição 1 q=300 ml/s Vc000.tif

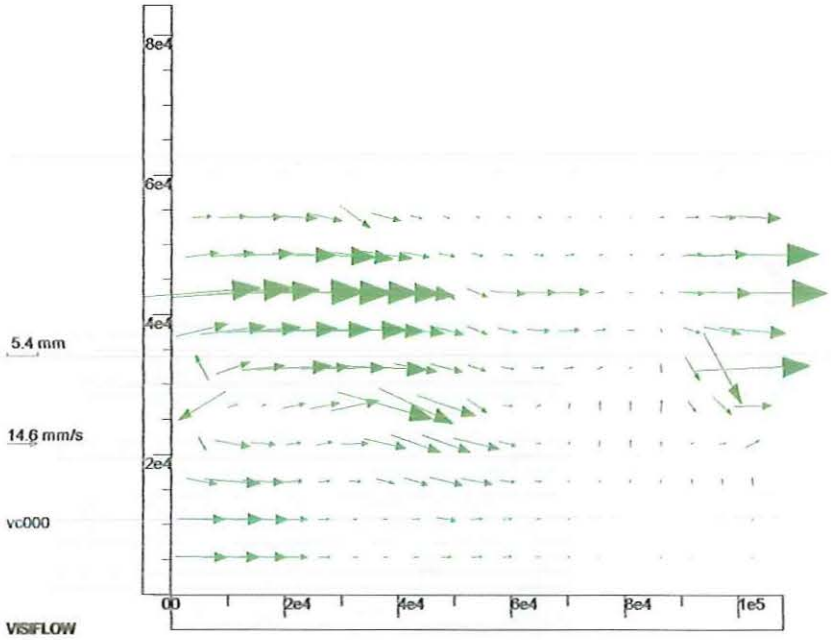


Figura 2 - Campo de velocidades para Vc000.tif e Vc001.tif

Figura 3- Posição 1, q=300 ml/s Vc002.tif

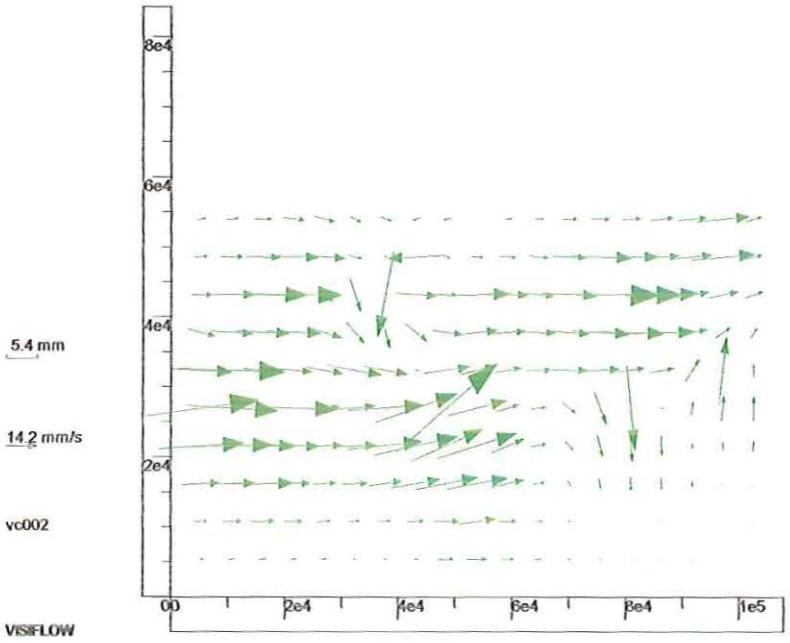


Figura 4 - Campo de velocidades para Vc001.tif e Vc002.tif

Figura 5- Posição 1, q=300ml/s e Vc004.tif

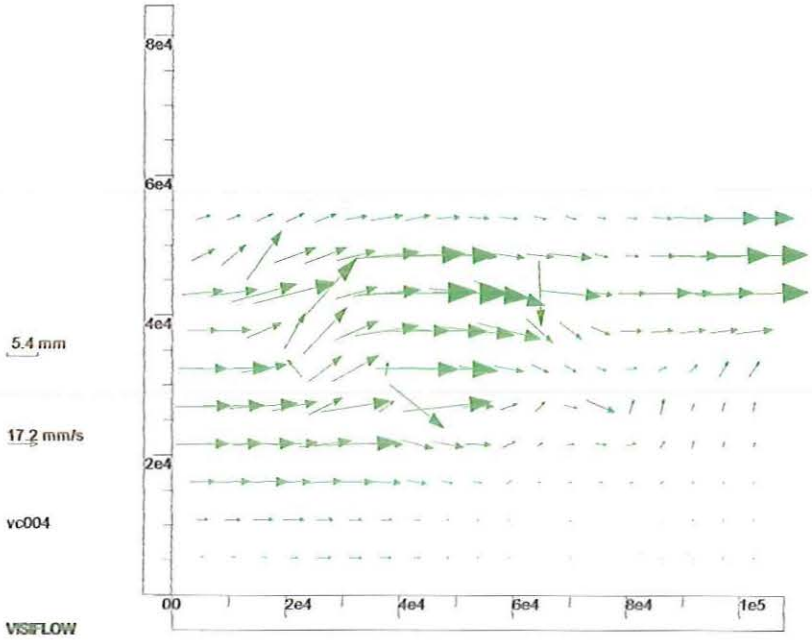


Figura 6 - Campo de velocidades para Vc003.tif e Vc004.tif

Figura 7 -Posição 1, q=300ml/s e Vc006.tif

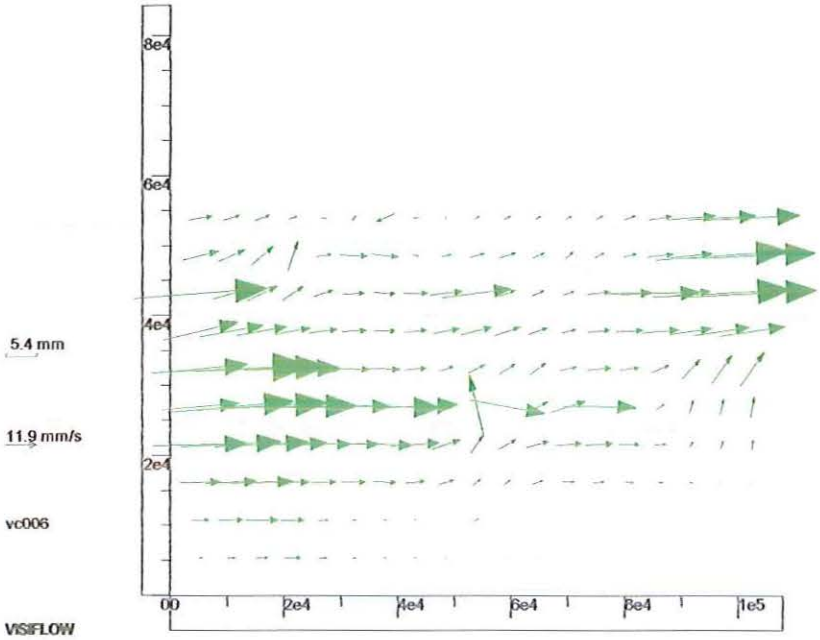


Figura 8 -Campo de velocidades para Vc005.tif e Vc006.tif

