

**DESENVOLVIMENTO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE FLUXOS
GRAVITACIONAIS ATRAVÉS DE ELEMENTOS DISCRETOS
ACOPLADOS À FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

SÉRGIO ANTÔNIO BRUM JUNIOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINESE DARCY
RIBEIRO - UENF**

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

MARÇO - 2015

**DESENVOLVIMENTO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE FLUXOS
GRAVITACIONAIS ATRAVÉS DE ELEMENTOS DISCRETOS
ACOPLADOS À FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

SÉRGIO ANTÔNIO BRUM JUNIOR

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Fernando Saboya Albuquerque Júnior

Co-orientador: Prof. Sérgio Tibana

CAMPOS DOS GOYTACAZES - RJ

MARÇO – 2015

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCT / UENF**

14/2015

Brum Junior, Sérgio Antônio

Desenvolvimento de simulações numéricas de fluxos gravitacionais através de elementos discretos acoplados à fluidodinâmica computacional / Sérgio Antônio Brum Junior. – Campos dos Goytacazes, 2015.

xxi, 235 f. : il.

Tese (Doutorado em Engenharia Civil) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil. Campos dos Goytacazes, 2015.

Orientador: Fernando Saboya Albuquerque Júnior.

Área de concentração: Geotecnia.

Bibliografia: f. 157-164.

1. ESCORREGAMENTO SUBMARINO 2. CFD-DEM 3. COEFICIENTE DE ATRITO 4. DINÂMICA 5. MORFOLOGIA I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciência e Tecnologia. Laboratório de Engenharia Civil II. Título

CDD 551.36

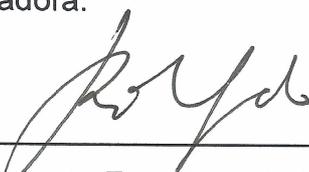
**DESENVOLVIMENTO DE SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DE FLUXOS
GRAVITACIONAIS ATRAVÉS DE ELEMENTOS DISCRETOS
ACOPLADOS À FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL**

SÉRGIO ANTÔNIO BRUM JUNIOR

Tese apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Aprovada em 31 de março 2015.

Comissão Examinadora:



Prof. Roberto Francisco de Azevedo (Ph.D., Eng. Civil) – UFV



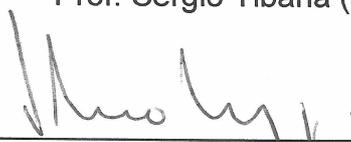
Prof. Vânia José Karam (D.Sc., Eng. Civil) – UENF



Prof. Aldo Durand Fáfán (D.Sc., Eng. Civil) – UENF



Prof. Sérgio Tibana (D.Sc., Eng. Civil) – UENF



Prof. Fernando Saboya Albuquerque Júnior (D.Sc., Eng. Civil) – UENF

Orientador

DEDICATÓRIA

*Dedico essa tese à memória
de meus avós Maria e Antoninho.
Saudade.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao apoio financeiro da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF), da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobras).

O valor humano se manifesta em atos simples, mas de grande significância. Em reconhecimento à tolerância e à compreensão do meu orientador, agradeço ao Prof. Fernando Saboya Albuquerque Júnior, que num momento decisivo da minha vida, em que tive que optar pela carreira da docência distante do local da pesquisa, foi extremamente importante para que eu pudesse conduzir o trabalho até esse ponto.

Não poderia deixar de lembrar da Tia Bel, um anjo na Terra que sempre dedicou muito carinho e atenção.

Agradeço a minha grande amiga e “cumadre” Natália, e aos meus grandes amigos e “cumpadres” Fábio “Belém” e Stênio “Fio”, que me suportaram e me ajudaram muito nesses anos.

Aos meus pais, Iracema e Sérgio, à minha irmã, Rita, e à minha esposa, Isabella, o meu muito obrigado por tudo.

À Deus, expresse minha gratidão por sempre me guiar e me abençoar.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE FIGURAS	xi
RESUMO.....	xx
ABSTRACT	xxi
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	3
2 INSTABILIDADE DO LEITO MARINHO	4
2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NA ESTABILIDADE DO LEITO MARINHO....	5
2.2 FLUXOS GRAVITACIONAIS	6
2.2.1 Corrente conservativa x Corrente não-conservativa	8
2.2.2 Desenvolvimento de uma corrente de densidade	10
2.2.3 Feições físicas de uma corrente de densidade	25
2.2.4 Comportamento reológico da mistura	30
2.2.5 A concentração de sedimentos	32
2.2.6 Classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos	34
2.2.7 Perfis verticais característicos	37
3 MÉTODOS NUMÉRICOS	39
3.1 Fluidodinâmica computacional.....	39
3.1.1 Método de volumes finitos.....	40
3.1.1.1 Tipo de arranjo utilizado para as variáveis	43
3.1.1.2 Esquemas de interpolação.....	43
3.1.1.3 Solução das Equações Discretizadas	44
3.1.1.4 Métodos para o tratamento do acoplamento pressão-velocidade	46
3.2 Método dos Elementos Discretos	48
3.3 Teoria do modelo CFD-DEM	51
3.3.1 Acoplamento entre CFD e DEM.....	51
4. MATERIAIS E MÉTODOS	54
4.1 Ferramentas computacionais.....	54
4.1.1 Sistema operacional Ubuntu 12.04 LTS.....	54
4.1.2 CFDEMcoupling	54

4.1.3 ParaView	57
4.1.4 Computador utilizado	58
4.2 Simulação numérica	58
4.2.1 Modelo físico	58
4.2.2 Partículas	60
4.2.2.1 Propriedades das partículas.....	61
4.2.3 Fluido	62
4.2.4 Análises adotadas na simulação.....	62
4.2.5 Desenvolvimento da simulação.....	62
4.2.5.1 Velocidade da frente do fluxo	64
4.2.5.2 Vazão de partículas.....	65
4.2.5.3 Altura média do fluxo	66
4.2.5.4 Fração de volume ocupada pela fase líquida	66
4.2.5.5 Perfis verticais de velocidade e de concentração das partículas.....	67
4.2.5.6 Pressão sobre a superfície da rampa	67
4.2.5.7 Pressão de água sobre a superfície da rampa	68
5. RESULTADOS.....	69
5.1 Velocidade média da frente do escoamento.....	69
5.1.1 Fluxos subaéreos.....	69
5.1.2 Fluxos subaquáticos.....	75
5.2 Quantidade de partículas que escoam pela rampa	80
5.2.1 Fluxos subaéreos.....	80
5.2.2 Fluxos subaquáticos.....	81
5.2.3 Vazão de partículas.....	85
5.3 Altura média do fluxo	90
5.3.1 Fluxos subaéreos.....	90
5.3.1.1 Região 1	90
5.3.1.2 Região 4	91
5.3.1.3 Região 2	92
5.3.1.4 Região 5	93
5.3.1.5 Região 3	95
5.3.2 Fluxos subaquáticos.....	96
5.3.2.1 Região 1	96
5.3.2.2 Região 4	97

5.3.2.3 Região 2	98
5.3.2.4 Região 5	99
5.3.2.5 Região 3	100
5.3.3 Perfis de altura média dos fluxos	101
5.3.3.1 Perfis de altura média máxima	101
5.3.3.2 Perfis de altura média final	107
5.3.3.3 Perfil de altura ao longo do deslocamento.....	113
5.4 Fração de volume ocupada pela fase fluida	114
5.4.1 Fluxos subaéreos.....	114
5.4.1.1 Região 1	114
5.4.1.2 Região 4	115
5.4.1.3 Região 2	116
5.4.1.4 Região 5	117
5.4.1.5 Região 3	118
5.4.2 Fluxos subaquáticos.....	119
5.4.2.1 Região 1	119
5.4.2.2 Região 4	120
5.4.2.3 Região 2	121
5.4.2.4 Região 5	122
5.4.2.5 Região 3	123
5.4.3 Comparação da concentração de partículas dos fluxos subaéreos e subaquáticos.....	124
5.5 Perfil vertical de velocidade e de concentração de partículas	125
5.5.1 Fluxos subaéreos.....	125
5.5.2 Fluxos subaquáticos.....	128
5.6 Pressão sobre a superfície da rampa	130
5.6.1 Fluxos subaéreos.....	130
5.6.1.1 Região 1	130
5.6.1.2 Região 2	131
5.6.1.3 Região 3	132
5.6.2 Fluxos subaquáticos.....	133
5.6.2.1 Região 1	133
5.6.2.2 Região 4	134
5.6.2.3 Região 2	135

5.6.2.4 Região 5	136
5.6.2.5 Região 3	137
5.7 Pressão de água sobre a superfície da rampa	138
5.7.1 Região 1	138
5.7.2 Região 4.....	139
5.7.3 Região 2.....	140
5.7.4 Região 5.....	141
5.7.5 Região 3.....	142
5.8 Comparação entre os valores obtidos pela equação do perfil vertical para fluxos subaquáticos com resultados de ensaio com modelo reduzido em centrífuga geotécnica	143
5.8.1 Velocidade da frente do escoamento	145
5.8.2 Contorno do perfil de altura do escoamento	147
6. CONCLUSÕES	152
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	157
ANEXOS	165

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Diferenças nos mecanismos de deposição de alta e baixa densidade (Middleton, 1967)	25
Tabela 2.2 – Classificação dos fluidos com relação ao comportamento reológico.....	30
Tabela 2.3 – Modelos de leis para os diferentes comportamentos reológicos	32
Tabela 4.1 Valores adotados das propriedades das partículas.....	61
Tabela 4.2 – Valores adotados dos parâmetros do fluido	62
Tabela 5.1 – Quantidade total de partículas que escoam pela rampa	82
Tabela 5.2 – Porcentagem de partículas que escoam pela rampa	84
Tabela 5.3 – Máximo valor de vazão de partículas para os fluxos subaéreos	86
Tabela 5.4 – Máximo valor de vazão de partículas para os fluxos subaquáticos.....	87
Tabela 5.5 – Razão de vazão entre os fluxos subaquáticos e subaéreos.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama esquemático da formação de uma tempestade (Simpson, 1997)	7
Figura 2.2 – Corrente de densidade de ar frio na atmosfera, visível devido à suspensão de areia e da poeira (Simpson, 1997)	7
Figura 2.3 – Tipos de correntes de densidade em ambiente marinho (Mulder e Alexander, 2001)	8
Figura 2.4 – Tipos de inicialização da corrente: a) por pulso e; b) por fluxo contínuo de material (Mutti et al., 1999)	11
Figura 2.5 – Esquema das transformações de fluxos (Fischer, 1983, apud Del Rey, 2006)	19
Figura 2.6 – Visualização de ondas internas nas correntes de turbidez: a) imagem obtida por ultrassom e; b) desenho esquemático (Del Rey et al., 2003)	20
Figura 2.7 – Diferença entre a dinâmica interna: a) corrente de turbidez e; b) fluxo de detritos (Manica, 2009)	23
Figura 2.8 – Desenho esquemático da seqüência de Bouma (1962) (Del Rey, 2006)	24
Figura 2.9 – Partes de uma corrente de densidade (Alvarado, 2006)	25
Figura 2.10 – Formas de instabilidade que ocorrem na parte frontal da corrente de densidade: (a) vórtices de Kelvin-Helmholtz e (b) complexo de lobos e ranhuras (Simpson, 1997)	27
Figura 2.11 – Fluxos que ocorrem na cabeça de uma corrente de densidade (Simpson, 1997)	28
Figura 2.12 – Classificação dos fluidos com relação ao comportamento reológico ..	31
Figura 2.13 – Classificação dos fluxos de densidade com base nos mecanismos dominantes de suporte de grãos (Middleton e Hampton, 1976)	34
Figura 2.14 – Classificação proposta por Shunmugam (2000)	36
Figura 2.15 – Terminologia para tipos de fluxos baseada na concentração volumétrica de sedimentos	36
Figura 2.16 – Perfil típico de velocidade de uma corrente de gravidade não conservativa (Kneller e Buckee, 2000)	37
Figura 2.17 – Perfil típico de velocidade (linha contínua) e cisalhamento (linha pontilhada) de um escoamento de jato plano junto à parede (Schlichting, 1979)	37
Figura 2.18 – Perfis de velocidade e concentração normalizados (Kneller e Buckee, 2000)	38
Figura 3.1 – Volume de controle (Jasak, 1996)	40
Figura 3.2 – Discretização nos domínios de espaço e tempo (Rusche, 2002)	41
Figura 3.3 – Parâmetros na discretização por volumes finitos (Rusche, 2002)	42

Figura 3.4 – Modelo usado para os contatos entre partículas (Alvarado, 2006)	49
Figura 3.5 – Cálculos realizados a cada incremento de tempo (O'Sullivan, 2011)....	50
Figura 4.1 – Área de trabalho Ubuntu 12.04 LTS.....	54
Figura 4.2 – Interface durante o processamento utilizando o software CFDEMcoupling	55
Figura 4.3 – Interface do programa ParaView 4.1.0 64-bit.....	57
Figura 4.4 – Detalhe esquemático da caixa de testes idealizada (imagem fora de escala).....	59
Figura 4.5 – Imagem renderizada da caixa de testes com a comporta aberta (imagem fora de escala).....	59
Figura 4.6 – Empacotamento das partículas antes do início do escoamento (imagem fora de escala).....	60
Figura 4.7 – Detalhe do empacotamento das partículas (imagem fora de escala)....	61
Figura 4.8 – Detalhe das divisões da rampa (imagem fora de escala).....	63
Figura 4.9 – Vista superior da caixa com detalhe do método utilizado para determinação da velocidade média da frente (imagem fora de escala)	65
Figura 4.10 – Detalhe da determinação das alturas inicial e final do fluxo (imagem fora de escala).....	66
Figura 4.11 – Vista superior da caixa de testes com detalhes dos elementos utilizados para geração das regiões analisadas nas simulações subaéreas e subaquáticas (imagem fora de escala).....	68
Figura 5.1 – Determinação da frente do escoamento principal nos fluxos subaéreos (vistas lateral e	70
Figura 5.3 – Velocidades médias da frente dos escoamentos dos fluxos subaéreos em função do tempo para os coeficientes de atrito das partículas: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85.....	72
Figura 5.4 – Velocidades médias da frente dos escoamentos dos fluxos subaéreos em função do deslocamento para os coeficientes de atrito das partículas: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85	73
Figura 5.5 – Deslocamento durante a primeira fase do escoamento em função dos coeficientes de atrito das partículas	75
Figura 5.6 – Deslocamentos da frente dos escoamentos em função do tempo nos fluxos subaquáticos.....	76
Figura 5.7 – Velocidades médias da frente dos escoamentos dos fluxos subaquáticos em função do tempo: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85	78
Figura 5.8 – Velocidades médias da frente dos escoamentos dos fluxos subaquáticos em função do deslocamento: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85	79

Figura 5.9 – Comparativo das variações das velocidades médias das frentes dos fluxos subaéreos e subaquáticos	80
Figura 5.10 – Quantidade de partículas nos fluxos subaéreos.....	81
Figura 5.11 – Quantidade de partículas nos fluxos subaquáticos	82
Figura 5.12 – Quantidade de partículas nos fluxos subaéreo e subaquático com coeficientes de atrito iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85.....	83
Figura 5.13 – Quantidade de partículas em função do coeficiente de atrito.....	85
Figura 5.14 – Vazão de partículas nos fluxos subaéreos.....	86
Figura 5.15 – Vazão de partículas nos fluxos subaquáticos	87
Figura 5.16 – Vazão de partículas nos fluxos subaéreo e subaquático com coeficientes de atrito iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85.....	88
Figura 5.17 – Vazão máxima de partículas em função do coeficiente de atrito	89
Figura 5.18 – Altura média do fluxo subaéreo – Região 1	91
Figura 5.19 – Altura média do fluxo subaéreo – Região 4	92
Figura 5.20 – Altura média do fluxo subaéreo – Região 2	93
Figura 5.21 – Altura média do fluxo subaéreo – Região 5	94
Figura 5.22 – Altura média do fluxo subaéreo – Região 3	95
Figura 5.23 – Altura média do fluxo subaquático – Região 1	96
Figura 5.24 – Altura média do fluxo subaquático – Região 4	97
Figura 5.25 – Altura média do fluxo subaquático – Região 2	98
Figura 5.26 – Altura média do fluxo subaquático – Região 5	99
Figura 5.27 – Altura média do fluxo subaquático – Região 3	100
Figura 5.28 – Perfis de altura média máxima dos fluxos subaéreos	101
Figura 5.29 – Perfis de altura média máxima dos fluxos subaquáticos.....	102
Figura 5.30 – Perfis de altura média máxima dos fluxos subaéreo e subaquático com coeficientes de atrito das partículas iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85	103
Figura 5.31 Perfil comparativo entre os resultados da Equação 5.10 e os dados obtidos pela simulação para a altura média máxima dos fluxos subaéreos com coeficientes de atrito das partículas iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85	105
Figura 5.32 – Perfil comparativo entre os resultados da Equação 5.11 e os dados obtidos pela simulação para a altura média máxima dos fluxos subaquáticos com coeficientes de atrito das partículas iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85	106
Figura 5.33 – Perfis de altura média final dos fluxos subaéreos	107
Figura 5.34 – Perfis de altura média final dos fluxos subaquáticos.....	108

Figura 5.35 – Perfis de altura média final dos fluxos subaéreo e subaquático com coeficientes de atrito das partículas iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85	110
Figura 5.36 – Perfil comparativo entre os resultados da Equação 5.12 e os dados obtidos pela simulação para a altura média final dos fluxos subaéreos com coeficientes de atrito das partículas iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85	111
Figura 5.37 – Perfil comparativo entre os resultados da Equação 5.13 e os dados obtidos pela simulação para a altura média final dos fluxos subaquáticos com coeficientes de atrito das partículas iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85	112
Figura 5.38 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaéreos na Região 1	115
Figura 5.39 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaéreos na Região 4	116
Figura 5.40 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaéreos na Região 2	117
Figura 5.41 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaéreos na Região 5	118
Figura 5.42 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaéreos na Região 3	119
Figura 5.43 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaquáticos na Região 1	120
Figura 5.44 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaquáticos na Região 4.....	121
Figura 5.45 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaquáticos na Região 2.....	122
Figura 5.46 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaquáticos na Região 5.....	123
Figura 5.47 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaquáticos na Região 3.....	124
Figura 5.48 – Velocidade média das partículas dos fluxos subaéreos nas diferentes regiões de análise: (a) Região 1; (b) Região 4; (c) Região 2; (d) Região 5; (e) Região 3	127
Figura 5.49 – Velocidade média das partículas dos fluxos subaquáticos nas diferentes regiões de análise: (a) Região 1; (b) Região 4; (c) Região 2; (d) Região 5; (e) Região 3.....	129
Figura 5.50 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaéreos na Região 1	131
Figura 5.51 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaéreos na Região 2.....	132
Figura 5.52 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaéreos na Região 3.....	133

Figura 5.53 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaquáticos na Região 1	134
Figura 5.54 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaquáticos na Região 4	135
Figura 5.55 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaquáticos na Região 2	136
Figura 5.56 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaquáticos na Região 5	137
Figura 5.57 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaquáticos na Região 3	138
Figura 5.58 – Pressão de água sobre a superfície da rampa na Região 1	139
Figura 5.59 – Pressão de água sobre a superfície da rampa na Região 4	140
Figura 5.60 – Pressão de água sobre a superfície da rampa na Região 2	141
Figura 5.61 – Pressão de água sobre a superfície da rampa na Região 5	142
Figura 5.62 – Pressão de água sobre a superfície da rampa na Região 3	143
Figura 5.63 – Aparato utilizado para a captura das imagens durante os ensaios na centrífuga geotécnica	144
Figura 5.64 – Deslocamento da frente do escoamento em função do tempo	145
Figura 5.65 – Velocidade média do escoamento em função do tempo	146
Figura 5.66 – Velocidade média do escoamento em função do deslocamento	147
Figura 5.67 – Contornos do escoamento em diferentes instantes (em ms) – (a) 5212.2; (b) 5263.1; (c) 5252.2; (d) 5262.1; (e) 5280.1; (f) 5288.2; (g) 5302.2; (h) 5314.1	149
Figura 5.68 – Contornos do escoamento em diferentes instantes (em ms) – (i) 5330.2; (j) 5338.1; (k) 5352.2; (l) 5360.1; (m) 5378.1; (n) 5394.1	150
Figura 5.69 – Extrapolação do contorno do escoamento (linha contínua azul)	151
Figura A.1 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m	166
Figura A.2 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m	167
Figura A.3 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m	168
Figura A.4 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m	169
Figura A.5 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m	170
Figura A.6 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m	171
Figura A.7 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m	172
Figura A.8 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m	173

Figura A.9 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m.....	174
Figura A.10 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m..	175
Figura B.1 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m..	176
Figura B.2 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50.....	177
Figura B.3 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m..	178
Figura B.4 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m..	179
Figura B.5 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m..	180
Figura B.6 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m..	181
Figura B.7 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m..	182
Figura B.8 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m..	183
Figura B.9 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m..	184
Figura B.10 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m..	185
Figura C.1 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 1.....	186
Figura C.2 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 1.....	187
Figura C.3 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 1.....	188
Figura C.4 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 1.....	189
Figura C.5 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 1.....	190
Figura C.6 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 4.....	191
Figura C.7 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 4.....	192
Figura C.8 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 4.....	193

Figura C.9 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 4.....	194
Figura C.10 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 4.....	195
Figura C.11 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 2.....	196
Figura C.12 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 2.....	197
Figura C.13 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 2.....	198
Figura C.14 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 2.....	199
Figura C.15 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 2.....	200
Figura C.16 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 5.....	201
Figura C.17 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 5.....	202
Figura C.18 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 5.....	203
Figura C.19 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 5.....	204
Figura C.20 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 5.....	205
Figura C.21 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 3.....	206
Figura C.22 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 3.....	207
Figura C.23 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 3.....	208
Figura C.24 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 3.....	209
Figura C.25 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 3.....	210
Figura D.1 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 1.....	211
Figura D.2 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 1.....	212
Figura D.3 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 1.....	213

Figura D.4 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 1	214
Figura D.5 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 1	215
Figura D.6 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 4	216
Figura D.7 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 4	217
Figura D.8 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 4	218
Figura D.9 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 4	219
Figura D.10 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 4	220
Figura D.11 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 2	221
Figura D.12 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 2	222
Figura D.13 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 2	223
Figura D.14 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 2	224
Figura D.15 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 2	225
Figura D.16 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 5	226
Figura D.17 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 5	227
Figura D.18 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 5	228
Figura D.19 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 5	229
Figura D.20 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 5	230
Figura D.21 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 3	231
Figura D.22 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 3	232
Figura D.23 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 3	233

Figura D.24 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 3.....	234
Figura D.25 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 3.....	235

RESUMO

A ocorrência de escorregamento de solo no leito marinho é um fenômeno espalhado nos mais diferentes ambientes oceânicos. Esses acontecimentos já foram responsáveis por danos e destruições de várias estruturas subaquáticas. Para tentar melhor entender esses fenômenos, o trabalho executou simulações de escorregamentos de solo através de modelagem numérica com elementos discretos acoplados à fluidodinâmica computacional (CFD-DEM). O programa escolhido para a realização desse trabalho foi o CFDEMcoupling. Através dele, foram realizadas simulações de escorregamentos, tanto subaéreos quanto subaquáticos, em um talude hipotético com 6° de inclinação. Em cada simulação realizada foi utilizado um coeficiente de atrito das partículas distinto e avaliadas as variações que ocorreram tanto na dinâmica quanto na morfologia do fluxo. Os dados obtidos demonstram que o coeficiente de atrito das partículas teve influência no comportamento dinâmico e na morfologia dos fluxos analisados.

PALAVRAS-CHAVE: escorregamento submarino, CFD-DEM, coeficiente de atrito, dinâmica, morfologia.

ABSTRACT

The happening of landslides in seabed is a phenomenon that occurs on several oceanic environments. These phenomena have caused damage and destruction of offshore structures. To try understanding a bit more these phenomena the present research simulated landslides through Discrete Element Method coupled to Computational Fluid Dynamics (CFD-DEM). The used software in simulations was CFDEMcoupling. Through this software onshore and offshore landslides were simulated, assuming a 6° slope. To each simulation performed a different particle coefficient of friction was used and the variations on dynamic and morphology were assessed. The data show that the particle coefficient of friction influenced the dynamic behavior and morphology examined flows.

KEYWORDS: submarine landslide, CFD-DEM, coefficient of friction, dynamic, morphology.

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A ocorrência de escorregamento de solo no leito marinho é um fenômeno espalhado nos mais diferentes ambientes oceânicos. Existem evidências desse fenômeno em uma ampla variedade de regiões *offshore*, de águas rasas, zonas próximas às costas, taludes continentais e além de fundos oceânicos em águas profundas. Esses acontecimentos já foram responsáveis por danos e destruições de várias estruturas *offshore*.

Os escorregamentos são iniciados pelo aumento das tensões atuantes, decréscimo da resistência do material ou pela combinação dos dois, sendo que os mecanismos que acarretam essas condições são: acúmulo de sedimentação, erosão, ondas, presença de gás, hidratos de gás, percolação de fluidos, terremotos, vulcões, diapirismo, e atividades humanas.

O aumento de danos em instalações *offshore* e a descoberta de novas reservas de hidrocarbonetos na costa brasileira em águas profundas fez crescer o interesse no estudo do comportamento geotécnico do leito marinho. Porém, as dificuldades de visualizar a ocorrência de escorregamentos submarinos *in situ* e, também, de simular esses escorregamentos em modelos físicos em escala real com ambiente controlado dificultam compreender a influência das propriedades físicas do solo na dinâmica desses escorregamentos.

Diversos trabalhos sobre esse tema foram desenvolvidos, principalmente com modelos reduzidos a 1 g (Mohrig e Marr, 2003; Ilstad *et al.*, 2004; Elverhøi *et al.*, 2005), entretanto, esses ensaios não conseguem reproduzir o comportamento do solo, que é não linear e altamente dependente do nível de tensão ao qual ele está submetido. Esse problema pode ser superado com modelos reduzidos submetidos a acelerações inerciais elevadas utilizando a centrífuga geotécnica, porém é um equipamento caro e de complexa operação.

O avanço tecnológico na capacidade de processamento de computadores facilita a realização de simulações numéricas complexas em equipamentos de uso

peçoal. Essas simulações podem auxiliar na melhor compreensão da influência das propriedades físicas do solo no comportamento dinâmico dos escorregamentos submarinos. Por esse motivo, a modelagem numérica aparece como uma importante ferramenta, visto que, com a sua utilização, é possível simular o protótipo em sua escala real, sendo capaz de reproduzir computacionalmente vários fenômenos a um custo relativamente baixo.

A existência de *softwares* para a resolução de problemas de correntes de densidade é ainda muito limitada. *Softwares* comerciais (*Ansys Fluent* e *CFX*; *Abaqus/CFD*; *Cham Phoenix*) apresentam a desvantagem de possuírem elevados custos com obtenção e manutenção de licenças.

Existem códigos gratuitos disponíveis, a maioria foi desenvolvida no meio acadêmico, porém esses códigos visam resolver problemas bem específicos. Com isso em mente, o pacote *CFDEMcoupling* surge como uma opção viável e interessante para a simulação de problemas relacionados a correntes de densidade.

1.2 OBJETIVOS

O trabalho busca realizar simulações numéricas de escorregamentos subaéreos e subaquáticos em um computador de uso pessoal utilizando elementos discretos acoplados à fluidodinâmica computacional para avaliar a influência do coeficiente de atrito das partículas na dinâmica e na morfologia desses escorregamentos.

Busca-se, também, determinar relações envolvendo características dinâmicas e morfológicas dos escorregamentos simulados com o coeficiente de atrito das partículas, para auxiliar na calibração de simulações numéricas futuras que busquem simular escorregamentos subaquáticos.

Essa pesquisa alcança apenas simulações de solos granulares com grãos esféricos em escorregamentos de pulso único sobre um talude de dimensões finitas com valor de inclinação constante, onde será avaliada apenas a influência do coeficiente de atrito das partículas nas características do escorregamento.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O trabalho desenvolvido é apresentado em 6 capítulos. No Capítulo 1 é realizada uma introdução ao tema demonstrando a relevância, a contextualização do problema, os objetivos e as etapas do trabalho. No Capítulo 2 é feita uma revisão da instabilidade de taludes submarinos e das principais características das correntes de densidade. No Capítulo 3 é feita uma descrição geral das técnicas de modelagem numérica utilizadas para o desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 4 é apresentada a metodologia empregada nas análises numéricas utilizando o código CFDEMcoupling. No Capítulo 5 são apresentados os resultados das simulações realizadas e é feita uma discussão dos mesmos e, finalmente no Capítulo 6 são explicitadas as conclusões e recomendações obtidas neste trabalho.

2 INSTABILIDADE DO LEITO MARINHO

Desde o início das descobertas de campos petrolíferos nos taludes continentais, vários estudos vêm sendo desenvolvidos por especialistas do mundo inteiro com o intuito de compreender melhor as condições geológico-geotécnicas e a dinâmica dos sedimentos submarinos nestas regiões. Instabilidades de taludes devem ser encaradas como um risco potencial, pois podem ocorrer em áreas onde estão instalados equipamentos de exploração e produção de petróleo ou gás, por exemplo, poços submarinos, sistemas de ancoragem de estruturas flutuantes, oleodutos e tubulações de fluxo (Hance, 2003).

Segundo Ward e Day (2002), o primeiro escorregamento de terra identificado data de 18 de novembro de 1929, quando de 300 a 700 km³ de sedimentos deslizaram do talude continental localizado ao sul de Newfoundland. A massa de sedimentos fluidificados chegou a deslocar-se em velocidades próximas de 80 km/h e durante seu trajeto destruiu 13 linhas submarinas transatlânticas de telégrafo que ligavam a América do Norte e a Europa. Em 1956, Terzaghi estudou e identificou a probabilidade da instabilidade do leito marinho devido à forças gravitacionais em um talude moderado. Segundo o autor, tal instabilidade de talude pode ser disparada por terremotos e/ou por períodos de depósito rápido de sedimentos em grandes fozes de rios.

Mais tarde, evidências em registros de reflexão sísmica no Golfo do México sugeriram que algumas áreas daquela região estariam sofrendo movimentos contínuos ou intermitentes, e que estes aconteceriam devido a uma combinação de causas, incluindo, entre elas, forças gravitacionais associadas com características de alívios, fluxos turbidíticos, ações de esmagamento ou diapirismo, tensões de tração, adensamento diferencial, variações nas poro pressões e anomalias na pressão do fundo induzidas por ondas (Poulos, 1988).

2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM NA ESTABILIDADE DO LEITO MARINHO

Os deslizamentos de terra submarinos são o resultado de uma interação complexa de vários fatores diferentes que atuam simultaneamente com intensidades e escala de tempo diferentes, de acordo com o ambiente geológico em que a área está inserida. O ambiente geológico-tectônico-oceanográfico é o que regula a ação de cada fator que influencia na estabilidade do solo marinho e cria ou não uma instabilidade potencial no local (Silva, 2005).

Um talude naturalmente estável pode se tornar instável sob a ação de um ou mais mecanismos de diversas naturezas, tais como: mudanças na morfologia, as quais alteram o equilíbrio de forças atuantes, como processos de erosão ou sedimentação; ação de forças externas, como atividades sísmicas e efeitos de ondas; aumento da poro pressão na massa de solo causado por carregamento ou deformação, diminuição das tensões efetivas devido ao aprisionamento de poro pressão causado por variações no nível do mar e decréscimo progressivo da resistência ao cisalhamento do material tanto por intemperismo ou degradação quanto por acumulação de deformações devidas a processos de *creep* ou carregamentos cíclicos (Costa *et al.*, 1997).

Segundo Locat e Lee (2000), os escorregamentos de massa submarinos são iniciados pelo aumento das tensões atuantes, pelo decréscimo da resistência do material ou pela combinação dos dois. Os principais mecanismos disparadores de origem natural estão associados a ondas de choque geradas por terremotos e a sobrecarga cíclica gerada pela passagem de ondas de tempestades. As ondas sísmicas são ondas compressionais e/ou cisalhantes que causam a aceleração nas partículas de sedimentos. Dependendo da intensidade do terremoto e da distância do epicentro, a aceleração gerada poderia diminuir a resistência do solo de tal forma que ele se movimentaria. Por outro lado, a variação na pressão hidrostática resultante da passagem de cavas e cristas das ondas geraria um carregamento cíclico que resultaria em um aumento na poro pressão e redução na tensão efetiva do solo e, conseqüentemente, a sua resistência.

2.2 FLUXOS GRAVITACIONAIS

Fluxos gravitacionais são escoamentos em que a presença de diferentes níveis de densidade entre fluidos ocasiona a ação diferencial de forças gravitacionais, a qual rege o movimento. O mecanismo de geração desses fluxos está centralizado na diferença entre a densidade do fluido da corrente e a densidade do fluido ambiente. Essa diferença de densidade, que pode ser muito pequena, é responsável pela geração de forças de empuxo diferentes entre o meio e a corrente, fazendo com que o fluido de maior densidade movimente-se em direção ao de menor densidade (Boffo, 2010).

Nesses fluxos, as partículas irão se movimentar pela ação da gravidade e este processo faz com que haja uma movimentação intersticial do fluido (Middleton e Hampton, 1976). Esses diferentes níveis de densidade podem manifestar-se de formas variadas na natureza: fluidos com densidades distintas, diferentes níveis de temperatura, presença de substâncias dissolvidas ou presença de sólidos em suspensão.

Grandes lagos, oceanos e a atmosfera são ambientes típicos onde se podem formar esses escoamentos. Um exemplo explícito de fluxo gravitacional (também chamado corrente de densidade) são as tempestades (Figura 2.1) formadas a partir da ascensão abrupta de uma massa de ar quente e úmida, que condensa ao alcançar uma altitude maior e posteriormente precipita. Devido a precipitação, ocorre o resfriamento do solo, originando uma massa de ar frio (mais densa) na parte anterior da massa de ar quente (menos densa). Em decorrência da criação dessa diferença de densidade entre as duas massas em contato, então, se forma uma corrente de densidade (Figura 2.2), a qual se alastra junto ao solo. Existem outros diversos exemplos de fluxos gravitacionais na natureza, tais como: avalanches, correntes oceânicas, gases expelidos por erupções vulcânicas, sedimentação em reservatórios e dispersão de poluentes (Simpson, 1997).

As correntes de densidade são consideradas as principais formas de transporte e deposição de material em meio subaquoso, como o mar. Elas são responsáveis pelas formações de deltas, cânions submarinos e depósitos em águas profundas. O mecanismo de deslocamento destes fluxos está condicionado pela

diferença de densidade entre o fluido da corrente (ρ_f) e o fluido ambiente – corpo receptor – (ρ_w) (Boffo, 2010).

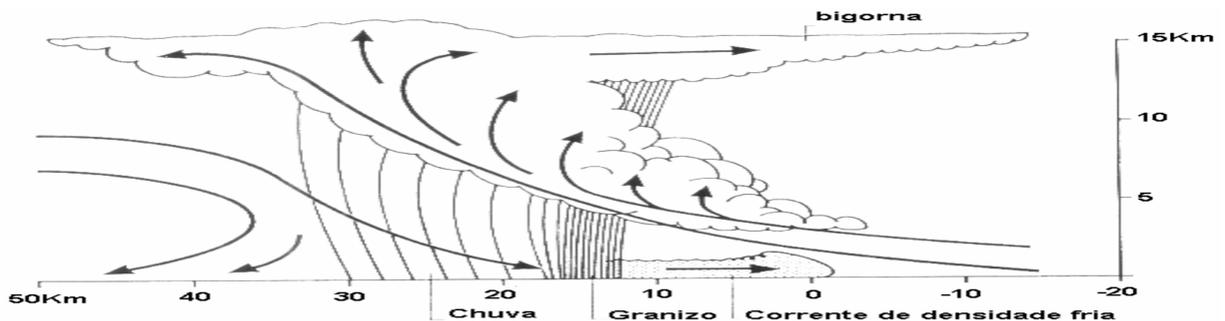


Figura 2.1 – Diagrama esquemático da formação de uma tempestade (Simpson, 1997)



Figura 2.2 – Corrente de densidade de ar frio na atmosfera, visível devido à suspensão de areia e da poeira (Simpson, 1997)

As correntes de densidade no ambiente marinho podem ser classificadas de acordo com a diferença da densidade entre o fluido que constitui a corrente (ρ_f) e o fluido ambiente (ρ_w). Isso permite a definição de quatro diferentes tipos de fluxos (Figura 2.3) (Mulder e Alexander, 2001):

- Homopical ($\rho_f = \rho_w$): quando as densidades dos fluidos da corrente e do ambiente são iguais;
- Mesopical ($\rho_{w1} < \rho_f < \rho_{w2}$): a densidade do fluido da corrente está compreendida entre as densidades de dois estratos distintos do fluido ambiente. Nessa situação, a corrente irá percorrer sua trajetória acima da *pycnocline* (contorno que separa os estratos do fluido ambiente com diferentes densidades);
- Hipopical ($\rho_f < \rho_w$): a densidade do fluido da corrente é menor que a do fluido do ambiente;
- Hiperpical ($\rho_f > \rho_w$): a densidade do fluido da corrente é maior que a do fluido ambiente.

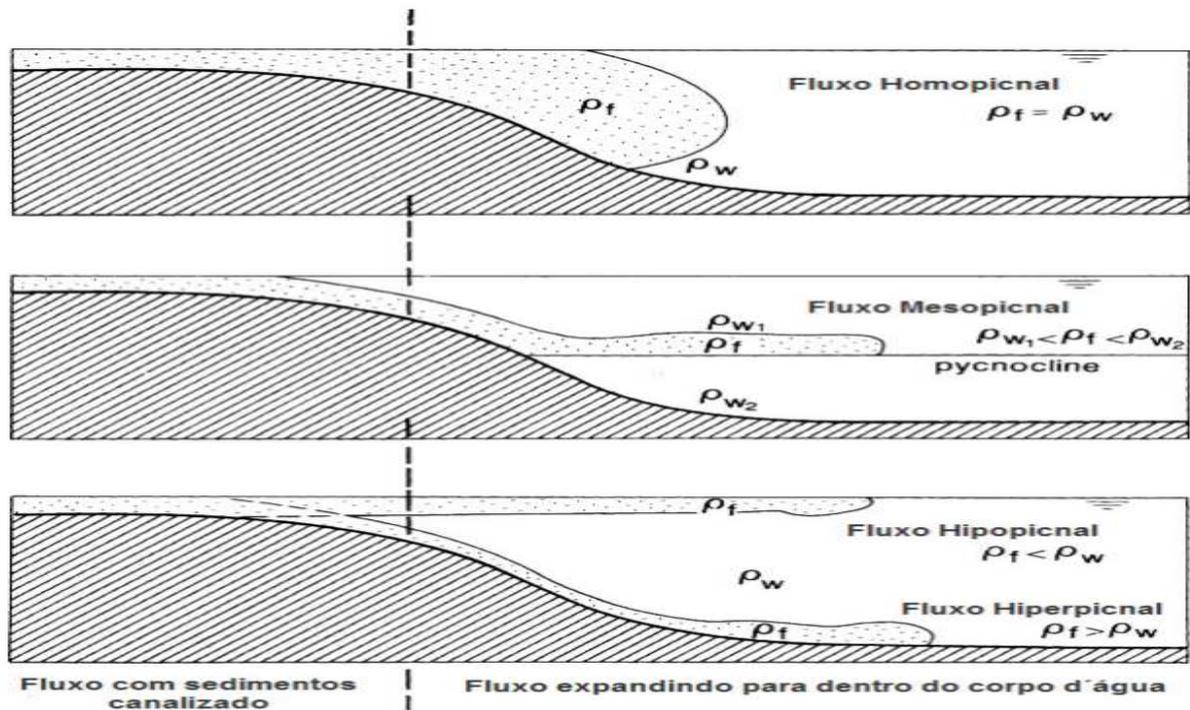


Figura 2.3 – Tipos de correntes de densidade em ambiente marinho (Mulder e Alexander, 2001)

2.2.1 Corrente conservativa x Corrente não-conservativa

As correntes de densidade podem ser divididas em dois grupos distintos: correntes conservativas e não-conservativas (Parsons *et al.*, 2006). As correntes são denominadas conservativas quando não sofrem alteração na vazão de fluabilidade, dada pela seguinte equação:

$$\phi = g \left(\frac{\Delta\rho}{\rho} \right) U h \quad , \quad (2.1)$$

sendo

$$\Delta\rho = \left(\frac{\rho_f - \rho}{\rho} \right) \quad (2.2)$$

onde:

- g = aceleração da gravidade [m/s²]
- h = espessura média da corrente [m]
- U = velocidade média da corrente integrada na vertical [m/s]
- ϕ = vazão de fluabilidade [m³/s³]
- ρ = massa específica do fluido ambiente [kg/m³]
- ρ_f = massa específica da corrente (mistura) [kg/m³]
- $\Delta\rho$ = variação da massa específica [-]

Correntes de densidade conservativas são induzidas ou pela densidade natural dos fluidos homogêneos, ou pela temperatura ou por sais dissolvidos, sendo que, nesses casos, não há material em suspensão, o material encontra-se dissolvido dentro da corrente (Puhl, 2012).

Por outro lado, as correntes de densidade não-conservativas são capazes de alterar sua flutuabilidade, pois, em um processo contínuo, concorrem fatores que possibilitam a troca do material da corrente com o da superfície inferior através de processos de deposição e erosão, modificando gradualmente a densidade da corrente ao longo do percurso. Na deposição há a diminuição da densidade, pois a corrente sofre perda de massa devido à deposição do material em suspensão. Ao contrário, a erosão aumenta a densidade, pois a corrente passa a incorporar sedimentos do leito.

Nas correntes não-conservativas, as partículas se mantêm em suspensão pela turbulência do fluido que as envolve, e a corrente sofre constantes mudanças em sua natureza enquanto se desloca através da sua interação com o meio que a envolve, trocando de material com a superfície inferior através dos processos de deposição e erosão, modificando gradualmente a densidade da corrente ao longo do percurso, dessa maneira, não respeitando a condição de continuidade (conservação de massa) (Del Rey, 2006).

As correntes conservativas apresentam aspectos e características dinâmicas semelhantes as correntes não-conservativas, porém, as partículas se encontram dissolvidas e não há variação na sua quantidade enquanto se desloca, assim, respeitando a condição de continuidade. Por se tratarem de escoamentos sem a presença de processos de erosão e deposição de sedimentos, as correntes conservativas permitem uma análise dos parâmetros que afetam o seu movimento sem a influência dos processos de troca de sedimentos (Fabian, 2002).

Nas correntes conservativas a variação de densidade ocorre somente pela entrada do fluido ambiente, enquanto nas não-conservativas essa variação acontece também pela entrada e saída de partículas em seu meio. Assim, a dinâmica de uma corrente de densidade não-conservativa envolve um maior número de variáveis, tornando o estudo deste fenômeno muito mais complexo. A estrutura da turbulência

interna da corrente implica em alterações na forma como o sedimento é suspenso e transportado, alterando, assim, o comportamento destas correntes e seu padrão de deposição (Del Rey, 2006).

2.2.2 Desenvolvimento de uma corrente de densidade

Segundo Mutti *et al.* (1999), o desenvolvimento de uma corrente de densidade é caracterizado por três zonas distintas: zona fonte, onde ocorre a origem da corrente; zona de transferência, região por onde a corrente flui; e desacelerando, eventualmente, no ponto em que toda a sua carga de sedimento irá se depositar, zona deposicional. Uma maneira simplificada de compreender o mecanismo de movimento das correntes de densidade é considerar as características da corrente relacionadas a cada uma das zonas.

2.2.2.1 Zona fonte

A dinâmica das correntes de densidade está associada à zona fonte através dos processos de inicialização (formação da corrente). A inicialização das correntes de densidade pode ocorrer ou pela remobilização de sedimentos já depositados no fundo do oceano ou pela entrada de sedimentos, por meio de uma fonte externa. Basicamente, são encontrados dois tipos de escoamentos característicos das correntes de densidade baseados nesses processos (Figueiredo, 2010):

a) Remobilização instantânea de material – pulso (*Surge-like flows*)

Esse tipo de escoamento é caracterizado por ser um fenômeno de curta duração e formado a partir de uma quantidade finita de material (Ravenne e Beghin, 1983). Os escoamentos desse tipo são originados, normalmente, por colapsos gravitacionais de sedimentos, tais como: deslizamentos, escorregamentos, rompimento de taludes, entre outros. O material do escoamento é remobilizado através dos vários processos que ocorrem no ambiente marinho.

Os escoamentos por pulso estão associados a um fluxo catastrófico, (Figura 2.4a), fortemente não uniforme, onde, em um dado local, a velocidade aumenta abruptamente na chegada da cabeça da corrente (*waxing flow*) e, logo após, decresce durante a passagem do corpo e da cauda (*waning flow*). Porém, o comportamento desse decréscimo é oscilatório, variando em torno de um valor médio até chegar ao ponto onde a deposição acontece. Esses fluxos podem transportar grandes partículas devido à grande capacidade de transporte e sua alta velocidade (Manica, 2009).

A duração das descargas depende do tamanho do talude que foi desestabilizado. Fluxos com curta duração podem durar de segundos a minutos, tendo espessuras que variam de centímetros a metros. Por outro lado, fluxos com longa duração podem perdurar por horas, possuindo espessuras que variam de dezenas a centenas de metros (Felletti *et al.* 2009).

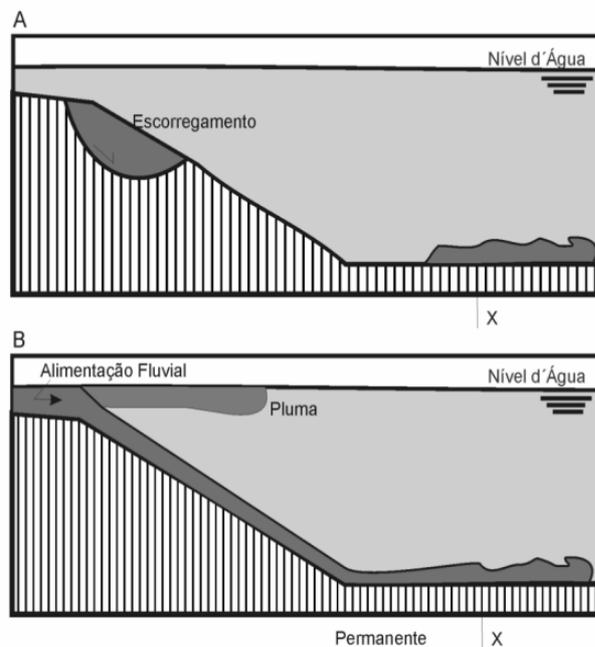


Figura 2.4 – Tipos de inicialização da corrente: a) por pulso e; b) por fluxo contínuo de material (Mutti *et al.*, 1999)

b) Remobilização não-instantânea de material (fluxo contínuo)

O segundo tipo de escoamento se caracteriza por um fluxo de alimentação contínua de material que persiste durante um determinado período de tempo durante o seu curso, isto é, o fluxo é realimentado, enquanto que a cabeça da corrente já

atingiu a área final de dissipação (Figura 2.4b). Nesse tipo de escoamento, a duração da passagem da cabeça, ou da frente do fluxo, é muito pequena quando comparada com a passagem do corpo (Kneller e Buckee, 2000). Um exemplo desse tipo de escoamento é o aporte fluvial que entra no ambiente marinho, formando os fluxos hiperpicnais ou uma remobiliação não instantânea de material.

Esses escoamentos podem ser mantidos por longos períodos (dias a meses) com uma velocidade média local quase contante, isso significa que a velocidade aumenta e diminui lentamente ao longo do tempo. Devido a isso, eles podem ser chamados de correntes quase-permanentes (*quasy-steady-currents*) (Alexander e Mulder, 2002). Na realidade, todas as correntes de densidade naturais são não permanentes, entretanto, a velocidade média tende a permanecer quase constante por um período relativamente longo. Além disso, os fluxos contínuos ainda podem ser ditos quase-permanentes devido a constante realimentação de sedimentos, possuindo variações temporais lentas. Normalmente, esses fluxos estão associados a cheias fluviais (quando a concentração das partículas suspensas é tal que a densidade da água fluvial é maior do que a da água da bacia).

Escoamentos formados a partir da alimentação contínua caracterizam-se pelo fluxo constante de partículas fluindo do corpo até a cabeça, através de um movimento lento. Parte do excesso de fluido ambiente alcança a parte superior da cabeça e é lançado para trás. Durante esse movimento, turbulência é gerada pela mistura com o fluido ambiente e vai se dissipando gradualmente, com o incremento da distância atrás da cabeça. No corpo desses escoamentos, a camada superior é relativamente suavizada e a mistura com o fluido ambiente é mais fraca que na região da cabeça, gerando uma forte estratificação de densidade (Baas *et al.*, 2004).

O comportamento desses escoamentos e seus depósitos podem ser mais variáveis do que o comportamento e os depósitos dos escoamentos por pulsos, uma vez que estas correntes podem ser mais longas e mais estáveis do que correntes por pulso e, conseqüentemente, seus depósitos são, provavelmente, significativamente diferentes. Esses escoamentos podem causar mais erosão, transporte e deposição do que os escoamentos por pulso devido a sua duração, embora sejam mais concentrados e mais lentos (Baas *et al.* 2004).

2.2.2.2 Zona de transferência

Para compreender as características da zona de transferência, será dado enfoque nos processos dinâmicos que ocorrem no escoamento. Após o início do processo, forma-se uma mistura em suspensão com uma determinada densidade/concentração que flui para a região mais a jusante do sistema deposicional. Diversos processos ocorrem no interior do fluxo durante o seu percurso, independente do seu tipo. Esses processos caracterizam o fenômeno propriamente dito (Manica, 2009).

a) Equações do movimento

A dinâmica das correntes de densidade é bastante complexa, em especial, devido aos processos de erosão e deposição que ocorrem durante o escoamento. Por conta disso, a representação desse fenômeno tridimensional através de equações analíticas não é simples, o que leva a simplificação das mesmas.

Considerando uma única dimensão (1D), Parker *et al.* (1986) apresentam um modelo de quatro equações simplificadas, buscando representar o processo físico de desenvolvimento das correntes de densidade. As quatro equações são:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Uh}{\partial x} = e_w U \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial UCh}{\partial x} = v_s (E_s - r_0 C) \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial Uh}{\partial t} + \frac{\partial U^2 h}{\partial x} = RgChS - \frac{1}{2} Rg \frac{\partial Ch^2}{\partial x} - u^2 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial Kh}{\partial t} + \frac{\partial UKh}{\partial x} = u^2 \frac{1}{2} U^3 e_w - \varepsilon_0 h - Rgv_s Ch - \frac{1}{2} RgChUe_w - \frac{1}{2} Rghv_s (E_s - r_0 C) \quad (2.6)$$

sendo a equação da continuidade da fase líquida (Equação 2.3), a equação da continuidade da fase sólida (Equação 2.4), a equação da variação da quantidade de movimento (Equação 2.5) e uma equação de balanço final da energia turbulenta cinética (Equação 2.6):

onde:

C = concentração volumétrica média de sedimento integrada na vertical [%]

e_w = coeficiente de carreamento de água[-]

E_s = coeficiente de incorporação de sedimento do leito[-]

g = aceleração da gravidade [m/s^2]

h = espessura média da corrente [m]

K = energia cinética turbulenta média integrada na vertical, por unidade de largura [m^2/s^2]

r_0 = concentração de referência junto ao leito [-]

R = massa específica submersa do grão = $(\rho_s - \rho)/\rho$

S = declividade do leito [-]

t = tempo [s]

u_* = velocidade de cisalhamento junto ao leito [m/s]

U = velocidade média da corrente integrada na vertical [m/s]

v_s = velocidade de queda do sedimento [m/s]

x = distância na direção longitudinal [m]

ε_0 = viscosidade média na vertical [-]

ρ = massa específica do fluido ambiente [kg/m^3]

ρ_s = massa específica do sedimento [kg/m^3]

Além da espessura média da corrente (h) e da velocidade média da corrente integrada na vertical (U), essas equações fornecem a concentração volumétrica média de sedimento integrada na vertical (C), a cada tempo ou posição ao longo do fluxo (Pratson *et al.*, 2000).

O entendimento dessas equações auxilia o estudo de correntes de densidade, pois evidencia os parâmetros que devem ser relacionados e/ou observados. Entretanto, elas foram determinadas a partir de simplificações e hipóteses que estão melhor discutidas em Parker *et al.* (1986).

b) Efeitos da alta concentração

Segundo Wan e Wang (1994), a alta concentração de sedimentos nos fluxos causa diversos efeitos no seu mecanismo de transporte e na deposição, sendo que esses efeitos atuam simultaneamente. De forma simplificada, as mudanças causadas ocorrem:

- na densidade do fluido, pois ocorre um aumento da energia potencial e da quantidade de movimento no escoamento;

- na viscosidade da mistura, que é alterada com a presença de mais sedimentos, apresentando um comportamento não-Newtoniano;

- na velocidade de queda das partículas, já que há sua diminuição com o aumento da concentração, devido a: queda das partículas, que induz um movimento ascendente de água; ao empuxo da partícula, o qual diminui em função da maior densidade do fluxo; e pela interferência entre as partículas (efeito de população – *hindered settling*);

- na capacidade de transporte do escoamento, que tende a aumentar com o aumento da concentração de sedimentos.

Entretanto, essas mudanças dependem também do tipo de sedimento presente no escoamento. Winterwerp (2001) discute que, quando a capacidade de transporte de sedimento de um fluxo turbulento com sedimentos não coesivos é excedida, um novo equilíbrio com baixa carga de sedimento é formado rapidamente, uma vez que os grãos que vão se depositando junto ao fundo formam um depósito consolidado, porém com uma possível produção de turbulência. Nesse caso, os grãos remanescentes na suspensão podem ser mantidos em suspensão.

Já no caso de solos coesivos, o aumento da concentração gera um cenário diferente, uma vez que flocos de sedimentos coesivos vão se depositando, formando uma camada lamosa fluida junto ao fundo, a qual contém uma grande quantidade de água no seu interior. Assim, um sistema bifásico (duas camadas) de fluido se desenvolve, sendo que a camada de baixo é a mais densa. Nessa camada ocorre um aumento significativo das forças viscosas, o que diminui a capacidade do escoamento transportar sedimentos para jusante, apesar de turbulência ser gerada nessa camada devido ao cisalhamento junto ao fundo (Manica, 2009).

Ainda não se consegue quantificar os mecanismos que atuam nas correntes de alta densidade e essa análise depende da composição granulométrica e do comportamento reológico das misturas.

Bagnold (1954) apontou que a presença da alta concentração de sedimentos com tamanho de fração areia tende a amortecer a turbulência nos fluxos experimentais. O aumento da concentração também aumentaria a viscosidade aparente da mistura, em alguns casos, sendo suficiente para eliminar a turbulência.

Middleton (1970) estudou experimentalmente os efeitos da alta concentração de sedimentos, concluindo que:

- o aumento da densidade resulta no aumento da velocidade e na redução da diferença entre a dispersão granulométrica e seus maiores clastos (que podem ser transportados). Esses clastos podem gerar marcas de sola (*sole marks*) se a concentração na base for alta;

- o aumento da viscosidade efetiva pode resultar na supressão das pequenas escalas de turbulência e na formação da subcamada laminar (posteriormente, denominada subcamada viscosa) na base da corrente;

- o aumento das interações partícula a partícula resulta em diminuição na efetividade do processo de seleção. A alta concentração pode ser reconhecida pelos sedimentos pobremente selecionadas, especialmente os finos;

- o aumento da taxa de deposição inicial, bem como a própria taxa de deposição, tem consequências importantes sobre os tipos de estruturas formadas no depósito.

c) Mecanismo de suporte dos grãos

Os seguintes mecanismos de suporte dos grãos são destacados no desenvolvimento de uma corrente de densidade:

- Turbulência do fluido intersticial: mecanismo onde os grãos são mantidos em suspensão pela componente ascendente da turbulência do fluido. Está diretamente associado à velocidade do escoamento, que varia em qualquer ponto e direção continuamente em torno de um valor médio. Assim, a velocidade instantânea do escoamento (U_{inst}) se caracteriza pela presença de um valor médio (U) mais a correspondente flutuação das velocidades em torno do valor médio (u') nas três direções do escoamento. Nesse caso, se atribui à componente vertical da turbulência (abordagem estocástica) o mecanismo de suporte dos grãos, não levando em conta a presença de estruturas coerentes da turbulência (abordagem determinística);

- Decantação impedida (*hindered settling*): impedimento à deposição devido à própria elevação da concentração de grãos que inibe o movimento da água e aproxima os grãos que tentam depositar-se, obrigando a água intersticial a ser

expulsa dos espaços intersticiais entre as partículas, o que dificulta a movimentação e retarda a decantação dos grãos;

- Empuxo (*buoyant lift*): fornecido por uma possível matriz composta de sedimentos mais finos e água;

- Pressão dispersiva (*dispersive pressure*): os grãos são mantidos em suspensão pelas forças geradas durante as colisões entre grãos (regime inercial) ou pela ação das forças viscosas do meio fluido (regime viscoso). A força de interação é proporcional à tensão de cisalhamento transmitida entre os grãos, se contrapondo a tendência dos grãos caírem sobre o fundo;

- Movimento ascendente do fluido intragranular: em dispersões muito concentradas de grãos, o fluido tende a ser expulso para cima ao mesmo tempo em que uma “chuva” de grãos maiores e mais densos tende a decantar, estabelecendo uma competição entre os grãos que caem e o fluido que tenta ascender, o que eleva a poro pressão até o ponto em que o fluido rompe a resistência que os grãos oferecem ao escape de fluidos intersticiais e escapa pelos espaços intergranulares. Enquanto houver aceleração do fluxo e pressão nos poros elevada, os grãos serão mantidos suspensos pelo fluido intersticial que busca escapar, retardando a sedimentação das partículas;

- Matriz coesiva (*matrix strenght*): os grãos são submersos em uma matriz lamosa que possui reologia não newtoniana. Nesse caso, o principal fenômeno que atua no deslocamento é a interação dos grãos com a matriz, sendo as forças gravitacionais pouco atuantes. A matriz lamosa forma um filme que lubrifica as irregularidades da superfície dos grãos, reduzindo o cisalhamento e permitindo que os fluxos fluam por grandes distâncias, mesmo em declives muito suaves (Del Rey, 2006).

Normalmente, dois ou mais mecanismos de suporte podem atuar conjuntamente ou em regiões distintas no interior da corrente. Contudo, sempre há o predomínio de um dos processos em cada etapa do desenvolvimento da corrente.

Esses fenômenos são dependentes, entre outros fatores, da concentração de grãos, da reologia do fluido, da composição e do tipo de sedimento, o que altera a

propriedade das misturas e, conseqüentemente, modifica o comportamento do fluido.

d) Transformações de fluxo

Durante o desenvolvimento de uma corrente de densidade, muitos processos podem ocorrer no seu interior, sendo esses chamados de transformações de fluxo, ou mudanças de regimes, sendo os mais importantes e menos compreendidos processos que ocorrem no interior da corrente (Shanmugam, 2000).

Fischer (1983) idealizou quatro tipos de transformações de fluxos que podem ocorrer durante o desenvolvimento da corrente (Figura 2.5). São elas:

- Transformação no corpo: ocorre quando o fluxo é alterado entre laminar e turbulento, sem que haja adição ou perda de fluido do corpo da corrente;

- Transformação gravitacional: ocorre quando as partículas carregadas pelo fluxo são gravitacionalmente segregadas, conseqüentemente, o regime turbulento, que inicialmente se desenvolve em todo o fluxo, passa a cessar na região basal, desenvolvendo, junto ao fundo, uma região altamente concentrada, onde o movimento é essencialmente laminar, sendo que, ao mesmo tempo, o fluxo diluído acima dessa região se mantém turbulento;

- Transformação de superfície: ocorre quando o fluido ambiente é incorporado, por mistura, à camada superior, devido ao cisalhamento na interface corrente-fluido ambiente ou quando o fluido ambiente entra pela superfície frontal inferior da corrente formando o seu nariz;

- Transformação por elutriação: desenvolvida pelo movimento ascendente do fluido intersticial, o qual carrega partículas finas, que saem da região mais densa, junto ao fundo, para produzir uma camada mais diluída e turbulenta acima dessa camada mais densa.

As transformações de fluxo propostas por Fisher (1983) foram concebidas na época em que eram bastante recentes as descobertas a respeito de estruturas turbulentas próximas à parede. Portanto, nessa classificação, a nomenclatura laminar e turbulenta refere-se ao fato de o escoamento se deslocar com ou sem a formação de estruturas aparentes de turbulência (Boffo, 2010).

Estudos anteriores à publicação acima mencionada revelaram a existência de estruturas turbulentas junto à parede, nas quais pulsos muito rápidos de aumentos de tensão seriam os responsáveis pela formação de turbulência na região da camada limite, mostrando que, mesmo quando aparentemente o escoamento não desenvolve turbulência, ela está presente nas regiões próximas ao contorno sólido ou à parede (Boffo, 2010).

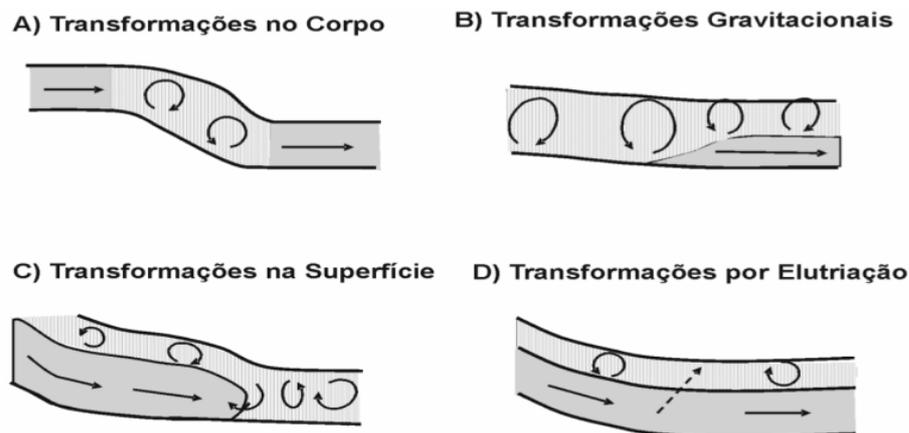


Figura 2.5 – Esquema das transformações de fluxos (Fischer, 1983, apud Del Rey, 2006)

Segundo Middleton e Hampton (1976), para que haja a transformação de um fluxo de detritos para uma corrente de turbidez seria necessária uma mistura adequada de água para gerar a turbulência essencial para a sua formação e que essa turbulência seria gerada no fluxo pela “fricção” nas interfaces superiores e inferiores ou pelo fenômeno de separação de fluxo. Nesse caso, existiriam três maneiras para o fluxo de água se misturar:

- mistura turbulenta ao longo da interface superior;
- mistura do fluxo ao longo da interface inferior;
- mistura provocada pela formação de vórtices atrás da cabeça.

Para Fischer (1983), a maneira como as partículas são suportadas dentro do fluxo no seu estágio final do movimento determina a textura e as estruturas do depósito, o que, segundo Shanmugam (1996) dificulta a compreensão das transformações durante a sua ocorrência.

e) Ondas internas

Para Kneller e Branney (1995) a corrente apresentaria flutuações temporais na sua concentração atreladas à condição de não permanência do escoamento. As hipóteses para explicar essas flutuações temporais na concentração da corrente são:

- a existência de fluxos pulsantes com ondas internas no escoamento;
- a existência de heterogeneidades na distribuição granulométrica enquanto a corrente se desloca.

Através da análise de imagens geradas por um ultrassom de uso médico, Del Rey *et al.* (2003) levantaram a hipótese de que o fluxo apresentaria um caráter bipartido e que, na interface que divide as duas partes do fluxo, ocorrem ondulação relacionadas ao desprendimento de vórtices na porção superior da corrente (Figuras 2.6a e 2.6b). Essas ondulações parecem atuar na gênese das flutuações da velocidade de deslocamento da corrente.

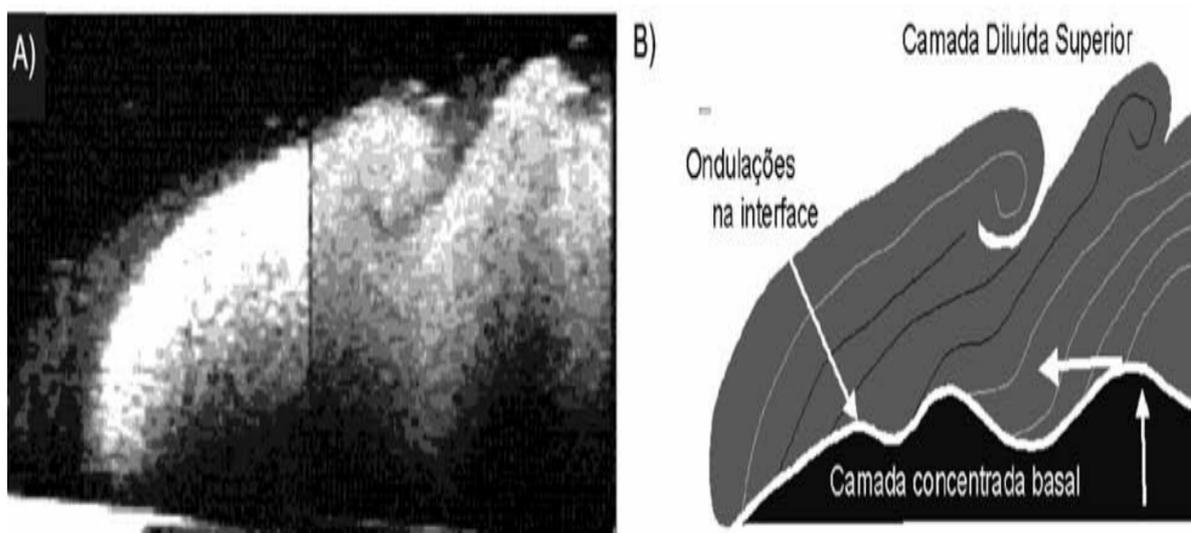


Figura 2.6 – Visualização de ondas internas nas correntes de turbidez: a) imagem obtida por ultrassom e; b) desenho esquemático (Del Rey et al., 2003)

f) Autosuspensão

Bagnold (1962) sugere o termo autosuspensão para descrever o mecanismo de sustentação dos sedimentos transportados. O critério de autosuspensão pode ser explicado pelo seguinte ciclo:

1) a corrente recebe uma entrada de energia gravitacional suficiente para manter a turbulência e para sustentar as partículas em suspensão gerada pelo fluido;

2) essa suspensão gera uma diferença de densidade entre o fluido ambiente e a corrente;

3) essa diferença de densidade mantém a carga em suspensão na corrente;

4) a carga em suspensão faz a corrente fluir gerando turbulência.

Middleton (1966) argumentou que em uma corrente permanente, que não é deposicional nem erosiva, deve existir um balanço entre as forças que favorecem a sedimentação da suspensão (reduzindo a densidade e a carga da corrente) e a componente vertical da força da gravidade agindo na suspensão, a qual é a responsável pelo movimento da corrente e, portanto, pela geração da turbulência que mantém o sedimento em suspensão. Assim, seria necessário haver uma adição de energia para iniciar a corrente através da criação da suspensão.

g) Trocas de sedimentos com o substrato

Outro processo ligado ao de autosuspensão é a troca de sedimentos com a superfície inferior, no caso o substrato marinho. Isso pode acontecer pelo processo de erosão, onde o material da superfície inferior é erodido e carregado para dentro da corrente. O material incorporado dentro da corrente causa um aumento na massa específica e na energia interna do fluxo (Puhl, 2012). Esse carregamento de material causa o aumento da capacidade de transporte da corrente, provocando o seu movimento a distâncias maiores. A situação inversa também é possível, devido a deposição de material da corrente na superfície inferior. Ao depositar parte do sedimento no leito, a diferença de massa específica entre a corrente e o fluido ambiente é reduzida, conseqüentemente, o fluxo desacelera, tendendo a depositar cada vez mais até a sua parada.

h) Trocas na interface

Outro processo dinâmico que ocorre no escoamento está relacionado aos processos de mistura que ocorrem ao longo da superfície da corrente. Devido à turbulência do escoamento, tanto os processos de mistura que acontecem na cabeça da corrente (instabilidades de Kelvin-Helmholtz e a formação de lobos e rachas na superfície inferior) quanto no corpo (carreamento) são causados pelo processo de difusão turbulenta (Middleton, 1993).

A viscosidade do fluido não tem grande influência no escoamento, no caso de escoamentos turbulentos. Contudo, à medida que as velocidades são menores, as forças viscosas tornam-se importantes para a dinâmica do escoamento e para o processo de mistura, passando a difusão molecular a ser importante no processo de mistura entre os materiais.

i) Diferenças entre fluxos de detritos e correntes de turbidez

Pratson *et al.* (2000) argumentam que a diferença de comportamento entre os fluxos de detritos e as correntes de turbidez se dá com relação a presença de argila e da concentração. Os fluxos de detritos são mais densos e possuem uma quantidade de argila suficiente para suportar os materiais de granulometria mais grossa durante a sua movimentação (Middleton e Hampton, 1976). As correntes de turbidez são diluídas e transportam tanto a argila como os materiais mais grossos em uma solução de água e sedimento em que são mantidos em suspensão pela turbulência do fluxo. A Figura 2.7 apresenta a diferença da dinâmica interna das correntes de turbidez (Figura 2.7a) e dos fluxos de detritos (Figura 2.7b), caracterizando nesse último, duas regiões de escoamento (fluxo cisalhante e fluxo tipo “plug”).

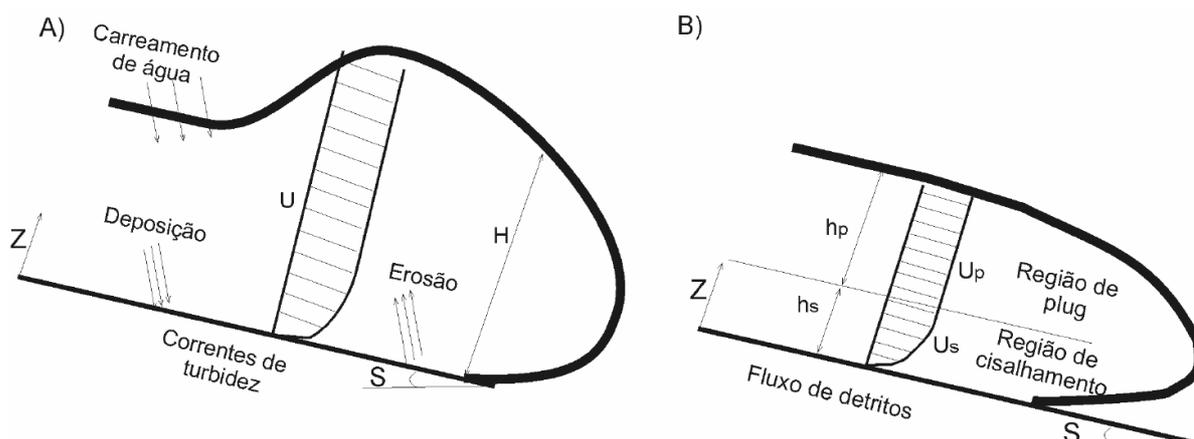


Figura 2.7 – Diferença entre a dinâmica interna: a) corrente de turbidez e; b) fluxo de detritos (Manica, 2009)

2.2.2.3 Zona de deposição

A deposição se dará quando a corrida de densidade encontrar gradientes baixos ou perda de confinamento lateral (espaços amplos), ainda que o fluido continue a jusante em gradientes muito baixos.

Existem quatro mecanismos de deposição, segundo Lowe (1982), são eles:

1) sedimentação por tração: onde as partículas se depositam individualmente, provenientes da carga de leito (*bed-load*);

2) sedimentação por suspensão: onde as partículas respondem individualmente e se acumulam diretamente à carga de suspensão (*suspended load*);

3) congelamento friccional (*frictional freezing*): onde as partículas são depositadas coletivamente (formando um *plug*) e interagem através do contato friccional (*frictional*);

4) congelamento coesivo (*cohesive freezing*): onde as partículas são depositadas coletivamente e interagem com as forças coesivas da matriz de sedimentos.

Os dois primeiros tipos ocorrem a partir de correntes de turbidez, fluxos liquefeitos e dos fluxos fluidizados, onde as partículas sedimentares tendem a se agrupar individualmente, sendo que as partículas grossas e finas tendem a cair separadamente durante a deposição, em função de suas velocidades de queda, gerando uma gradação normal no depósito. Nos dois últimos, fluxos de grãos e de detritos, a deposição ocorre quando a tensão cisalhante é inferior ao “congelamento

friccional” (*frictional freezing*) dos grãos ou à interação coesiva entre as partículas. Desse modo, o fluxo estaciona, depositando-se coletivamente, com a formação de um depósito em massa (Giacomet, 2005).

Segundo Kuenen e Migliorini (1950), quando sedimentos com grãos de tamanhos variados são introduzidos de forma espasmódica em um corpo d’água não muito raso, tenderá, com o passar do tempo, arranjar-se formando leitos gradados sobre o fundo. As partículas grossas assentam-se mais rapidamente que as partículas finas, acumulando-se primeiro. Ocorre o contínuo decréscimo no assentamento das classes granulométricas até que as partículas mais finas depositam-se nas porções de topo. Como outras causas para a formação das camadas gradadas, considera-se o decréscimo gradual na capacidade de transporte da corrente de densidade. Bouma (1962) apresentou o modelo deposicional resultante de observações ao longo da distância e da gradação vertical de sedimentos no interior do depósito. O seu modelo ficou conhecido como a clássica “Sequência de Bouma” (Figura 2.8).

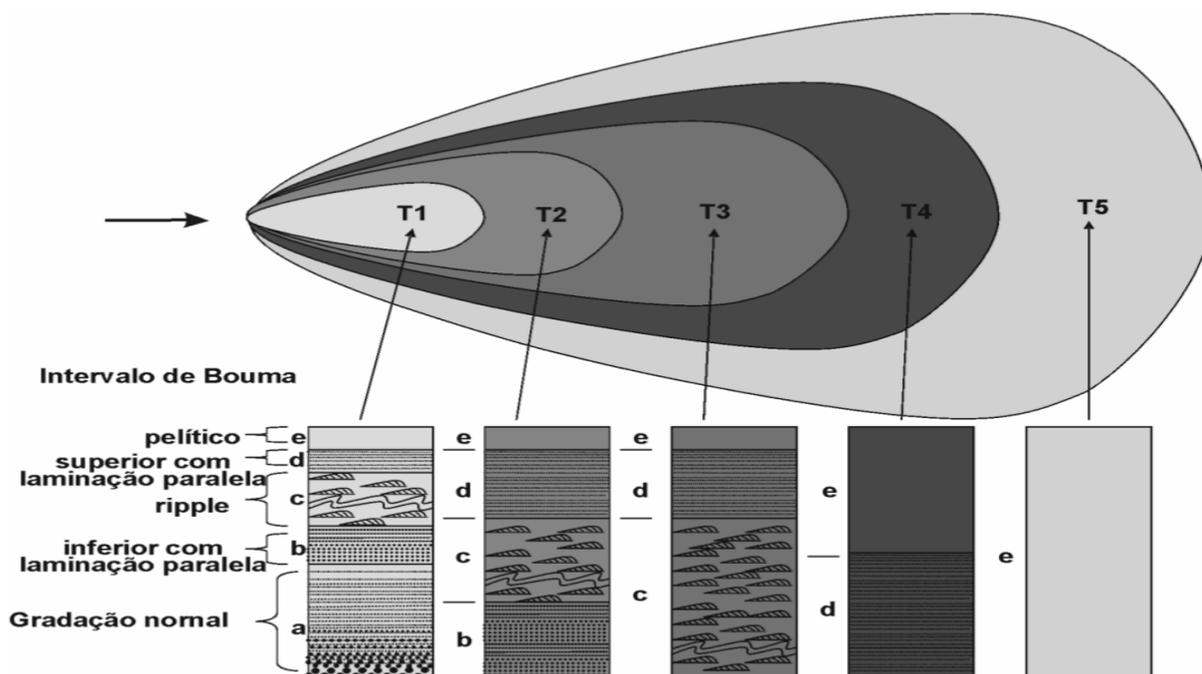


Figura 2.8 – Desenho esquemático da sequência de Bouma (1962) (Del Rey, 2006)

Middleton (1967) destacou as seguintes diferenças, expostas na Tabela 2.1, entre os mecanismos de deposição de sedimentos.

Tabela 2.1 Diferenças nos mecanismos de deposição de alta e baixa densidade (Middleton, 1967)

Estágio	Baixa densidade	Alta densidade
1	Deposição de pouco sedimento imediatamente atrás da cabeça, seguido de um curto movimento de tração	Deposição de sedimentos imediatamente atrás da cabeça, seguido pela extensiva massa cisalhante do depósito. O topo do depósito não é bem definido
2	Baixa deposição de sedimentos em suspensão seguida de um maior movimento de tração	Formação de um depósito expandido (depósito rápido). Ondas de Helmholtz formam-se na interface superior do depósito e produzem um movimento circular cisalhante profundo dentro do depósito
3	Rápida deposição de sedimento em suspensão quando a velocidade declina rapidamente, seguida da passagem da principal onda da corrente	Desaparecimento das ondas e formação da superfície planar, acompanhado pela consolidação do fundo
4	Deposição muito baixa de sedimento vinda da zona de mistura carregada pela corrente e muito baixa deposição de sedimentos finos presentes na cauda da corrente	Deposição muito baixa de sedimento vindo da zona de mistura carregada pela corrente, e muito baixa deposição de sedimentos finos presentes na cauda da corrente

Segundo o autor acima citado, o comportamento dos fluxos de alta concentração e a formação do depósito característico é função do comportamento pseudoplástico da suspensão de partículas a altas concentrações e é causada pelas interações das partículas (pressão dispersiva) dentro da suspensão.

2.2.3 Feições físicas de uma corrente de densidade

Ao longo de sua evolução, as correntes de densidade apresentam regiões, de comportamento e forma distintos, as quais podem ser divididas em três partes principais (Figura 2.9): frente de avanço ou cabeça, região posterior ou corpo e, em alguns casos, cauda. Esses elementos podem se desenvolver mais ou menos de acordo com as condições em que a corrente se desenvolve (Del Rey, 2006).

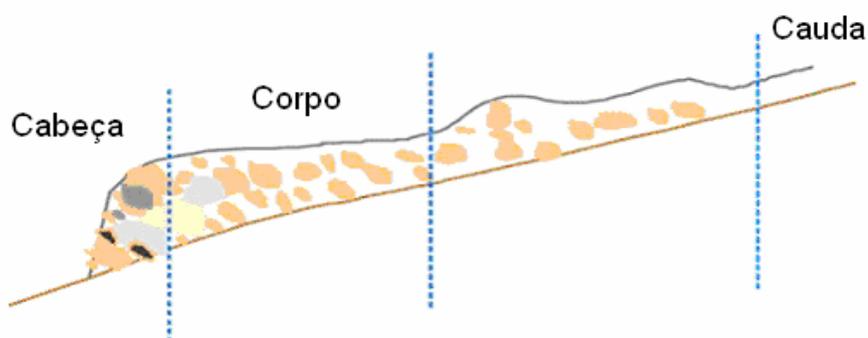


Figura 2.9 – Partes de uma corrente de densidade (Alvarado, 2006)

a) Cabeça

A primeira parte é formada pela cabeça ou frente, a qual tem formato aproximado de uma semi-elipse. Na maioria dos casos, a altura da cabeça é quase sempre maior que a do corpo e da cauda, devido à resistência imposta pelo fluido ambiente ao avanço da corrente. Isso ocorre, pois, à medida que a cabeça vai avançando, ela se desloca e acelera o fluido no seu entorno (ambiente). Esse fluido ambiente, por sua vez, causa uma resistência à corrente que é maior do que a resistência junto ao fundo e junto a interface. Logo a cabeça da corrente, deve ser maior para compensar esta força, enquanto que a parte atrás da cabeça possui somente a resistência de fundo e interface agindo contra o escoamento (Middleton, 1993).

Devido ao avanço intruso no ambiente, a região frontal da corrente apresenta-se como uma zona de intensa mistura com o fluido ambiente, contudo, seu contorno pode ser claramente definido. A parte traseira da cabeça apresenta uma série de vórtices de mistura transversais, conhecidos como instabilidades de Kelvin-Helmholtz (Figura 2.10a), os quais se alastram para a região posterior da corrente, tendo grande influência sobre o resto da corrente. Esse tipo de vórtice é formado pelo cisalhamento viscoso na interface superior da corrente com o fluido ambiente, criando uma zona para a mistura turbulenta (Figueiredo, 2010).

A resistência junto ao fundo provoca na corrente a existência de um ponto mais à frente e pouco acima da superfície inferior, chamado nariz da corrente, por onde a corrente sobre-passa o fluido ambiente. Por essa região, também ocorre a entrada do fluido ambiente para dentro da corrente, o que resulta numa zona de instabilidade gravitacional tridimensional, chamada de complexo de lobos e ranhuras (Figura 2.10b) (Puhl, 2007). Essas estruturas são formadas através de instabilidades convectivas produzidas pelo fluido menos denso (ambiente), quando a corrente passa por cima e misturado pelos movimentos que ocorrem dentro da cabeça formando essas instabilidades.

Simpson (1997) descreve diversos fatores que influenciam na altura e extensão da cabeça, destacando a inclinação do fundo e a viscosidade da corrente como os mais importantes. Middleton (1966) observou que, à medida que a cabeça

vai avançando, sofre resistência do fluido ambiente e desenvolvem linhas de fluxo que divergem para cima dentro da cabeça. Tais linhas, por sua vez, deslocam e aceleram o fluido ambiente no seu entorno. Isso ocorre porque a resistência à frente da corrente é maior do que a resistência junto ao fundo e junto à interface superior.

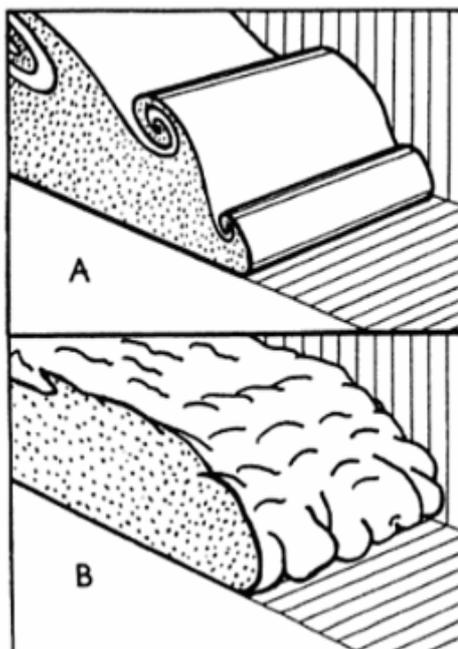


Figura 2.10 – Formas de instabilidade que ocorrem na parte frontal da corrente de densidade: (a) vórtices de Kelvin-Helmholtz e (b) complexo de lobos e ranhuras (Simpson, 1997)

Dessa forma, a cabeça da corrente deve apresentar uma maior espessura que o corpo para compensar essa força, uma vez que ele possui somente a resistência do fundo e da interface superior agindo contra o escoamento. Tal fato implica que o balanço de massa e de quantidade de movimento da cabeça difere significativamente daquele do corpo e da cauda (Middleton, 1993).

Simpson (1997) descreve a cabeça de corrente em três regiões: a zona densa inferior onde não há mistura do fluido, a zona superior onde ocorre de mistura com o fluido menos denso através do colapso de vórtices e a zona não-perturbada de fluido ambiente menos denso (Figura 2.11). O ponto mais frontal da corrente, também denominado por nariz, está situado um pouco acima da superfície inferior, como resultado da condição de não-deslizamento do fundo, da resistência na interface superior e da entrada de fluido ambiente abaixo da cabeça. Esta situação provoca uma pequena circulação reversa junto ao fundo.

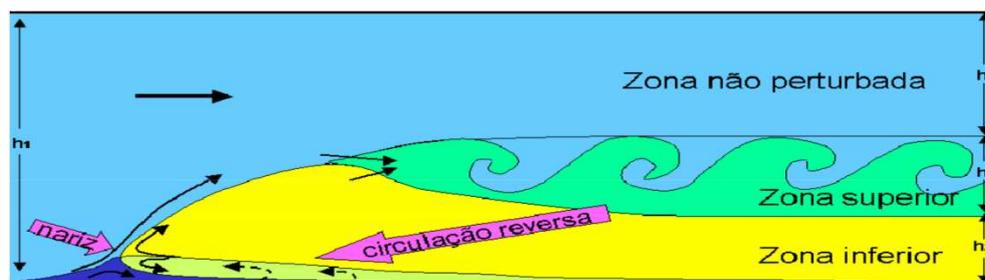


Figura 2.11 – Fluxos que ocorrem na cabeça de uma corrente de densidade (Simpson, 1997)

b) Corpo

O corpo da corrente é caracterizado por deslocar-se com uma velocidade maior do que a velocidade da cabeça da corrente, podendo chegar a 30% ou 40% (Kneller e Buckee, 2000 e Baas *et al.*, 2004). Uma das causas disso é a formação de vórtices atrás da cabeça da corrente, que provocam uma diluição maior nesta região. Então, para manter a taxa constante de avanço, a corrente tem que compensar esta região diluída, o que é feito através do aumento de velocidade do corpo (Middleton, 1993). Elisson e Turner (1959) descreveram o corpo como uma região de velocidade estável que possui uma camada fina e densa de fluido próximo à base da corrente.