Figura 9 - Posição 1, q=300ml/s e Vc008.tif

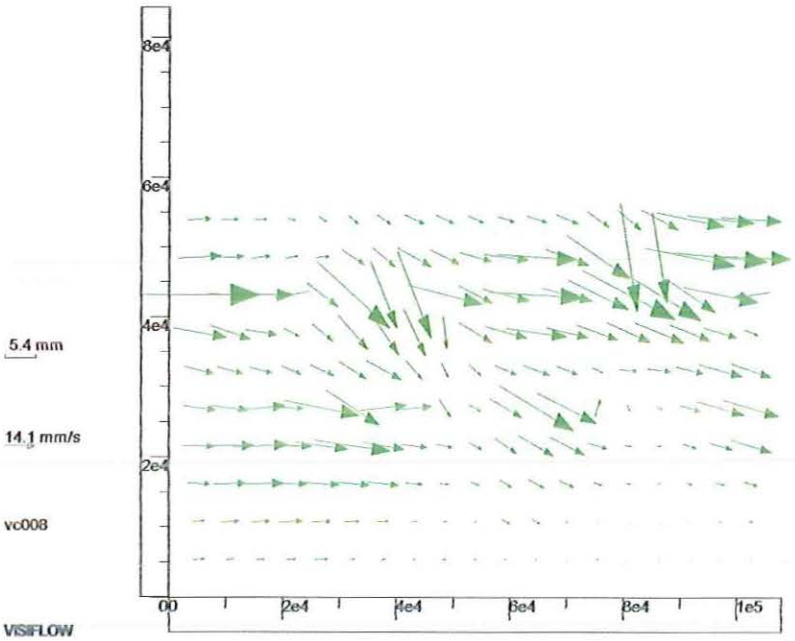


Figura 10 - Campo de velocidades para Vc007.tif e Vc008.tif

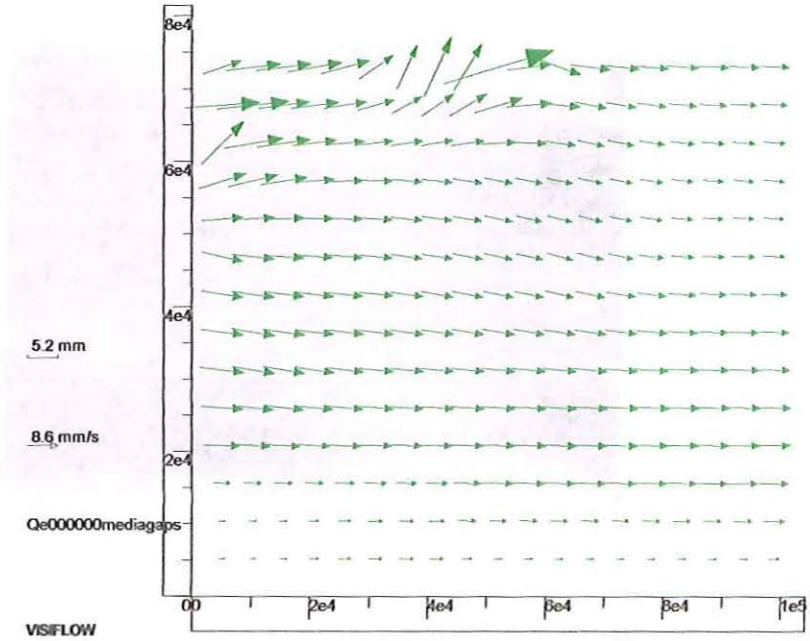


Figura 11 – Campo médio de velocidades para q= 300ml/s e posição1.

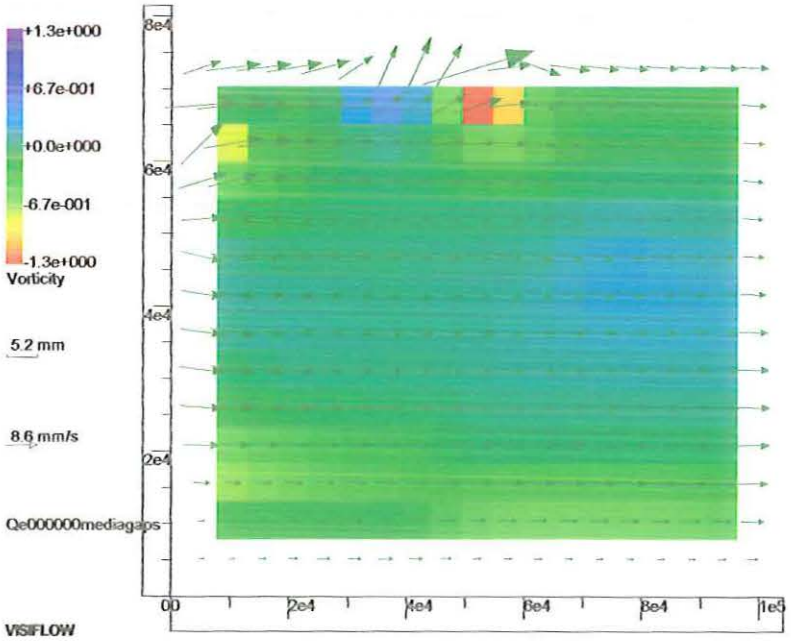


Figura 12 – Vorticidade para q= 300ml/s e posição 1.

VAZÃO DE 300ML/S E POSIÇÃO 2.

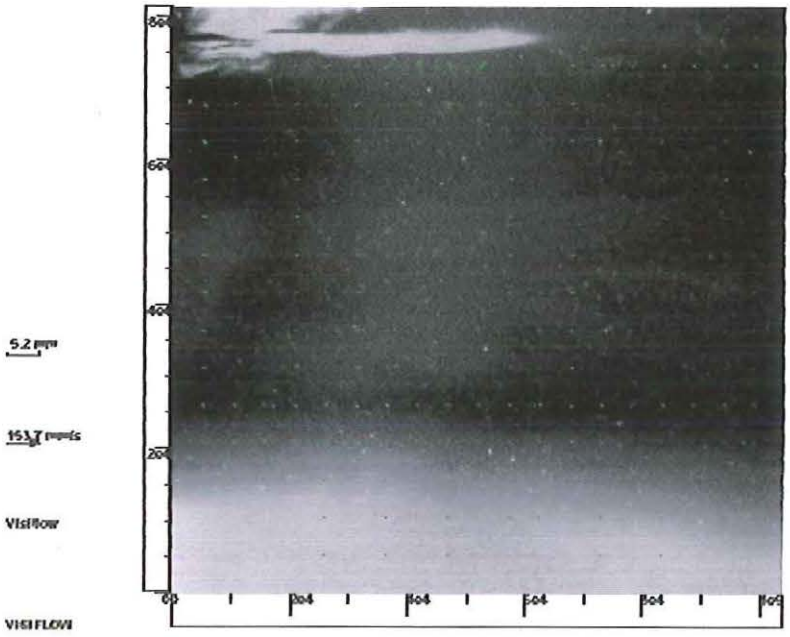


Figura 1 - Posição 2, q= 300ml/s e foto Qeoooooo.tif

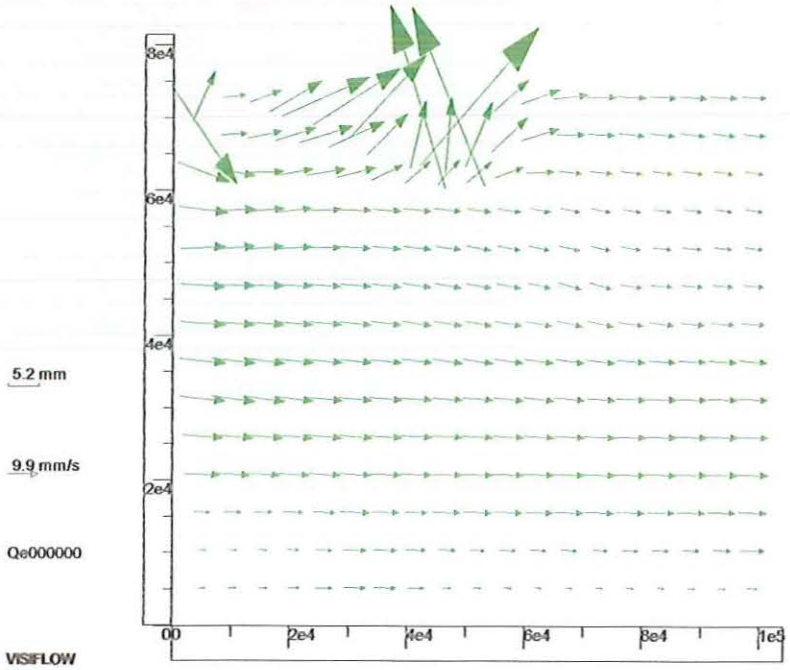


Figura 2 - Campo de velocidades para q=300 ml/s e fotos qe000000.tif Qe000001.tif