Simpson e Britter (1979) dividiram o corpo em duas regiões distintas: uma junto ao fundo, onde a densidade é maior, e outra acima desta, onde ocorre o processo de mistura com o fluido ambiente. Esse processo de mistura, além de acontecer atrás da cabeça da corrente, se desenvolve, por todo o seu corpo à medida que a corrente avança, através do carreamento de fluido ambiente. Postma *et al.* (1988) comentaram que a interface entre estas duas camadas (bipartição) apresenta uma descontinuidade dentro do fluxo do corpo, refletindo num gradiente de concentração e de viscosidade aparente abrupta nesta zona.

Poucas são as definições teóricas do corpo da corrente (Kneller e Buckee, 2000), aliás, não há um consenso na definição da separação entre a região frontal e a região posterior da corrente. Na maioria dos casos, pode-se perceber visualmente uma descontinuidade na espessura da corrente, além de uma região de maior mistura com o fluido ambiente na parte superior (Puhl, 2012).

Ellison e Turner (1959) descrevem o corpo da corrente de densidade como sendo uma região de velocidade permanente no sentido da corrente, que apresenta uma camada de fluido mais densa e delgada próxima a camada inferior (região mais concentrada), e outra acima dessa (região menos concentrada), onde ocorre o processo de mistura com o fluido ambiente. Esse processo de mistura na camada superior, além de acontecer atrás da cabeça da corrente, se desenvolve por todo o seu corpo, à medida que a corrente avança, através do carreamento de fluido ambiente, gerando uma sucessão irregular de grandes turbilhões (Figueiredo, 2010). Postma *et al.* (1988) comentaram que a interface entre essas duas camadas (bipartição) apresenta uma descontinuidade dentro do fluxo do corpo, refletindo num gradiente de concentração e de viscosidade aparente abrupta nessa zona.

Sendo a velocidade no corpo da corrente mais elevada que a velocidade da cabeça, a altura da cabeça aumenta à medida que a velocidade do corpo aumenta e o material move-se mais rapidamente para a cabeça (Kneller *et al.*, 1999). Uma das causas disso é a formação de vórtices atrás da cabeça da corrente, que provocam uma diluição maior nessa região. Então, para manter a taxa de avanço constante, a corrente tem que compensar essa região diluída, o que é feito através do aumento da velocidade do corpo.

A intensa mistura observada na camada superior dificulta a medição e a definição da espessura da região do corpo devido à esteira de vórtices de mistura que se desenvolvem na camada superior das correntes. Puhl (2007) realizou estimativas do erro cometido na medição da espessura do corpo, seus resultados estimaram erros de aproximadamente 30% e 15% para correntes conservativas e não-conservativas, respectivamente.

Devido à velocidade do corpo ser superior à da cabeça, essa última recebe um impulso por parte do corpo. Para dissipar esta energia, a cabeça tende a aumentar sua geometria ou utiliza o excesso de energia para carrear material para o seu interior. Assim, essa zona se caracteriza por ser predominantemente de erosão. Já, no corpo principal do fluxo, o sedimento é carreado em suspensão mantendo a espessura do fluxo quase uniforme (Manica, 2009).

c) Cauda

Em alguns casos, ainda é possível distinguir uma terceira região, chamada cauda, a qual é caracterizada por ser uma região onde a espessura decresce rapidamente. Nessa região as velocidades são baixas, além de ser uma zona mais diluída (pouca concentração de sedimentos) onde há predominância de sedimentos finos, os quais vão sendo depositados assim que o fluxo vai desacelerando (Puhl, 2012).

2.2.4 Comportamento reológico da mistura

A reologia é o ramo da física que estuda a relação tensão-deformação dos corpos físicos, ou seja, a maneira como ocorrem as mudanças na forma (deformação) e no fluxo de um material submetido a um nível de tensão, avaliando a viscosidade, plasticidade, elasticidade e o escoamento da matéria. No estudo das correntes de densidade, essa relação é de fundamental importância, pois através dela pode-se determinar o comportamento reológico e a viscosidade das misturas de água e sedimentos que compõe a corrente (Manica, 2009).

Pela reologia, podemos classificar os fluidos (Tabela 2.2) de acordo com a relação entre a tensão sobre ele aplicada e a deformação causada (Figura 2.12a) e com o tempo (Figura 2.12b).

Tabela 2.2 – Classificação dos fluidos com relação ao comportamento reológico

Tipo de fluido	Dependentes do tempo	Resistência inicial	Tensão vs. Deformação com relação ao:	
			Gradiente de velocidade	Tempo
Newtoniano	Não	Não	Linear	-
Dilatante			Aumenta	
Pseudo-plástico			Diminui	
Plástico de Bingham		Sim	Aumenta linearmente	
Plástico			Diminui linearmente	
Tixotrópico (afinante)	Sim	Não	-	Diminui
Reopético (espessante)				Aumenta

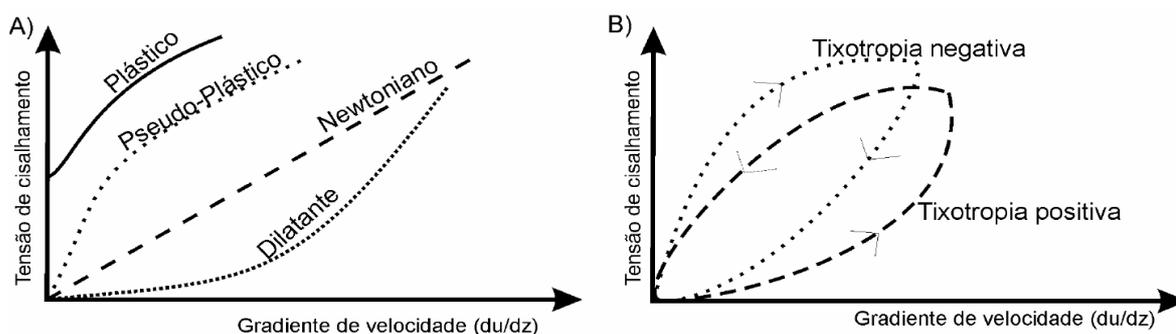


Figura 2.12 – Classificação dos fluidos com relação ao comportamento reológico

Os fluidos newtonianos apresentam a viscosidade constante, ou seja, apresentam uma taxa de deformação que varia linearmente com uma taxa de cisalhamento, sobre temperatura e pressão constantes. Por sua vez, as substâncias plásticas apresentam uma resistência inicial ao cisalhamento antes de deformar. As substâncias plásticas com reologia de Bingham mostram pseudo-viscosidade ou viscosidade plástica, ou seja, a taxa de incremento de deformação é linear com o aumento da tensão cisalhante (Del Rey, 2006).

Os fluidos ainda podem ser classificados como pseudoplásticos, caso a viscosidade diminua com o aumento da tensão de cisalhamento, ou dilatantes, caso a viscosidade aumente com o aumento da tensão de cisalhamento.

Além de todos esses fluidos, cujas propriedades independem do tempo de aplicação das tensões, têm-se os fluidos dependentes do tempo (fluidos com memória). O fluido é denominado tixotrópico (afinante), quando a viscosidade aparente diminui com o tempo em que o fluido é submetido à tensão. Caso a viscosidade aparente aumente com o tempo em que o fluido é submetido a tensão, o fluido é denominado reopético (espessante). A tixotropia ocorre devido à interação elétrica entre as partículas de argila. Esta interação aumenta de intensidade quase que linearmente após o fluxo ter cessado, provocando uma organização progressiva das partículas, que, por sua vez, aumenta a viscosidade da mistura. Este arranjo é quebrado quando o fluido inicia seu movimento (Del Rey, 2006).

O modelo de tensão-deformação mais simples é o que apresenta uma relação linear entre a tensão de cisalhamento aplicada e a deformação. Nesse caso, os fluidos são chamados de Newtonianos (devido à definição da Lei de Newton da Viscosidade), sendo que a viscosidade do fluido ou da mistura (coeficiente de

viscosidade dinâmica) é constante (Manica, 2009). Alguns dos modelos que tentam descrever a relação entre a tensão cisalhante aplicada e a taxa de deformação para os diferentes comportamentos reológicos estão apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Modelos de leis para os diferentes comportamentos reológicos

Modelo	Equação	Tipo de fluido
Newton	$\tau = \mu\gamma$	Newtoniano
Lei de Ostwald (potência)	$\tau = k\gamma^n$, sendo $n > 1$	Dilatante
Lei de Ostwald (potência)	$\tau = k\gamma^n$, sendo $n < 1$	Pseudo-plástico
Bingham	$\tau = \tau_0 + k\gamma$	Plástico de Bingham
Hershel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + k\gamma^n$	Plástico

onde:

τ = tensão de cisalhamento [Pa]

τ_0 = tensão de cisalhamento crítica [Pa]

μ = coeficiente de viscosidade dinâmica [Pa.s]

γ = (du/dz) é o gradiente de velocidade ou taxa de deformação [1/s]

k = coeficiente de consistência [Pa.sⁿ]

n = coeficiente da lei de potência

2.2.5 A concentração de sedimentos

A incorporação ou a perda de sólidos em suspensão nas correntes de turbidez é uma constante durante o seu deslocamento, desde sua inicialização até a sua extinção. A concentração de sedimentos nas correntes pode alterar significativamente as propriedades do fluido e do comportamento do fluxo. A densidade do fluido, a velocidade de queda dos grãos, a viscosidade, a velocidade do fluxo e a capacidade de transporte podem ser todas elas alteradas (Del Rey, 2006).

O aumento da concentração de sedimentos em suspensão aumenta a densidade do fluxo. Sendo assim, altas concentrações de sedimentos implicam em uma maior energia potencial e em uma maior quantidade de movimento no escoamento. Se todas as propriedades do fluxo permanecerem inalteradas, o aumento de concentração de sedimentos resulta em um aumento da velocidade do fluxo.

Para Wan e Wang (1994), a presença de mais sedimentos altera a viscosidade da mistura, fazendo com que o fluido apresente um comportamento não-Newtoniano, além de implicar na diminuição da velocidade de queda dos grãos devido aos seguintes efeitos:

- a queda das partículas induz um movimento ascendente de água que provoca o arraste das partículas;
- o empuxo da partícula diminui em função da maior densidade do fluido;
- a viscosidade aumenta;
- se o fluido muda a sua reologia, para Bingham, passa a existir o efeito da tensão-limite;
- há a interferência entre as partículas (efeito de população);
- ocorre a floculação quando há uma quantidade suficiente de argila em suspensão. Em casos extremos, as partículas de argila formam uma estrutura floculada que inibe a queda das partículas grossas.

Velocidades de queda muito baixas podem fazer com que o sedimento que entra na corrente tenha dificuldade em sair do fluxo. Isso realimenta o processo, aumentando a capacidade de transporte da mesma.

O aumento da concentração de sedimentos em correntes promove uma elevação da sua densidade que, por sua vez, aumenta o empuxo sobre os grãos. Como resultado, menos energia é necessária para manter as partículas em suspensão que, por sua vez, possibilita que esse excedente de energia possa ser utilizado para assimilar mais sedimento, resultando num aumento da capacidade de transporte da corrente (Del Rey, 2006).

Entretanto, essas mudanças dependem também do tipo de sedimento presente no escoamento. Winterwerp (2001) discute que, quando a capacidade de transporte de sedimento de um fluxo turbulento com sedimentos não coesivos é excedida, um novo equilíbrio com baixa carga de sedimento é formado rapidamente, uma vez que, os grãos que vão se depositando junto ao fundo formam um depósito consolidado, porém com uma possível produção de turbulência. Nesse caso, os grãos remanescentes na suspensão podem ser mantidos em suspensão (Manica, 2009).

Já no caso de solos coesivos, o aumento da concentração gera em um cenário diferente, uma vez que flocos de sedimentos coesivos vão se depositando, formando uma camada lamosa fluida junto ao fundo, a qual contém uma grande quantidade de água no seu interior. Assim, um sistema bifásico (duas camadas) de fluido se desenvolve, sendo que a camada de baixo é a mais densa. Nessa camada ocorre um aumento significativo das forças viscosas, o que diminui a capacidade do escoamento transportar sedimentos para jusante, apesar de turbulência ser gerada nessa camada devido ao cisalhamento junto ao fundo (Manica, 2009).

2.2.6 Classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos

Com base na reologia dos fluidos, Dott (1963) propôs uma classificação dos fluxos de sedimentos subaquáticos, classificando-os em dois tipos: newtonianos (correntes de turbidez) e plásticos (fluxos de massa, tais como fluxo de detritos, fluxos de grãos e outros) (Del Rey, 2006).

Middleton e Hampton (1976) propõem uma classificação dos fluxos gravitacionais de sedimentos baseada nos mecanismos de suporte dos grãos. Segundo esses autores, quatro mecanismos de suporte dos grãos são definidos (Figura 2.13)

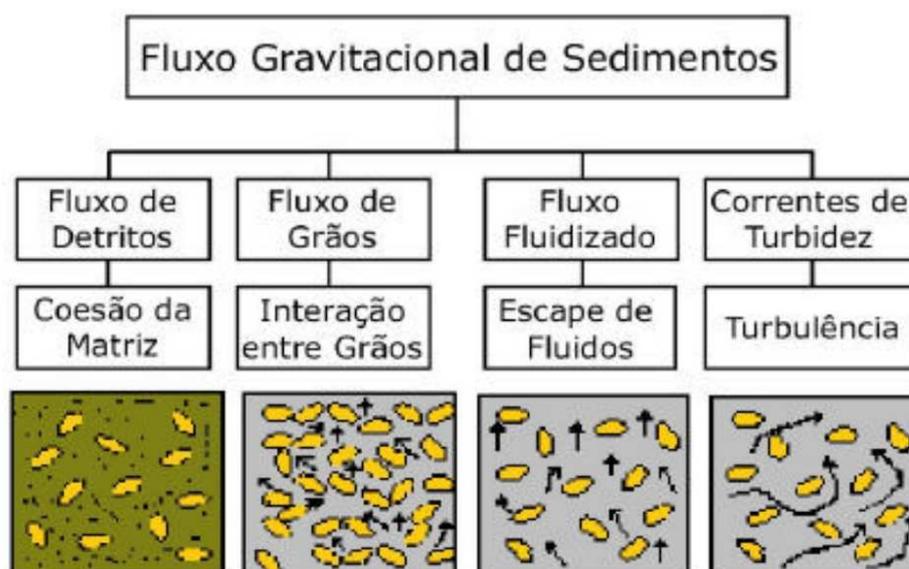


Figura 2.13 – Classificação dos fluxos de densidade com base nos mecanismos dominantes de suporte de grãos (Middleton e Hampton, 1976)

1. *Turbulência do Fluido Intersticial* – é o mecanismo típico das correntes de turbidez e, em parte, de suspensões concentradas. Nelas os grãos são mantidos em suspensão pela componente ascendente da turbulência do fluido;

2. *Movimento Ascendente do Fluido Intragranular* – ocorre pela energia gerada devido o aumento da pressão nos poros ocasionada pela redução volumétrica que ocorre devido o rearranjo de grãos em fluxos de sedimentos liquefeitos e pela entrada de fluido sob a cabeça das correntes de densidade;

3. *Interação de Grãos* – os grãos são mantidos em suspensão diretamente pelas forças geradas pelos choques entre grãos (regime inercial) ou pela ação das forças viscosas produzidas pela interação entre os grãos (regime viscoso). Esse mecanismo é particularmente conhecido em fluxos de detritos arenosos (fluxo de grãos) verificado em frentes de dunas eólicas;

4. *Coesão da Matriz* – os grãos são submersos em uma matriz lamosa, composta pela mistura entre o fluido intersticial e sedimentos finos, que possui reologia não newtoniana. Neste caso, o principal fenômeno que atua no deslocamento é a interação dos grãos com a matriz sendo as forças gravitacionais pouco atuantes. Esse é o mecanismo de transporte predominante dos fluxos de detritos lamosos (Del Rey, 2006).

Normalmente ocorrem esses quatro mecanismos de suporte de grãos nas correntes de densidade. Eles podem atuar conjuntamente ou em regiões distintas no interior da corrente. Contudo, há sempre o predomínio de um dos processos em cada etapa do desenvolvimento da corrente.

Shanmugam (2000) discute os problemas da classificação baseada apenas no mecanismo de suporte de grãos, enfatizando que esta classificação é própria para o estágio final do fluxo, enquanto que, durante o seu desenvolvimento mais de um mecanismo de suporte pode estar envolvido. Ele propôs a classificação dos escoamentos baseada na reologia do fluido, modo de transporte e mecanismo de suporte do sedimento. Esta classificação pode ser visualizada na Figura 2.14.

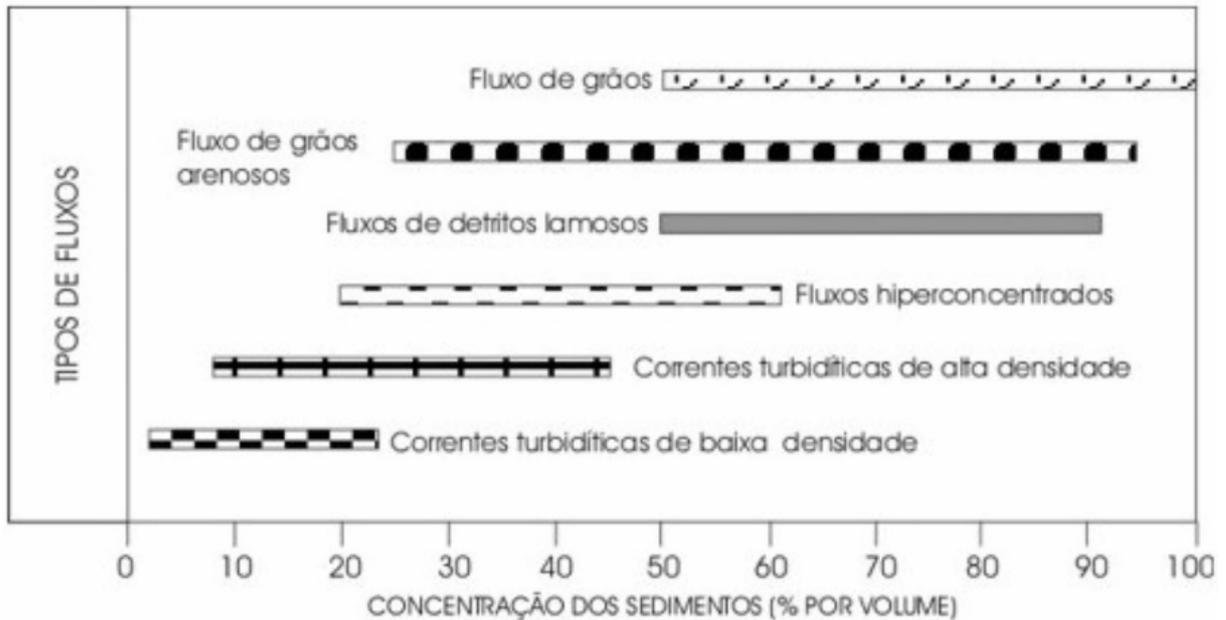


Figura 2.14 – Classificação proposta por Shunmugam (2000)

Mulder e Alexander (2001) apresentam uma classificação para o tipo de fluxo com base na concentração de sedimentos, definida como a razão entre o volume de sedimentos e o volume total (Figura 2.15). Os autores consideram que o predomínio ou não das forças coesivas e cisalhantes entre as partículas é o que distingue os fluxos. Nos fluxos coesivos há uma resistência da matriz que impede a percolação de água no interior do fluxo, preservando a coerência do corpo do fluxo. Já nos fluxos friccionais há uma interação entre as partículas, que gera um aumento no espaço intergranular, o qual é preenchido por água. Nesse caso, a característica do fluxo depende diretamente da concentração de sedimentos, que pode variar muito durante o seu deslocamento pela entrada de água ou decantação de sólidos.

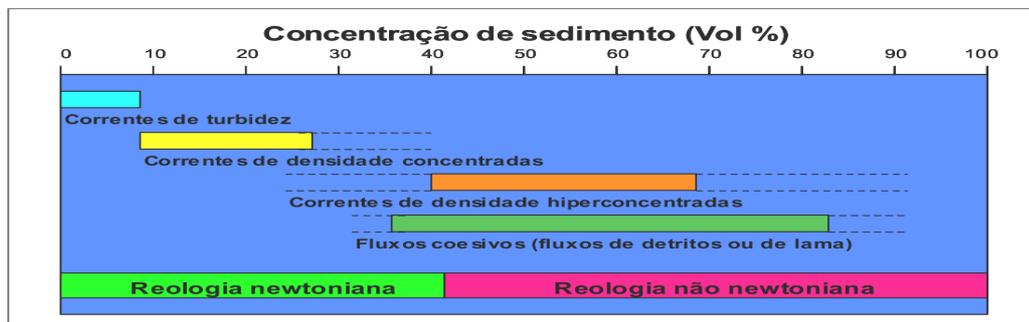


Figura 2.15 – Terminologia para tipos de fluxos baseada na concentração volumétrica de sedimentos

Como a concentração de sedimento não define por si só as condições limites, as linhas tracejadas na Figura 2.15 representam estas incertezas.

2.2.7 Perfis verticais característicos

Pelas suas características dinâmicas, as correntes de densidade não conservativas apresentam variações significativas no seu perfil vertical. A Figura 2.15 apresenta um perfil vertical de velocidades típico dessas correntes, o qual é similar ao perfil de escoamento de um jato plano junto à parede, como ilustrado na Figura 2.16. Esse perfil, que pode ser observado tanto em experimentos como na natureza, pode ser dividido em uma região interior, situada acima do substrato, onde se tem um gradiente de velocidade positivo e, uma região exterior, onde ele é negativo. A região interior geralmente apresenta a metade da espessura exterior. A altura em que o ponto de máxima velocidade ocorre depende da proporção das forças de arraste que se desenvolvem tanto nos limites superiores e inferiores da corrente, ocorrendo entre 0,2 e 0,3 da altura total da corrente. Este ponto de máxima velocidade separa a região interior e exterior da corrente.

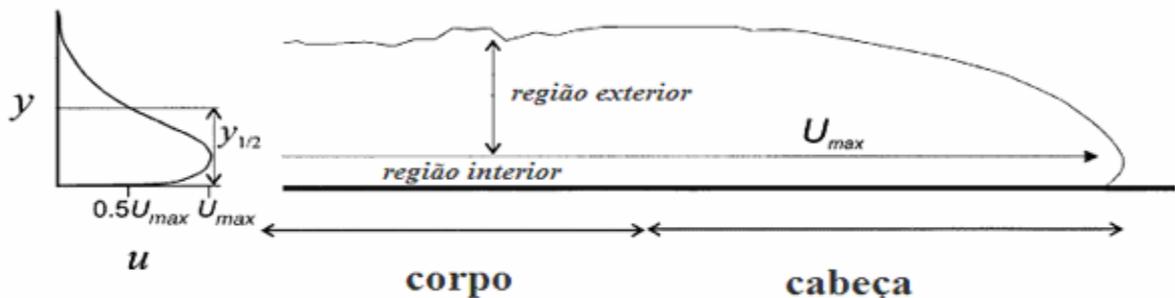


Figura 2.16 – Perfil típico de velocidade de uma corrente de gravidade não conservativa (Kneller e Buckee, 2000)

Já o perfil de tensão de cisalhamento apresenta valores positivos até o valor de velocidade máxima, que corresponde ao cisalhamento nulo. Acima do valor de velocidade máxima, o perfil de tensão de cisalhamento apresenta valores negativos, sendo que o valor máximo ocorre na interface com o fluido menos denso (Puhl, 2012).

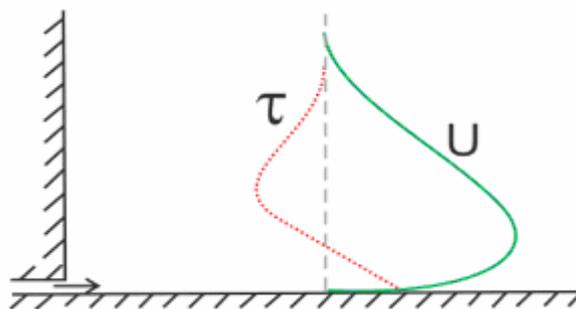


Figura 2.17 – Perfil típico de velocidade (linha contínua) e cisalhamento (linha pontilhada) de um escoamento de jato plano junto à parede (Schlichting, 1979)

Quanto à concentração de sedimentos, as correntes de densidade não conservativas são bastante estratificadas. Elas apresentam um gradiente vertical de concentração de sedimentos, sendo mais densa na camada inferior, e menos densa e mais heterogênea na camada superior. Kneller e Buckee (2000) identificam quatro perfis de concentração para correntes de densidade não conservativas (Figura 2.18). No primeiro caso (a) um modelo bidimensional típico, dividindo o fluxo em uma região inferior, zona mais densa de espessura constante e numa região superior, zona mais diluída por causa do carreamento de água ambiente. No segundo (b), o perfil é típico de correntes de densidade não conservativas com baixa concentração. Essas correntes são fortemente estratificadas, com gradiente de densidade maior perto da base da corrente, o qual decresce rapidamente perto dos níveis de velocidade máxima. Em (c), a distribuição de densidade apresenta um perfil de concentração inclinado, sendo freqüentemente observada em correntes erosivas ou em correntes com a alta taxa de carreamento na camada superior. O último perfil (d) foi baseado em experimentos em que a distribuição granulométrica foi medida mostrando que o material fino é mais uniformemente distribuído na vertical do que o material mais grosseiro, que tende se tornar concentrado na camada de baixo do fluxo.

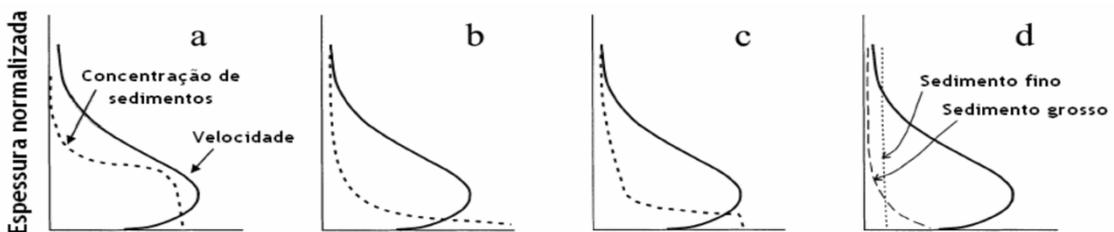


Figura 2.18 – Perfis de velocidade e concentração normalizados (Kneller e Buckee, 2000)

3 MÉTODOS NUMÉRICOS

3.1 Fluidodinâmica computacional

A Fluidodinâmica computacional, também conhecida como CFD, é uma ferramenta utilizada para a simulação de fenômenos físicos que envolvem fluidos em movimento, resolvendo as equações matemáticas através de métodos numéricos, pois os modelos matemáticos envolvidos nesses problemas, em geral, não têm soluções analíticas conhecidas. Esses modelos matemáticos são resolvidos através de métodos numéricos que incluem, por exemplo, os métodos de diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos (Minkowycz *et al.*, 1988).

O procedimento de resolução numérica desse problema consiste na discretização do domínio e das equações diferenciais parciais. O termo “discretização” se refere à aproximação de um problema em um domínio contínuo por elementos discretos. O objetivo de um método de discretização é substituir as equações diferenciais parciais por um conjunto de equações algébrico-diferenciais ordinárias, o qual fornecerá o valor das quantidades de interesse em pontos discretos no espaço (conhecido como método das linhas), compondo o que se chama de malha computacional, ou por um sistema de equações algébricas para um conjunto de pontos discretos no espaço e no tempo (Silva, 2008).

Os métodos numéricos mais utilizados para solução de escoamentos de fluidos são diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos. O método das diferenças finitas foi o primeiro a ser empregado, nos trabalhos pioneiros de Crochet e Pilate (1976) e Perera e Walters (1977). Este método continuou a ser explorado nos anos seguintes, mas seu uso foi diminuindo, em favor do uso do método de elementos e volumes finitos (Fávero, 2009).

O método mais utilizado e mais explorado para a simulação de escoamentos de fluidos é sem dúvidas o método de elementos finitos. Encontram-se muitos trabalhos na literatura usando esse método e o desenvolvimento de novas metodologias em elementos finitos é um assunto ainda muito explorado nos dias de hoje.

Após o uso dos métodos de diferenças finitas e elementos finitos terem se consolidado na área de simulação de escoamentos de fluidos, o método dos volumes finitos foi muito bem aceito, pois traz diversas vantagens se comparado aos demais, tais como: maior estabilidade numérica, menos quantidade de memória requerida e menor tempo computacional para soluções com a mesma qualidade.

3.1.1 Método de volumes finitos

O método dos volumes finitos é aplicado na discretização do espaço físico e temporal. Consiste em obter a aproximação numérica da equação diferencial parcial a partir de sua integração no volume de controle elementar (célula), representado na Figura 3.1. Determina-se uma distribuição de pontos, denominados pontos nodais, dentro da geometria de estudo de maneira que cada nó é envolto por um volume de controle. É comum determinar volumes de controle próximos às extremidades do domínio, de forma que os limites físicos coincidam com os limites dos volumes de controle. A discretização espacial é feita integrando todos os termos da equação para cada volume de controle do domínio. O resultado final é a equação discretizada para um grupo de pontos de uma malha (Favero, 2009).

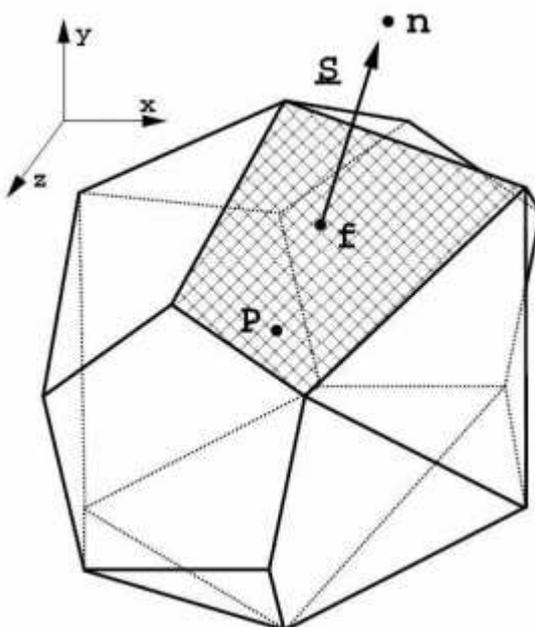


Figura 3.1 – Volume de controle (Jasak, 1996)

O primeiro tipo de discretização considera a divisão do domínio do espaço em um conjunto de volumes de controle interconectados entre si (contíguos) ou com o

contorno do domínio. A discretização do espaço físico constrói a chamada malha computacional. Uma malha otimizada, geralmente, não é uniforme, sendo caracterizada por possuir maiores refinamentos onde há grandes variações das propriedades entre os pontos nodais. Quanto à organização desses elementos, classifica-se a malha como estruturada e não-estruturada. Quanto à forma dos volumes de controle, é usual a divisão em elementos tetraédricos e hexaédricos. De forma similar, a discretização temporal é aplicada a problemas transientes partindo de uma condição inicial e subdivide seu domínio em um número finito de intervalos no tempo. A Figura 3.2 apresenta uma representação de um domínio discretizado (Silva, 2008).

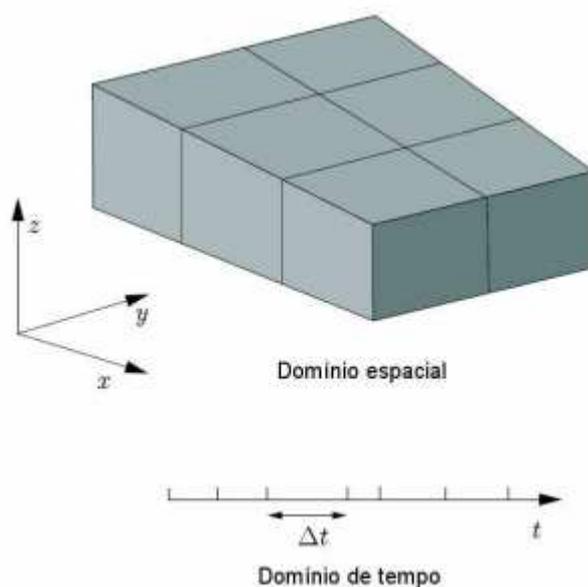


Figura 3.2 – Discretização nos domínios de espaço e tempo (Rusche, 2002)

Um volume de controle é composto por um conjunto de faces, que por sua vez é composta por um conjunto de arestas. As faces podem conectar dois volumes de controle ou um volume de controle ao contorno do domínio. A Figura 3.3 apresenta as variáveis relevantes na interconexão de dois volumes de controle vizinhos P e N (Silva, 2008).

A solução do problema de escoamento (velocidade, pressão, fração volumétrica do fluido) é definida no centróide de cada célula. A precisão da solução é governada pelo número de células do domínio, além da marcha temporal definida para os problemas transientes. Com o aumento do número de nós, aumenta-se também a demanda por recursos computacionais para a solução do problema. Para

a obtenção de uma boa precisão, portanto, é necessário um grande tempo de processamento (Ferreira, 2010).

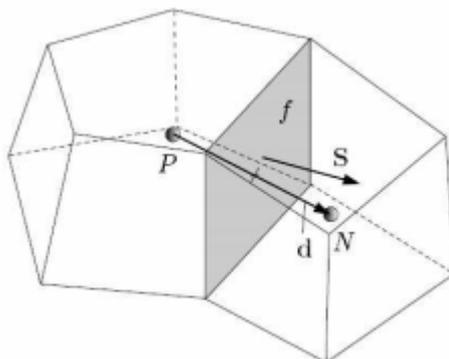


Figura 3.3 – Parâmetros na discretização por volumes finitos (Rusche, 2002)

Resumidamente, pode-se associar o método dos volumes finitos aos seguintes passos:

- Integração das equações de conservação em todas as células do domínio de interesse;
- Substituição de diferentes esquemas de aproximação por diferenças finitas em termos da equação integrada representando os processos do escoamento, como convecção, difusão e fontes. Esse processo converte as equações integrais em um sistema de equações algébricas;
- Solução das equações algébricas por um método iterativo.

O primeiro passo distingue o método dos volumes finitos das demais técnicas de CFD, o que acarreta na conservação das principais propriedades para cada elemento, relevando uma das principais vantagens do esquema. A conservação de uma propriedade genérica de um escoamento, ψ , por exemplo, um componente do campo de velocidades, dentro do volume de controle pode ser expresso como o balanço entre os vários fatores que tendem a contribuir ou reduzir a propriedade.

O segundo passo se refere à determinação dos esquemas adequados de aproximação das derivadas presentes nas equações aplicáveis aos volumes de controle por termos lineares. A seleção desses modelos de aproximação linear deve ser feita levando-se em consideração as características do fenômeno de transporte envolvido.

3.1.1.1 Tipo de arranjo utilizado para as variáveis

Uma diferença muito comum encontrada em trabalhos que usam o método de volumes finitos é o uso do arranjo desencontrado ou o co-localizado das variáveis, os quais determinam a posição da alocação do campo de variáveis na malha. A idéia do arranjo co-localizado consiste em avaliar as variáveis escalares, como a pressão, massa específica, temperatura, nos pontos nodais, mas calcular os componentes da velocidade nas faces de cada célula. Dessa forma, o arranjo co-localizado armazena todas as variáveis do problema no centro dos volumes enquanto o desencontrado, duas ou mais variáveis estão localizadas em posições diferentes do volume. O arranjo co-localizado tem diversas vantagens sobre o desencontrado, como, por exemplo, menor uso de memória computacional e maior facilidade para se trabalhar com coordenadas generalizadas, indispensáveis em problemas que envolvem geometrias complexas. Torna também mais fácil a aplicação de condições de contorno, uma vez que não sobram “meios volumes” próximos às fronteiras. Além disso, o emprego de técnicas de malhas múltiplas (*multigrid*) só é viável usando este tipo de arranjo (Peric *et al.*, 1988). Deve-se lembrar que o arranjo co-localizado introduz problemas de oscilações na pressão e faz-se necessário usar o método de interpolação de momento também conhecido como método de correção de Rhie-Chow (Rhie e Chow, 1983) para resolver esse problema. O método de interpolação de momento consiste em fazer com que a velocidade nas interfaces, necessárias para o cálculo dos fluxos advectivos, dependam das pressões nos volumes vizinhos, “imitando” o arranjo desencontrado (Favero, 2009).

3.1.1.2 Esquemas de interpolação

As funções de interpolação usadas no método volumes finitos influenciam na precisão das simulações. Uma maior precisão pode ser conseguida usando esquemas de alta ordem, mesmo em malhas menos refinadas. Contudo, o aumento da ordem de interpolação pode causar problemas de instabilidades numéricas e soluções fisicamente irreais com o surgimento de oscilações. Os primeiros trabalhos

e a grande maioria dos trabalhos encontrados ainda hoje usam esquemas de 1ª ordem UDS (*Upwind Differencing Scheme*), 2ª ordem CDS (*Central Differencing Scheme*) ou uma mistura desses dois métodos gerando um esquema híbrido HDS (*Hybrid Resolution Schemes – UDS + CDS*).

Esquemas UDS são aplicáveis principalmente a problemas advectivos, em que o valor de uma propriedade genérica ψ é calculado considerando-se a contribuição do nó vizinho de maior influência, analisando-se a direção do fluxo. Aproximações CDS são recomendadas para problemas de caráter difusivo, em que o valor da propriedade ψ é tomado levando-se em consideração a contribuição das células adjacentes, sem considerar o fluxo do escoamento (Ferreira, 2010).

Esquemas de alta ordem ou os esquemas HRS (*High Resolution Schemes*), MINMOD e CUBISTA (*Convergent and Universally Bounded Interpolation Scheme for the Treatment of Advection*) também são alternativas. Contudo, deve-se ter muito cuidado na hora da escolha de um esquema de alta ordem, pois podem ocorrer problemas de convergência e oscilações na solução. Apesar disso, sabe-se que as oscilações podem ser eliminadas com o uso de combinações convexas de diferentes esquemas de alta ordem, gerando os esquemas WENO (*Weighted Essentially Non-Oscillatory*) (Liu *et al.*, 1994).

3.1.1.3 Solução das Equações Discretizadas

Encontram-se na literatura trabalhos que usam a formulação de volumes finitos e resolvem o sistema de equações totalmente acoplado (Muniz, 2003), ou seja, o sistema de equações é resolvido simultaneamente, e trabalhos onde a resolução é feita de forma segregada, onde nesse caso usa-se um método de correção de pressão, tal como o SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) (Patankar e Spalding, 1972) e o PISO (*Pressure Implicit Splitting of Operators*) (Issa, 1986) entre outros.

Em qualquer dessas metodologias, acoplada ou desacoplada, a resolução de sistemas de equações não-lineares geralmente é feita de duas maneiras. Uma delas é usar o método das substituições sucessivas com ou sem relaxação. A outra é usar

o método de Newton para resolver o sistema não-linear. Em cada iteração deste método se torna necessário também resolver um sistema linear de equações algébricas (Favero, 2009).

Para resolver o sistema linear podem-se usar métodos diretos ou iterativos. Os métodos diretos fazem a inversão completa da matriz, determinando a solução exata, com menos erros de truncamento, em um número finito de operações matriciais. Como exemplos, podem-se citar a eliminação gaussiana e fatorações (LU, Cholesky). Esses métodos possuem como característica o elevado custo computacional, sendo indicados para sistemas lineares com um número não muito grande de equações (até algumas centenas) ou com uma matriz do sistema cuja estrutura permita um método especial de solução. A limitação desses métodos a sistemas pequenos ocorre por dois motivos. Primeiro, o número de operações (matemáticas) cresce muito rapidamente com o tamanho do sistema, o que aumenta o custo computacional superlinearmente. Além disso, o alto número de operações leva ao aumento dos erros de truncamento, o que degrada a acurácia da solução.

Os métodos iterativos foram desenvolvidos para superar as deficiências dos métodos diretos no tratamento de grandes sistemas. Eles são baseados na transformação do sistema linear em um procedimento iterativo em que, a partir de uma estimativa inicial, pode conduzir à solução desejada. Esses métodos geram menor custo computacional, principalmente referente à memória necessária, além de apresentarem facilidades de implementação em computadores de alto desempenho com memória compartilhada ou distribuída (supercomputadores e *clusters*), e por isso são muito mais usados em CFD. Exemplos de métodos iterativos são os métodos de Gauss-Seidel, métodos de minimização, como o método dos resíduos generalizado (GMRES), método de CG (*Conjugate Gradient*) e seus derivados e métodos de malhas múltiplas como o GAMG (*Generalised geometric-algebraic multi-grid*), entre outros (Favero, 2009).

Outro ponto a se considerar para os métodos iterativos é o uso de alguns pré-condicionadores na hora da resolução do sistema de equações, pois, dependendo do procedimento iterativo aplicado, a matriz de iteração pode não ser diagonalmente dominante, que é a condição necessária para a convergência do método. Alguns pré-condicionadores como o DIC (*Diagonal incomplete-Cholesky*), DILU (*Diagonal*

incomplet-LU) e Bi-CGSTAB (*Bi-Conjugate Gradient Stabilized*) são bem conhecidos na literatura (Ajiz e Jennings, 1984; Lee *et al.*, 2003; Jacobs, 1980; Vorst, 1992).

Deve-se ainda mencionar que o sistema de equações discretizado é caracterizado por apresentar alto nível de esparsidade. Assim o uso de algoritmos que levam em conta o fato dessas matrizes serem esparsas é indispensável para diminuir o custo computacional.

3.1.1.4 Métodos para o tratamento do acoplamento pressão-velocidade

Normalmente o campo de velocidades é desconhecido, e os seus valores são determinados pela solução global do problema junto com todas as demais variáveis do escoamento. A solução das equações de transporte nas direções x , y e z e da equação da continuidade apresenta alguns obstáculos, entre eles:

- Os termos advectivos da equação da quantidade de movimento contêm termos não-lineares;
- Todas as equações são intrinsecamente acopladas, já que cada componente da velocidade aparece nas equações de conservação de quantidade de movimento e da continuidade.

Em escoamentos considerados compressíveis, onde a densidade ρ varia principalmente com a pressão p , a equação da continuidade pode ser usada como uma equação de transporte para a densidade e a temperatura T através do uso de uma equação de estado $p=p(\rho, T)$. Quando o escoamento considerado é incompressível, a densidade é constante e não depende da pressão, e a de estado não pode mais ser utilizada. Assim, não se tem mais uma equação de evolução para a determinação da pressão, sendo, então, geralmente definida a partir das equações de conservação de massa e quantidade de movimento. Nesse caso, o acoplamento entre a velocidade e a pressão introduz uma restrição na solução do campo de escoamento: se o campo de pressões correto é aplicado às equações da continuidade, o campo de velocidades resultante deve satisfazer a continuidade. Esse acoplamento pressão-velocidade costuma ser o grande desafio nos escoamentos incompressíveis.

Em alguns casos, como a convecção natural, permite-se que o valor de ρ apresente pequenas variações apenas com relação a temperatura, entretanto, a determinação da pressão p continua a ser calculada sem o uso da equação de estado. Tanto na convecção natural quanto em escoamentos incompressíveis, a determinação do campo de pressão é necessária para que o campo de velocidades satisfaça a equação de conservação de massa.

Os métodos SIMPLE (*Semi IMPLICIT Linked Equations*) de Patankar (1980) e PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*) de Issa (1986) são alguns dos métodos utilizados para o tratamento do acoplamento pressão-velocidade. Ambos determinam o campo de velocidade a partir de um campo de pressão estimado, resolvendo a equação de conservação de quantidade de movimento. O campo de pressão deve ser corrigido de forma a satisfazer a equação de conservação de massa. Considera-se que o campo de velocidade u^* é obtido a partir da equação de quantidade de movimento se o campo de pressão for p^* .

O algoritmo SIMPLE relaciona a correção da velocidade $u'_f = u_f - u_f$ com a correção de pressão $p'_{c_0} = p_{c_0} - p_{c_0}$ a partir da equação de conservação de quantidade de movimento, como:

$$u'_f = d_f (p'_{c_0} - p'_{c_1}) \quad (3.1)$$

A correção de pressão é obtida de forma a garantir a conservação de massa. A fórmula de correção de velocidade é substituída na equação discretizada de conservação de massa, resultando em:

$$a_p p'_{c_0} = \sum_{nb} a_{nb} p'_{nb} + b \quad ; \quad b = \sum_f \rho_f u_f A_f \quad (3.2)$$

onde o termo b corresponde à fonte de massa que deve se anular quando o esquema convergir.

Uma vez que a solução da equação de correção de pressão é obtida, a pressão do centro do volume de controle e o fluxo de massa nas faces dos volumes de controle são corrigidos através de:

$$p_{c_0} = p_{c_0}^+ + \alpha_{p_{c_0}} p'_{c_0} \quad ; \quad u_f = u_f + d_f (p'_{c_0} - p'_{c_1}) \quad (3.3)$$

sendo α_{p_c} o fator de relaxamento da pressão.

A fim de melhorar a eficiência dos cálculos, o algoritmo PISO baseia-se na relação de aproximação de ordem elevada entre as correções para a pressão e velocidade. Dessa forma, para melhorar a eficiência dos cálculos, esse algoritmo realiza dois níveis de correção de pressão e velocidade adicionais: correção de vizinhança e correção de enviesamento (*skewness*).

O método PISO é aconselhado para simulações não permanentes. Em simulações de regime permanente ele não oferece melhoras na eficiência com relação ao SIMPLE (Eisenmann, 2013).

O algoritmo PISO requer um maior tempo de computação por iteração, mas pode diminuir drasticamente o número de iterações necessárias para a convergência, especialmente em problemas transientes. Uma comparação entre os métodos PISO e SIMPLE mostra que utilizando o primeiro ocorre uma significativa redução de tempo, em torno de 60% em relação ao SIMPLE, independentemente do passo de tempo ou do refinamento da malha. Porém, para casos permanentes, recomenda-se o algoritmo SIMPLE (Távora, 2011).

3.2 Método dos Elementos Discretos

O trabalho de Hrennikoff (1941) pode ser considerado como o primeiro passo no desenvolvimento do Método dos Elementos Discretos (DEM). Ele propõe a representação do contínuo através de arranjos de bielas de rigidez equivalente. Mais recentemente Absi (1971) desenvolveu a mesma idéia realizando aplicações aos estudos de fundações de base elástica e na representação de muros em prédios altos através de arranjos de barras com rigidez equivalente. Vale mencionar o aporte significativo que o trabalho de Cundall e Strack (1977) trouxe para o desenvolvimento do método. Cundall e Strack (1977) aplicou o seu método para realizar estudos mecânicos geotécnicos com materiais granulares. O método proposto por ele (Método dos Elementos Distintos) baseia-se em realizar a integração explícita das equações do movimento de uma estrutura formada por

partículas rígidas com massas conectadas entre si, mediante molas e amortecedores, como mostra a Figura 3.4 (Alvarado, 2006).

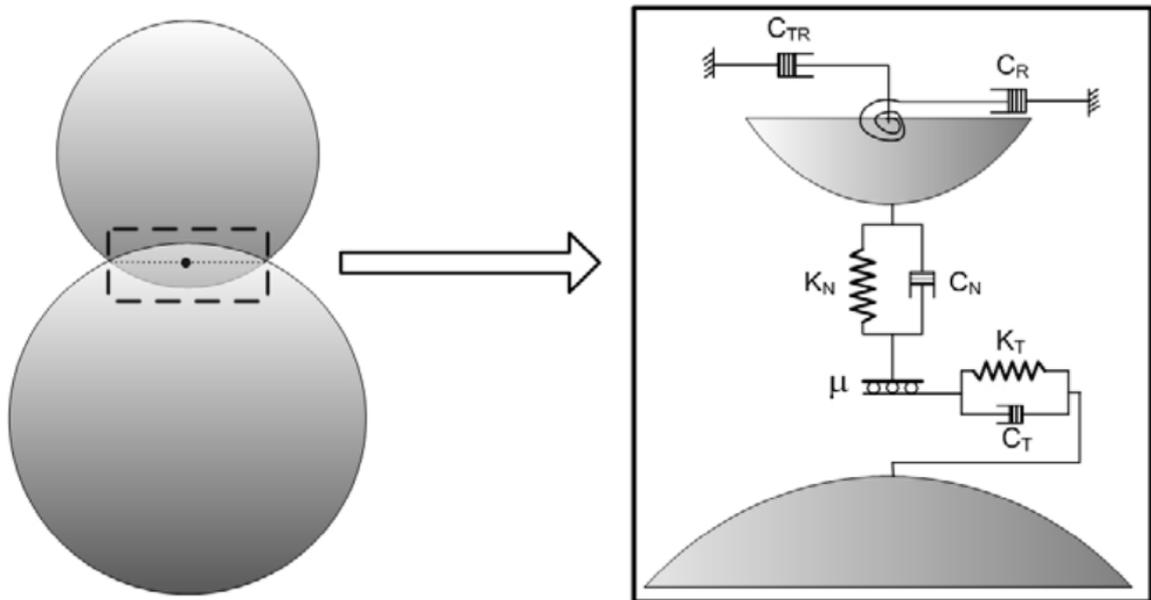


Figura 3.4 – Modelo usado para os contatos entre partículas (Alvarado, 2006)

Esse método pode ser aplicado facilmente na simulação não só de materiais contínuos, como também para representar estruturas descontínuas. Isso se deve ao fato que, antes da fratura, surgem forças de tração, de compressão e de corte entre as partículas adjacentes. Porém, após a falha, desaparecem as forças de tração entre as partículas contíguas afastadas pela descontinuidade (Rios, 2002).

O método dos elementos distintos é um tipo de elemento discreto, e é atualmente o método mais popular em geomecânica, a formulação básica para o método dos elementos distintos é a já citada proposta de Cundall e Strack (1977).

Para que sejam realizadas simulações usando DEM o usuário deve informar ao sistema a geometria das partículas, com suas coordenadas e condições de contorno, as características dos contatos entre os corpos definem as propriedades dos materiais, atrito e rigidez. Em seguida, o usuário define como ocorrerá o carregamento do sistema.

A simulação pode ser iniciada como transiente ou dinâmica, usualmente para um número específico de incrementos. A cada incremento, as partículas em contato são identificadas e a magnitude das forças atuantes entre estes corpos é

relacionada com a distância. A partir dessas forças a força resultante, os momentos podem ser determinados.

O movimento de transição para cada corpo pode ser a partir da resultante das forças atuantes nele e o momento resultante é usado para calcular a rotação resultante.

A rotação e o deslocamento são determinados usando-se um esquema de integração do tipo diferenças centrais no domínio do tempo e esses deslocamentos e rotações incrementais são usados para que, no passo seguinte de tempo, sejam atualizadas as posições e orientações de cada corpo, para então se proceder o novo cálculo das forças de contato, a partir dessa nova geometria, repetindo-se a sequência de cálculos. A Figura 3.5 ilustra um fluxograma dos cálculos realizados a cada incremento de tempo.

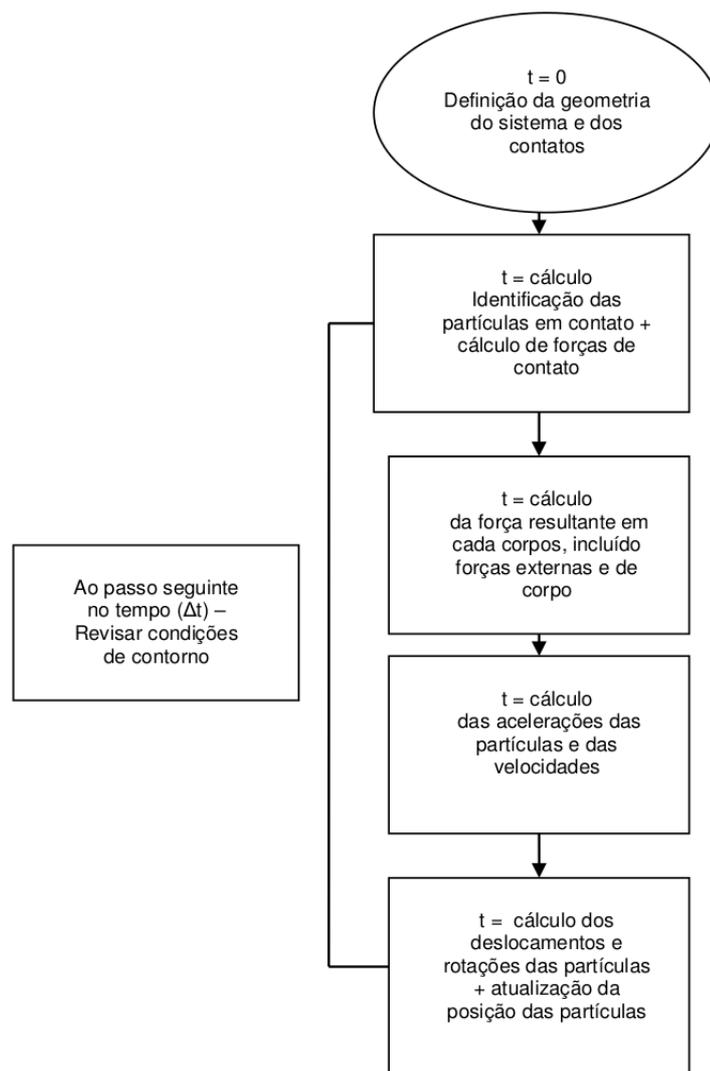


Figura 3.5 – Cálculos realizados a cada incremento de tempo (O'Sullivan, 2011)

3.3 Teoria do modelo CFD-DEM

Fluxos carregando partículas, tais como avalanches, fluxos de detritos, ou transporte de sedimento em rios, consistem de regimes com diferentes comportamentos físicos. Então, um modelo apropriado tem que ser capaz de tratar com a interação entre o fluido e os grãos em regimes de fluxos granulares densos com fluido intersticial até fluxos de suspensões diluídas. Em virtude disso, a abordagem acoplada CFD-DEM tem sido utilizada para realizar a modelagem de fluxos fluidos carregando partículas.

Enquanto o método de elementos discretos (DEM) é semelhante às técnicas de dinâmica molecular e pode ser utilizado para modelar partículas sólidas, a fluidodinâmica computacional (CFD) pode ser usada para a modelagem de fluidos através da teoria do contínuo.

O método CFD-DEM usado no programa CFDEMcoupling trata os cálculos do fluido e os cálculos das partículas como dois códigos separados, ambos implementados dentro de um ambiente de código aberto. As simulações DEM são conduzidas por um código chamado LIGGGHTS e as simulações CFD são conduzidas por um programa de código aberto OpenFOAM®.

3.3.1 Acoplamento entre CFD e DEM

A interação entre a modelagem do fluxo de partículas com o DEM e do fluxo de fluidos com o CFD é realizado através da troca de campos dentro de um intervalo de tempo predefinido. Os códigos CFD e DEM, assim como a rotina de acoplamento, realizam seus cálculos em paralelo usando paralelização MPI (Message Passing Interface). No padrão MPI, uma aplicação é constituída por um ou mais processos que se comunicam, acionando-se funções para o envio e recebimento de mensagens entre os processos.

O movimento de uma fase fluida incompressível na presença de uma segunda fase granular é governado por uma versão modificada das Equações de Navier-Stokes, as quais podem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{\partial \alpha_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f u_f) = 0 \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial (\alpha_f u_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f u_f u_f) = -\alpha_f \frac{p}{\rho_f} - R_{sl} + \nabla \cdot \tau \quad (3.5)$$

onde, α_f é a fração do volume ocupado pelo fluido, ρ_f é a sua densidade, u_f é a sua velocidade, e τ é o tensor de tensão para a fase fluida. R_{sl} representa a troca de quantidade de movimento com a fase granular. Para cada célula, R_{sl} é calculado seguindo o modelo de Gidaspow.

De acordo com Goniva *et al.* (2010), a rotina de acoplamento é realizada, para cada Δt , da seguinte forma:

- 1 - o algoritmo DEM calcula as posições e as velocidades das partículas;
- 2 - a informação necessária é passada para o algoritmo CFD;
- 3 - para cada partícula, a célula correspondente na malha CFD é determinada;
- 4 - para cada célula, a fração de volume ocupada pela fase fluida é definida por:

$$\alpha_f = 1 - \frac{\sum_{i=0}^{k_c} V_{p,i}}{V_{cell}} \quad (3.6)$$

onde, $V_{p,i}$ é o volume da partícula i e k_c é o número de partículas na célula de volume computacional V_{cell} .

- 5 - a velocidade média da partícula em cada célula computacional é determinada;
- 6 - baseando-se nessas informações, os termos de troca de quantidade de movimento entre a partícula e o fluido podem ser avaliados;
- 7 - o fluxo de fluido é calculado usando os termos de troca de quantidade de movimento;
- 8 - as forças atuantes do fluido em cada partícula são enviadas para o algoritmo DEM e usadas na próxima iteração;
- 9 - o algoritmo CFD calcula a velocidade do fluido levando em conta a fração de volume local e a troca da quantidade de movimento em razão de preservar a 3ª Lei de Newton;
- 10 - a rotina de acoplamento é repetida a partir de 1.

A mais importante contribuição para a troca de quantidade de movimento entre partícula-fluido é estabelecida por meio de uma força de arrasto dependente da fração de volume granular. Diferente da força de arrasto atuante sobre uma esfera simples, nesse caso, a fração de volume granular pode ser considerada para o cálculo da força de arrasto.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho busca analisar o comportamento dinâmico e a morfologia de correntes de densidade através de modelagem numérica. Para isso, foram realizadas simulações com fluxos granulares subaéreos e subaquáticos, de pulso único, sendo feitas alterações nos valores do coeficiente de atrito das partículas entre cada simulação.

4.1 Ferramentas computacionais

4.1.1 Sistema operacional Ubuntu 12.04 LTS

O sistema operacional escolhido foi o Ubuntu 12.04 LTS (Precise Pangolin) 64 Bits (Figura 4.1). O Ubuntu é um sistema operacional de código aberto, construído a partir do núcleo Linux, baseado no Debian. Essa versão do Ubuntu foi escolhida pois, no início da pesquisa, ela era a versão mais recente com Longo Tempo de Suporte.

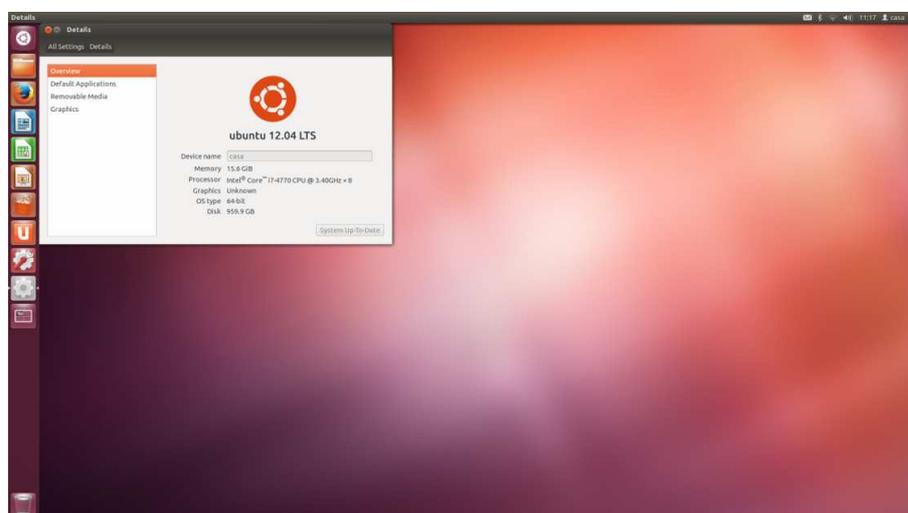


Figura 4.1 – Área de trabalho Ubuntu 12.04 LTS

4.1.2 CFDEMcoupling

O software utilizado nessa pesquisa foi o CFDEMcoupling versão 2.2 (Figura 4.2), a qual era a mais recente disponível no início do trabalho. O Modelo CFDEM é uma síntese da Fluidodinâmica Computacional (CFD) e do Método de Elementos

Discretos (DEM) para modelar sistemas fluido-granulares acoplados. O movimento das partículas é obtido com o Método dos Elementos Discretos, o qual aplica as Leis de Movimento de Newton para todas as partículas, enquanto a Fluidodinâmica Computacional é utilizada para calcular o fluxo do fluido, através das equações de Navier-Stokes. As interações entre as fases fluido e sólido são modeladas usando a Terceira Lei de Newton.

O algoritmo usado para acoplar o fluxo granular com o fluxo fluido é um algoritmo transiente incompressível que utiliza o método PISO para o acoplamento pressão-velocidade.

```

cfdemSolverIB twoSpheresGlowinskiMPI CFD
File Edit View Search Terminal Help
Number of processor patches = 1
Number of processor faces = 100
Number of boundary faces = 900

Number of processor faces = 100
Max number of cells = 2000 (0% above average 2000)
Max number of processor patches = 1 (0% above average 1)
Max number of faces between processors = 100 (0% above average 100)

Time = 0

Processor 0: field transfer
Processor 1: field transfer

End.

// run_parallel_cfdemSolverPiso_ErgunTestMPI_CFDDEM //

/root/CFDEM/CFDEMcoupling-PUBLIC-2.2.x/tutorials/cfdemSolverIB/twoSpheresGlowinskiMPI/CFD

rm: cannot remove `couplingFiles/*': No such file or directory

```

Figura 4.2 – Interface durante o processamento utilizando o software CFDEMcoupling

O CFDEMcoupling acopla dois programas distintos: o OpenFOAM (CFD) e o LIGGGHTS (DEM). O OpenFOAM é um programa que realiza simulações utilizando a Fluidodinâmica Computacional (CFD), permitindo resolver fluxos de fluidos complexos envolvendo reações químicas, turbulência e transferência de calor. O LIGGGHTS realiza simulações com o Método dos Elementos Discretos. Ele é baseado no LAMMPS, o qual é um simulador de dinâmica molecular. O LIGGGHTS

busca melhorar as capacidades do LAMMPS para simulações com partículas em geral e com transferência de calor entre partículas.

O pós-processamento, assim como o processamento, é dividido em dois programas utilitários. Para a parte DEM é utilizando o programa LPP (*LIGGGHTS Post Processing*). A parte CDF é pós-processada pelo programa foamToVTK. Ambos transformam as informações dos arquivos de dados gerados durante a simulação em pacotes de arquivos VTK (*Visualization ToolKit*).

Os dados dos arquivos VTK são manipulados por um software de sistema de código aberto, o *Visualization ToolKit*, o qual é aplicado para computação gráfica 3D, processamento de imagens e visualização. Ele consiste de uma biblioteca de classes em C++ e várias camadas de interface interpretadas, incluindo Tcl/Tk, Java e Python, e suporta uma ampla variedade de algoritmos de visualização para diferentes tipos de dados. Também são implementadas técnicas de modelagem avançadas, tais como: modelagem implícita, redução de polígonos, suavização de malhas e triangulação de Delaunay. O projeto e a implementação da biblioteca foram fortemente influenciados pelos princípios de orientação a objetos, e o software foi instalado e testado em quase todas as plataformas baseadas em Unix e Windows.

O programa utilitário LPP é uma versão modificada do Pizza.py, o qual é uma coleção de ferramentas em Python capaz de realizar o pós-processamento do arquivo *dump* gerado pelo LAMMPS. O arquivo *dump* armazena as informações das partículas (i.e. posição, velocidade linear, velocidade angular, força, etc.) a cada intervalo de tempo. O LPP melhora a capacidade de pós-processamento do Pizza.py para simulações granulares. Ele converte o arquivo *dump*, gerado pelo LIGGGHTS, para arquivos VTK usando ferramentas de multiprocessamento em Python em paralelo, lidando de maneira melhor com o arquivo *dump*, ao invés de carregar todos os dados na memória de uma só vez, como faz o Pizza.py. Ele também possibilita a análise de tensões em paredes sobre geometrias estáticas ou em movimento.

O foamToVTK é um programa utilitário capaz de realizar o pós-processamento dos arquivos gerados pelo OpenFOAM. Diferente do CFD, onde o arquivo *dump* armazena todas informações das partículas, no OpenFOAM os dados

da simulação são gravados em pastas distintas referentes aos diversos intervalos de tempo. Dentro de cada pasta existem vários arquivos específicos, um para cada propriedade avaliada, ou seja, há um arquivo para os dados de pressão, outro para os de velocidade, e assim por diante. O foamToVTK agrupa essas informações e as escrevem em arquivos VTK.

4.1.3 ParaView

Para auxiliar na análise dos dados e na visualização das simulações, foi utilizado o programa ParaView (Figura 4.3), que é uma multi-plataforma de visualização científica, com interface intuitiva, que permite visualizações tanto em 2D quanto em 3D. A versão escolhida foi a 4.1.0 64-bit.

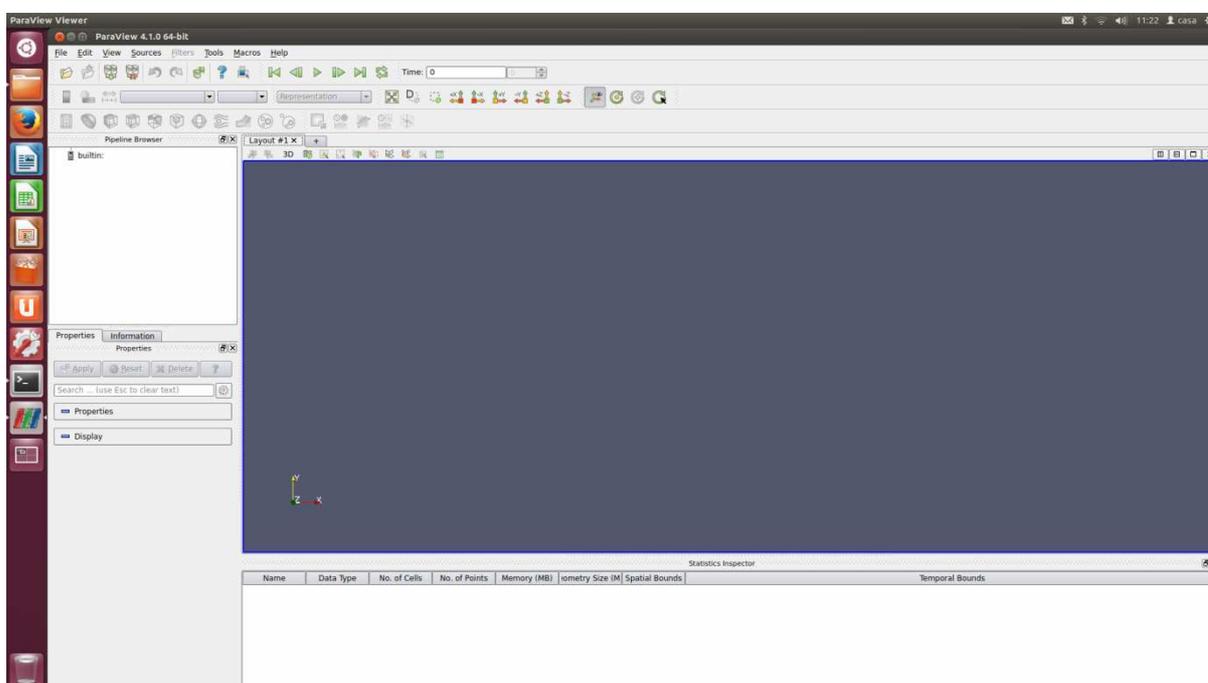


Figura 4.3 – Interface do programa ParaView 4.1.0 64-bit

O ParaView consegue ler os arquivos VTK gerados pelos pós-processadores utilizados. Ao final de cada intervalo de tempo da simulação, um arquivo VTK é gerado com os dados da simulação naquele instante. Ao importar os arquivos VTK no ParaView, cada arquivo compõe um instante de tempo dentro da linha de tempo do programa.

Uma vez que os arquivos VTK são importados para o ParaView, os dados são visualizados e tratados através de uma coleção de filtros existentes dentro do próprio programa.

Além da leitura de arquivos VTK, o ParaView permite a conversão e escrita dos dados em arquivos de diferentes formatos, facilitando a exportação dos dados para outros programas (por exemplo, planilhas eletrônicas).

4.1.4 Computador utilizado

Para as simulações utilizando o programa CFDEMcoupling foi utilizado um computador de mesa com processador Intel® Core™ i7-4770 (8M Cache, 3.4 GHz), com 16 GB de memória RAM (DDR3, 1600 MHz) e disco rígido de 1TB (SATA 7200 rpm).

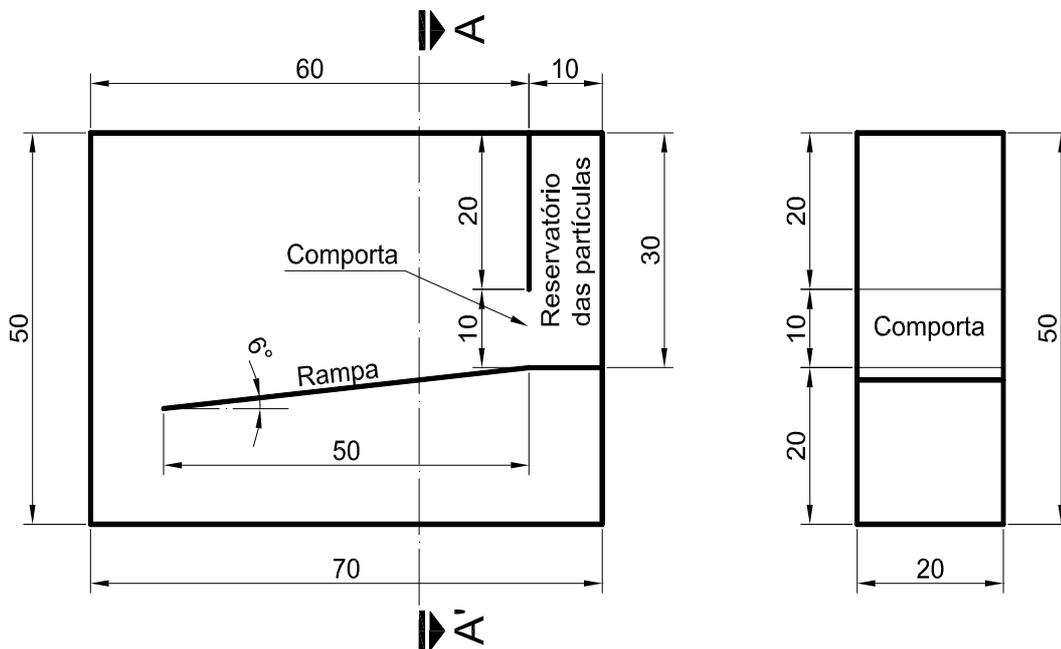
4.2 Simulação numérica

4.2.1 Modelo físico

Para a simulação das correntes de densidade foi feita modelando-se uma caixa de testes com dimensões iguais a 0,70 m x 0,20 m x 0,50 m (comprimento x largura x altura). Esta caixa possui uma rampa com 6° de inclinação e um compartimento (0,10 x 0,20 x 0,30) m³ de volume para o armazenamento inicial das partículas. A ligação entre a rampa e o compartimento de armazenamento é feita por uma comporta com (0,20 x 0,10) m² de área. A parte abaixo da rampa funciona como um fosso para as partículas permanecerem após a passagem pela rampa. A Figura 4.4 apresenta um detalhe esquemático da caixa de testes, enquanto a Figura 4.5 ilustra a caixa de testes renderizada no software ParaView.

A modelagem da caixa de testes, necessária para o arquivo de entrada do processamento utilizando o software CFDEMcoupling, foi feita utilizando arquivos ASCII – STL (*American Standard Code for Information Interchange* –

STereoLithography). Com esse formato é possível descrever a superfície de uma geometria tridimensional utilizando superfícies triangulares.



Corte longitudinal

Dimensões em centímetros

Corte AA'

Figura 4.4 – Detalhe esquemático da caixa de testes idealizada (imagem fora de escala)

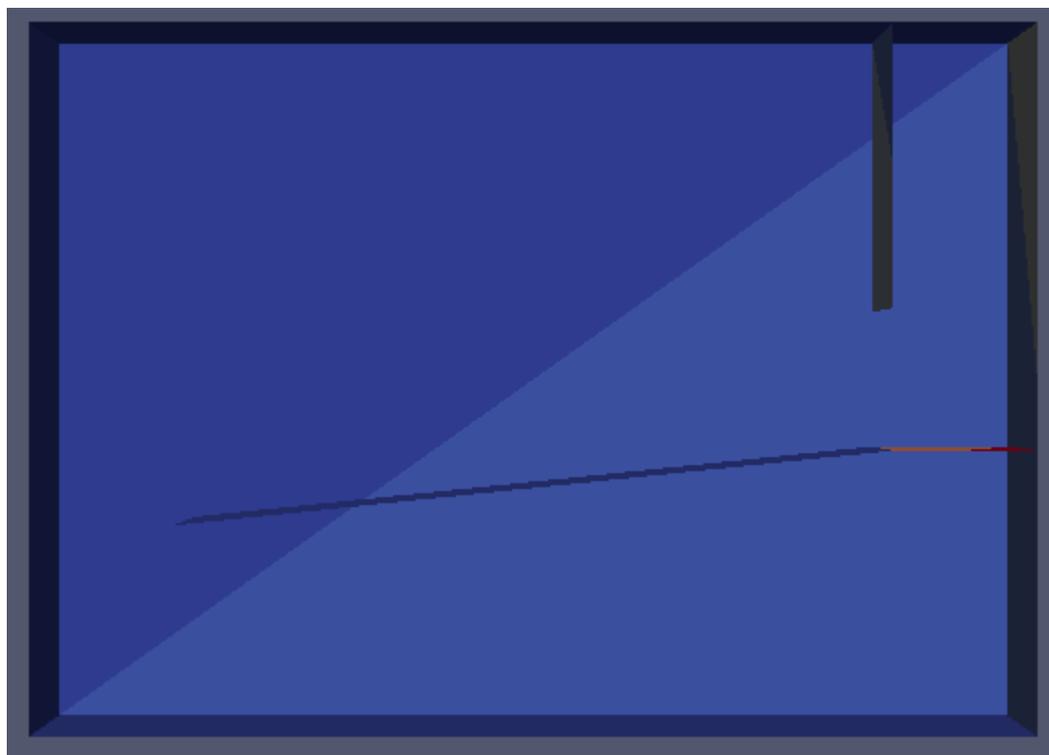


Figura 4.5 – Imagem renderizada da caixa de testes com a comporta aberta (imagem fora de escala)

4.2.2 Partículas

Durante as simulações foram utilizadas partículas esféricas com 0,003 m de diâmetro. A escolha do diâmetro das partículas foi feita buscando limitar o número máximo de partículas no interior do compartimento de armazenamento em aproximadamente 310.000 (trezentas e dez mil) e respeitar a recomendação do programa LIGGGHTS (parte integrante do CFDEMcoupling), o qual adverte que o volume de uma partícula unitária não deve ser inferior a precisão do equipamento. Simulações com diâmetros inferiores a este apresentaram problemas.

O empacotamento inicial das partículas no reservatório foi realizado utilizando-se um arquivo preliminar específico para este fim. A Figura 4.6 ilustra o empacotamento das partículas antes do início do escoamento. Para o posicionamento das partículas foi adotada uma estrutura cúbica de face centrada (CFC), a qual forneceu um arranjo denso das partículas (Figura 4.7).

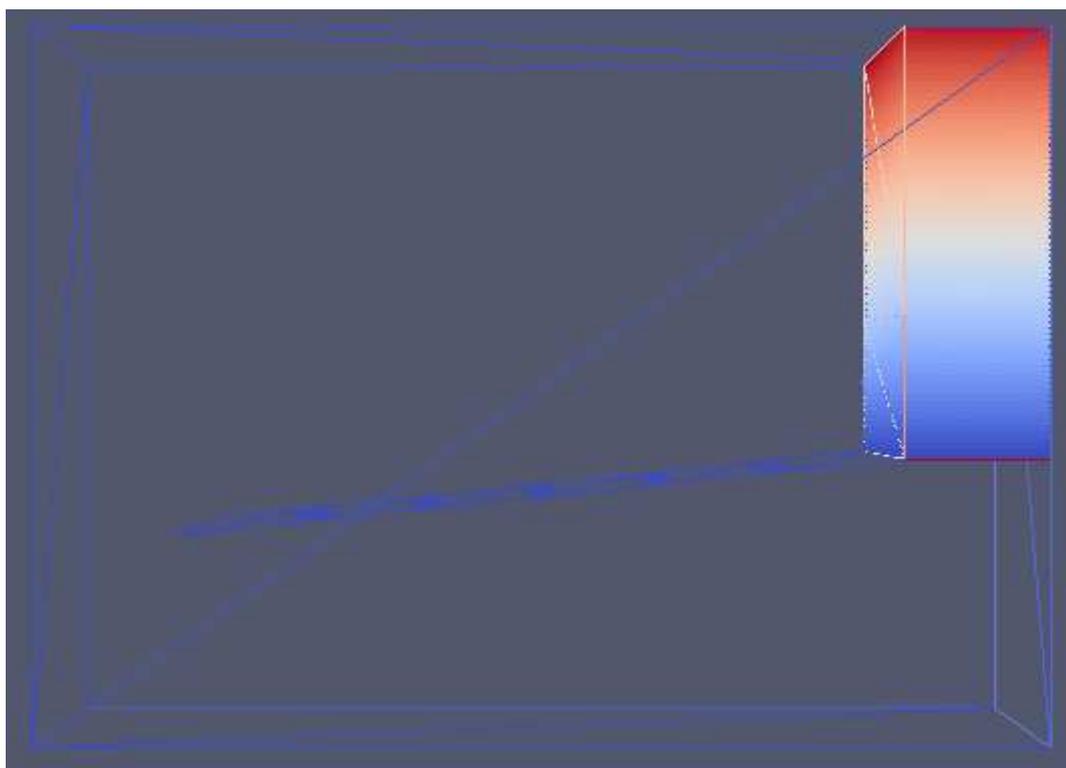


Figura 4.6 – Empacotamento das partículas antes do início do escoamento (imagem fora de escala)

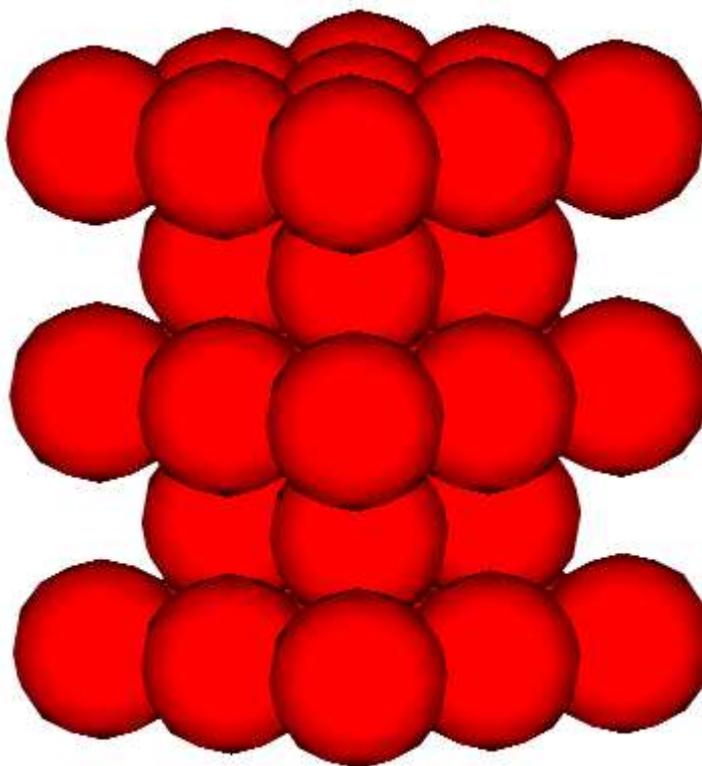


Figura 4.7 – Detalhe do empacotamento das partículas (imagem fora de escala)

4.2.2.1 Propriedades das partículas

Para realizar as simulações, tanto subaéreas quanto subaquáticas, foi necessário definir as seguintes propriedades das partículas: Módulo de Young; Coeficiente de Poisson; Coeficiente de Restituição; Coeficiente de Atrito.

Com o intuito de observar as variações que ocorrem nos fluxos simulados devido a variação do coeficiente de atrito das partículas, foram realizadas simulações com valores modificados dessa propriedade, tanto nas análises subaéreas quanto subaquáticas. Os valores adotados estão apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Valores adotados das propriedades das partículas

Propriedade	Valor adotado
Módulo de Young (Pa)	5.000.000
Coeficiente de Poisson	0,24
Coeficiente de Restituição	0,30
Coeficiente de Atrito	0,54; 0,60; 0,70; 0,81; 0,85

4.2.3 Fluido

As simulações subaquáticas foram realizadas buscando simular uma corrente de densidade sobre o leito marinho. O fluido utilizado na análise foi definido através dos parâmetros apresentados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 – Valores adotados dos parâmetros do fluido

Parâmetro	Valor adotado
Densidade (kg/cm ³)	998,2071 (a 20°C)
Viscosidade turbulenta cinemática (m ² /s)	0,000001

4.2.4 Análises adotadas na simulação

Para a análise através do Método dos Elementos Discretos (DEM), foi adotado o modelo simplificado de Hertz-Mindlin. Na análise através de Fluidodinâmica Computacional (CFD), foi adotado um modelo de primeira ordem para um fluido incompressível.

Durante as simulações, o acoplamento entre CFD e DEM foi realizado pelo programa da seguinte maneira: as equações da Navier-Stokes em valor médio de Reynolds em volume médio são resolvidas levando em conta as mudanças no movimento e o deslocamento das partículas discretas, sendo que as trajetórias das partículas são calculadas pelo código LIGGGHTS (DEM) (Goniva *et al.*, 2010).

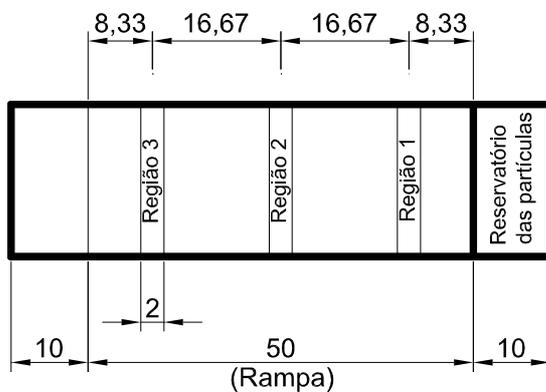
4.2.5 Desenvolvimento da simulação

Após a criação do empacotamento das partículas no compartimento de armazenamento inicial, a comporta era retirada e as partículas liberadas para escoarem sobre a rampa. Nas simulações subaéreas, o tempo total de simulação era de 5 (cinco) segundos, sendo o intervalo entre as iterações igual a 0,00001 segundo. Os dados foram gravados em intervalos de 0,01 segundo.

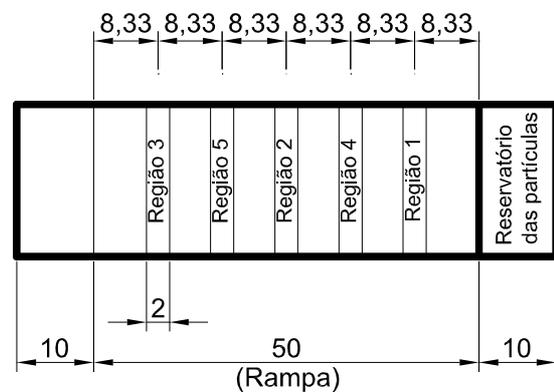
Durante as simulações foram registrados os dados referentes a: posição, velocidade linear, força e velocidade angular das partículas. Também foram aquisitados os dados referentes à força sobre a superfície da rampa.

A rampa foi dividida em regiões uniformemente distribuídas (ver Figura 4.8) para auxiliar nas determinações da altura média do fluxo, da fração de volume ocupada pela fase fluida e da pressão das partículas sobre a rampa. Nas simulações subaéreas foram utilizadas 3 (três) regiões, enquanto nas análises subaquáticas foram utilizadas 5 (cinco) regiões.