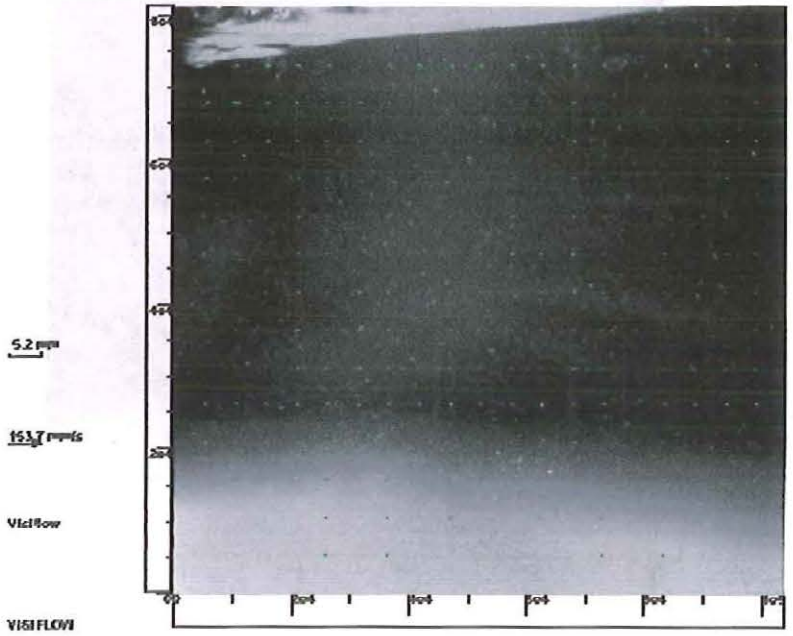


Figura 3 - Posição 2, q= 300ml/s e Qe000002.tif

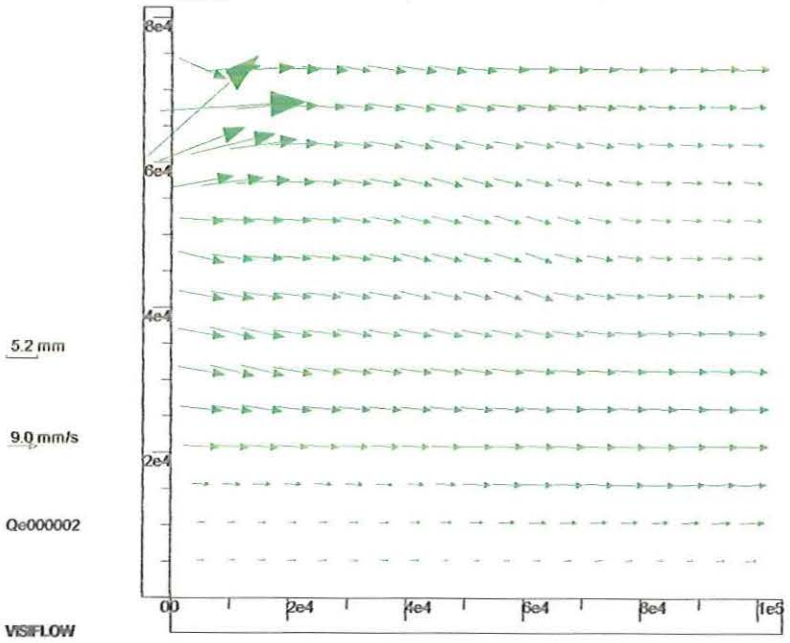


Figura 4 - Campo de velocidades para Qe000001.tif e Qe000002.tif.

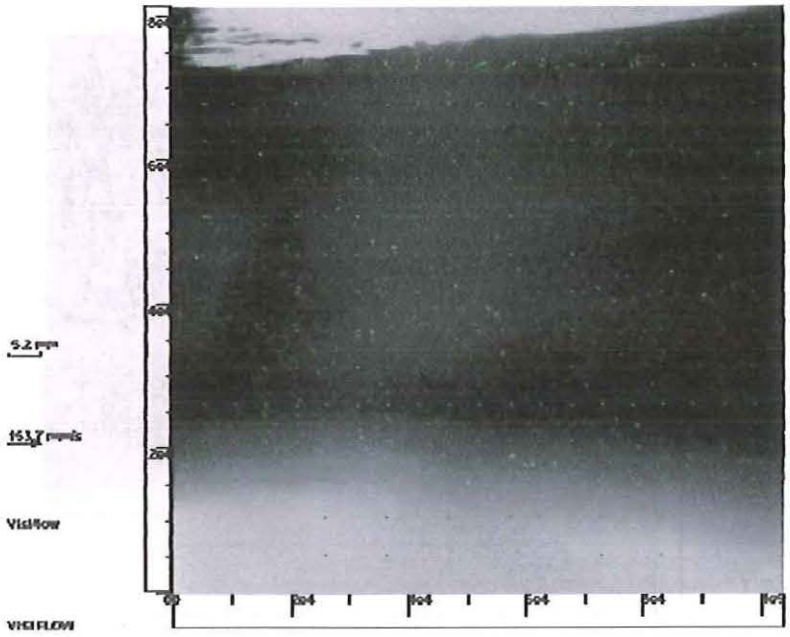


Figura 5 - Posição 2, q= 300ml/s e Qe000004.tif.