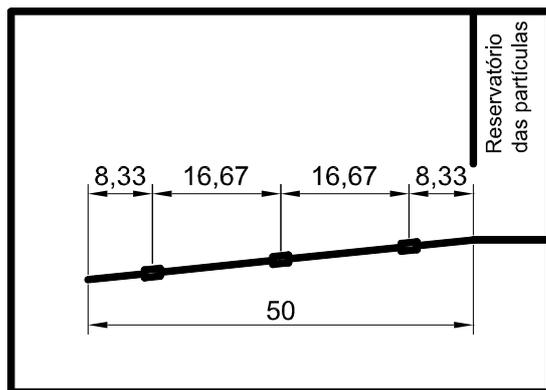
Essas regiões também serviram para dividir as análises das partículas. Porém, nessas análises, utilizaram-se 5 (cinco) regiões tanto nas simulações subaéreas quanto nas subaquáticas.



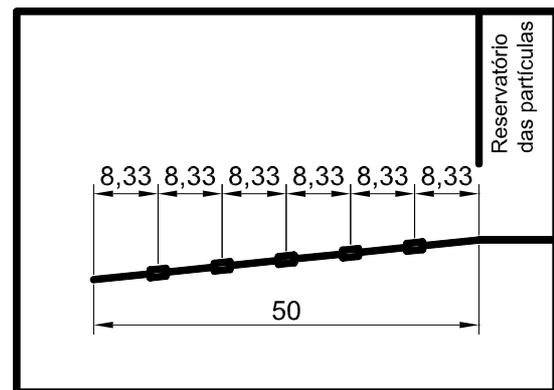
Vista superior subaérea



Vista superior subaquática



Corte longitudinal subaérea



Corte longitudinal subaquática

Dimensões em centímetros

Figura 4.8 – Detalhe das divisões da rampa (imagem fora de escala)

Com os dados coletados nessas simulações, foi possível determinar os seguintes parâmetros do fluxo de densidade:

- Velocidade da frente do fluxo;

- Vazão de partículas;
- Altura média do fluxo;
- Fração de volume ocupada pela fase líquida;
- Perfis verticais de velocidade e de concentração das partículas;
- Pressão sobre a superfície da rampa;
- Pressão de água sobre a superfície da rampa

Para visualizar os escoamentos e separar os dados necessários para análise foi utilizado o software Paraview. Em seguida, os dados foram compilados em uma planilha eletrônica, onde também foram gerados os gráficos com os resultados.

4.2.5.1 Velocidade da frente do fluxo

Para a determinação da velocidade média da frente do fluxo foi utilizada a seguinte metodologia. Em cada instante da simulação foi determinada a posição da partícula que se encontrava na dianteira do escoamento. Com os dados das posições das partículas que se encontram mais a frente do escoamento em dois instantes de tempo sequentes é possível determinar a velocidade média desenvolvida pela vanguarda do escoamento. A Figura 4.9 ilustra como foi realizada a determinação da dianteira do fluxo em diferentes instantes de tempo e, conseqüentemente, a determinação da velocidade média entre esses instantes.

Foi utilizada a seguinte equação para o cálculo da velocidade média da frente do fluxo.

$$v = \left(\frac{\Delta x_i}{\Delta t_i} \right) \left[\frac{1}{\cos(6^\circ)} \right] \quad (4.1)$$

sendo

$$\Delta t_i = (t_{i+1} - t_i) \quad (4.2)$$

onde:

- v = velocidade média da frente do fluxo [m/s];
- Δx_i = distância entre as partículas mais a frente do escoamento em dois instantes sequentes [m];
- Δt_i = intervalo de tempo entre os instantes sequentes [s];
- t_i = tempo no instante i [s].

A análise de velocidade da frente do fluxo foi realizada até o momento em que o escoamento chegou ao final da rampa.

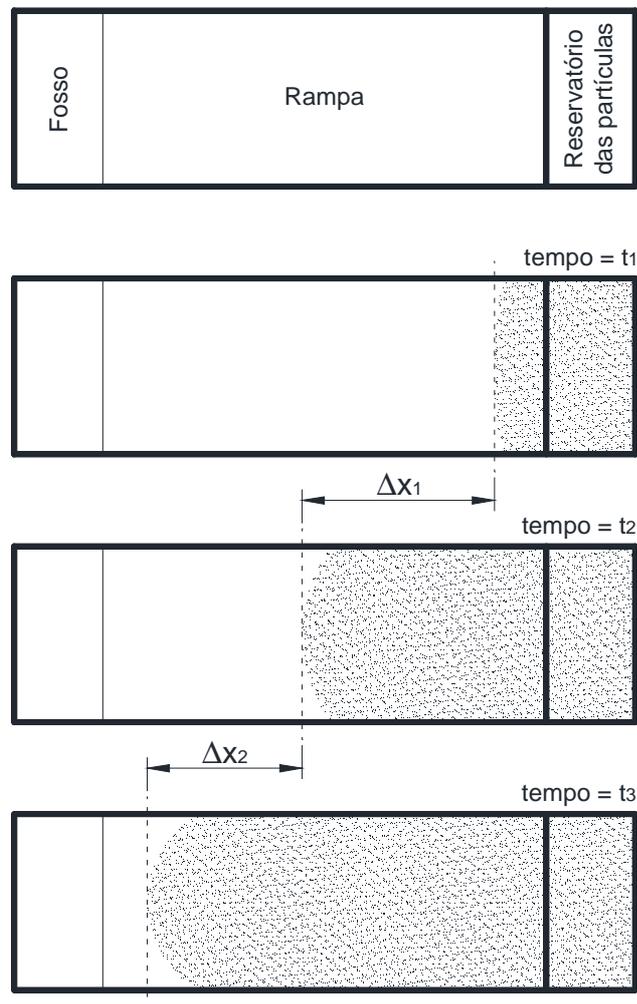


Figura 4.9 – Vista superior da caixa com detalhe do método utilizado para determinação da velocidade média da frente (imagem fora de escala)

4.2.5.2 Vazão de partículas

A vazão de partículas que alimenta o escoamento foi calculada a partir da quantidade de partículas que escoam. Essa quantidade foi determinada com base no número de partículas que passam pela comporta a cada intervalo de tempo. Conhecendo esse número e o volume de cada partícula, foi possível determinar o volume de partículas que passam pela comporta em cada intervalo de tempo, gerando os valores de vazão de partículas.

4.2.5.3 Altura média do fluxo

A análise da altura média do fluxo nas regiões de análise delimitadas na rampa. Para determinar a altura média do fluxo nessas regiões, foram determinadas as alturas do escoamento no início da região analisada (h_i) e no final da região analisada (h_f), conforme ilustra a Figura 4.10, sendo feita uma média aritmética simples com esses dois valores. As alturas médias do fluxo foram determinadas, em cada região, a partir do momento da entrada da primeira partícula na região analisada até o final do período da simulação.

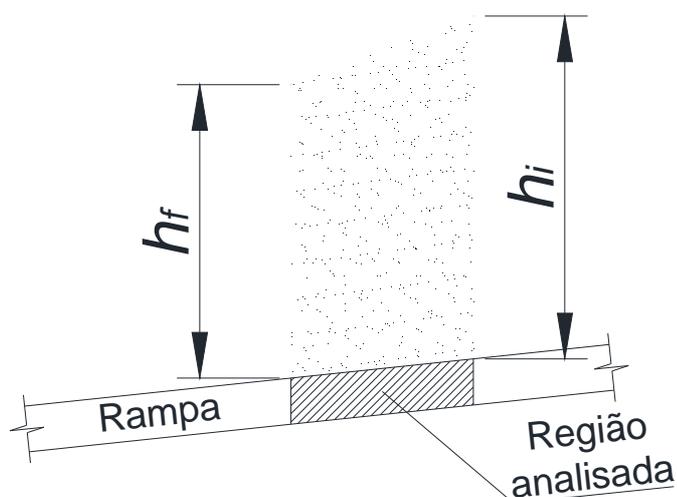


Figura 4.10 – Detalhe da determinação das alturas inicial e final do fluxo (imagem fora de escala)

4.2.5.4 Fração de volume ocupada pela fase líquida

A estimativa da fração de volume ocupada pela fase líquida foi realizada nas regiões delimitadas sobre a rampa, a partir do momento que a partícula mais a frente do escoamento entra na região de análise até o final da simulação. Para a determinação dessa fração foi necessário estimar dois parâmetros: o volume total (V_t) e o volume ocupado pelas partículas (V_s) da parte do escoamento que se encontra sobre a região de análise. Como a análise é feita ao longo do tempo, para cada instante de tempo foi necessário determinar a largura, o comprimento e as alturas inicial e final do fluxo sobre a região analisada para possibilitar a determinação do volume total do escoamento em cada momento da análise. Também, em cada instante, foi necessário estimar a quantidade de partículas sobre

a região analisada, a fim de calcular o volume ocupado pelas partículas, observando que todas as partículas possuem o mesmo diâmetro. Com os dados dos volumes estimados, a fração de volume ocupada pela fase líquida foi determinada pela seguinte equação:

$$\text{Fração de volume ocupada pela fase líquida} = \frac{V_t - V_s}{V_t} \quad (4.3)$$

4.2.5.5 Perfis verticais de velocidade e de concentração das partículas

As análises de velocidade e concentração das partículas foram realizadas em cada uma das regiões delimitadas na rampa. Para essas análises foram separadas as informações, referentes a velocidade e posição, de todas as partículas presentes na região analisada nos seguintes instantes de tempo, a contar do momento em que a partícula mais a frente do escoamento entra na região de análise: 0,01 s; 0,02 s; 0,04 s; 0,08 s; 0,15 s; 0,30 s; 0,45 s; 0,60 s; 0,75 s; 0,90 s; 1,05 s; 1,20 s; 2,40 s; 3,60 s; 4,80 s. Em algumas regiões não foi possível determinar os valores em todos os instantes de tempo supracitados e, nesses casos, a análise foi até o último instante possível de ser registrado.

Para a construção do perfil vertical de concentração das partículas, a altura do escoamento foi dividida em 20 segmentos igualmente espaçados. Na sequência, foi estimada a quantidade de partículas que se encontravam dentro de cada segmento de altura. Com essas informações foi possível determinar a razão entre a quantidade de partículas presentes em cada segmento de altura e a quantidade total de partículas presentes sobre a região analisada.

4.2.5.6 Pressão sobre a superfície da rampa

O programa LIGGGHTS permite a análise da pressão que as partículas exercem sobre cada célula triangular da malha utilizada para gerar as regiões delimitadas na rampa, dessa forma, foi possível determinar as variações da pressão exercida pelo escoamento sobre as regiões na rampa ao longo do tempo. Como cada região analisada foi gerada utilizando dois elementos triangulares (Figura 4.11), com áreas superficiais iguais, a determinação da pressão sobre a superfície

na região foi realizada utilizando-se o valor obtido através da média aritmética simples dos valores de pressão dos elementos triangulares da região.

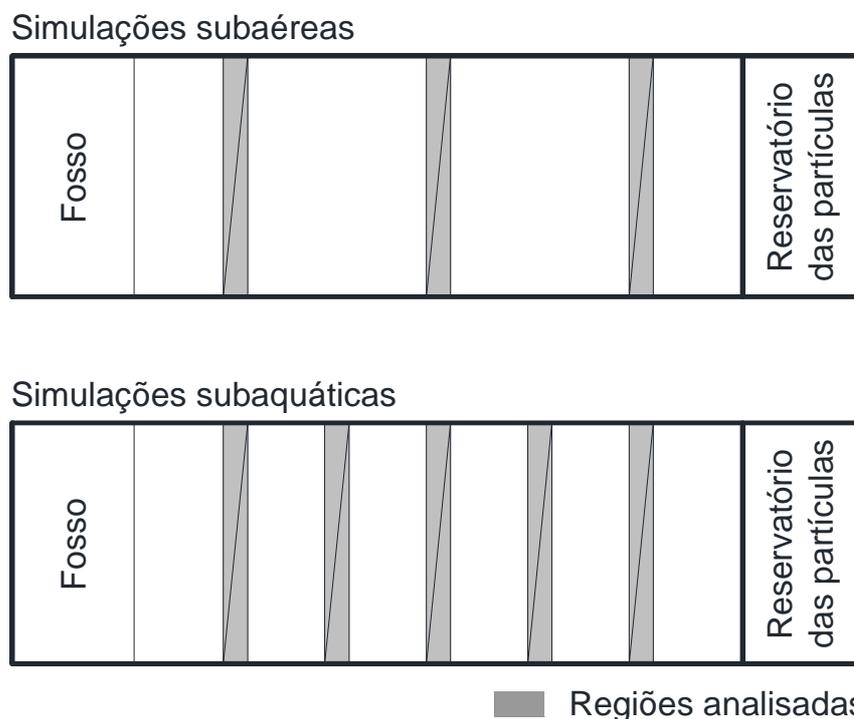


Figura 4.11 – Vista superior da caixa de testes com detalhes dos elementos utilizados para geração das regiões analisadas nas simulações subaéreas e subaquáticas (imagem fora de escala)

4.2.5.7 Pressão de água sobre a superfície da rampa

As variações de pressão de água sobre a superfície da rampa, ao longo do tempo de simulação, foram determinadas considerando o valor médio das variações de pressão nas células de volume (CFD) que se encontravam nas regiões analisadas em cada incremento de tempo. Os gráficos gerados apresentam uma curva tracejada vertical, para cada fluxo simulado, a qual indica a entrada da primeira partícula do escoamento na região analisada, permitindo avaliar o que acontece nas regiões analisadas antes e após a chegada do escoamento.

5. RESULTADOS

5.1 Velocidade média da frente do escoamento

Neste item, serão apresentados e discutidos os resultados relacionados a velocidade média da frente dos escoamentos analisados. A determinação da velocidade média da frente foi realizada através da análise da posição da partícula mais avançada do escoamento nos diferentes instantes da simulação. Com a variação da posição dessa partícula e a variação dos intervalos de tempo entre os instantes analisados, foi possível determinar a velocidade média.

5.1.1 Fluxos subaéreos

Os fluxos subaéreos apresentaram várias partículas desprendidas do escoamento principal. Para realizar a determinação da posição da frente do escoamento foi utilizada a posição da frente do escoamento principal, desconsiderando-se as partículas desprendidas. Essas partículas foram determinadas visualmente nos diferentes instantes analisados, conforme ilustra a Figura 5.1, o que pode gerar pequenas variações nos valores, principalmente nos instantes iniciais da simulação, onde é mais difícil determinar quais partículas se desprenderam do escoamento principal.

Analisando os dados de posição da frente do escoamento dos fluxos subaéreos em função do tempo (linhas contínuas da Figura 5.2) observa-se que todos os fluxos analisados possuem comportamentos bem parecidos até se aproximarem da Região 1. A partir dessa região, conforme ocorre o aumento do coeficiente de atrito das partículas há um aumento do tempo necessário para se atingir um mesmo deslocamento, ou seja, uma diminuição da velocidade da frente do escoamento.

Nota-se, também, que as curvas de deslocamento em função do tempo apresentam variações de curvatura entre a Região 2 e final da rampa. Essas variações ficam mais acentuadas conforme ocorre o aumento do coeficiente de atrito das partículas. Observando-se as imagens das partículas em diferentes instantes analisados (Figuras A.1 até A.10 – Anexo A) verifica-se que o escoamento inicia

com a movimentação das partículas próximas a comporta. Conforme essas partículas vão saindo, ocorre a movimentação das partículas que se encontram acima dessas. Porém é uma movimentação gradual até conseguir mobilizar as partículas que se encontram no topo do reservatório e durante todo esse intervalo de tempo ocorre a primeira fase do escoamento, que dura desde o instante inicial do escoamento até o segundo ponto de inflexão da curva deslocamento em função do tempo. Após as partículas posicionadas no topo do reservatório saírem da inércia, o escoamento entra em uma segunda fase, onde se observa mais claramente a diminuição da altura das partículas no interior do reservatório.

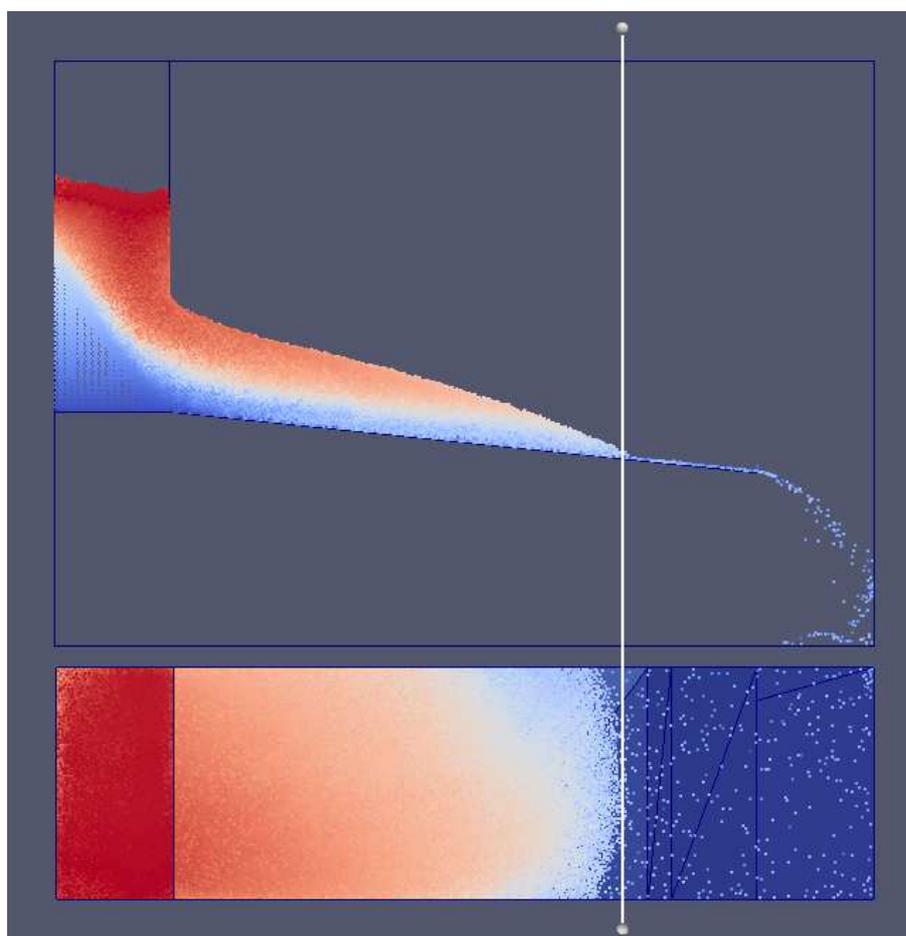


Figura 5.1 – Determinação da frente do escoamento principal nos fluxos subaéreos (vistas lateral e superior)

As linhas tracejadas presentes na Figura 5.2 representam as projeções dos deslocamentos dos fluxos além da rampa utilizada na simulação. Essas projeções foram determinadas através da extrapolação dos valores de velocidade em função do tempo, conforme ilustrado nas Figuras 5.3 e 5.4. Pode-se observar que há uma tendência do deslocamento máximo atingido pelo fluxo aumentar com a diminuição do coeficiente de atrito das partículas.

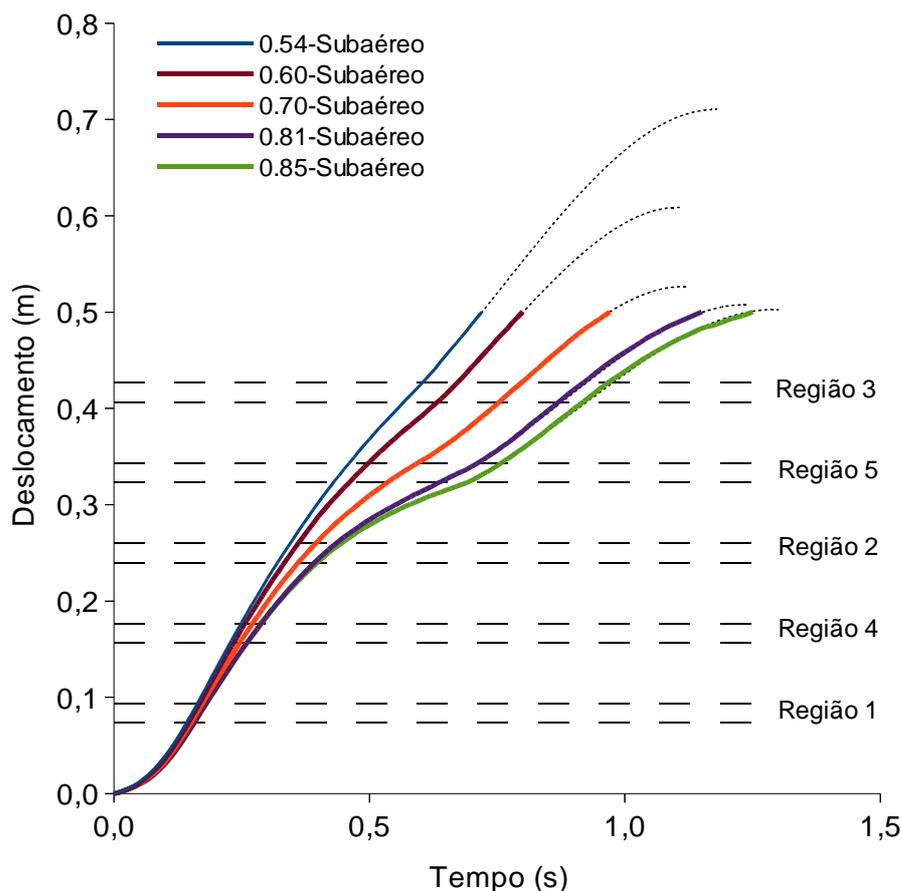


Figura 5.2 – Deslocamentos da frente dos escoamentos em função do tempo nos fluxos subaéreos

Conhecendo os valores de deslocamento em função do tempo, foi possível determinar a velocidade média da frente do escoamento, com base na Equação 4.1. A Figura 5.3 ilustra a variação da velocidade da frente do escoamento em função do tempo e a Figura 5.4 exhibe a variação dessa velocidade em função do deslocamento, ambas as variações representadas pelas linhas contínuas. As linhas tracejadas verticais ilustradas na Figura 5.4 delimitam as regiões de análise existentes na rampa e os números entre essas linhas identificam essas regiões.

Considerando as Figuras 5.3 e 5.4, nota-se que em todos os fluxos subaéreos analisados há um aumento da velocidade média da frente do escoamento até que se atinge um valor de velocidade máxima, entre as Regiões 1 e 4. A partir desse ponto, a velocidade começa a diminuir até atingir um ponto de inflexão extremo, o qual limita a primeira fase de escoamento. Após esse ponto de inflexão, ocorre um novo aumento da velocidade média da frente do escoamento buscando atingir um valor de pico e, a partir desse valor, a velocidade tende a diminuir até que a frente do escoamento alcance a imobilidade (segunda fase de escoamento).

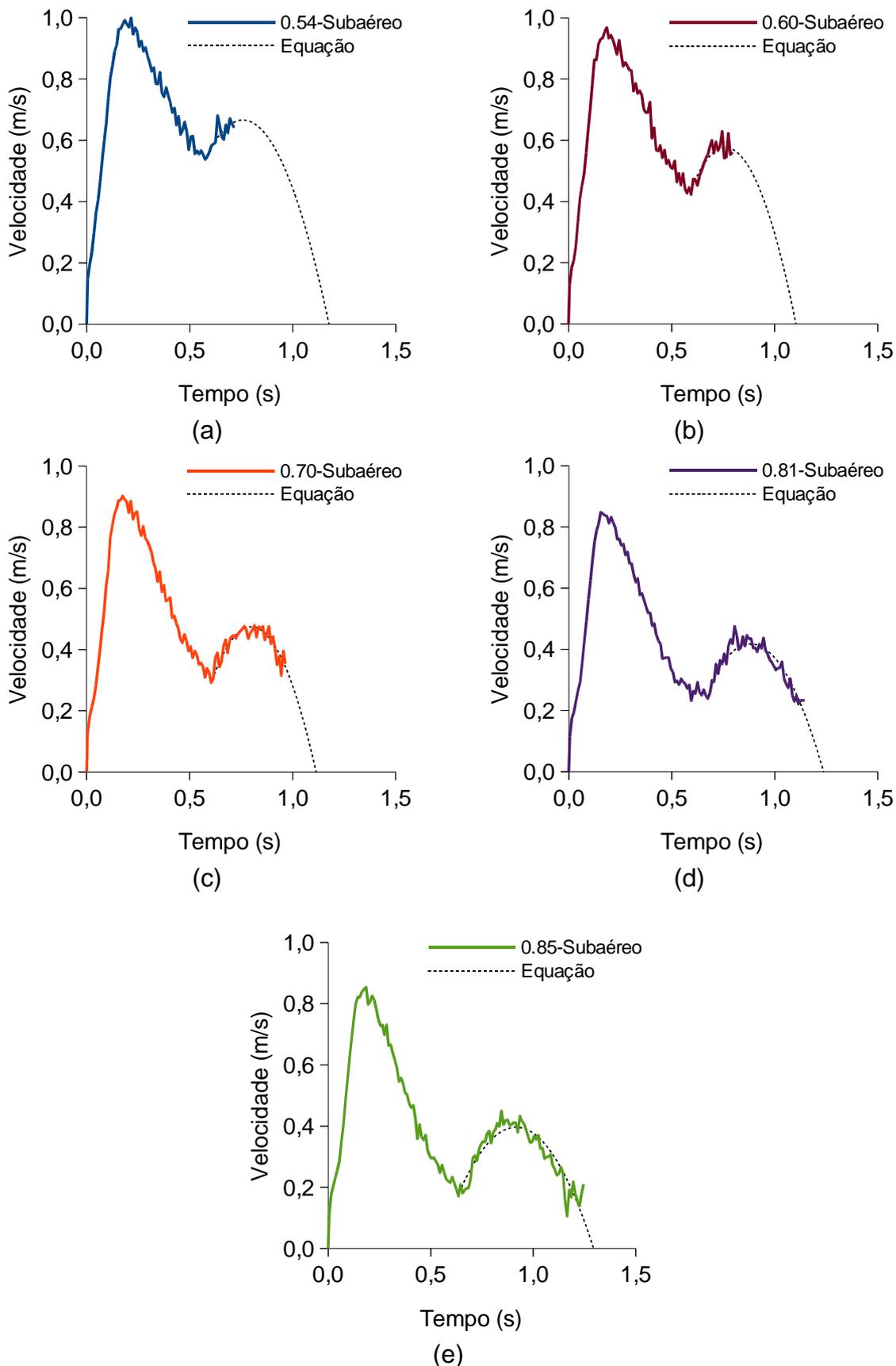


Figura 5.3 – Velocidades médias da frente dos escoamentos dos fluxos subaéreos em função do tempo para os coeficientes de atrito das partículas: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85

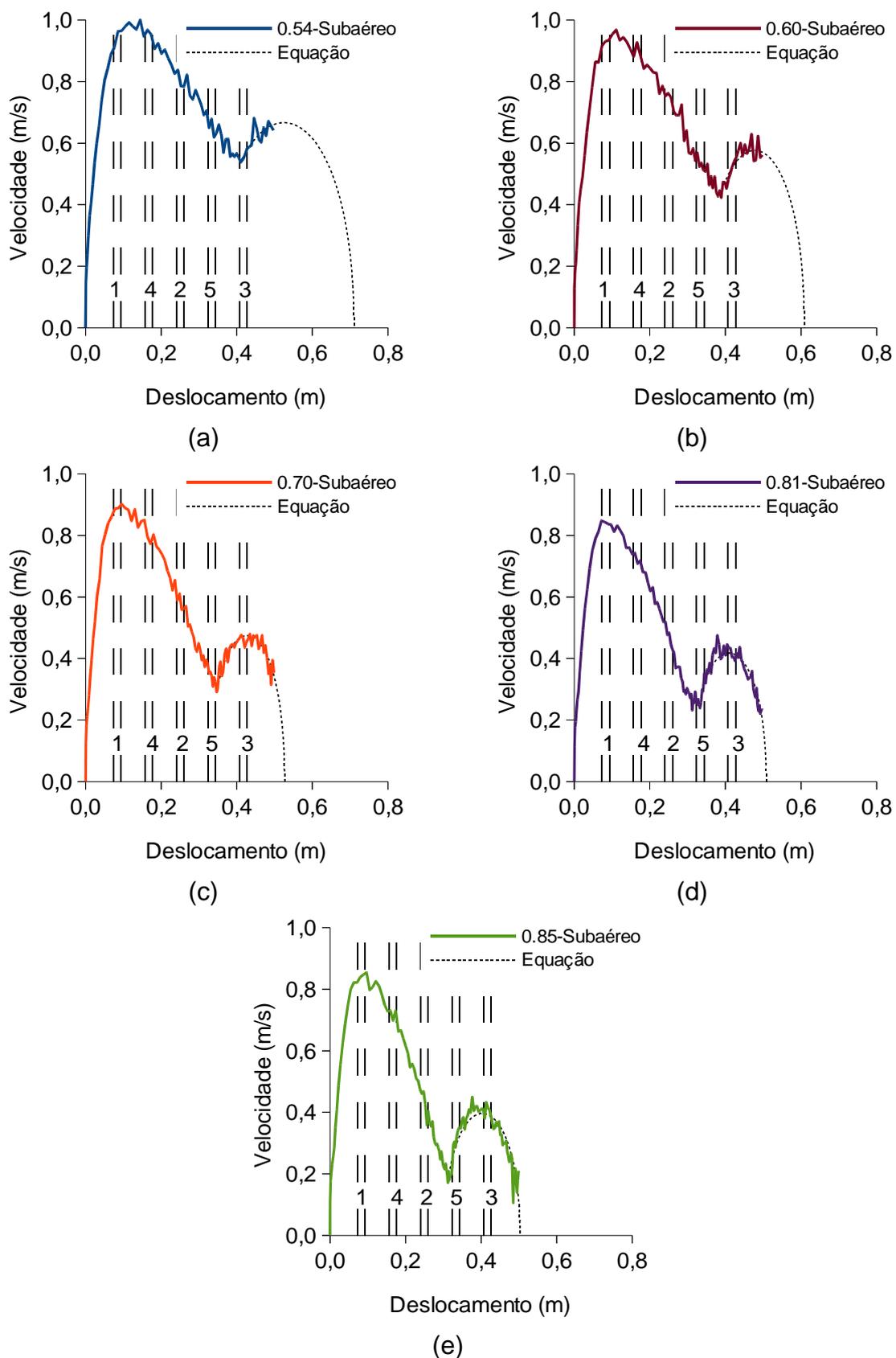


Figura 5.4 – Velocidades médias da frente dos escoamentos dos fluxos subaéreos em função do deslocamento para os coeficientes de atrito das partículas: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e)

0,85

As simulações realizadas não permitiram que os fluxos chegassem à imobilidade, pois a rampa utilizada possui uma extensão de 0,50 m, e observou-se que todos os fluxos analisados conseguem transpor essa distância antes de pararem. Para que fosse possível estimar o deslocamento máximo de cada fluxo subaéreo analisado, foram utilizados os valores de velocidade média dos fluxos que representam a segunda fase de escoamento. Com esses dados foi determinada a seguinte equação para representar a variação da velocidade média em função do tempo e do coeficiente de atrito das partículas:

$$v = -231,15f^3t^2 + 278,52f^3t + 547,06f^2t^2 - 677,04f^2t - 416,54ft^2 + 528,57ft + 97,99t^2 - 126,07t - 84,09f^3 + 212,01f^2 - 172,16f + 42,86 \quad (5.1)$$

onde:

v = velocidade da frente do escoamento [m/s];
 f = coeficiente de atrito das partículas;
 t = tempo [s].

Com base na Equação 5.1, a qual apresenta um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,944098, considerando os dados de velocidade das simulações durante a segunda fase do escoamento, foram estimados os valores das velocidades da frente dos escoamentos além da rampa de simulação. Esses valores estão representados pelas linhas pontilhadas nas Figuras 5.3 e 5.4.

O deslocamento da frente do fluxo além da rampa foi estimado integrando a Equação 5.1 e aplicando-a para os fluxos subaéreos simulados, gerando, então, as curvas pontilhadas ilustradas na Figura 5.2.

A Figura 5.5 apresenta os valores referentes ao deslocamento da primeira fase do escoamento da frente (deslocamento primário) nos fluxos subaéreos simulados em função do coeficiente de atrito das partículas. Observa-se que os valores tendem a diminuir com o aumento do coeficiente de atrito das partículas. A linha tracejada ilustrada na Figura 5.5 representa a equação de ajuste desses pontos:

$$\Delta s_1 = -0,282760f + 0,555096 \quad (5.2)$$

onde:

Δs_1 = deslocamento primário [m];
 f = coeficiente de atrito das partículas.

A Equação 5.2 possui um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,967362.

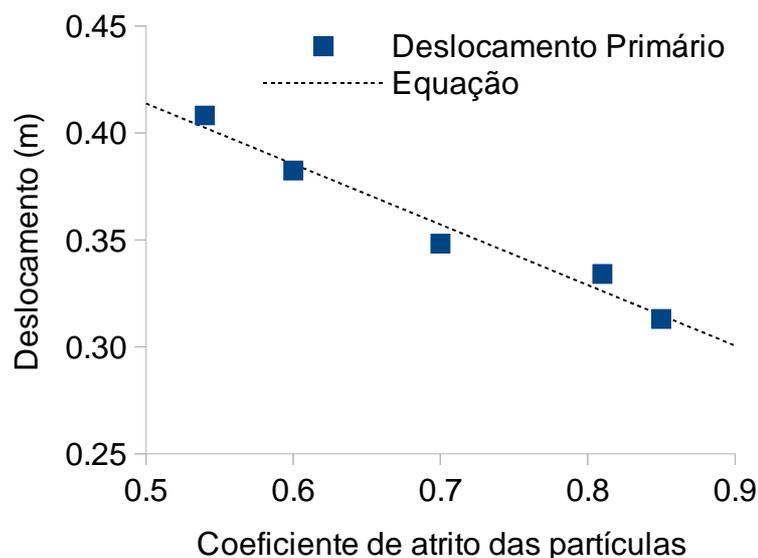


Figura 5.5 – Deslocamento durante a primeira fase do escoamento em função dos coeficientes de atrito das partículas

5.1.2 Fluxos subaquáticos

Os fluxos subaquáticos simulados não apresentaram uma quantidade significativa de partículas desprendidas. Dessa maneira, a determinação do deslocamento da frente do fluxo foi baseada na posição da partícula que se encontrava na vanguarda do escoamento em cada instante de tempo analisado.

Nos fluxos subaquáticos simulados, a posição da frente do fluxo em função do tempo (Figura 5.6) mostra que os fluxos possuem comportamentos parecidos no início dos deslocamentos até se aproximarem da Região 1. A partir dessa região, ocorre um aumento do tempo necessário para se atingir um mesmo deslocamento conforme há o aumento do coeficiente de atrito das partículas, assim como ocorre nos fluxos subaéreos. Observa-se que as curvas de deslocamento em função do tempo podem ser ajustadas por equações de terceira ordem. Considerando isso, os deslocamentos dos fluxos subaquáticos simulados (linhas tracejadas na Figura 5.6) foram ajustados através da equação:

$$\Delta s = -3,52f^3t^3 + 12,30f^3t^2 - 15,54f^3t + 7,37f^2t^3 - 25,94f^2t^2 + 32,75f^2t - 4,81ft^3 + 17,39ft^2 - 22,60ft + 0,92t^3 - 3,59t^2 + 5,38t + 2,47f^3 - 5,10f^2 + 3,45f - 0,78 \quad (5.3)$$

onde:

Δs = deslocamento da frente do escoamento [m];

f = coeficiente de atrito das partículas;

t = tempo [s].

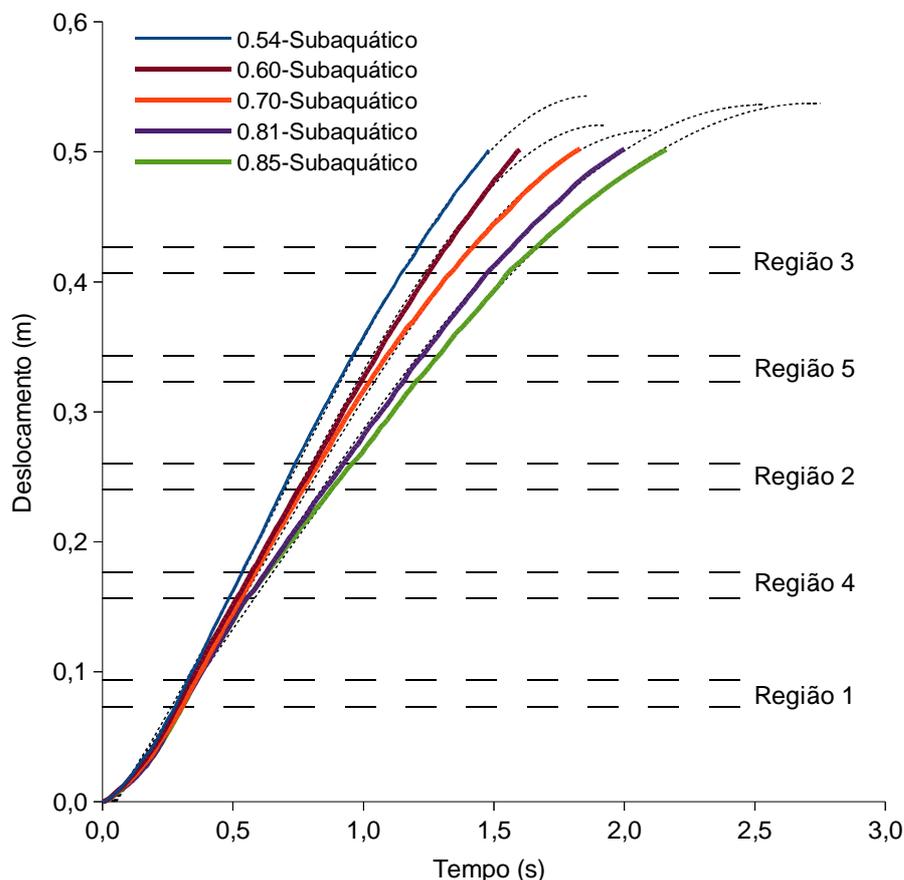


Figura 5.6 – Deslocamentos da frente dos escoamentos em função do tempo nos fluxos subaquáticos

A Equação 5.3 apresenta um coeficiente de determinação (R^2) de 0,999416 para os valores de deslocamento compreendidos dentro da faixa simulada (entre 0,00 m e 0,50 m). Ela permite relacionar o deslocamento da frente do fluxo com o tempo e o coeficiente de atrito das partículas. Vale salientar que essa equação tem o intuito de representar o comportamento dos fluxos simulados, dentro das condições específicas deste trabalho. Deve-se tomar cuidado, caso se utilize essa equação para tentar representar fluxos submetidos a outras condições.

As velocidades médias da frente dos escoamentos dos fluxos subaquáticos foram determinadas através da Equação 4.1, considerando os dados de deslocamento em função do tempo, ilustrados na Figura 5.6. A Figura 5.7 ilustra as

variações das velocidades médias da frente do escoamento em função do tempo e a Figura 5.8 mostra essas variações em função do deslocamento sobre a rampa para as simulações subaquáticas realizadas.

Nas Figuras 5.7 e 5.8 as linhas contínuas indicam as variações das velocidades da frente dos escoamentos durante as suas passagens pela rampa. As linhas tracejadas indicam graficamente a equação de ajuste da velocidade do escoamento:

$$v = -10,56f^3t^2 + 24,60f^3t + 22,11f^2t^2 - 51,88f^2t - 14,43ft^2 + 34,78ft + 2,76t^2 - 7,18t - 15,54f^3 + 32,75f^2 - 22,60f + 5,38 \quad (5.4)$$

onde:

v = velocidade da frente do escoamento [m/s];
 f = coeficiente de atrito das partículas;
 t = tempo [s].

A Equação 5.4 foi determinada através da derivada primeira da função deslocamento em relação ao tempo, originando uma equação de segunda ordem. Observa-se uma boa conformidade entre os valores de velocidade média calculados a partir dos dados das posições da frente dos escoamentos e a curva de ajuste.

Através da Figura 5.7, verifica-se que há um aumento das velocidades da frente dos escoamentos até que se atingem pontos com valores máximos. A partir desses pontos, as velocidades começam a decrescer e os escoamentos passam a buscar a imobilidade. Observa-se, também, que há uma tendência de aumento do tempo necessário para o escoamento percorrer a rampa conforme ocorre o aumento do coeficiente de atrito das partículas. Além disso, pode-se verificar que, com o aumento do coeficiente de atrito das partículas, há uma tendência de diminuição da velocidade média máxima alcançada pelos fluxos. Analisando a Figura 5.8, verifica-se a velocidade média da frente do escoamento ao longo do deslocamento pela rampa. Todos os fluxos simulados apresentam um comportamento de crescimento dos valores de velocidade conforme ocorre o deslocamento até atingirem um ponto onde há o máximo valor de velocidade média, entre o início do escoamento e a Região 4. A partir desse valor, a velocidade tende a diminuir conforme a frente do escoamento avança.