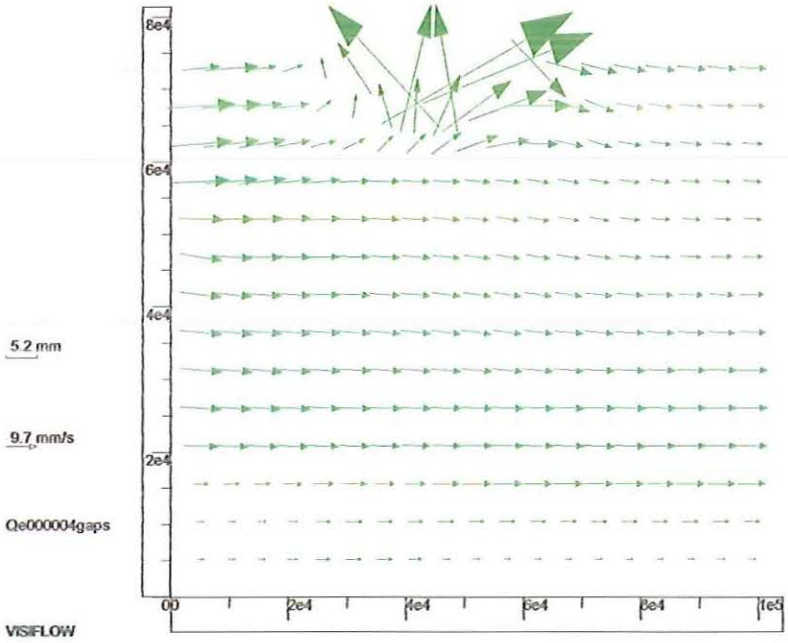


Figura 6 - Campo de velocidades para Qe000003.tif e Qe000004.tif

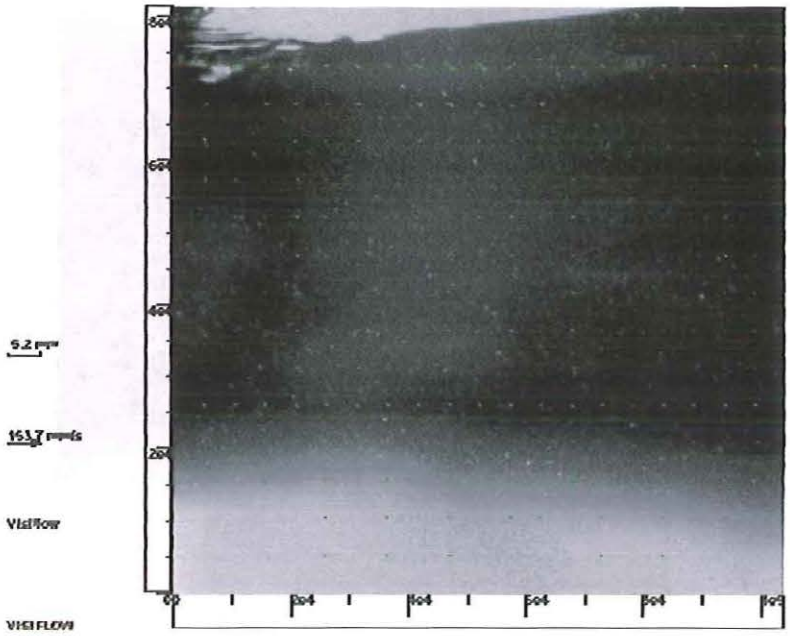


Figura 7 - Posição 2, q=300ml/s e foto Qe000006.tif

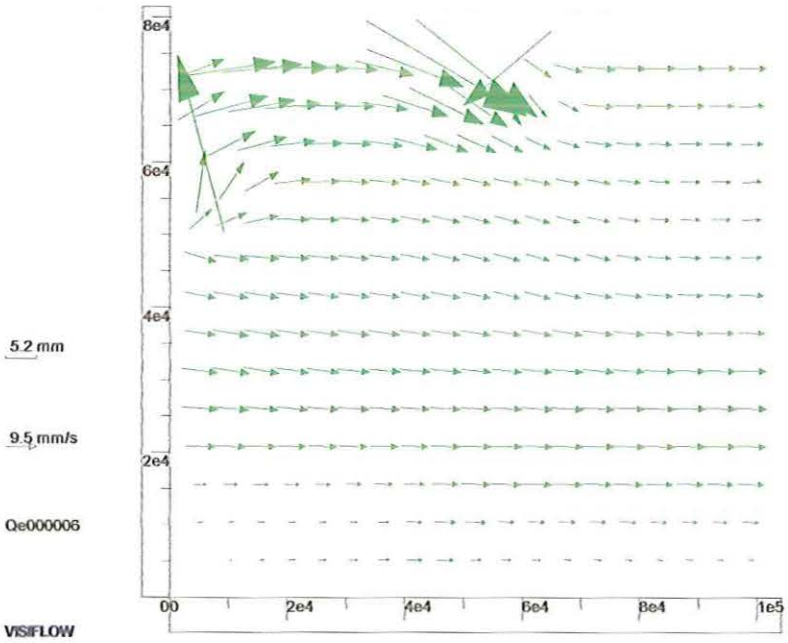


Figura 8 - Campo de velocidades para Qe000005.tif e Qe000006.tif.

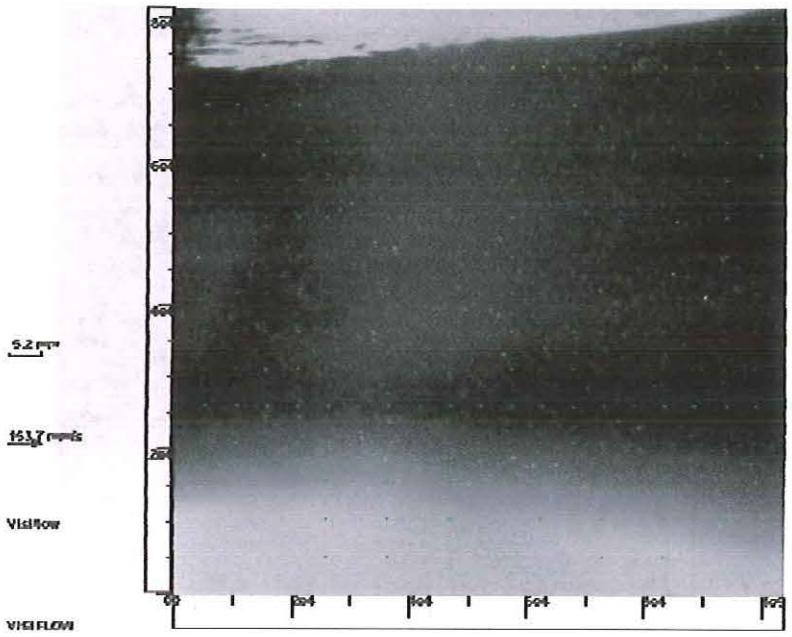


Figura 9 - Posição 2, q=300ml/s e Qe000008.tif.

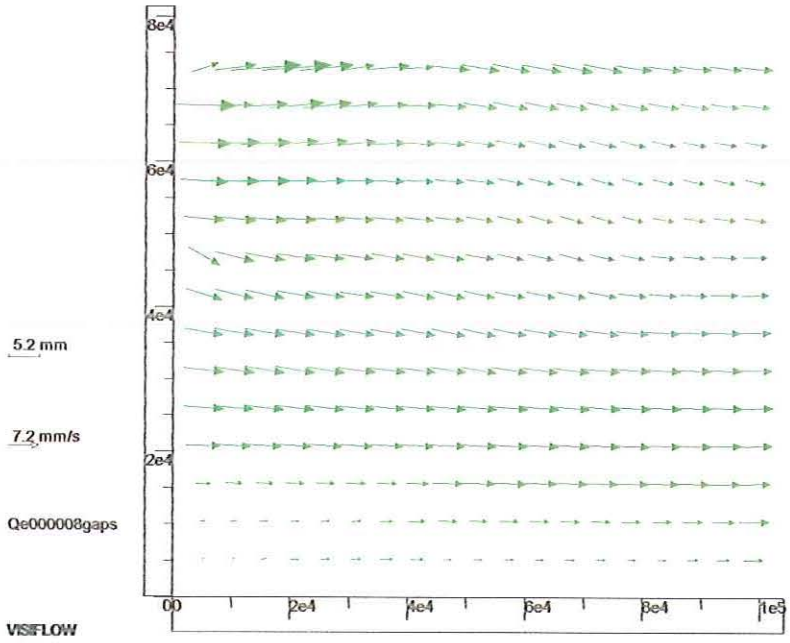


Figura 10 -Campo de velocidades para Qe000007.tif e Qe000008.tif.

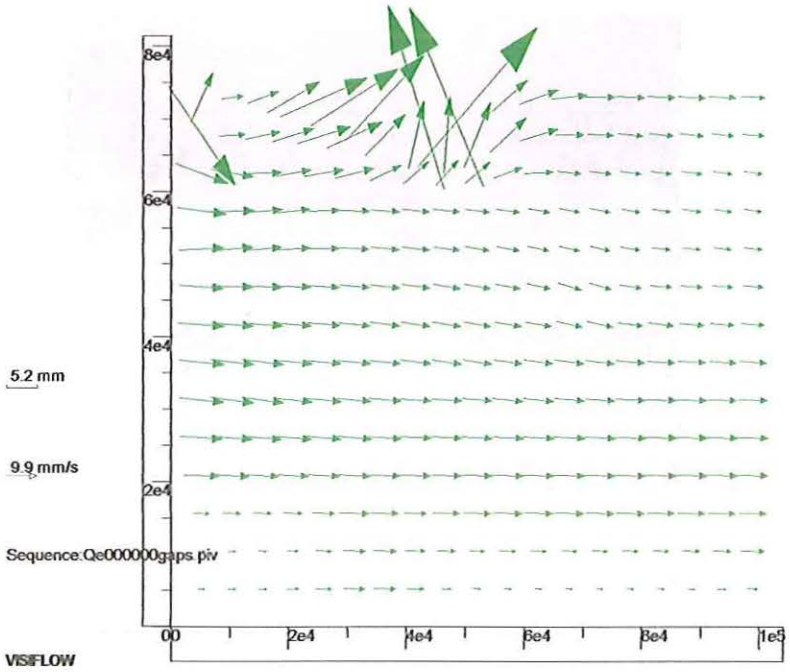


Figura 11 - campo médio de velocidades para q= 300ml/s e posição 2.

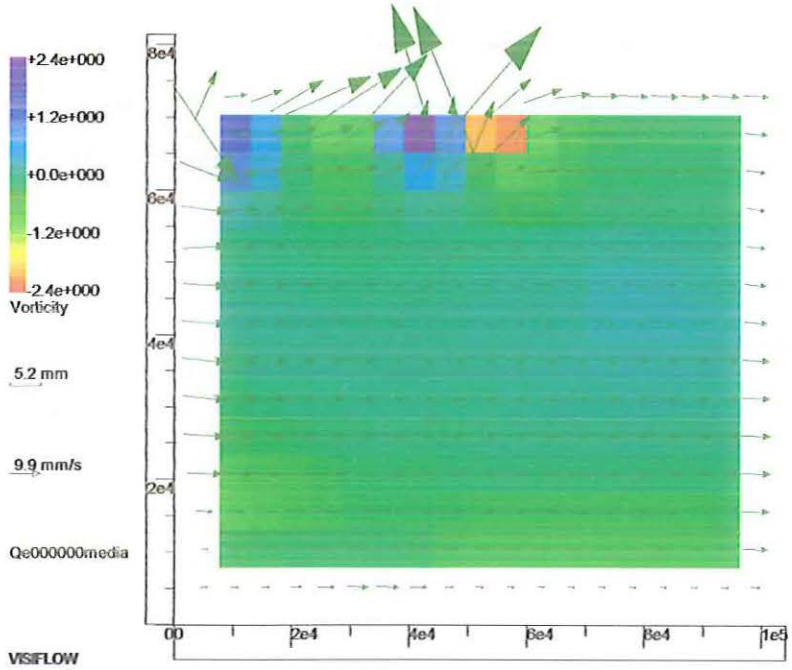


Figura 12 - Vorticidade para q=300 ml/s e posição2.

VAZÃO DE 300 ML/S E POSIÇÃO 2.

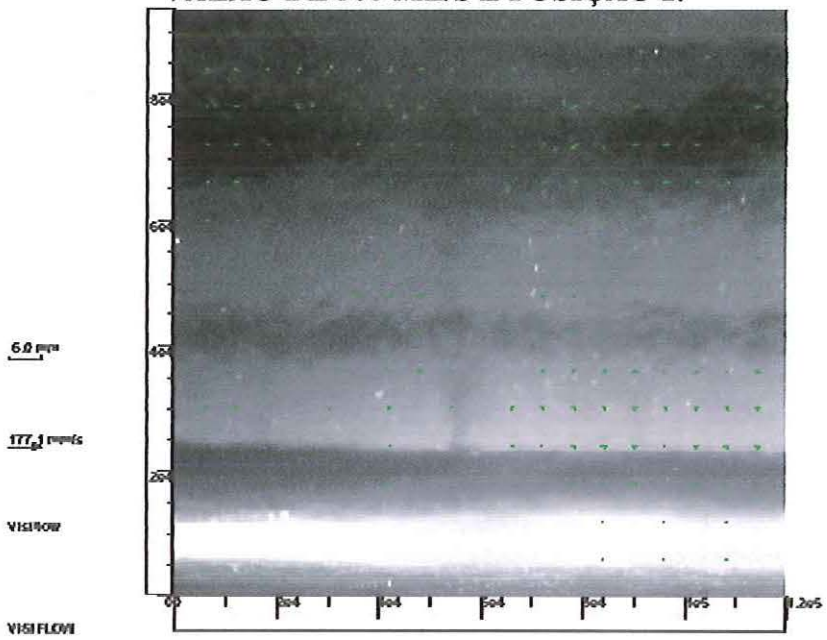


Figura 1 – Posição 2, q=300 ml/s e foto qt7000.tif

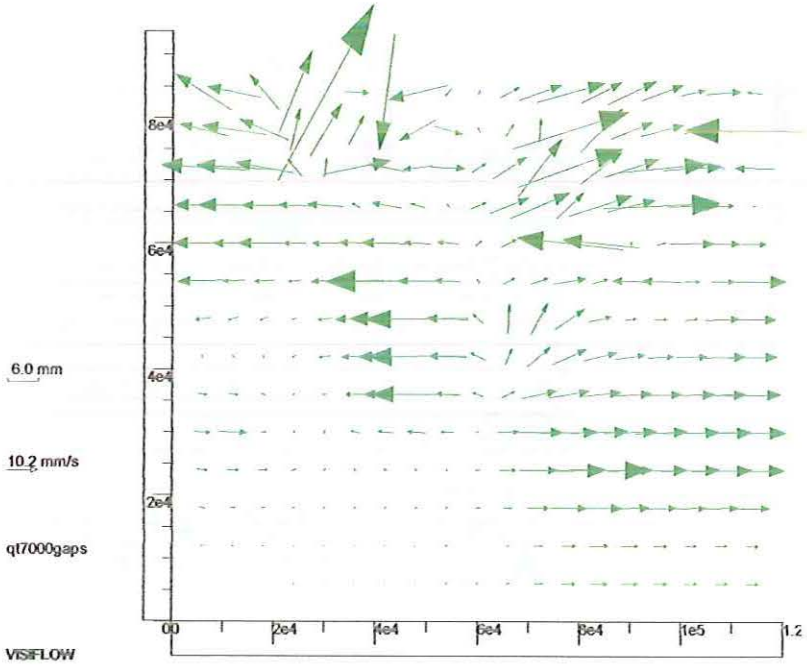


Figura 2 – Campo de velocidades para as fotos qt7000.tif e qt7001.tif.

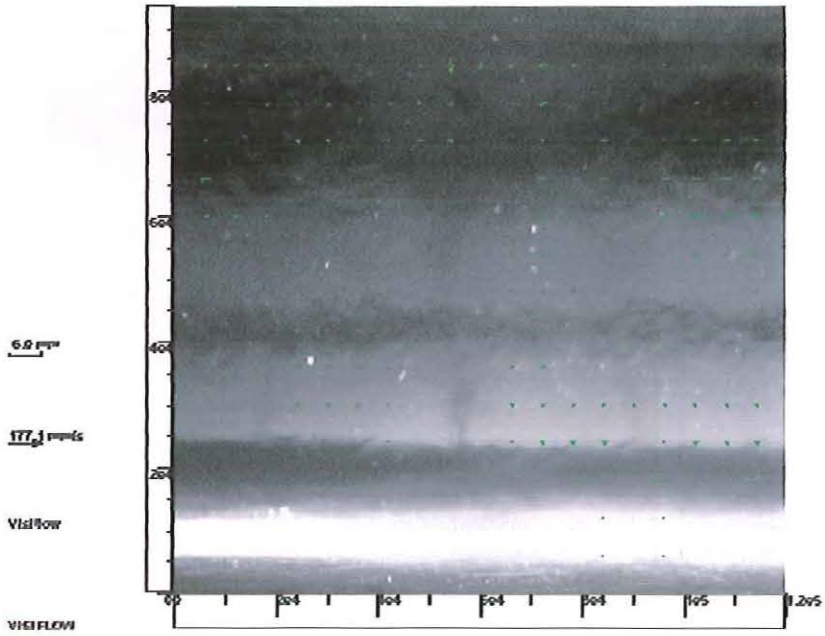


Figura 3 – Posição 2, q = 300ml/s e foto qt7002.tif.

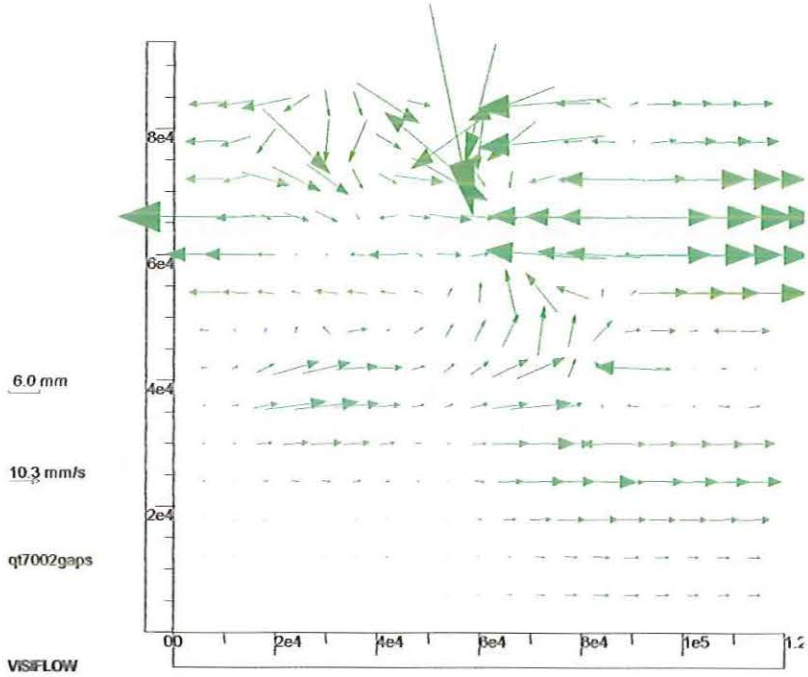


Figura 4 – Campo de velocidades para fotos qt7001.tif e qt7002.tif.