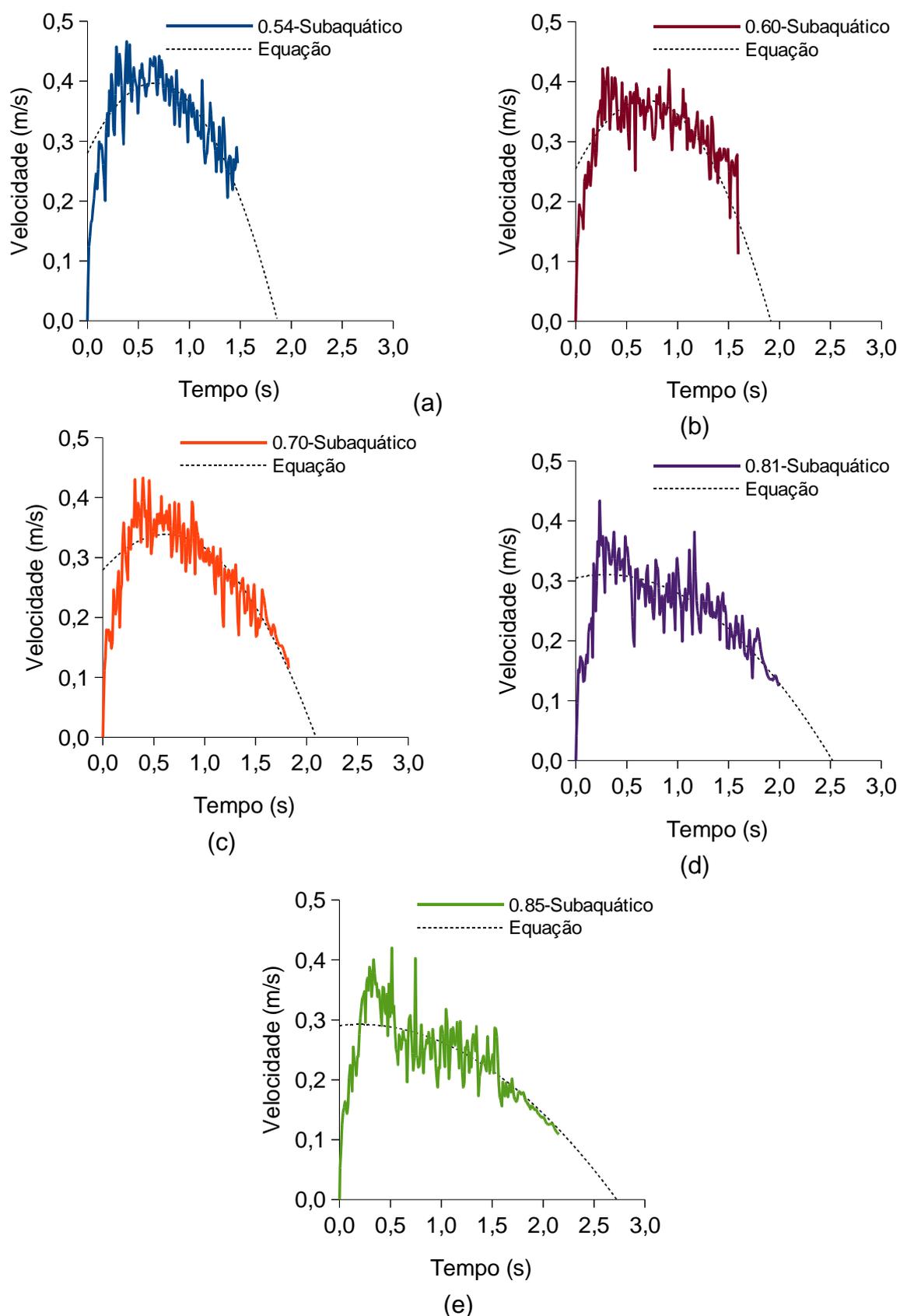


Figura 5.7 – Velocidades médias da frente dos escoamentos dos fluxos subaquáticos em função do tempo: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85

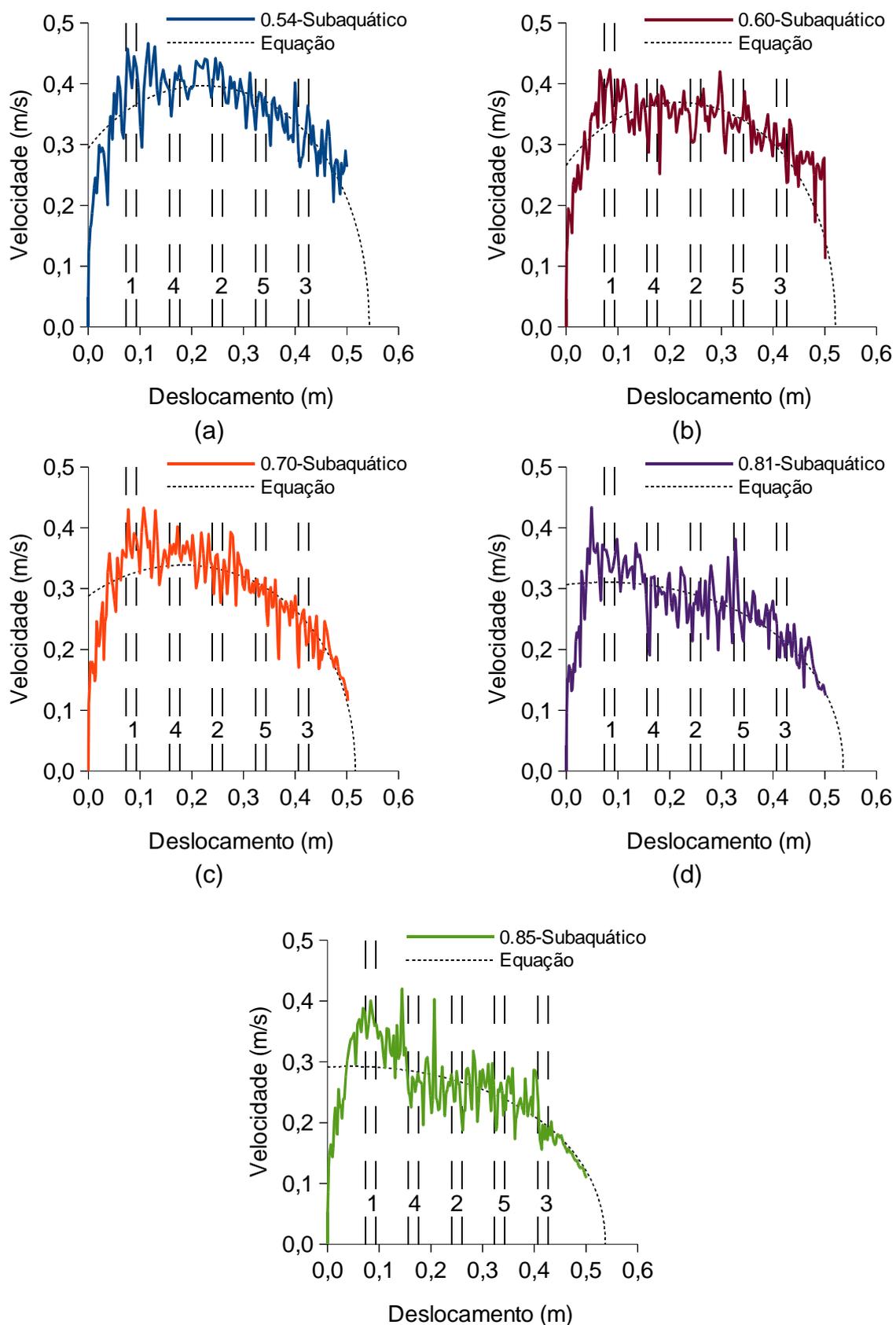


Figura 5.8 – Velocidades médias da frente dos escoamentos dos fluxos subaquáticos em função do deslocamento: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85

Em ambos os fluxos, subaéreos e subaquáticos, há uma tendência da velocidade média da frente do fluxo diminuir com o aumento do coeficiente de atrito, sendo mais perceptível nos fluxos subaéreos. A Figura 5.9 apresenta um comparativo entre as velocidades médias da frente dos fluxos subaéreos e subaquáticos, onde as diferenças entre os comportamentos das curvas ficam mais claras. Além disso, pode-se observar que os valores de velocidade média máxima atingidos pelos fluxos subaéreos são maiores que o dobro dos valores alcançados pelos fluxos subaquáticos.

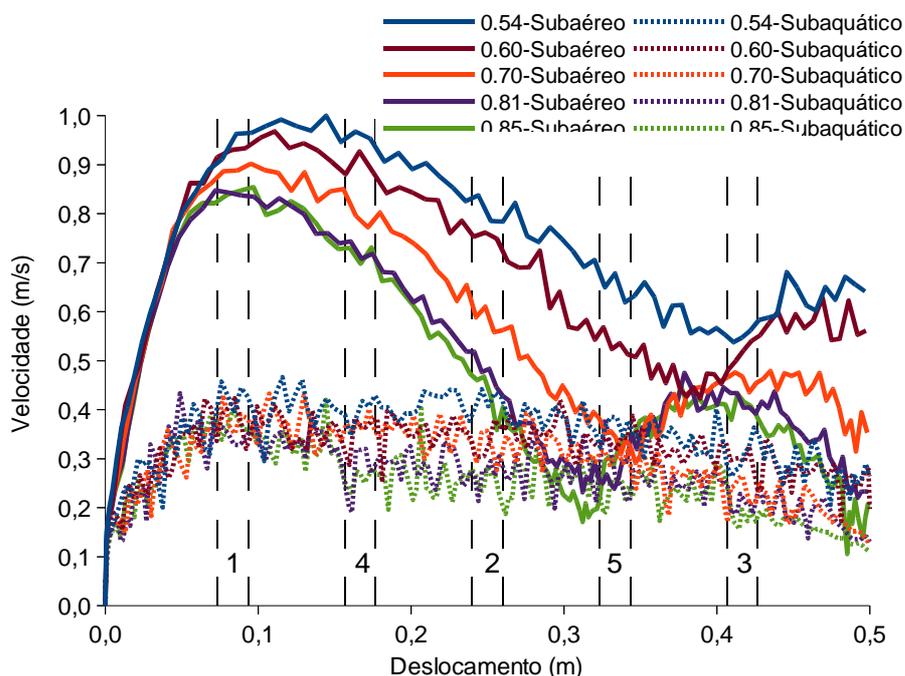


Figura 5.9 – Comparativo das variações das velocidades médias das frentes dos fluxos subaéreos e subaquáticos

5.2 Quantidade de partículas que escoam pela rampa

5.2.1 Fluxos subaéreos

A análise da quantidade de partículas que escoam pela rampa permite estimar a vazão de partículas que alimentam o escoamento ao longo do tempo de simulação, além de determinar a relação entre a quantidade de partículas que escoam pela rampa e a quantidade inicial (309.441 partículas).

Conforme se observa na Figura 5.10, a quantidade de partículas que escoam pela rampa diminui com o aumento do coeficiente de atrito. Ou seja, quanto maior for o coeficiente de atrito das partículas, maior é o número de partículas que permanecem depositadas no reservatório. Pode-se notar que, em todos os fluxos subaéreos, foi necessário menos de 1,5 s para que praticamente todas as partículas que escoam pela rampa saiam do reservatório.

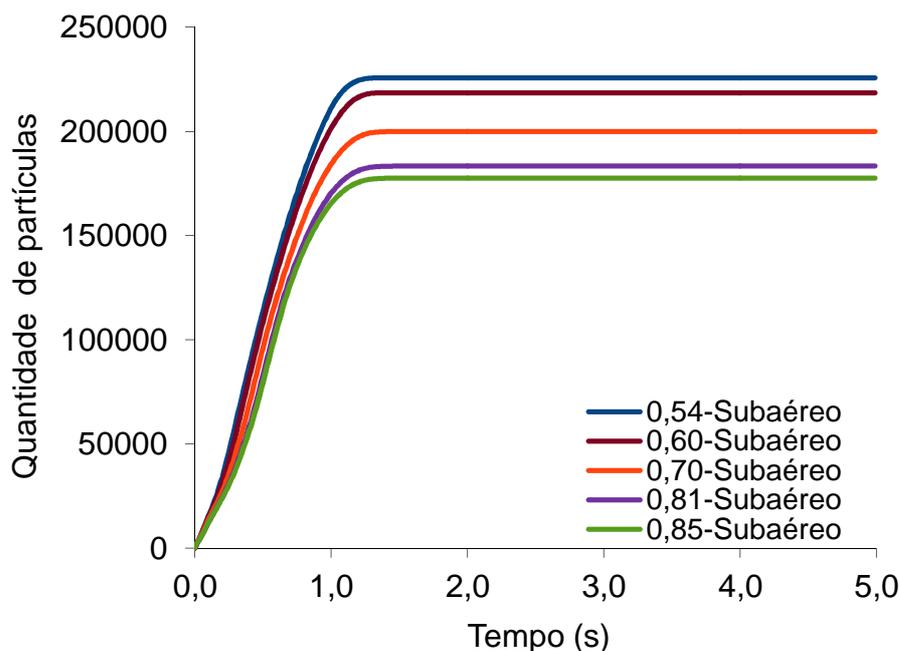


Figura 5.10 – Quantidade de partículas nos fluxos subaéreos

5.2.2 Fluxos subaquáticos

Os fluxos subaquáticos (Figura 5.11) mantêm o mesmo comportamento observado nos fluxos subaéreos, onde ocorre uma diminuição das partículas que escoam pela rampa com o aumento do coeficiente de atrito. Porém, nos fluxos subaquáticos são necessários aproximadamente 2,0 s para que as partículas que escoam pela rampa deixem o reservatório.

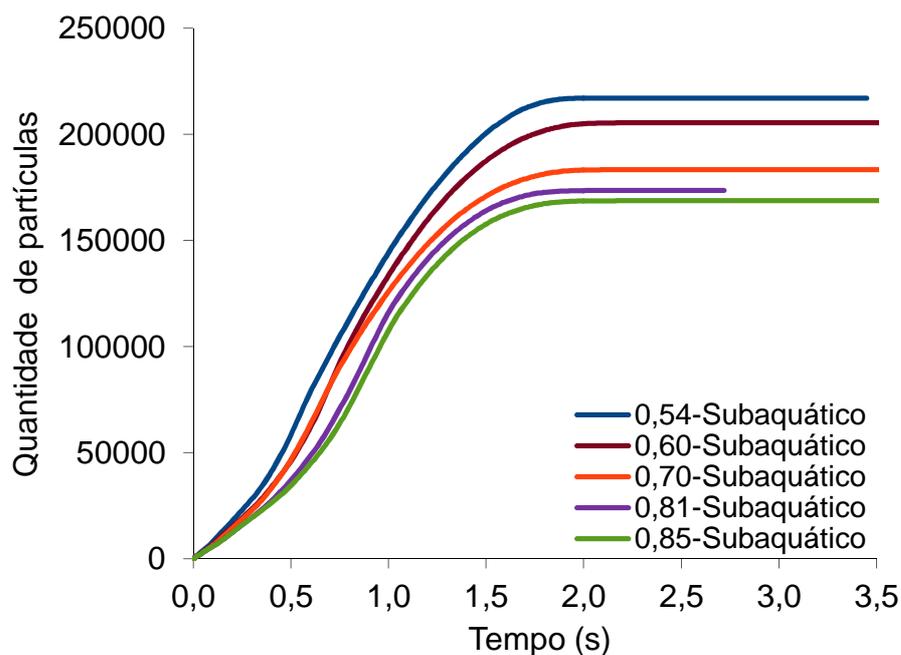


Figura 5.11 – Quantidade de partículas nos fluxos subaquáticos

A Figura 5.12 apresenta curvas comparativas da quantidade de partículas que escoam pela rampa entre os fluxos subaéreos e subaquáticos com o mesmo coeficiente de atrito. Nessa figura, nota-se que os fluxos subaquáticos apresentam uma quantidade de partículas que escoam menor que os fluxos subaéreos, sendo entre 91,71% e 96,18% da quantidade de partículas que escoam nos fluxos subaéreos, conforme ilustra a Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Quantidade total de partículas que escoam pela rampa

Fluxo	Quantidade de partículas	Fluxo	Quantidade de partículas	Razão Subaquático/ Subaéreo	Razão Subaquático/ Subaéreo média	Desvio padrão
0,54-Subaéreo	225669	0,54-Subaquático	217082	0,9618	0,9433	0,0165
0,60-Subaéreo	218464	0,60-Subaquático	205542	0,9409		
0,70-Subaéreo	199958	0,70-Subaquático	183386	0,9171		
0,81-Subaéreo	183391	0,81-Subaquático	173598	0,9466		
0,85-Subaéreo	177570	0,85-Subaquático	168691	0,9500		

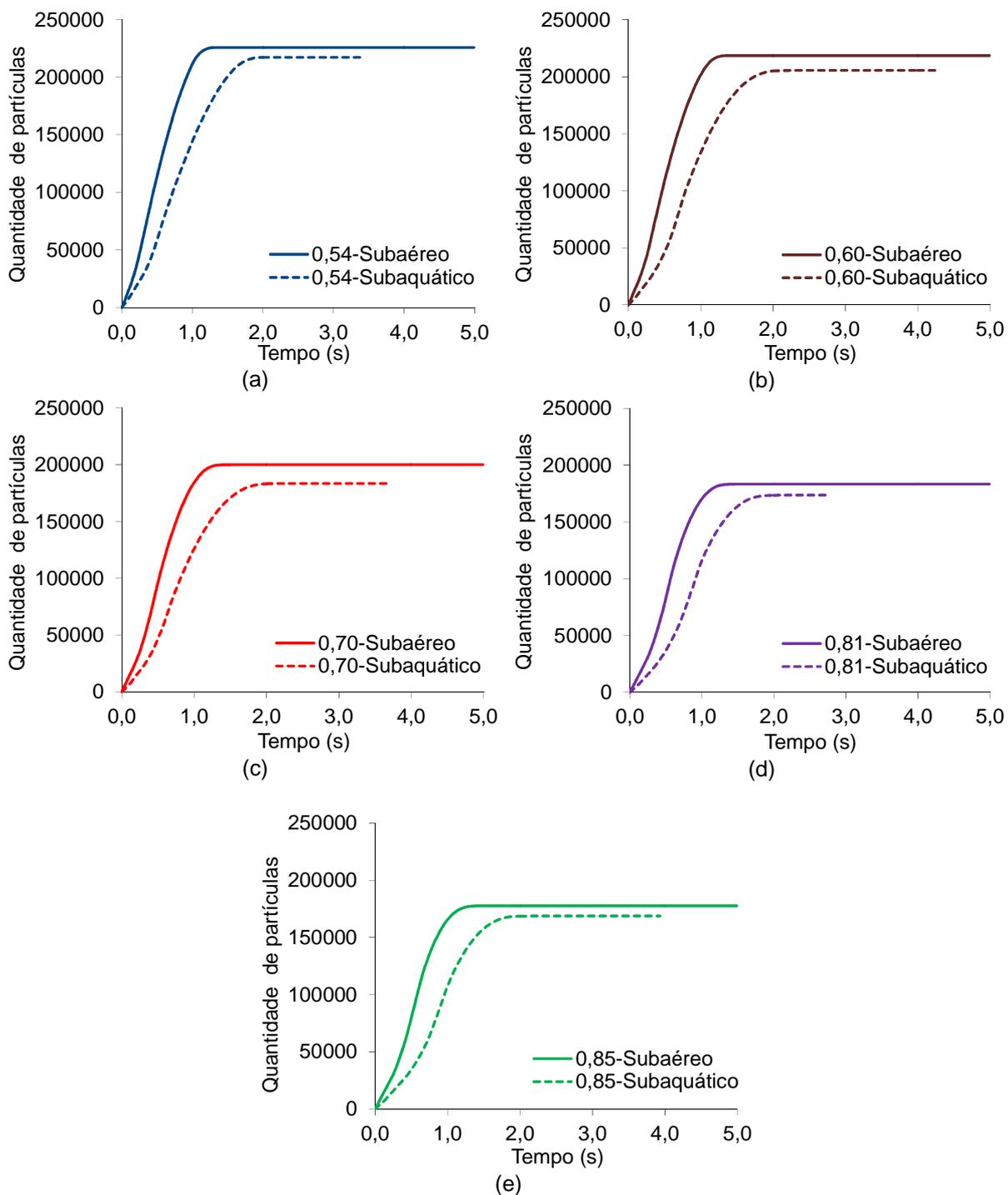


Figura 5.12 – Quantidade de partículas nos fluxos subaéreo e subaquático com coeficientes de atrito iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85

Avaliando-se a porcentagem de partículas que escoam pela rampa durante o período da simulação em relação à quantidade de partículas depositadas no reservatório no início da simulação, nota-se que conforme ocorre o aumento do coeficiente de atrito das partículas há uma diminuição dessa porcentagem, segundo os dados apresentados na Tabela 5.2, sendo mais expressiva nos fluxos subaquáticos.

Tabela 5.2 – Porcentagem de partículas que escoam pela rampa

Fluxo	% de partículas que escoam	Fluxo	% de partículas que escoam
0,54-Subaéreo	72,93	0,54-Subaquático	70,15
0,60-Subaéreo	70,60	0,60-Subaquático	66,42
0,70-Subaéreo	64,62	0,70-Subaquático	59,26
0,81-Subaéreo	59,27	0,81-Subaquático	56,10
0,85-Subaéreo	57,38	0,85-Subaquático	54,51

Através da Figura 5.13, a qual ilustra o comportamento da quantidade máxima de partículas que escoam em função do coeficiente de atrito, pode-se observar que há uma tendência linear da diminuição da quantidade de partículas em função do coeficiente de atrito, tanto nos fluxos subaéreos quanto nos subaquáticos. As linhas de tendência das quantidades máximas de partículas que escoam para os fluxos subaéreos e subaquáticos são representadas, respectivamente, pelas seguintes equações:

$$\# \text{partículas}_{(\text{Subaéreo})} = -158828,062678f + 312196,043875 \quad (5.5)$$

$$\# \text{partículas}_{(\text{Subaquático})} = -155098,148148f + 298228,503704 \quad (5.6)$$

onde:

$\# \text{partículas}$ = quantidade máxima de partículas,
 f = coeficiente de atrito das partículas.

A Equação 5.5 apresenta um valor igual a 0,997596 para o coeficiente de determinação (R^2), enquanto a Equação 5.6 apresenta um valor igual a 0,969814 para o mesmo coeficiente. Nota-se que apenas o fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 tende a ter uma maior distância das linhas de tendência

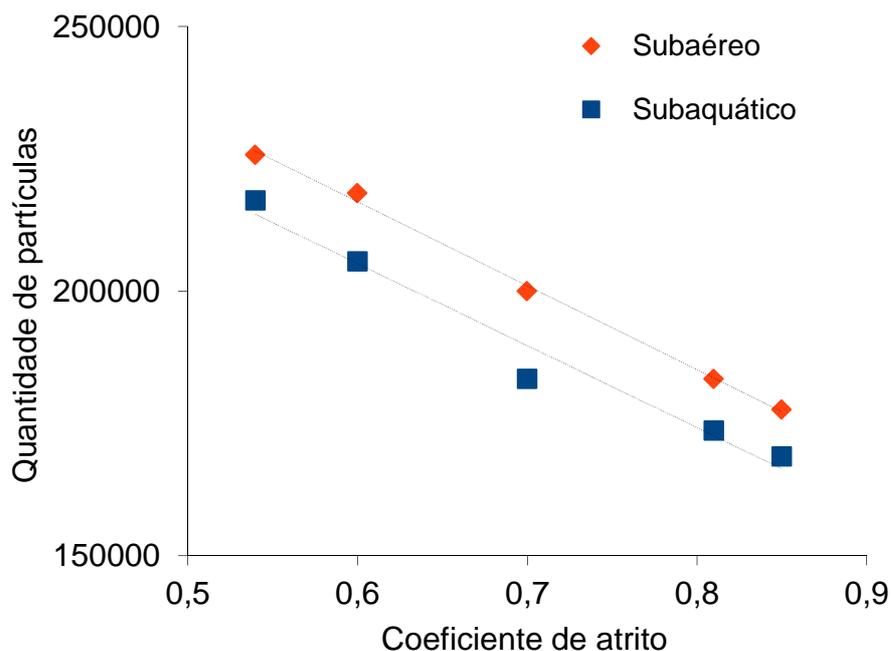


Figura 5.13 – Quantidade de partículas em função do coeficiente de atrito

5.2.3 Vazão de partículas

Com as informações de quantidades de partículas que escoam nos diversos fluxos analisados (Itens 5.2.1 e 5.2.2), é possível determinar a vazão de partículas ao longo do tempo de escoamento.

A Figura 5.14 ilustra os comportamentos das curvas de vazão de partículas em função do tempo dos fluxos subaéreos. Observa-se que as curvas tendem a possuírem rápidas oscilações nos instantes iniciais do escoamento, para em seguida buscarem um crescimento da vazão até atingirem pontos de valor máximo de vazão. Após as curvas alcançarem esses pontos, ocorre uma diminuição da vazão até, praticamente, cessar a saída de partículas do reservatório, o que ocorre em instantes entre 1,36 s e 1,45 s após o início do escoamento.

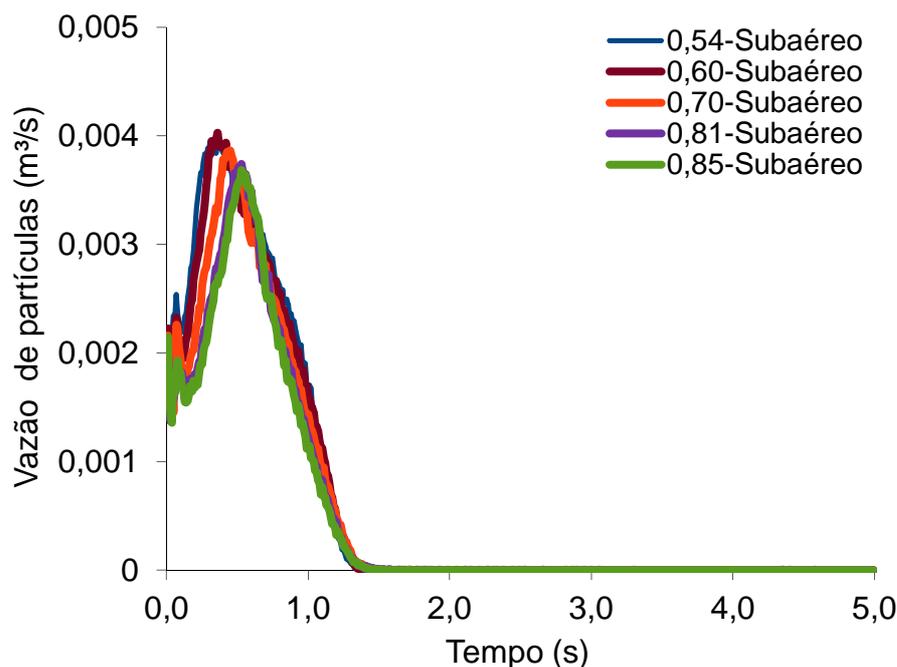


Figura 5.14 – Vazão de partículas nos fluxos subaéreos

Conforme ilustra a Tabela 5.3, o fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,60 é o que alcança um maior valor de vazão de partículas entre os fluxos analisados, porém com um valor muito próximo do fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,54. Nos demais fluxos, há uma tendência do máximo valor de vazão do fluxo diminuir com o aumento do coeficiente de atrito das partículas, conforme ilustra a Figura 5.17.

Tabela 5.3 – Máximo valor de vazão de partículas para os fluxos subaéreos

Fluxo	Máximo valor de vazão de partículas (m³/s)
0,54-Subaéreo	0,003997
0,60-Subaéreo	0,004028
0,70-Subaéreo	0,003865
0,81-Subaéreo	0,003739
0,85-Subaéreo	0,003686

Nos fluxos subaquáticos (Figura 5.15), o comportamento padrão das curvas é o seguinte: ocorrem oscilações iniciais até que se alcança um valor que permanece constante por um período de tempo. Esse período de tempo tende a aumentar com o aumento do coeficiente de atrito das partículas. Após esse período de tempo, a vazão de partículas tende a aumentar até atingir um valor de vazão máximo. Em

seguida, a vazão tende a diminuir até o instante em que, praticamente, cessa a saída de partículas do reservatório, em instantes entre 2,04 s e 2,41 s.

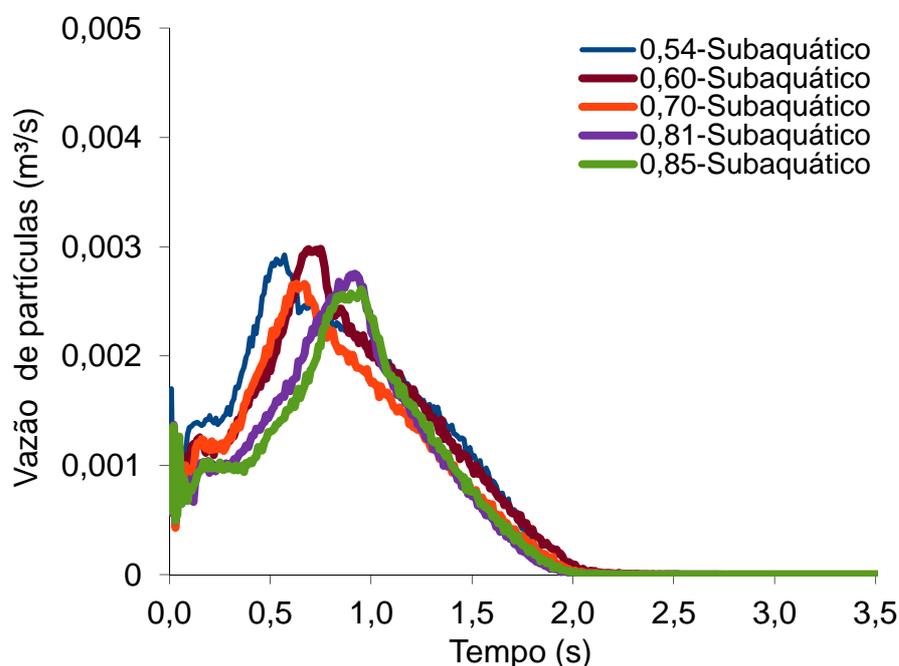


Figura 5.15 – Vazão de partículas nos fluxos subaquáticos

A Tabela 5.4 apresenta os valores do máximo valor de vazão de partículas para os diferentes fluxos subaquáticos analisados. Nota-se que, mais uma vez, o fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,60 é o que alcança um maior valor de vazão de partículas entre os fluxos analisados, com um valor bem próximo do fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,54. Mais uma vez, apresenta-se uma tendência de diminuição do máximo valor de vazão do fluxo com o aumento do coeficiente de atrito das partículas, conforme ilustra a Figura 5.17.

Tabela 5.4 – Máximo valor de vazão de partículas para os fluxos subaquáticos

Fluxo	Máximo valor de vazão de partículas (m³/s)
0,54-Subaéreo	0,002924
0,60-Subaéreo	0,002980
0,70-Subaéreo	0,002662
0,81-Subaéreo	0,002753
0,85-Subaéreo	0,002611

A Figura 5.16 apresenta comparativos entre os fluxos subaéreos e subaquáticos com o mesmo valor de coeficiente de atrito das partículas.

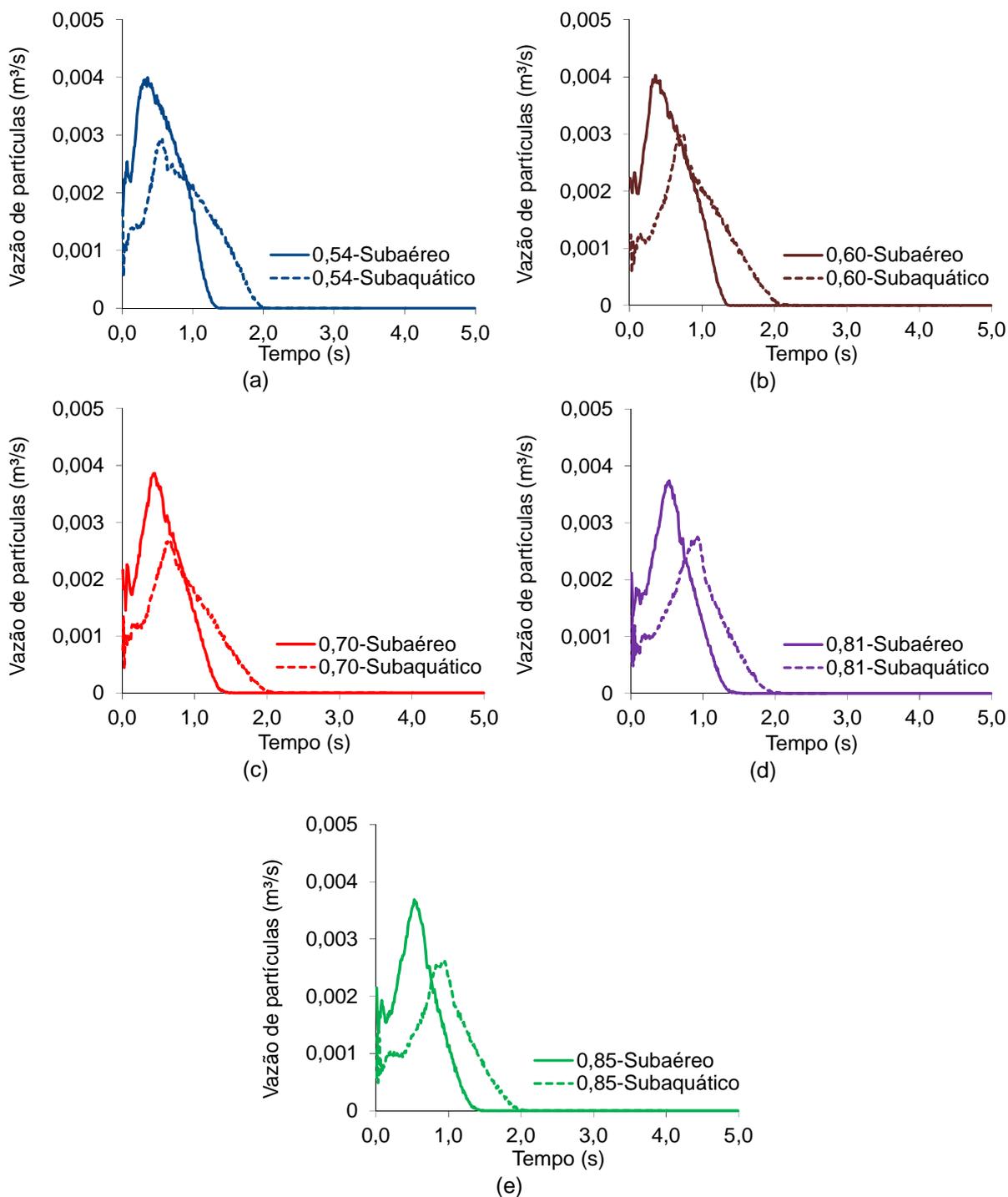


Figura 5.16 – Vazão de partículas nos fluxos subaéreo e subaquático com coeficientes de atrito iguais

a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85

É clara a diferença de comportamento entre os fluxos subaéreos e subaquáticos, principalmente nos períodos de duração e nos valores máximos alcançados, que nos fluxos subaquáticos são em média 72% dos encontrados nos fluxos subaéreos, conforme indicam os valores de razão de vazão na Tabela 5.5, determinados pela equação:

$$\text{Razão de vazão} = \frac{\text{valor de máxima vazão do fluxo subaquático}}{\text{valor de máxima vazão do fluxo subaéreo}} \quad (5.7)$$

Tabela 5.5 – Razão de vazão entre os fluxos subaquáticos e subaéreos

Fluxo	Razão de vazão	Valor médio	Desvio padrão
0,54	0,7316	0,7209	0,022
0,60	0,7399		
0,70	0,6887		
0,81	0,7361		
0,85	0,7085		

A Figura 5.17 ilustra as tendências de variação do máximo valor de vazão em função do coeficiente de atrito das partículas, tanto para os fluxos subaéreos quanto para os subaquáticos.

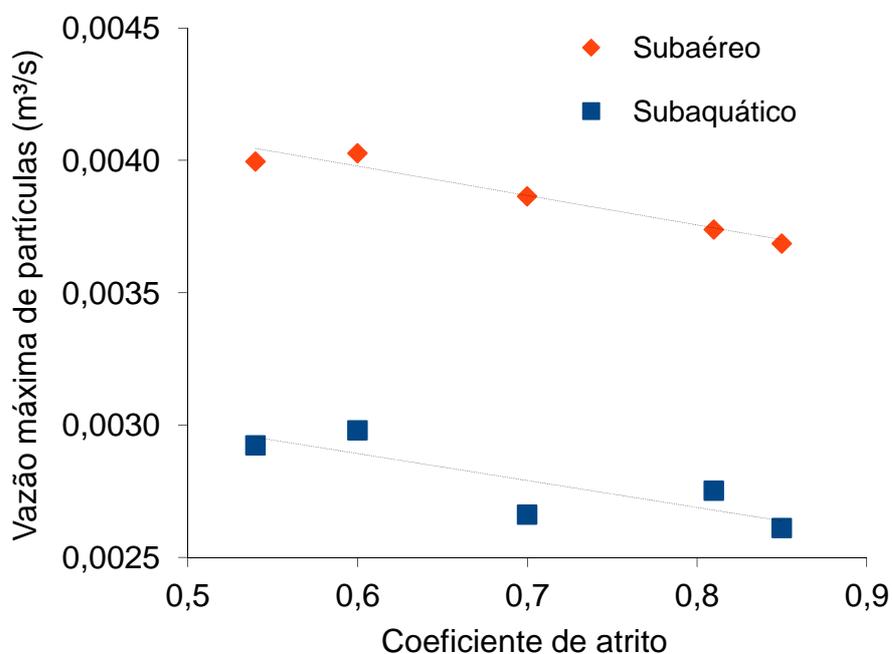


Figura 5.17 – Vazão máxima de partículas em função do coeficiente de atrito

As linhas de tendência das regressões lineares da vazão máxima de partículas em função do coeficiente de atrito, para os fluxos subaéreos e subaquáticos são representadas pelas seguintes equações, respectivamente:

$$\text{Vazão máxima de partículas}_{(\text{Subaéreo})} = -0,0011120432f + 0,0046412698 \quad (5.8)$$

$$\text{Vazão máxima de partículas}_{(\text{Subaquático})} = -0,0010161844f + 0,0034971992 \quad (5.9)$$

onde:

Vazão máxima de partículas = vazão máxima de partículas [m³/s]
f = coeficiente de atrito das partículas

5.3 Altura média do fluxo

A análise da altura média do fluxo foi feita em cada região da rampa. Para a construção dos gráficos, o tempo começou a ser contado a partir do instante que a primeira partícula do escoamento entrou na região avaliada.

5.3.1 Fluxos subaéreos

5.3.1.1 Região 1

Os dados relacionados à Região 1 são apresentados na Figura 5.18, através da qual pode-se observar que nos fluxos com coeficiente de atrito iguais a 0,54 e 0,60 a maior altura média se deu em instantes próximos de 1,00 s após a entrada da primeira partícula na região. Nesses dois fluxos, após o instante do máximo valor de altura média, houve uma diminuição dessa altura até atingir um valor, o qual se mantém constante até o final do tempo do escoamento. Nos demais fluxos, nota-se um crescimento da altura média até atingir um valor máximo, em instantes próximos de 1,20 s após a entrada da primeira partícula na região, e após esse ponto a altura média do fluxo permanece praticamente constante, fazendo com que as curvas tenham assíntotas paralelas ao eixo das abscissas.

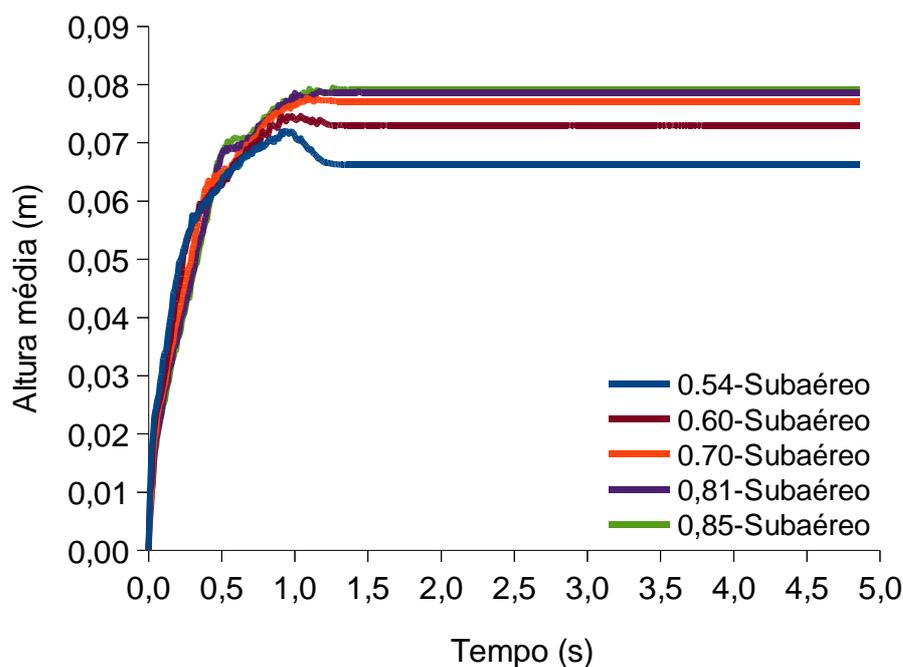


Figura 5.18 – Altura média do fluxo subaéreo – Região 1

Observa-se, também, que na Região 1 há uma tendência da altura média máxima e da altura média ao final do fluxo aumentar conforme ocorre o aumento do coeficiente de atrito das partículas.

5.3.1.2 Região 4

Na Região 4 da rampa as curvas representando os fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,54 e 0,60 repetem o comportamento observado na Região 1, como ilustra a Figura 5.19, assim como os demais fluxos.

Os valores finais de altura média de todos os fluxos subaéreos analisados na Região 4 ficaram bem próximos, porém, esses valores foram inferiores aos observados na Região 1.

Chama a atenção um pequeno patamar no início da curva, quando essa atinge valores de altura média entre 0,01 m e 0,02 m. Esse comportamento indica que parte da frente do fluxo passa a ter uma altura relativamente constante por alguns instantes, ocasionando uma descontinuidade no crescimento da altura do fluxo.

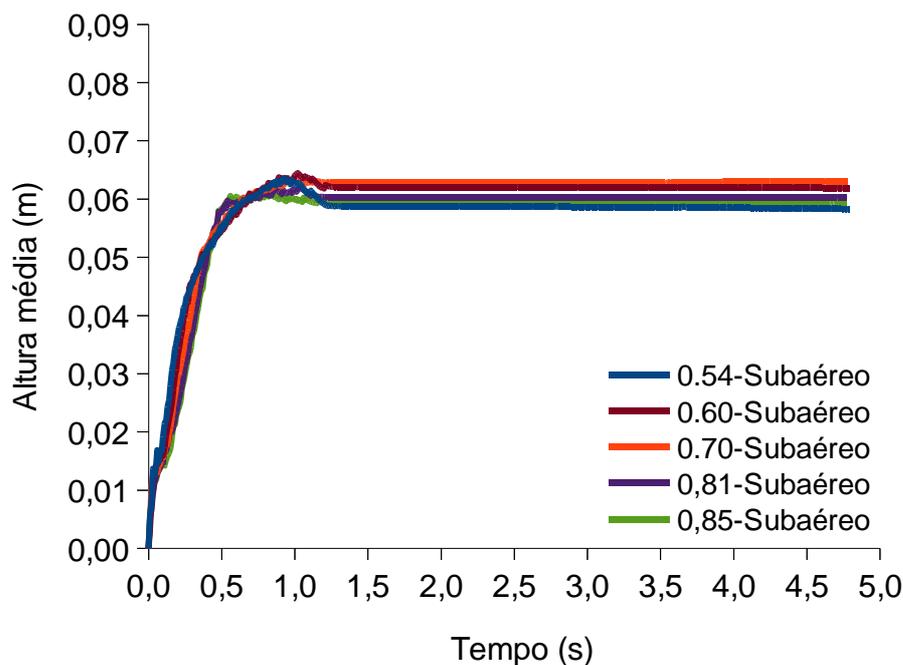


Figura 5.19 – Altura média do fluxo subaéreo – Região 4

5.3.1.3 Região 2

A Figura 5.20 apresenta as variações da altura média do fluxo em função do tempo na Região 2 da rampa para os diferentes fluxos subaéreos analisados. Observa-se que os fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,70, 0,81 e 0,85 passaram a apresentar comportamento semelhante aos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,54 e 0,60, ou seja, todos os fluxos apresentaram um crescimento da altura média do fluxo até um valor máximo, representando um ponto de pico. A partir desse ponto, nos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,70, 0,81 e 0,85, o valor da altura média tende a diminuir até atingir um valor que se torna praticamente constante ao longo do tempo do fluxo. Já nos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,54 e 0,60, a partir do ponto de altura máxima o valor tende a diminuir, porém não atinge um valor constante dentro do intervalo de tempo em que ocorre o fluxo. Fica claro que nos fluxos com coeficientes de atrito menores (0,54 e 0,60), as partículas ainda estão em movimento nessa Região durante o intervalo de tempo da simulação, enquanto as partículas dos fluxos com maiores coeficientes de atrito (0,70, 0,81 e 0,85) já terminaram de se depositar.