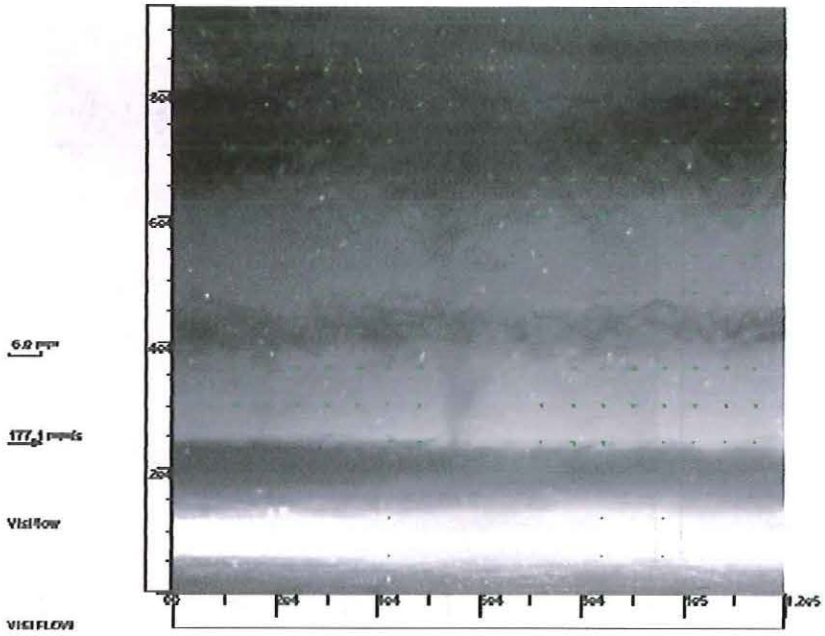


Figura 5 – Posição 2, q=300 ml/s e foto 7004.tif

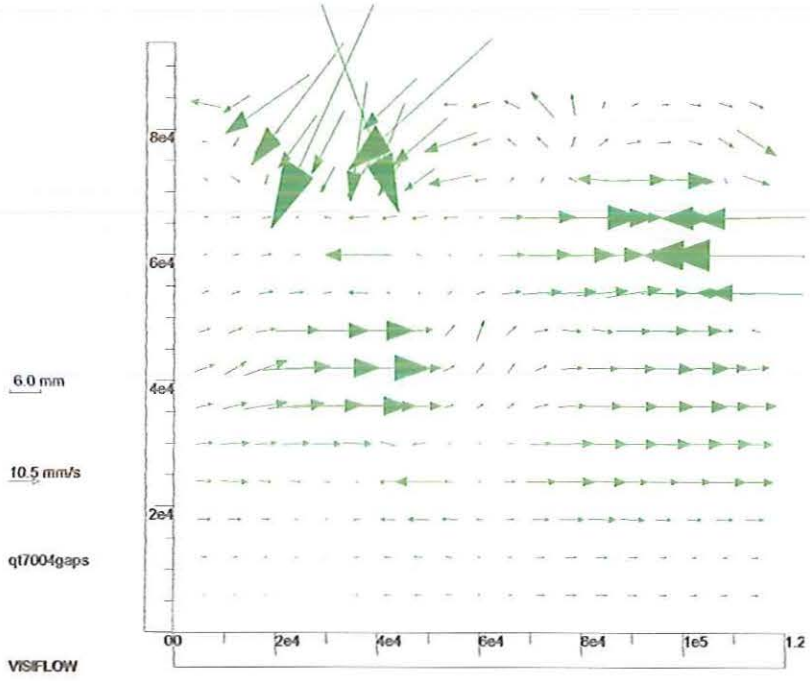


Figura 6 – Campo de velocidades para as fotos qt7003.tif e qt7004.tif.

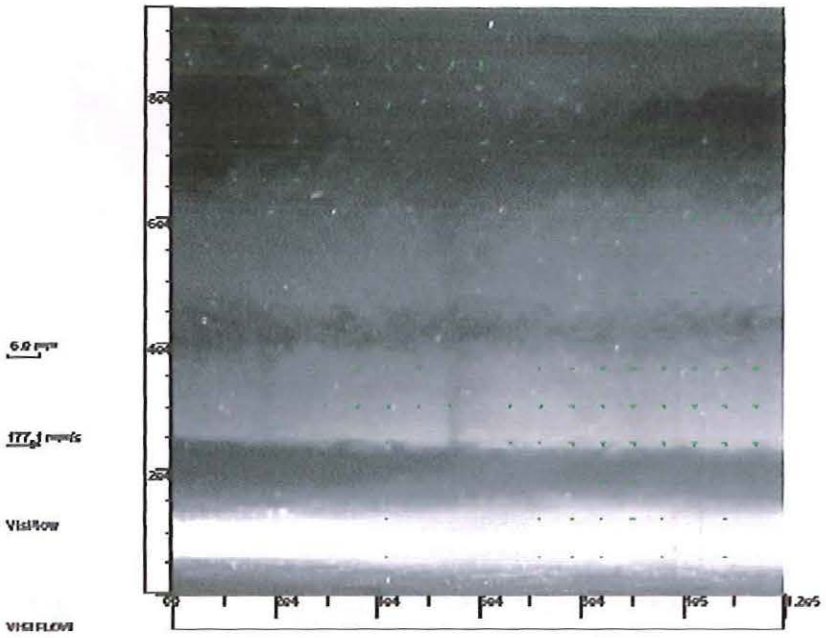


Figura 7 – Posição 2, q = 300 ml/s e foto qt7006.tif

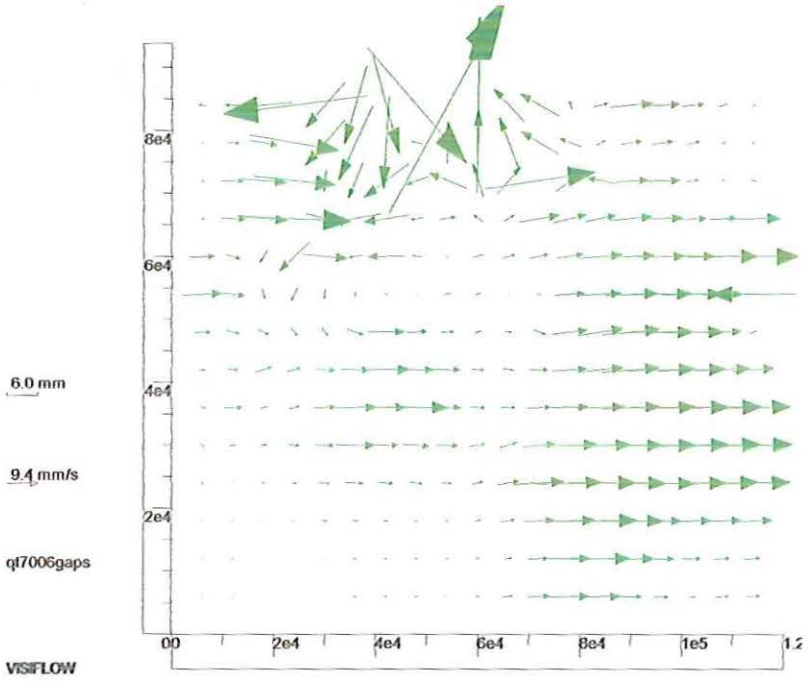


Figura 8 – Campo de velocidades para fotos qt7005.tif e qt7006.tif.

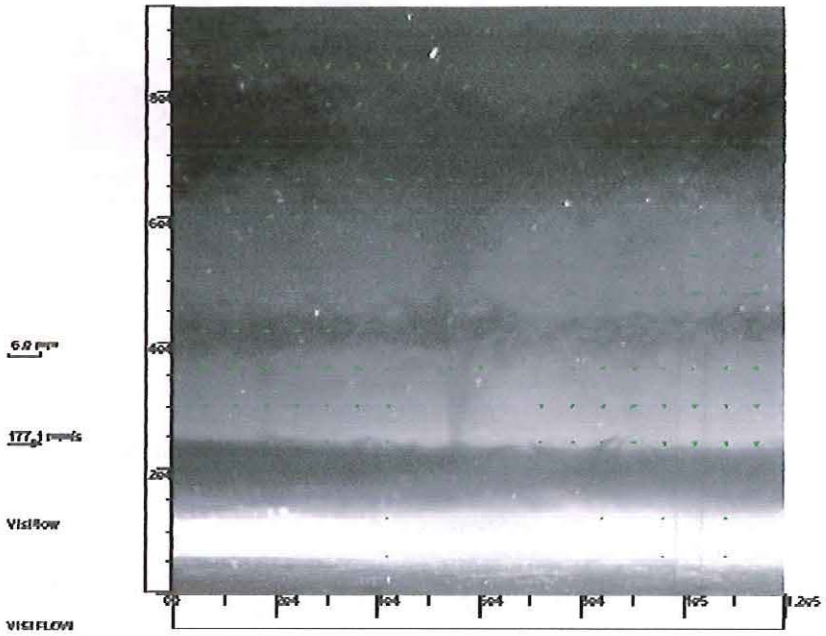


Figura 9 – Posição 2, q=300ml/s e foto qt7008.tif.

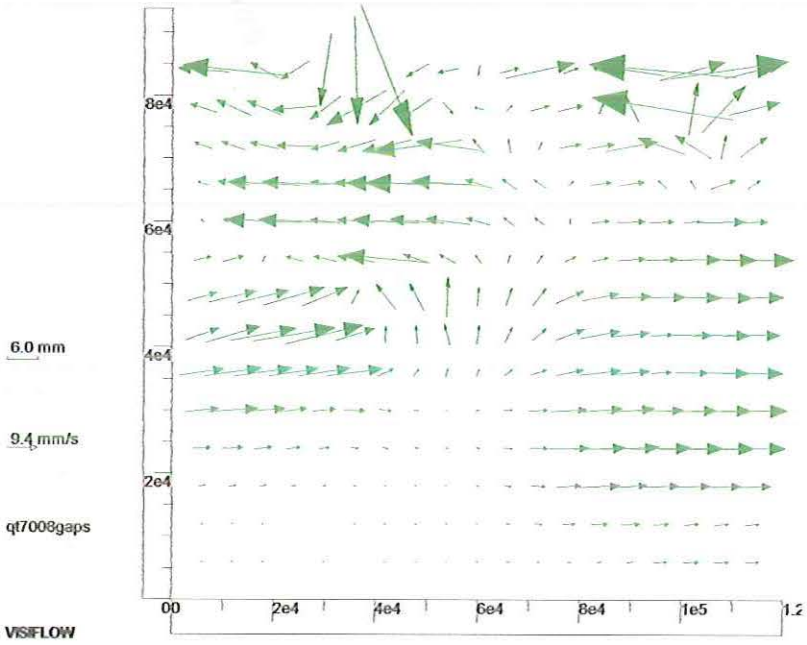


Figura 10 – Campo de velocidades para fotos qt7007.tif e qt7008.tif.

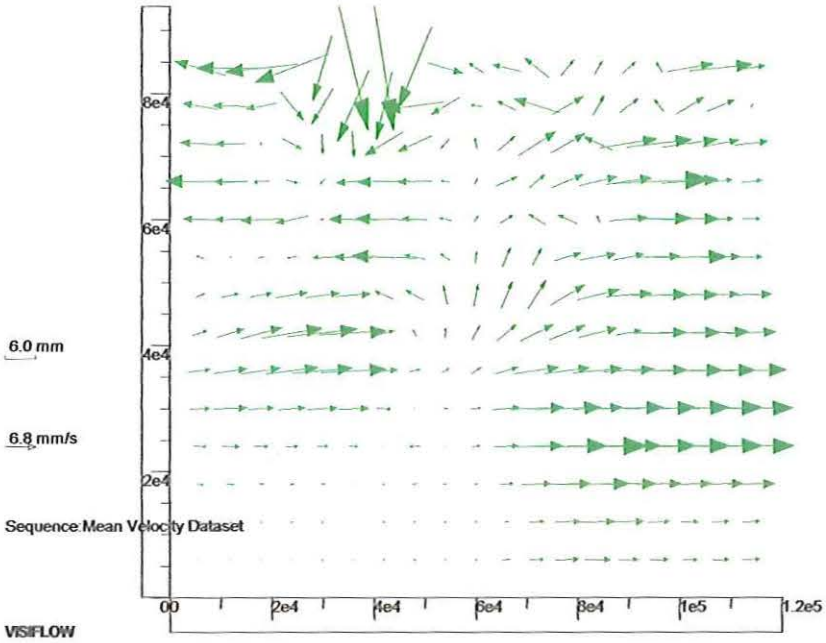


Figura 11 – Campo médio de velocidades transversais para q= 300ml/s e posição 2.

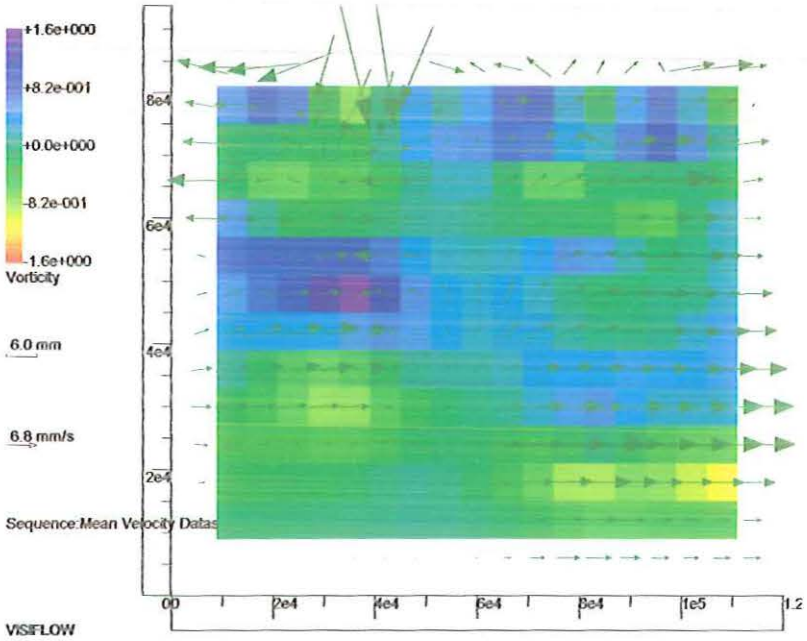


Figura 12 – Vorticidade para q= 300ml/s e posição 2.

Ens.	f.atrito	Ta	Tp	W	ρp	ρa	h_0	b	A_0	Rh	Q_0
		^0C	^0C	%	(Kg/m^3)	(Kg/m^3)	(cm)	(cm)	(cm^2)	(cm)	(cm^3/s)
p11	liso	28	26,5	71	998	1013	1,7	5	8,5	1,0119	50
p12	liso	28,5	28,5	71	998	1013	1,5	5	7,5	0,9375	150
p13	liso	29	27,7	71	998	1013	1,5	5	7,5	0,9375	300
p21	liso	25	24	76	998	1020	1,5	5	7,5	0,9375	50
p22	liso	23	22,6	83	998	1020	1,6	5	8	0,97561	150
p23	liso	23,5	22	83	998	1020	1,6	5	8	0,97561	300
p34	liso	28	27	77	998	1050	1,6	5	8	0,97561	20
p35a	liso	28	27	70	998	1050	1,6	5	8	0,97561	15
p35b	liso	27	26	70	998	1050	1,6	5	8	0,97561	15
p35c	liso	28	27	64	998	1050	1,6	5	8	0,97561	15
p31	liso	23	23	83	998	1050	1,6	5	8	0,97561	50
p32	liso	24	23	68	998	1050	1,5	5	7,5	0,9375	150
p33	liso	23,5	22,5	68	998	1050	1,6	5	8	0,97561	300