Nota-se também, uma tendência da altura média máxima do fluxo diminuir com o aumento do coeficiente de atrito, assim como a altura média ao final do fluxo, porém, nessa última o fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,54 se apresenta como uma exceção.

Na Região 2 também ocorre uma diminuição da altura média do fluxo em relação a região imediatamente anterior (Região 4). Pode-se notar essa diminuição também na altura média do patamar no início das curvas (que passa a ocorrerem em valores próximos de 0,01m), o qual foi observado pela primeira vez na Região 4. Porém houve um aumento do intervalo de tempo que esse patamar permanece na frente do fluxo, e esse intervalo aumenta conforme há o aumento do coeficiente de atrito.

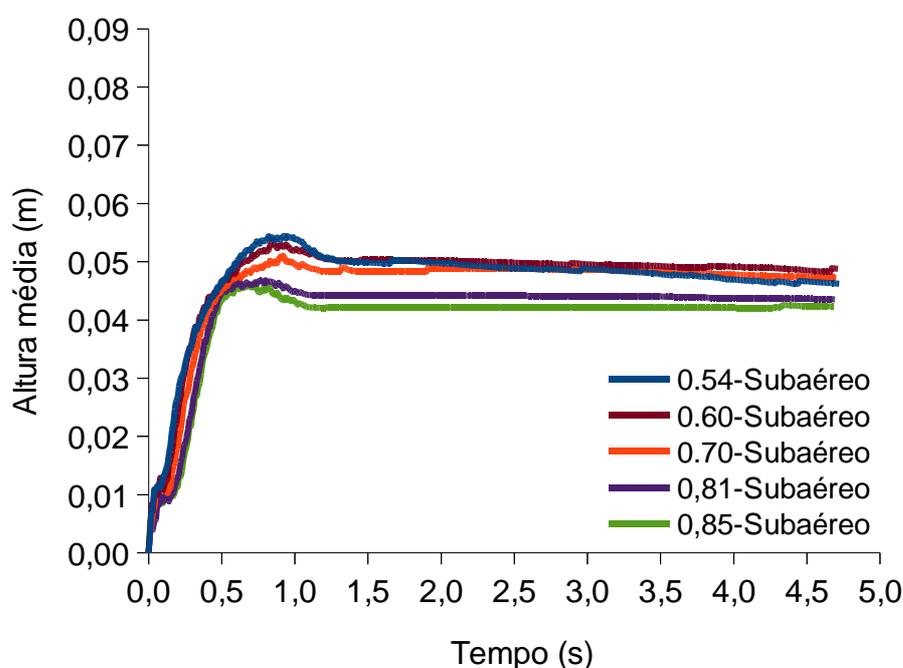


Figura 5.20 – Altura média do fluxo subaéreo – Região 2

5.3.1.4 Região 5

Na Região 5, o comportamento das curvas que representam as variações das alturas médias dos fluxos (Figura 5.21) se mostra parecido com o da Região 2. Todos os fluxos apresentaram um ponto de pico. Entretanto, a partir desse ponto, nos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,81 e 0,85, o valor da altura média

tende a diminuir até atingir um valor que se torna praticamente constante durante um determinado período de tempo, para em seguida acontecer uma leve tendência de diminuição da altura média até o final do tempo de análise. Já o fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,70 passa a se comportar conforme os fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,54 e 0,60, os quais, a partir do ponto de pico apresentam a tendência de diminuir de altura sem chegarem a atingir um valor constante dentro do intervalo de tempo em que ocorre o fluxo. Dessa forma, na Região 5, as partículas dos fluxos com coeficientes de atrito menores (0,54, 0,60 e 0,70) ainda estão em movimento durante o intervalo de tempo da simulação, enquanto as partículas dos fluxos com maiores coeficientes de atrito (0,81 e 0,85) praticamente já terminaram de se depositar, apresentando apenas pequenos arranjos próximo ao final do fluxo.

Observa-se que a altura média dos fluxos na Região 5 mantém a tendência de diminuir em relação a Região imediatamente anterior. Também fica evidente a diminuição da altura média conforme há o aumento do coeficiente de atrito do fluxo, entretanto, diferente da Região 2, a altura média do fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,54 não chega a se tornar inferior a do fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,60, ambos os fluxos atingem valores finais de altura média muito próximos.

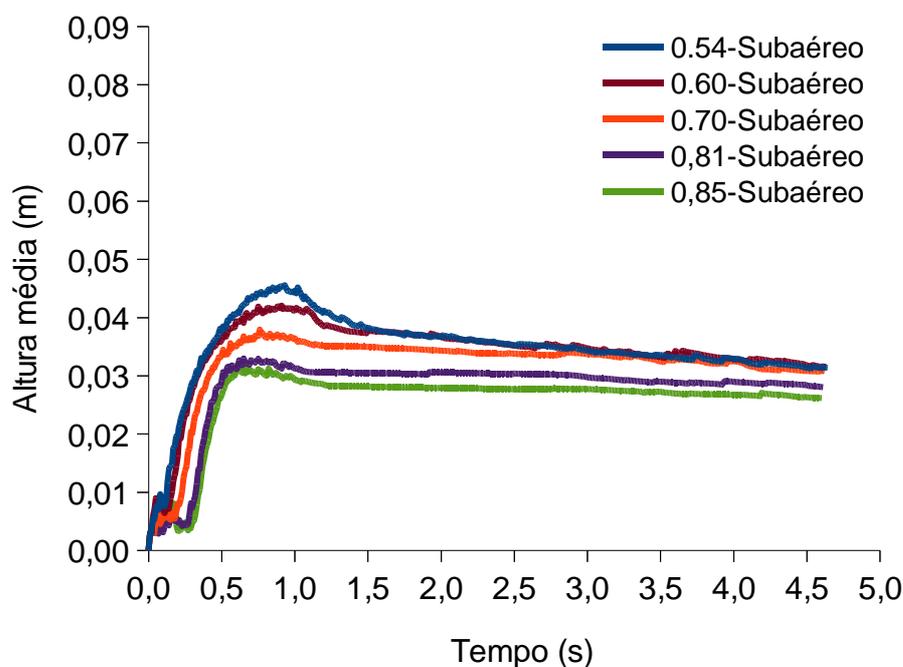


Figura 5.21 – Altura média do fluxo subaéreo – Região 5

Na Região 5, é possível observar de maneira mais clara o aumento dos intervalos de tempo em que ocorrem os patamares nas curvas dos fluxos analisados. Nota-se, também, que durante os períodos de tempo dos patamares nos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,81 e 0,85 chegam a acontecer nítidas oscilações nas alturas médias dos fluxos. Pode-se observar mais uma vez a tendência de diminuição da altura média do fluxo nos patamares, em relação à Região imediatamente anterior.

5.3.1.5 Região 3

As variações das alturas médias dos fluxos subaéreos na Região 3, ilustradas na Figura 5.22, reiteram as tendências de diminuição das alturas do fluxo em relação a Região imediatamente anterior e em relação ao aumento do coeficiente de atrito das partículas. Todos os fluxos apresentam comportamentos parecidos na Região 3, onde há um crescimento da altura do fluxo até um valor de pico e a partir desse ponto a altura tende a diminuir sem atingir um valor constante. Pode-se observar que os intervalos de tempo dos patamares aumentam com o aumento do coeficiente de atrito das partículas. Esses intervalos também são superiores aos encontrados na Região 5.

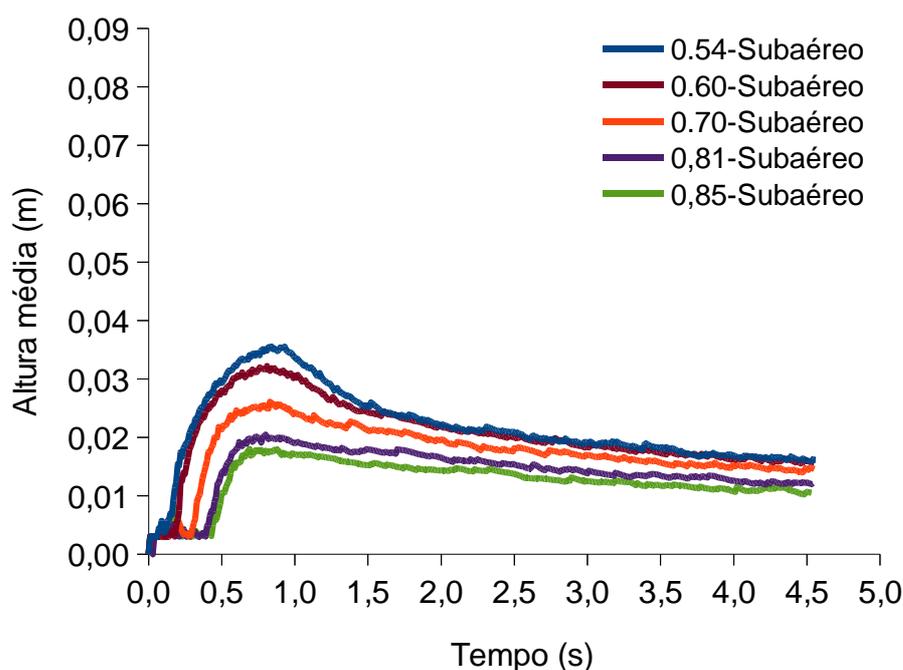


Figura 5.22 – Altura média do fluxo subaéreo – Região 3

5.3.2 Fluxos subaquáticos

5.3.2.1 Região 1

A Figura 5.23 ilustra as curvas que representam as variações das alturas médias dos fluxos subaquáticos na Região 1. Nota-se que todos os fluxos mostram uma tendência de crescimento da altura média do fluxo ao longo do tempo até atingir um valor que permanece praticamente constante até o final do período da simulação. Com exceção do fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,54, todos os fluxos encaminham-se para o maior valor de altura média no final do período de escoamento. O crescimento da altura média ocorre com algumas oscilações de valores, o que dificulta compreender o comportamento inicial da variação da altura média em função do coeficiente de atrito. Uma observação interessante nessa região é a de que os fluxos com coeficientes de atrito menores (0,54, 0,60 e 0,70) apresentam mais oscilações que os fluxos com coeficientes de atrito maiores (0,81 e 0,85).

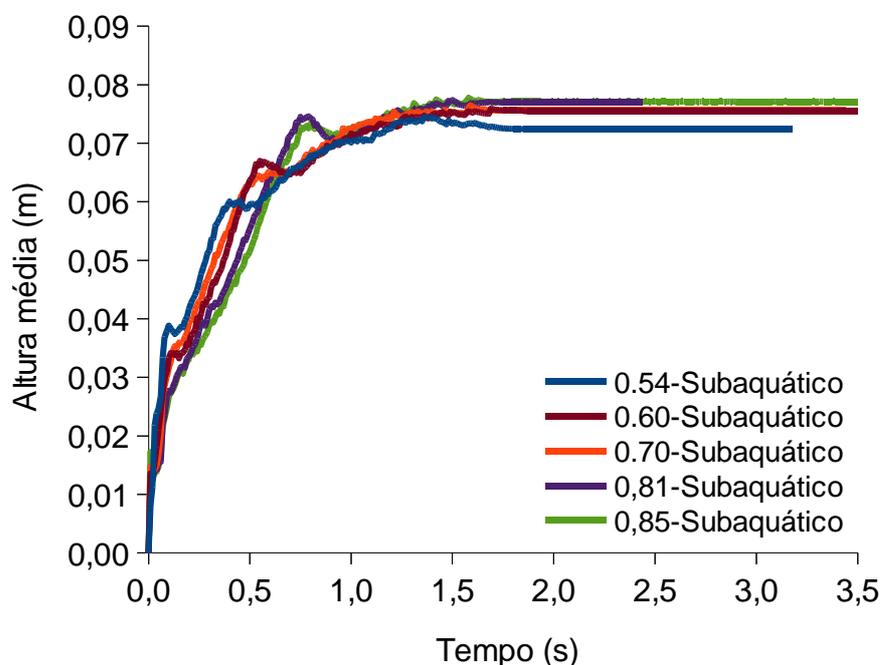


Figura 5.23 – Altura média do fluxo subaquático – Região 1

No final do período de escoamento nota-se que o comportamento apresentado pelas curvas é o da altura média aumentar com o aumento do

coeficiente de atrito das partículas, sendo alcançados valores de altura média muito próximos entre os fluxos analisados, com exceção, novamente, do fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,54, o qual apresenta um valor visivelmente inferior aos demais.

5.3.2.2 Região 4

Na Região 4 da rampa, todas as curvas de variação de altura média em função do tempo do escoamento apresentam comportamentos semelhantes, para os diferentes fluxos analisados, conforme ilustra a Figura 5.24. É possível notar que, em todos os fluxos, durante o crescimento da altura média aparece um pequeno patamar na curva, nos primeiros instantes de escoamento. O patamar de cada fluxo ocorre em valores de altura média diferentes, estando esses valores compreendidos entre 0,01 m a 0,02 m. Após a passagem pelo patamar, há um crescimento da altura média até que se atinge um ponto onde o valor dessa altura é máximo, em seguida há um decréscimo da altura média até que ocorre a estabilização em torno de um valor constante, inferior ao valor máximo.

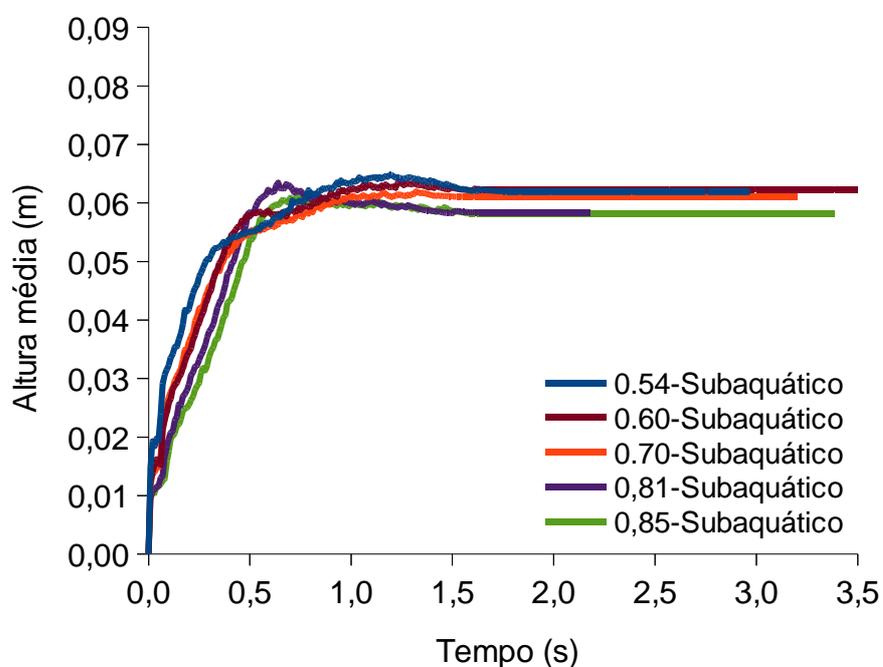


Figura 5.24 – Altura média do fluxo subaquático – Região 4

Comparando os fluxos da Região 4 com os da Região 1, nota-se que há uma diminuição dos valores da altura média, tanto em valores máximos quanto em finais. Também ocorre uma diminuição das oscilações encontradas nos instantes iniciais da passagem do fluxo pela região.

5.3.2.3 Região 2

As curvas relacionadas as variações das alturas médias dos fluxos subaquáticos na Região 2 são apresentadas na Figura 5.25. Observa-se a tendência de crescimento da altura média de maneira mais suave, sem a presença de oscilações expressivas. Mais uma vez, esse crescimento se dá até um ponto onde se atinge o valor de altura máxima, e a partir desse ponto a altura média do fluxo decresce tendendo a estabilizar em um valor constante.

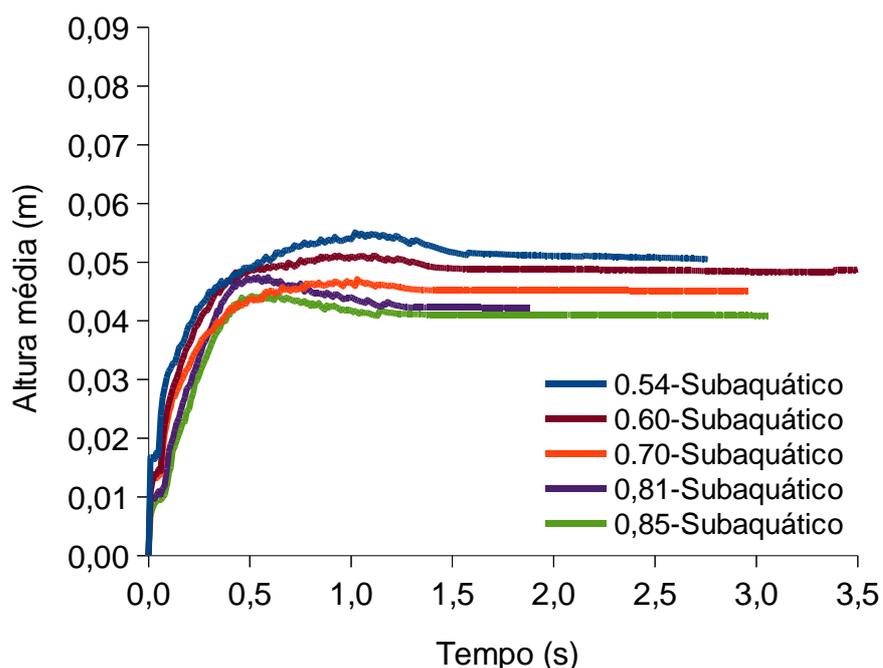


Figura 5.25 – Altura média do fluxo subaquático – Região 2

Pode-se ver que ocorre uma diminuição da altura média final conforme há o aumento do coeficiente de atrito do fluxo. Observa-se, também, a presença do patamar na fase inicial de crescimento da altura média, fazendo com que a altura do fluxo permaneça constante, por certo intervalo de tempo. Além disso, mantém-se a

tendência de diminuição da altura média do fluxo em relação a região imediatamente anterior.

5.3.2.4 Região 5

Observando a Figura 5.26, a qual representa as variações das alturas médias dos fluxos subaquáticos na Região 5, verifica-se um comportamento inicial semelhante ao da Região 2, com um crescimento suave da altura média ao longo do tempo, até atingir um valor máximo. A partir desse ponto as curvas apresentam dois comportamentos distintos. Nos fluxos com coeficientes de atrito menores (0,54 e 0,60 e 0,70) há uma tendência de diminuição da altura média sem que ocorra a estabilização em um valor constante, durante o intervalo de tempo da simulação. Nos demais fluxos (0,81 e 0,85), após o ponto que representa o valor de altura média máxima há a diminuição da altura média até que se atinge um valor o qual permanece praticamente constante ao longo do intervalo de tempo da simulação.

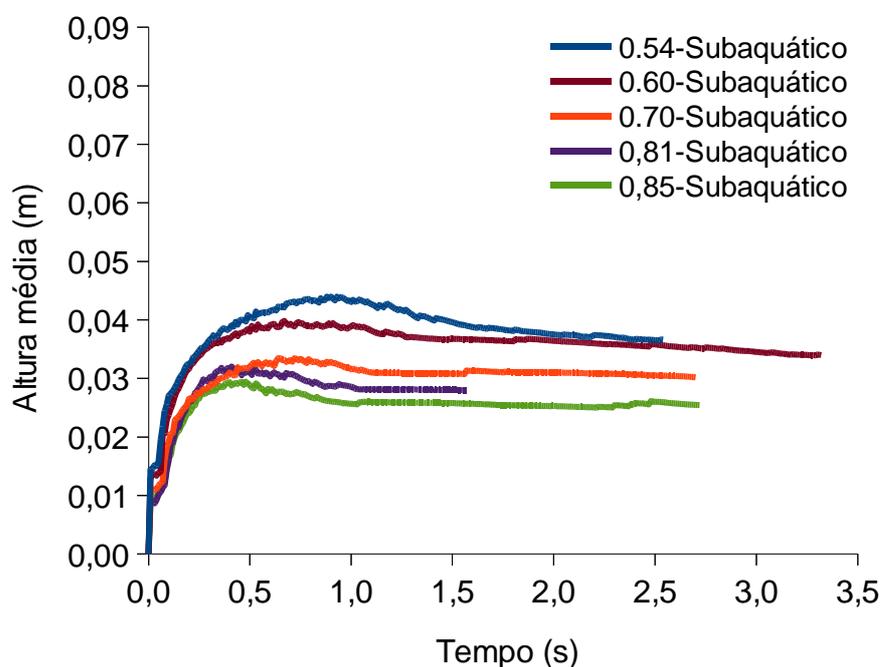


Figura 5.26 – Altura média do fluxo subaquático – Região 5

Entretanto, mais uma vez, nota-se que a altura média final diminui com o aumento do coeficiente de atrito das partículas e que as alturas médias finais na Região 5 são inferiores as alturas médias alcançadas na Região 2 (região

imediatamente anterior). Também, novamente, vê-se o patamar no início do crescimento da altura média.

5.3.2.5 Região 3

A Figura 5.27 ilustra as curvas que representam as variações das alturas médias dos fluxos subaquáticos na Região 3 da rampa. Pode-se observar comportamentos bem semelhantes aos das Regiões 2 e 5 até o ponto de valor de altura média máxima. A partir desse ponto, em todos os fluxos, ocorre a diminuição da altura média, sem que se atinja um valor constante ao longo do tempo da simulação.

Reitera-se o comportamento de diminuição da altura média com o aumento do coeficiente de atrito das partículas, assim como, a diminuição dos valores de altura média da Região 3 em relação a região imediatamente anterior.

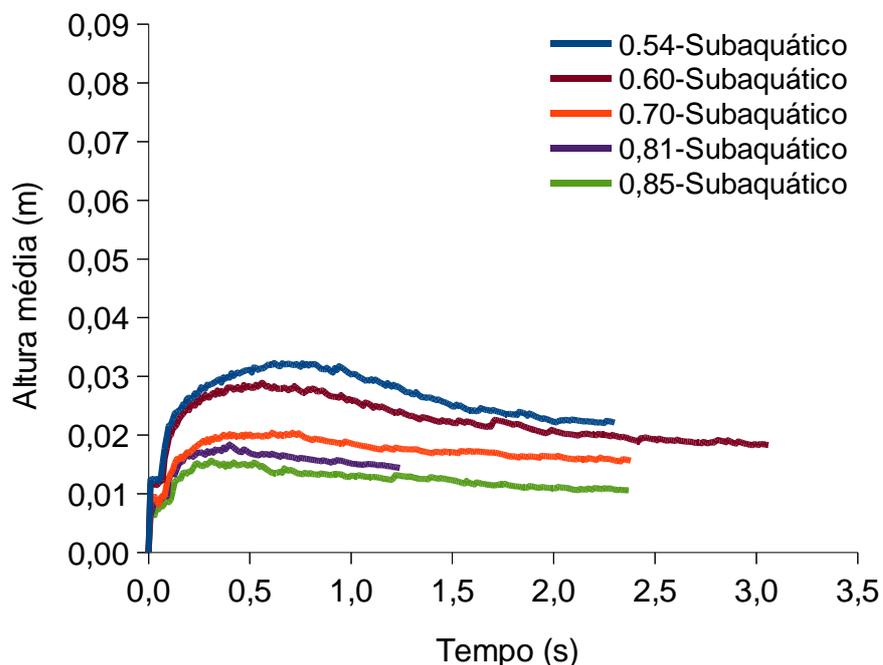


Figura 5.27 – Altura média do fluxo subaquático – Região 3

Mais uma vez, encontra-se presente a região de patamar nos instantes iniciais da passagem do fluxo pela Região 3, onde as variações de altura média dentro desse patamar do fluxo são muito pequenas.

A diminuição da altura após atingir o valor máximo está relacionada a diminuição do vazão de partículas no início da rampa, que faz com que o fluxo diminua e as partículas se depositem. Essa diminuição de altura é mais acentuada nas Regiões 5 e 3, pois as partículas que estão em camadas mais elevadas tendem a rolar sobre as outras em direção para o fosso, enquanto as partículas mais próximas da base ficam depositadas sobre a rampa. Esse comportamento pode ser melhor observado no Item 5.5.

5.3.3 Perfis de altura média dos fluxos

5.3.3.1 Perfis de altura média máxima

Fazendo uma análise das alturas médias máximas atingidas pelos fluxos em cada região analisada, durante o escoamento, foi possível gerar os perfis dos fluxos subaéreos (Figura 5.28) e dos fluxos subaquáticos (Figura 5.29).

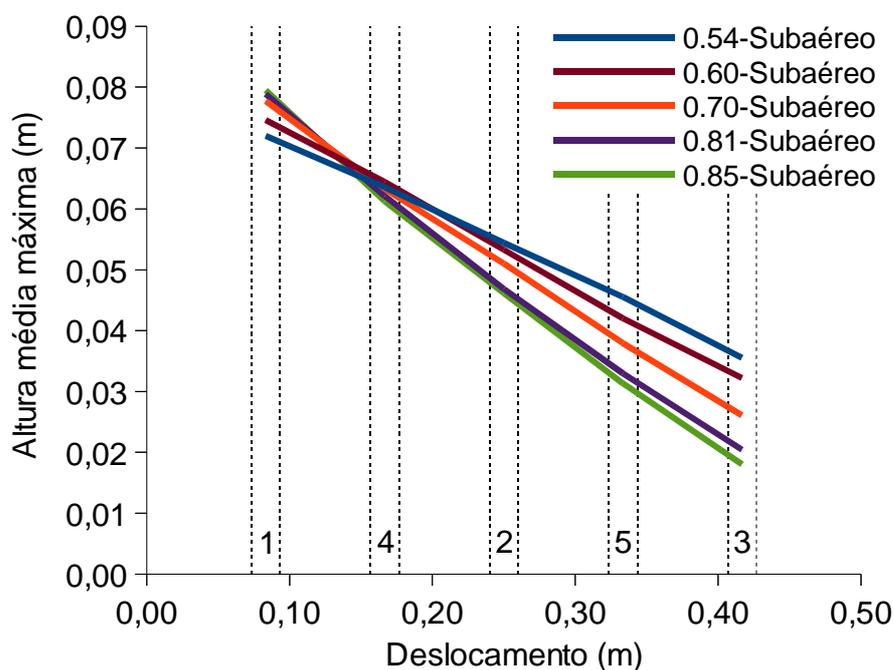


Figura 5.28 – Perfis de altura média máxima dos fluxos subaéreos

Observando a Figura 5.28, verifica-se que na região mais próxima do início do escoamento (Região 1), a altura média máxima do fluxo aumenta com o aumento do coeficiente de atrito das partículas. Enquanto, na região mais afastada do início do escoamento (Região 3), a altura média máxima do fluxo aumenta com a diminuição do coeficiente de atrito das partículas. Ao longo das demais regiões ocorre a

transição do comportamento do fluxo em relação a altura média máxima. Esse comportamento se repete nos fluxos subaquáticos, conforme ilustra a Figura 5.29, porém, a diferença de altura média máxima entre os fluxos na Região 1 é nitidamente menor que a dos fluxos subaéreos.

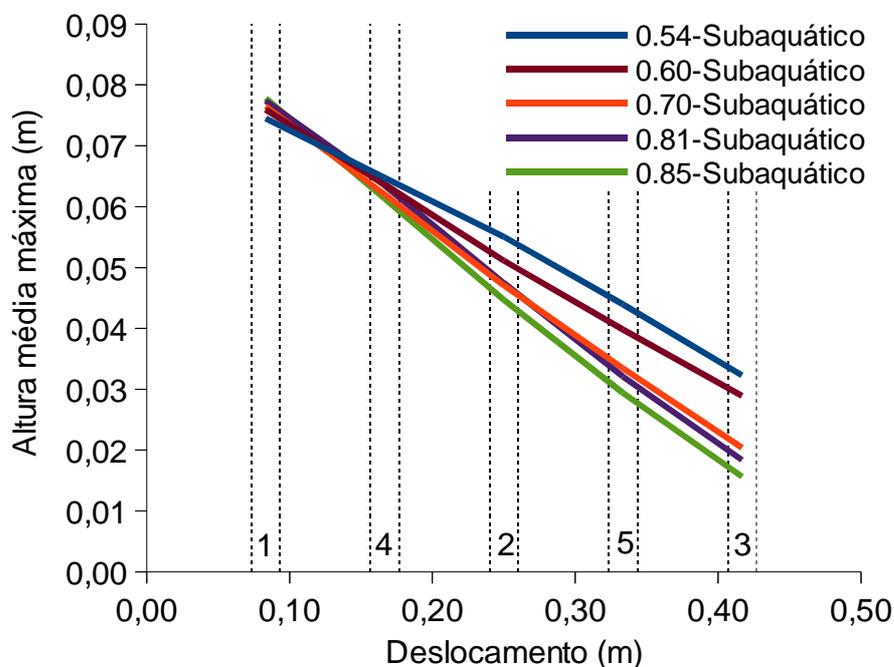


Figura 5.29 – Perfis de altura média máxima dos fluxos subaquáticos

A Figura 5.30 faz comparações entre os fluxos subaéreos e subaquáticos considerando o mesmo coeficiente de atrito.

Quando se comparam os fluxos subaéreos e os subaquáticos, verifica-se que ambos os perfis alcançam alturas médias máximas muito próximas. Há uma tendência dos fluxos subaquáticos atingirem alturas médias menores nas regiões mais afastadas do início do escoamento (Regiões 5 e 3). Por outro lado, na região mais próxima ao início do escoamento (Região 1), apenas nos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,70, 0,81 e 0,85 verificou-se esse mesmo comportamento. Nos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,54 e 0,60, os fluxos subaquáticos atingiram alturas médias máximas superiores aos fluxos subaéreos com os mesmos coeficientes.

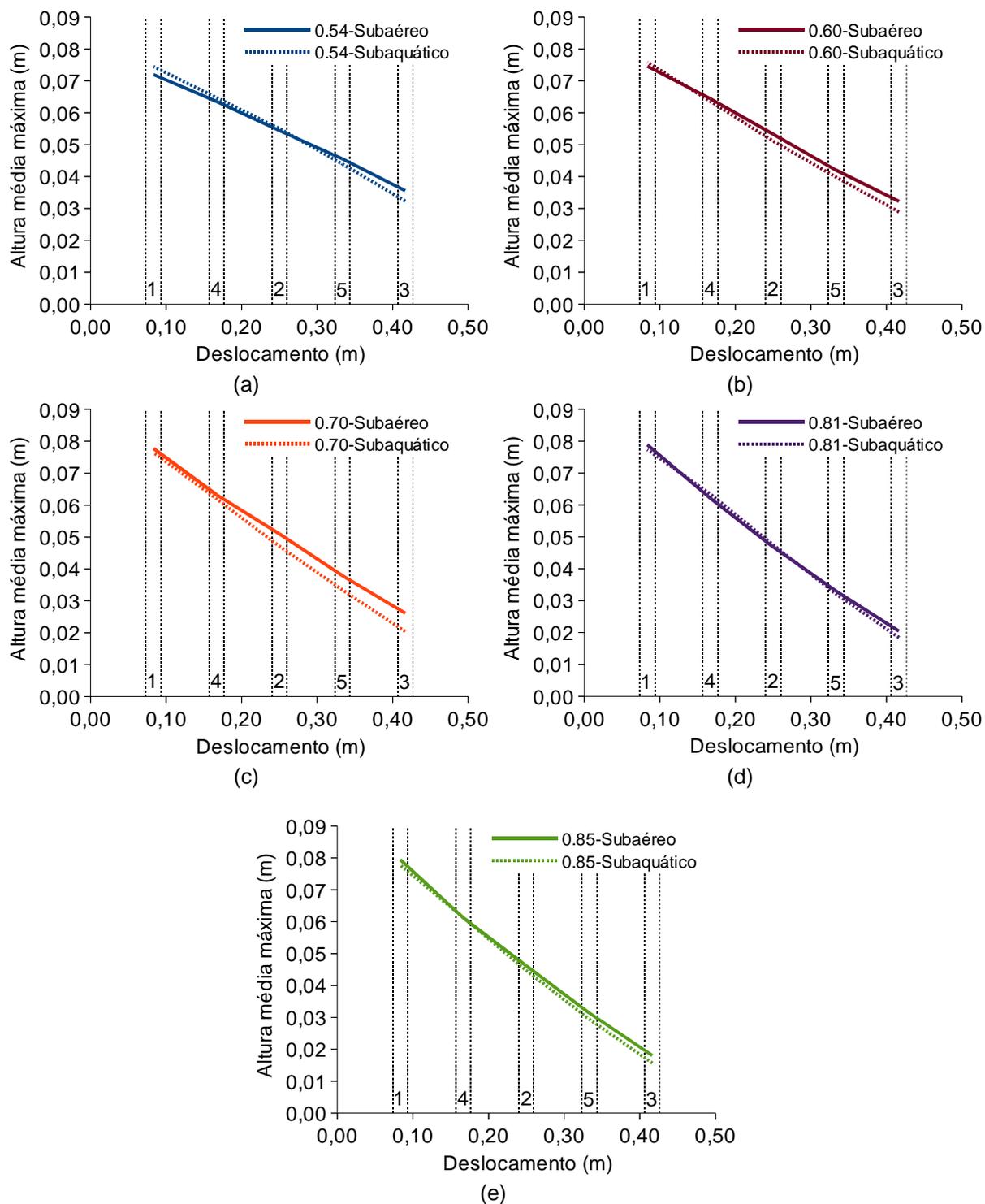


Figura 5.30 – Perfis de altura média máxima dos fluxos subaéreo e subaquático com coeficientes de atrito das partículas iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85

Observa-se que há uma tendência do perfil de altura média máxima ser quase linear, porém, principalmente os fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,54 e 0,85 apresentam um comportamento que é ajustado melhor por um polinômio de grau dois. Com base nos resultados obtidos, foi possível determinar as seguintes equações para representar a variação de altura média máxima ao longo do deslocamento considerando os diferentes coeficientes de atrito das partículas, tanto para os fluxos subaéreos quanto para os subaquáticos, respectivamente:

$$hm_{m\acute{a}x(Suba\acute{e}reo)} = -0,332194L^2 f^2 + 0,455313Lf^2 + 0,900932L^2 f - 1,088250Lf - 0,418023L^2 + 0,359583L - 0,113040f^2 + 0,214598f - 0,002674 \quad (5.10)$$

$$hm_{m\acute{a}x(Subaqu\acute{a}tico)} = -1,739743L^2 f^2 + 1,272168Lf^2 + 2,656406L^2 f - 2,081342Lf - 0,960946L^2 + 0,644317L - 0,116999f^2 + 0,197771f + 0,011206 \quad (5.11)$$

onde:

$hm_{m\acute{a}x}$ = altura média máxima [m];
 L = deslocamento sobre a rampa [m];
 f = coeficiente de atrito das partículas.

Os coeficientes de determinação (R^2) para as Equações 5.10 e 5.11 são, respectivamente, 0,999757 e 0,998222. As Figuras 5.31 (fluxos subaéreos) e 5.32 (fluxos subaquáticos) ilustram as comparações dos resultados da altura média máxima entre os valores determinados pelas Equações 5.10 e 5.11 e os dados obtidos pelas simulações.

Nota-se uma boa aproximação dos resultados das equações com os dados obtidos pelas simulações. Isso possibilita fazer uma previsão da altura média máxima de um escoamento qualquer considerando, apenas, os valores do coeficiente de atrito das partículas, dentro da faixa de coeficientes de atrito das partículas analisados (entre 0,54 e 0,85). Lógico, que essas equações se tornam restritas aos demais parâmetros utilizados nas simulações, tais como: coeficiente de restituição, coeficiente de Poisson, inclinação da rampa, etc.

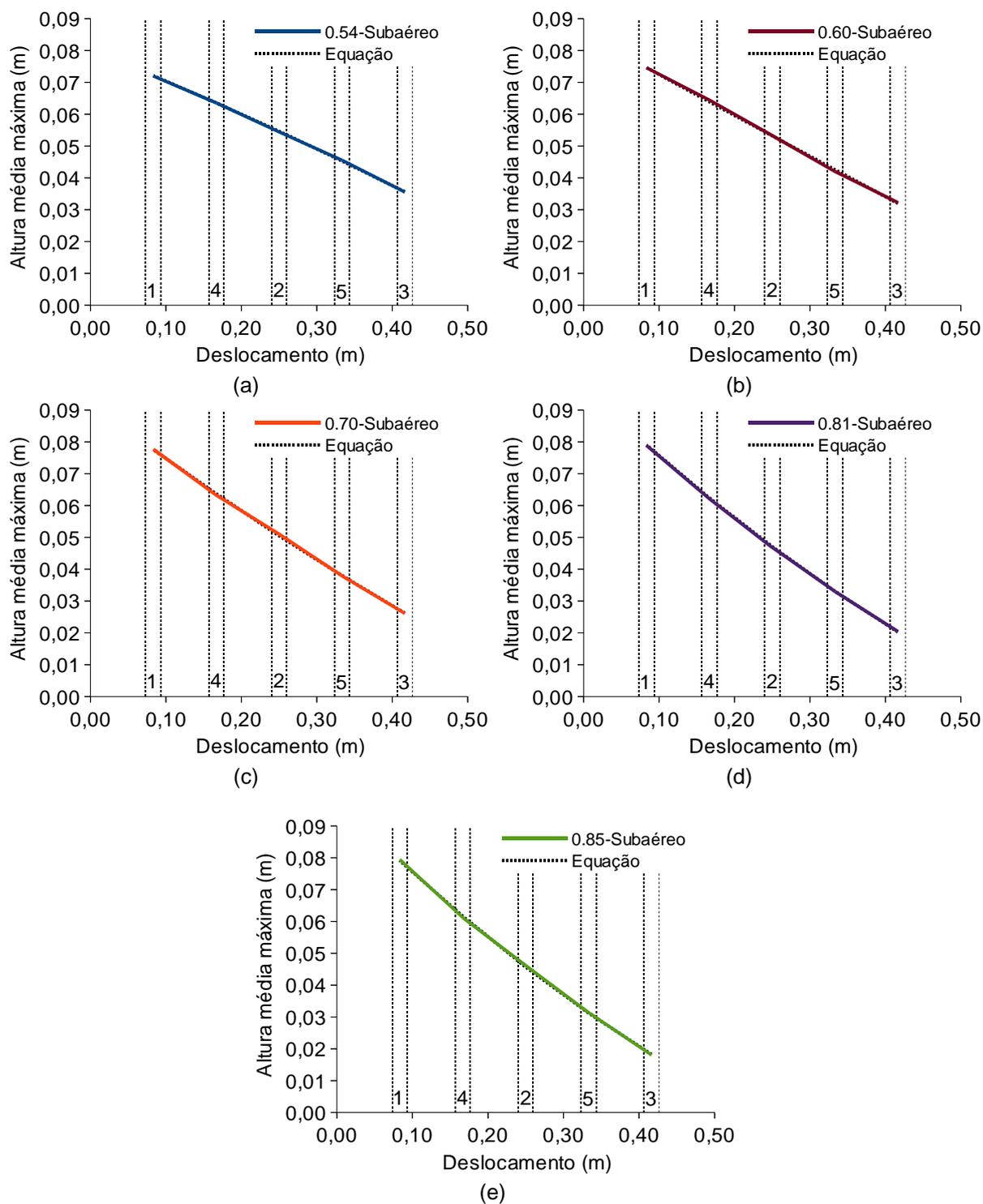


Figura 5.31 Perfil comparativo entre os resultados da Equação 5.10 e os dados obtidos pela simulação para a altura média máxima dos fluxos subaéreos com coeficientes de atrito das partículas iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85

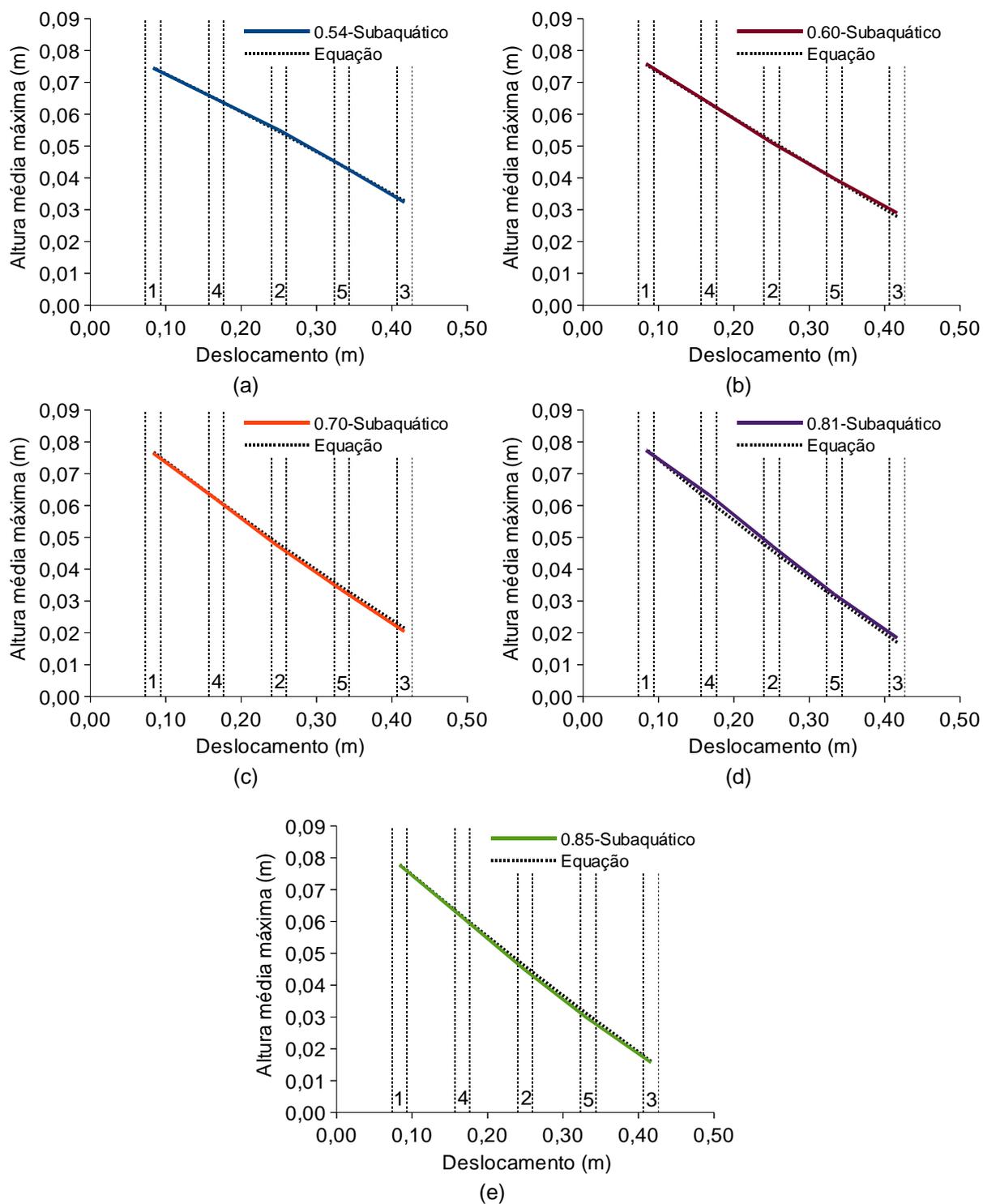


Figura 5.32 – Perfil comparativo entre os resultados da Equação 5.11 e os dados obtidos pela simulação para a altura média máxima dos fluxos subaquáticos com coeficientes de atrito das partículas iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85

5.3.3.2 Perfis de altura média final

As Figuras 5.33 e 5.34 ilustram os perfis das alturas médias finais atingidas pelos fluxos subaéreos e subaquáticos, respectivamente. Verifica-se um comportamento bem parecido com os perfis de altura média máxima dos fluxos subaéreos em relação as alturas alcançadas nas regiões iniciais e finais da rampa conforme ocorre a variação do coeficiente de atrito das partículas, havendo um aumento da altura média final na Região 1 com o aumento do coeficiente de atrito das partículas, enquanto a altura média final na Região 3 aumenta com a diminuição do coeficiente de atrito das partículas.