v_0	Δρa/ρp	g'	B_0	M_0	Rey_0	Frd_0	Ri_0	Espes
(cm/s)		(cm/s^2)	(cm^4/s^3)	(cm^4/s^2)				(mm)
5,88235	0,01503	14,7415	737,074	294,118	613,648	0,45577	4,81413	1,13
20,00	0,01503	14,7415	2211,22	3000	1932,99	1,01574	0,96925	2,63
40	0,01503	14,7415	4422,44	12000	3865,98	1,48377	0,45422	4,93
6,66667	0,02204	21,6208	1081,04	333,333	644,33	0,2267	19,4588	4
18,75	0,02204	21,6208	3243,13	2812,5	1885,84	0,28513	12,2999	20
37,5	0,02204	21,6208	6486,25	11250	3771,69	0,54373	3,38246	22
2,5	0,0521	51,1038	1022,08	50	251,446	0,04946	408,83	5
1,875	0,0521	51,1038	766,557	28,125	188,584	0,03709	726,81	5
1,875	0,0521	51,1038	766,557	28,125	188,584	0,03709	726,81	5
1,875	0,0521	51,1038	766,557	28,125	188,584	0,03709	726,81	5
6,25	0,0521	51,1038	2555,19	312,5	628,615	0,11287	78,4954	6
20	0,0521	51,1038	7665,57	3000	1932,99	0,19783	25,5519	20
37,5	0,0521	51,1038	15331,1	11250	3771,69	0,27763	12,9736	35,7

Referência Bibliográfica.

Akiyama, J. e Stefan, H.G. (1984)."**Plunging flow into a reservoir : theory**". ". *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol.110. N04. abril pp.484-499.

Alavian,V.,Jirka, G.H., Denton, R.ª, Johnson,M.C e Stefan,H.G.(1992)."Density current entering lakes and reservois". *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol.118. N011. Novembro. pp.1464-1489.

Alavian, V. (1986)."**Behavior of density current on na incline**". *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol.112. N01. Janeiro pp.27-42.

Alavian, V. e Tsihrintzis, V.A(1997)."**Spreading of three-dimensional inclined gravity plumes**". *Journal of Hydraulic Research*. Vol.34. N05. Pp.695-710.

Amen, R. e Maxworthy, T.(1980)"**The gravitational collapse of a mixed region into a linearly stratified fluid**". *Journal of fluid mechanics*.Vol 96, part 1, pp 65-80.

Atkinson, J. F. (1993)."**Detachment of buoyant surface jets discharged on slope**". *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 119, N0 8, August. p. 878-895.

Barbosa, AA(1999). "**Correntes de densidade em reservatórios**". Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental.

Benjamin. B. (1968)."Gravity currents and related phenomena". *Journal of fluid mechanics*. Vol 31. pp.209-248.

Britter, R. E. e Simpson, J.E.(1981) "**A note on the structure of the head of na intrusive gravity current**". *Journal of fluid mechanics*.Vol 112. Pp.459-466.

Chen,D e Jirka, G.H.(1995)."Experimental study of plane turbulent wakes in a shalloe water layer". Fluid Dynamics Research.pp.11-41

Díaz, MM.M e Jirka, G.H.(1996)**."Buoyant plumes from multiport diffuser discharge in deep coflowing water"**. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 122, N0 8, August. Pp.428-435.

Doneker, R.L e Jirka, G.H. (1991)**."Expert Systems for mixing-zone analysis and design of pollutant discharges"**. *Journal of water resources planning and management*. Vol.117.N0.6.Novembro/dezembro.pp.679-697.

Ellison, T.H. e Turner, J.S.(1959)."**Turbulent Entrainment in stratified flows**". *Journal of fluid mechanics*,pp.423-448.

Faust, K. M. e Plate, E.J. (1984) "**Experimental investigation of intrusive gravity currents entering stably stratified fluids**". *Journal of Hydraulic Research*. Vol 22, N_0 5. pp 315-325.

Gao,F., Yamaji,H.e Shuto,N.(1991)**."An experimental study on buoyant surface jets"**. Environmental Hydraulics, Lee e Cheung. Balkema Rotterdam,ISBN 9054100389

Hallworth, M.A, Huppert, H.E., Phillips, J.C e Sparks, S.J.(1996)."Entrainment into two-dimensionsl and axisymmetric turbulent gravity currents". *Journal of fluid mechanics*. Vol 308. 289-311.

Harris, G.S.(1965)**."An inclined plume"**. *Journal of the Engineering Mechanics Division*. Proceedings of the American Society Engineers, vol.91.N0.EM1, Fevereiro, pp4215-4221.

Jirka, G.H. e Akar, P.J(1990)."**Hydrodinamic classification of submerged multiport-diffusr discharges"**. *Journal of Hydraulic Engineering*.Vol.117 N0.9Setembro. pp 1113-1127

Jirka, G.H. e Doneker,R.L.(1991)."**Hydrodinamic classification of submerged single-port discharges"**. *Journal of Hydraulic Engineering*.Vol.117 N0.9Setembro. pp 1095-1111.

Jirka,G.H (1982)."**Multiport-diffuser for heat disposal: a summary**". *Journal of Hydraulic Division.* Proceeding of the American Society Engineeres.Vol.108 N0.HY12 Dezembro. pp 1425-1468.

Jirka, G. H. "**Physical Processes and Modeling Methodologies**".

Jirka, G. H. e Lee, J.H.W.(1994)."**Waste disposal in the ocean**". Water Quality and its control. A A Balkema/ Rotterdam/ Brookfield. P.193-242.

Jirka, G. H. e Lee (1992)."**In support of experimental hydraulics: three examples from environmental fluid mechanics".** Journal of Hydraulic Research.Vol.30 N0.3. pp 293-301

Koh, R.C.Y.(1971)."**Two-Dimensional surface warm jets**". *Journal of the Hydraulics Division.* Proceedeings of the American Society of Civil Engineers. Vol 97, N_0 HY6, June. p.819-837.

Manins, P.C.(1975)."**Intrusion into a stratified fluid**". *Journal of fluid mechanics.* Vol.74pp547-560

Manins, P.C.(1976)."**Mixed-region collapse in a stratified fluid**". *Journal of fluid mechanics.* Vol.77. pp.177-183

Maxworthy,T.(1983)."**The dynamics of double-diffusive gravity current**". ". *Journal of fluid mechanics.* Vol.128. pp.259-282.

Monteiro, L.A .J. (1998)"**Implantação de um modelo tridimensional para a circulação das águas induzidas pelo vento em lagos**". Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisito para obtenção do título de Mestre em Hidráulica e Saneamento.

Moretti, P. M. e McLaughlin, D.K.(1976)."**Hydraulic modeling of mixing in stratified lakes**". *Journal of Hydraulic Division.* Proceedings of American Socieyt of Civil Engineers. Vol.103 n0.HY4. Abril.pp-367-380

Nash, J.D., Jirka, G.H e Chen, D. (1995). **"Large scale plnar induced fluorescence in turbulent density-stratified flows"**. *Experiments in fluid.* Vol.19. pp.297-304

Ortiz, J.P. (1993)."**Critérios básicos de modelagem física de jatos e plumas térmicas em lagos e grandes reservatórios**". Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 10/Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul, 1 Gramado. ABRH, v5, p. 1-10.

Pinheiro, A C.F.B. (1998). "**Modelagem hidrotérmica de jatos e plumas, com lançamento horizontal submerso, em resrevatório estagnado**". Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Hidráulica e Sanitária, BT/PHD/53.EPUSP, 12p.

Safaie, B. (1979)."**Mixing of buoyant surface jet over sloping bottom**". *Journal of the waterway, Port, Coastal and Ocean Division*. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Vol. 105, N0. WW4, November, p.357-373.

Turner, J.S. (1973). **Buoyancy effects in fluids**. Cambridge University Press, Cambridge.

Wang,L.X e Yu, C.Z.(1991)"Application of digital image processing technique in environmental". Environmental Hydraulics, Lee e Cheung. Balkema Rotterdam,ISBN 9054100389