Pode-se observar que, principalmente nos fluxos com coeficientes de atrito das partículas iguais a 0,54 e 0,60, não ocorre uma tendência bem clara de linearidade do perfil da altura média final. Nota-se uma tendência mais curva, onde as curvas que representam os fluxos com coeficientes de atrito das partículas iguais a 0,54, 0,60 e 0,70 apresentam concavidade voltada para baixo, enquanto as curvas dos fluxos com coeficiente de atrito das partículas iguais a 0,81 e 0,85 apresentam concavidade voltada para cima.

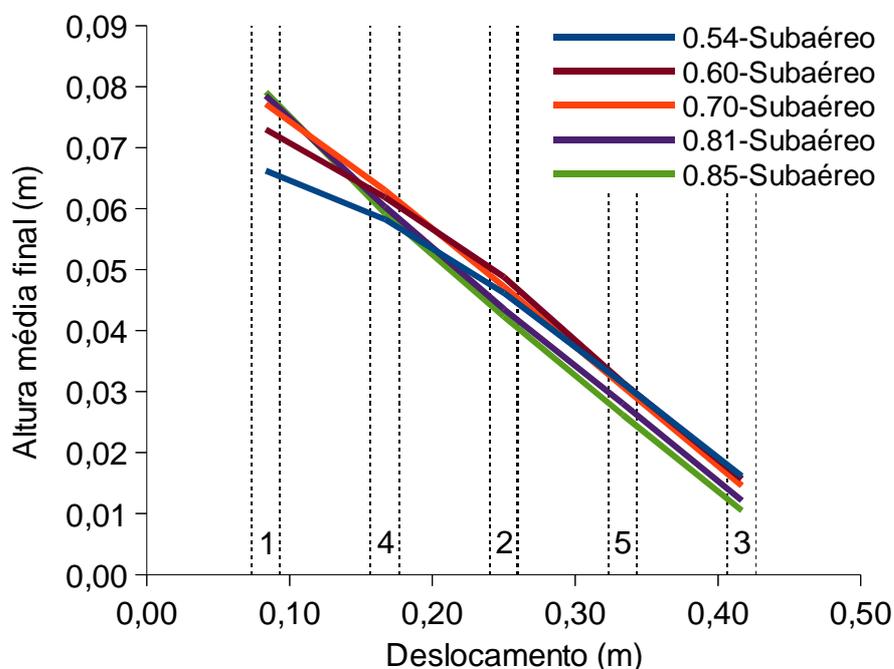


Figura 5.33 – Perfis de altura média final dos fluxos subaéreos

Vale salientar, que os valores de altura média finais foram determinados dentro do intervalo de tempo da simulação. Simulações com intervalos de tempo diferentes podem levar a resultados distintos.

No caso dos fluxos subaquáticos (Figura 5.34), observa-se que a altura média final do fluxo, na região mais próxima ao início do escoamento (Região 1), cresce com o aumento do coeficiente de atrito das partículas, assim como acontece nos fluxos subaéreos, porém, a faixa em que se encontram os valores de altura média finais dos fluxos analisados, nessa região, é bem menor do que a faixa observada nos fluxos subaéreos. Já na região mais afastada do início do fluxo (Região 3), a altura média final do fluxo cresce com a diminuição do coeficiente de atrito das partículas, repetindo o comportamento observado nos fluxos subaéreos. Contudo, a faixa em que se encontram os valores de alturas médias finais alcançados pelos fluxos subaquáticos é bem maior do que a faixa observada nos fluxos subaéreos.

Pode-se observar que as curvas que representam os fluxos com coeficientes de atrito das partículas iguais a 0,54 e 0,60 apresentam concavidade voltada para baixo, enquanto os fluxos com coeficientes de atrito das partículas iguais a 0,70, 0,81 e 0,85 apresentam concavidade voltada para cima.

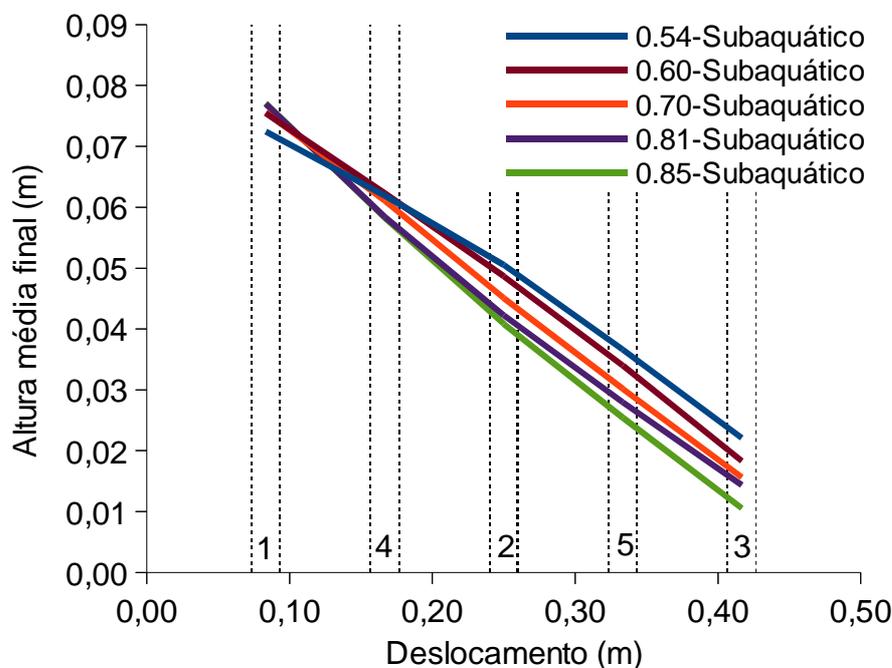


Figura 5.34 – Perfis de altura média final dos fluxos subaquáticos

A Figura 5.35 apresenta uma comparação das alturas médias finais entre os fluxos subaéreos e subaquáticos com o mesmo coeficiente de atrito das partículas. Através dessas figuras é possível observar que as diferenças de valores das alturas médias finais, em cada região analisada, entre os fluxos subaéreos e subaquáticos são pequenas, com exceção do fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,54, onde as alturas médias finais do fluxo subaquático foram significativamente superiores as do fluxo subaéreo, sendo superiores em valores médios de 0,0051 m, com um desvio padrão igual a 0,0011 m. Com exceção do fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,54, nota-se que o perfil de altura média final dos fluxos analisados é função principalmente do coeficiente de atrito das partículas, não sendo influenciando de maneira tão significativa pelo fluido ambiente.

Utilizando os valores obtidos pelas simulações, foi possível determinar as seguintes equações que representam a variação de altura média final ao longo do deslocamento considerando os diferentes coeficientes de atrito das partículas, tanto para os fluxos subaéreos quanto para os subaquáticos, respectivamente:

$$hm_{final(Subaéreo)} = 0,582208L^2 f^2 + 0,155287Lf^2 + 0,088225L^2 f - 0,818215Lf - 0,397799L^2 + 0,332267L - 0,215075f^2 + 0,378995f - 0,068210 \quad (5.12)$$

$$hm_{final(Subaquático)} = -0,524425L^2 f^2 + 0,530503Lf^2 + 1,473890L^2 f - 1,240840Lf - 0,754370L^2 + 0,416903L - 0,098968f^2 + 0,187107f + 0,009671 \quad (5.13)$$

onde:

$$hm_{final} = \text{altura média final [m]}.$$

A Equação 5.12 apresenta um valor igual a 0,999258 para o coeficiente de determinação (R^2), enquanto a Equação 5.13 tem um valor igual a 0,999143 para o mesmo coeficiente. Comparações dos resultados da altura média final entre os valores determinados pelas equações e os dados obtidos pelas simulações são ilustradas nas Figuras 5.36 (fluxos subaéreos) e 5.37 (fluxos subaquáticos).

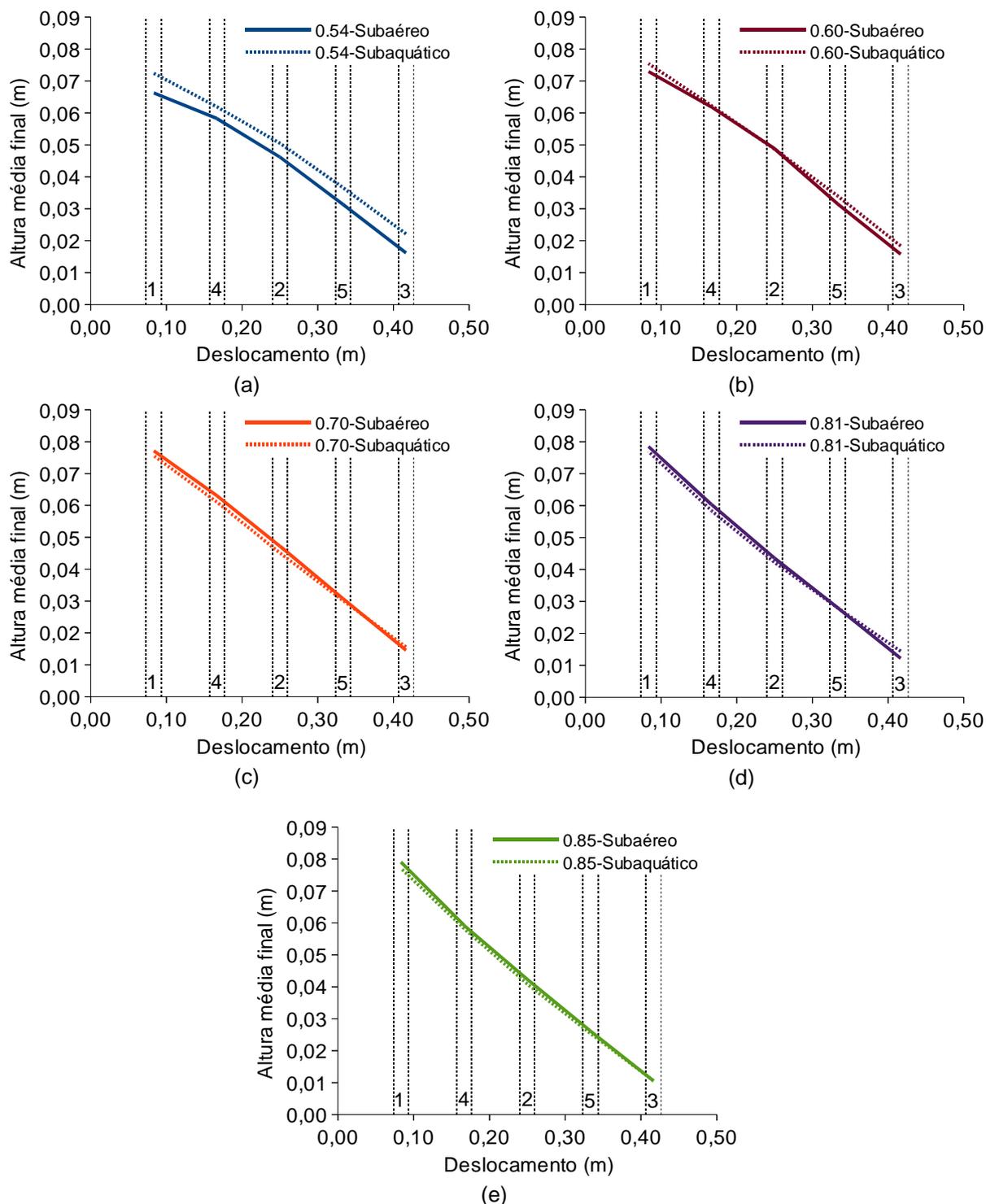


Figura 5.35 – Perfis de altura média final dos fluxos subaéreo e subaquático com coeficientes de atrito das partículas iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85

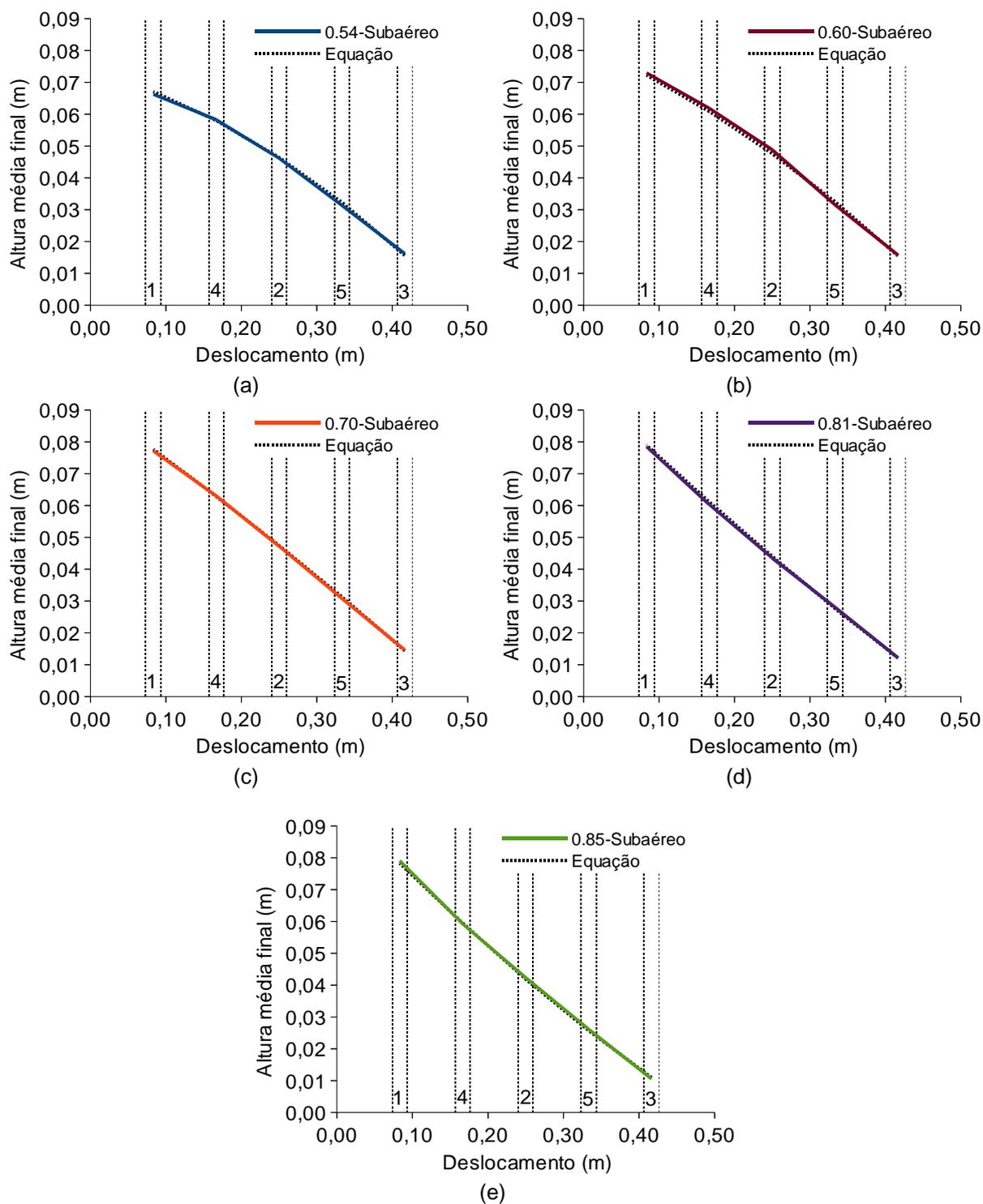


Figura 5.36 – Perfil comparativo entre os resultados da Equação 5.12 e os dados obtidos pela simulação para a altura média final dos fluxos subaéreos com coeficientes de atrito das partículas iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85

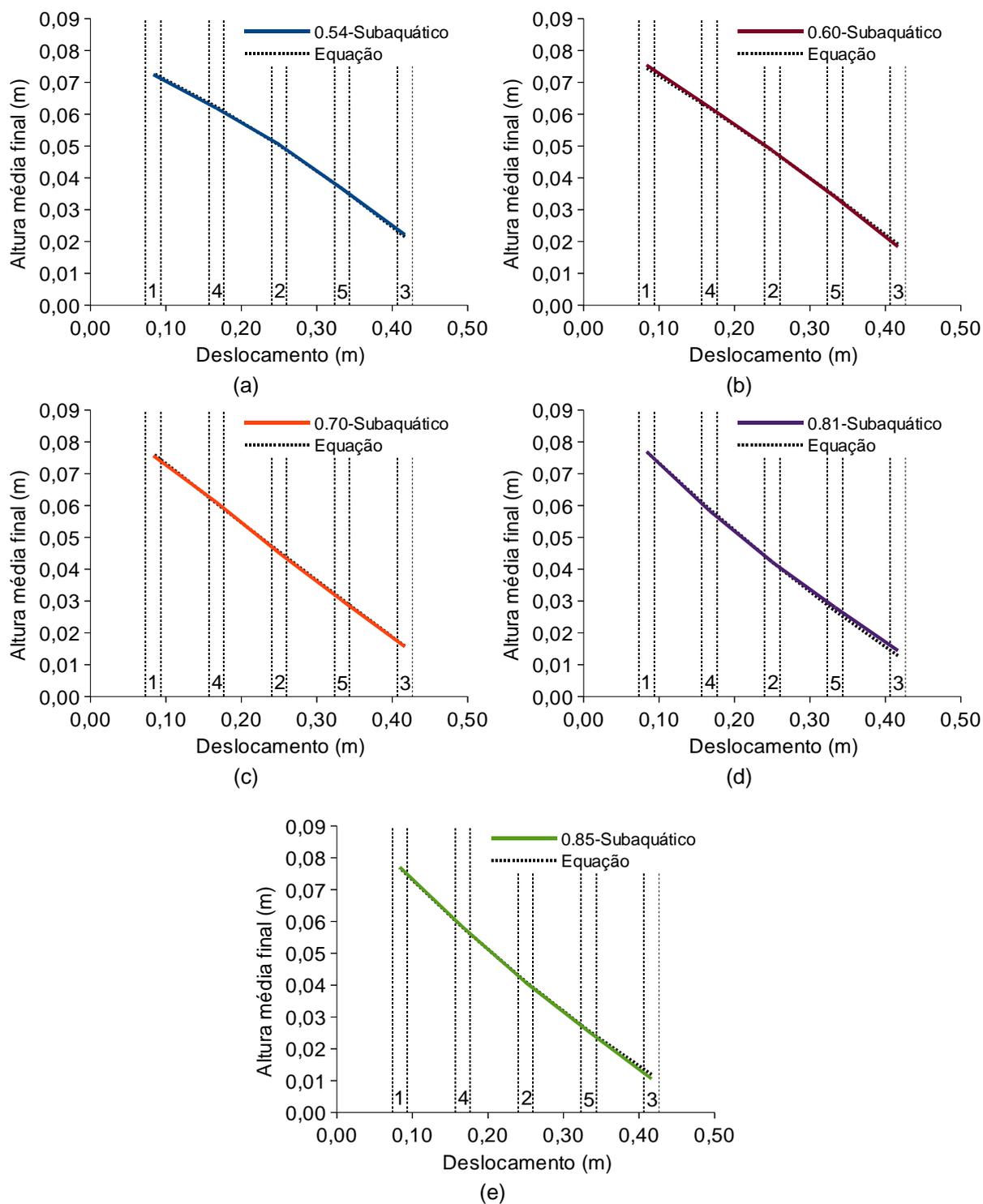


Figura 5.37 – Perfil comparativo entre os resultados da Equação 5.13 e os dados obtidos pela simulação para a altura média final dos fluxos subaquáticos com coeficientes de atrito das partículas iguais a: (a) 0,54; (b) 0,60; (c) 0,70; (d) 0,81; (e) 0,85

Observa-se que os valores encontrados pelas equações aproximam-se bastante dos dados obtidos pelas simulações, tornando possível estimar a altura média final de um escoamento a partir do valor de seu coeficiente de atrito das partículas dentro da faixa de análise (entre 0,54 e 0,85), considerando-se as restrições impostas pelos demais parâmetros utilizados nas simulações, já mencionados no item 5.3.3.1.

5.3.3.3 Perfil de altura ao longo do deslocamento

As Figuras A.1 até A.10 (fluxos subaéreos – Anexo A) e as Figuras B.1 até B.10 (fluxos subaquáticos – Anexo B) ilustram, através de imagens geradas a partir dos dados dos processamentos, o escoamento das partículas em diferentes instantes de deslocamento. Essas imagens permitem ter uma ideia do comportamento do perfil de altura do escoamento durante estes instantes. Através das simulações realizadas, equações empíricas foram determinadas para estimar o perfil vertical dos escoamentos, subaéreos e subaquáticos, nos mais diferentes pontos de deslocamento da frente dos fluxos dentro da faixa dos coeficientes de atrito das partículas adotados nas simulações:

$$y = -0,2352[\exp(-x_{m\acute{a}x})]^{f^{1,20}} - 0,0112 \frac{[\ln(x)]}{f^{0,33}} - 2,4526 \left[\frac{(y_0 - y_i)}{(x_0 - x_i)} (x_0 - x) \right] f^{0,70} + C \quad (5.14)$$

$$y = -0,2024[\exp(-x_{m\acute{a}x})]^{f^{0,63}} - 0,0063 \frac{[\ln(x)]}{f^{0,52}} - 2,7490 \left[\frac{(y_0 - y_i)}{(x_0 - x_i)} (x_0 - x) \right] f^{0,55} + C \quad (5.15)$$

onde:

- y = coordenada y da superfície superior do escoamento [m];
- x = coordenada x da superfície superior do escoamento [m];
- $x_{m\acute{a}x}$ = coordenada x da frente do escoamento no instante da análise [m];
- f = coeficiente de atrito das partículas;
- y_0 = coordenada y do ponto correspondente ao início da rampa [m];
- y_i = coordenada y do ponto correspondente ao final da rampa [m];
- x_0 = coordenada x do ponto correspondente ao início da rampa [m];
- x_i = coordenada x do ponto correspondente ao final da rampa [m];
- C = constante (valor a ser ajustado) [m].

A Equação 5.14 determina os perfis de altura dos fluxos subaéreos, enquanto os perfis de altura dos fluxos subaquáticos são determinados pela Equação 5.15.

Nas simulações subaéreas foi adotado o valor 0,4205 m para a constante C , enquanto nas simulações subaquáticas foi adotado o valor 0,4102 m.

Vale salientar, que os fluxos subaéreos apresentaram partículas desprendidas à frente do escoamento principal, conforme ilustra a Figura 5.1, sendo que a Equação 5.14 foi determinada considerando apenas o movimento do escoamento principal. Por isso, em alguns instantes é possível observar que a linha verde está limitada a um deslocamento inferior as partículas que se encontram na vanguarda do escoamento.

Fazendo regressões entre os valores determinados através das Equações 5.14 e 5.15 e os valores obtidos através das simulações, alcançaram-se coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,897154 para os fluxos subaéreos e a 0,888199 para os fluxos subaquáticos, os quais podem ser considerados satisfatórios, em vista as características dinâmicas das correntes de densidade.

5.4 Fração de volume ocupada pela fase fluida

5.4.1 Fluxos subaéreos

5.4.1.1 Região 1

A Figura 5.38 ilustra as variações da fração de volume ocupada pela fase fluida dos fluxos subaéreos na Região 1. Observa-se que ocorre uma rápida diminuição dos valores da fração volume ocupada pela fase fluida, em todos os fluxos, nos primeiros instantes que o escoamento passa pela Região 1. Os valores dessa fração diminuem até alcançarem valores, os quais permanecem praticamente constantes no restante do tempo da simulação. Vale salientar, que o valor da fração de volume ocupada pela fase fluida no empacotamento das partículas é de 0,27.

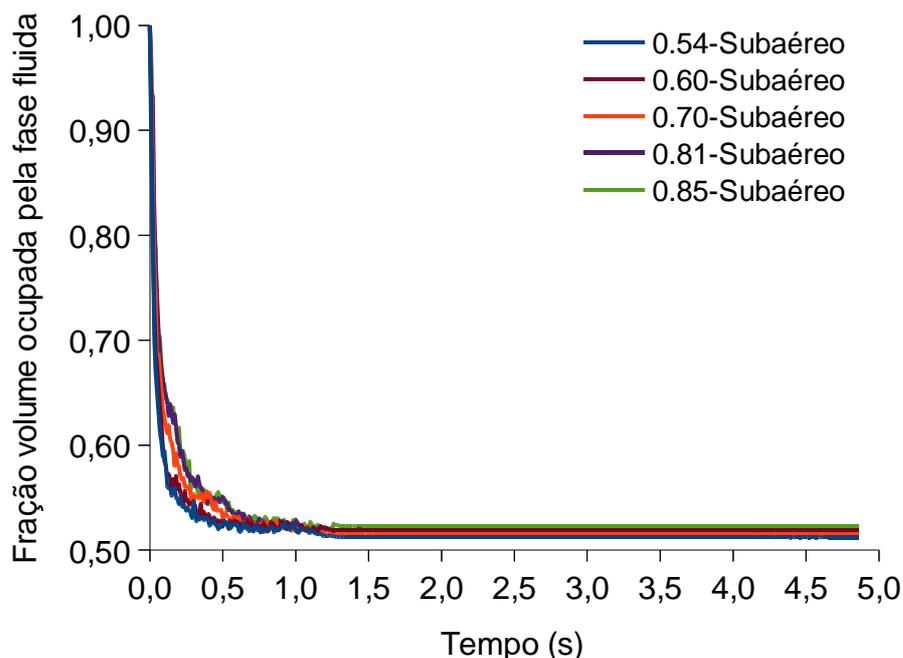


Figura 5.38 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaéreos na Região 1

Pode-se ver que os vértices das curvas tendem a acontecer em valores de fração de volume e de tempo maiores com o aumento do coeficiente de atrito das partículas.

5.4.1.2 Região 4

Ao analisar as variações das frações de volume na Região 4 (Figura 5.39), nota-se que o decréscimo dos valores se dá de maneira mais lenta, se comparado aos da Região 1. De forma geral, o comportamento das curvas permanece parecido com o da região imediatamente anterior. Porém, observa-se que ocorre um maior distanciamento entre as curvas na parte anterior aos seus vértices, mas, todas as curvas ainda se apresentam muito próximas entre si na parte final do escoamento. Contudo, há uma ligeira tendência do valor final de fração de volume ocupada pela fase fluida aumentar em todos os fluxos analisados nessa região em relação aos valores da região imediatamente anterior.

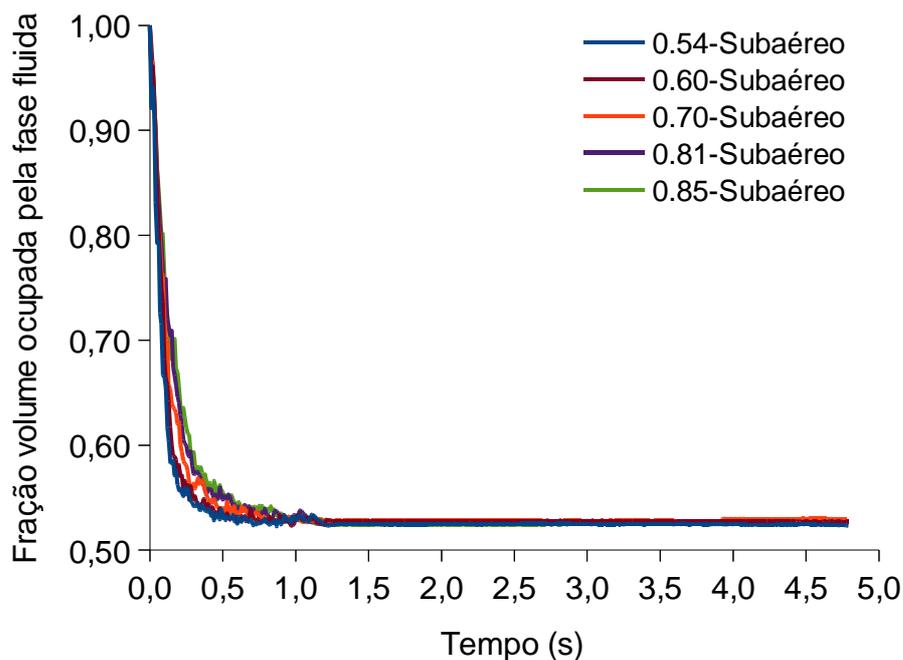


Figura 5.39 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaéreos na Região 4

5.4.1.3 Região 2

Na Região 2, observa-se que as curvas (Figura 5.40), as quais representam as variações da fração de volume ocupada pela fase fluida dos diferentes fluxos, aumentam seus distanciamentos nas partes anteriores aos seus vértices em relação a região imediatamente anterior. Após os vértices, as curvas permanecem próximas, porém, apresentam pequenas oscilações nos valores da fração de volume ocupada pela fase fluida, além de uma tendência de decréscimo desses valores até o final do período do escoamento.

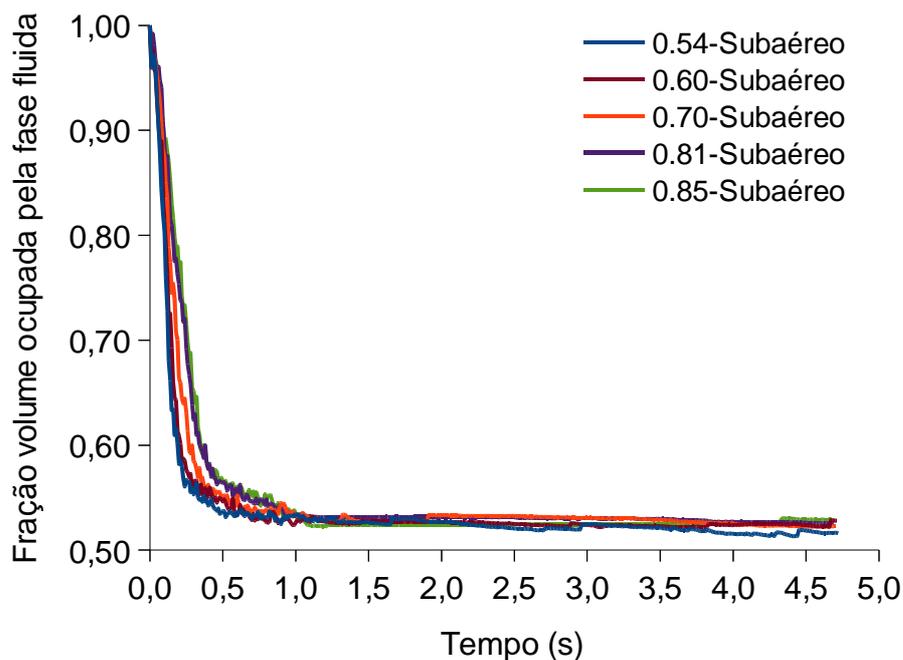


Figura 5.40 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaéreos na Região 2

5.4.1.4 Região 5

Verifica-se mais uma vez o aumento do distanciamento, em relação a região imediatamente anterior, entre as curvas que representam as variações da fração de volume ocupada pela fase fluida na Região 5 (Figura 5.41). Esse distanciamento leva a concluir que a parte inicial do escoamento chega com menor concentração de partículas conforme há o aumento do coeficiente de atrito das partículas.

Observam-se oscilações acentuadas na parte inicial das curvas dos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,81 e 0,85, além de um aumento das oscilações após os vértices das curvas, principalmente nos fluxos com coeficientes de atrito das partículas iguais a 0,54, 0,60 e 0,70, quando comparados com os da Região 2. Todas as curvas, ou seja, todos os fluxos, ainda tendem a valores finais próximos, entretanto passam a se apresentarem mais dispersas.

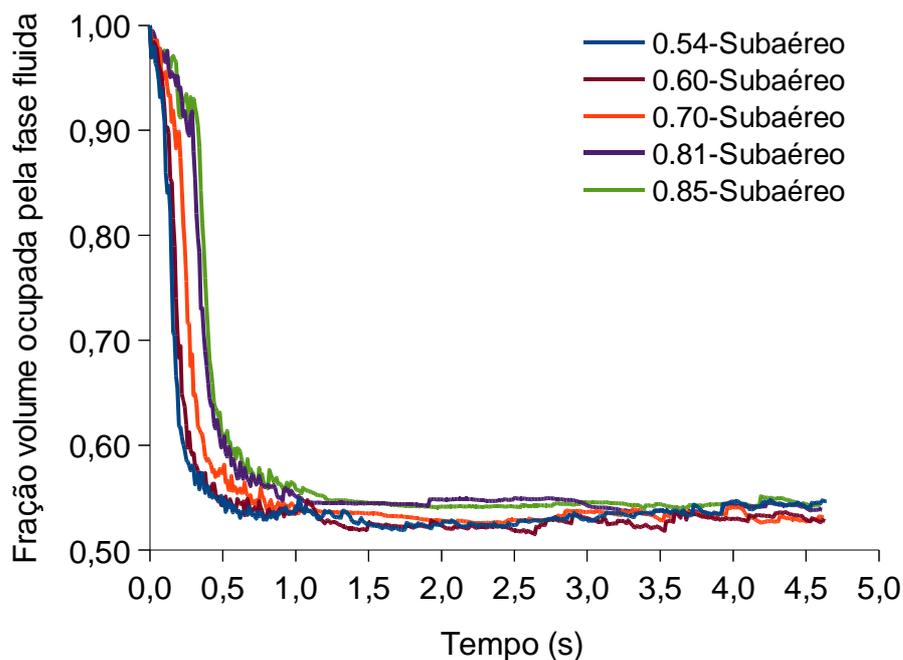


Figura 5.41 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaéreos na Região 5

5.4.1.5 Região 3

As variações da fração de volume ocupada pela fase fluida dos fluxos na Região 3 (Figura 5.42) demonstram um maior distanciamento entre as curvas na parte anterior aos vértices dessas. Observam-se, de forma mais clara, as oscilações de valores na parte inicial e na parte posterior ao vértice das curvas em todos os fluxos. Além disso, nota-se um maior distanciamento entre as curvas, tanto na parte inicial quanto na parte final, se feita a comparação com a região imediatamente anterior.

Observando os valores ao final do escoamento nessa região, fica evidente a tendência de aumento da fração de volume ocupada pela fase fluida com o aumento do coeficiente de atrito das partículas.

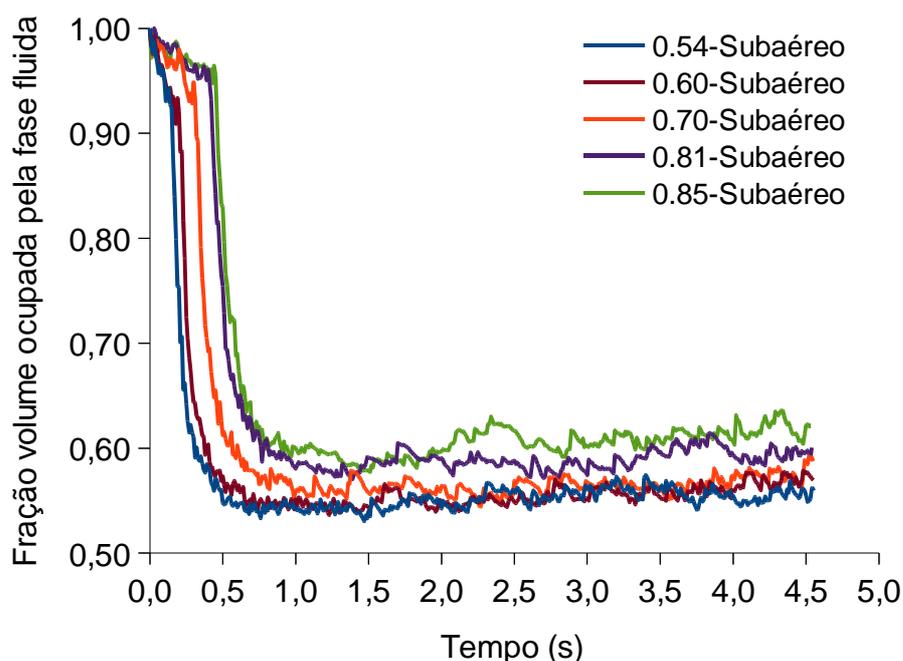


Figura 5.42 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaéreos na Região 3

5.4.2 Fluxos subaquáticos

5.4.2.1 Região 1

A Figura 5.43 apresenta as variações da fração de volume ocupada pela fase fluida em função do tempo na Região 1 para os diferentes fluxos subaquáticos analisados. Verifica-se que ocorre um decréscimo acentuado dos valores da fração de volume nos instantes iniciais em todos os fluxos, seguido de uma transição no comportamento da curva que passa na sequência a buscar um valor constante ao longo do tempo. Nos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,54 e 0,70 ocorre um vale acentuado seguido de um pico, também acentuado, nas curvas antes de iniciar a transição no comportamento. Todos os fluxos analisados tenderam a valores da fração de volume ocupada pela fase fluida bem próximos no final do período da simulação, estando entre 0,51 e 0,52.

Pode-se observar que os vértices das curvas tendem a valores de fração de volume ocupada pela fase fluida maiores com o aumento do coeficiente de atrito das partículas.

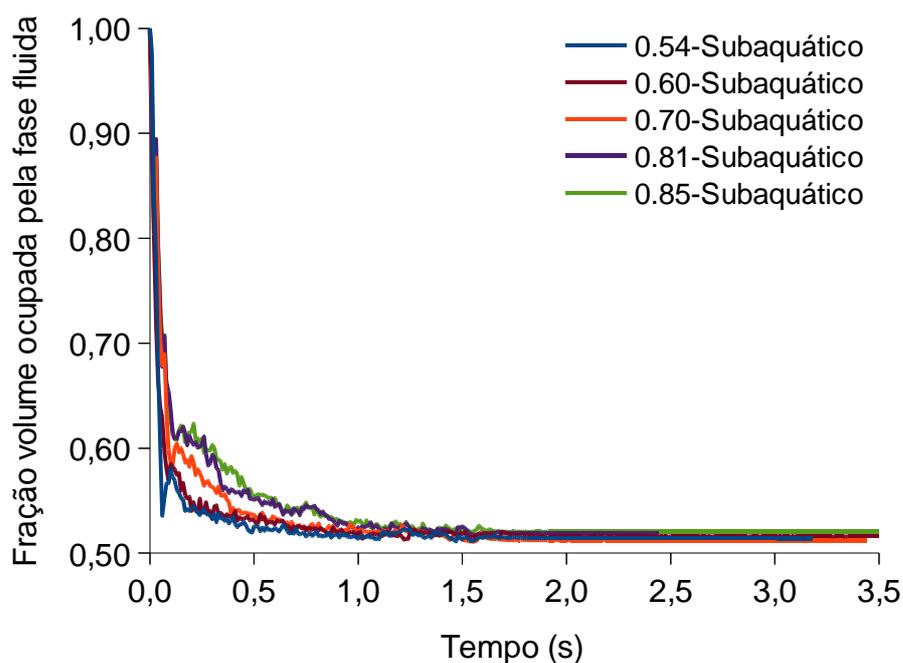


Figura 5.43 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaquáticos na Região 1

5.4.2.2 Região 4

Na Região 4 da rampa, observa-se um comportamento das curvas (Figura 5.44) bem semelhante ao da Região 1. Porém, nota-se que o vale e o pico acentuados que ocorrem nos instantes iniciais aparecem em todos os fluxos, com diferentes intensidades. Novamente, todos os fluxos tendem a valores finais da fração de volume ocupada pela fase fluida constantes e bem próximos, variando entre 0,52 e 0,53, indicando uma leve diminuição da concentração de partículas nessa região em relação a região imediatamente anterior.

Assim como na Região 1, verifica-se que os vértices das curvas ocorrem em valores maiores de fração de volume ocupada pela fase fluida conforme aumenta o coeficiente de atrito das partículas.

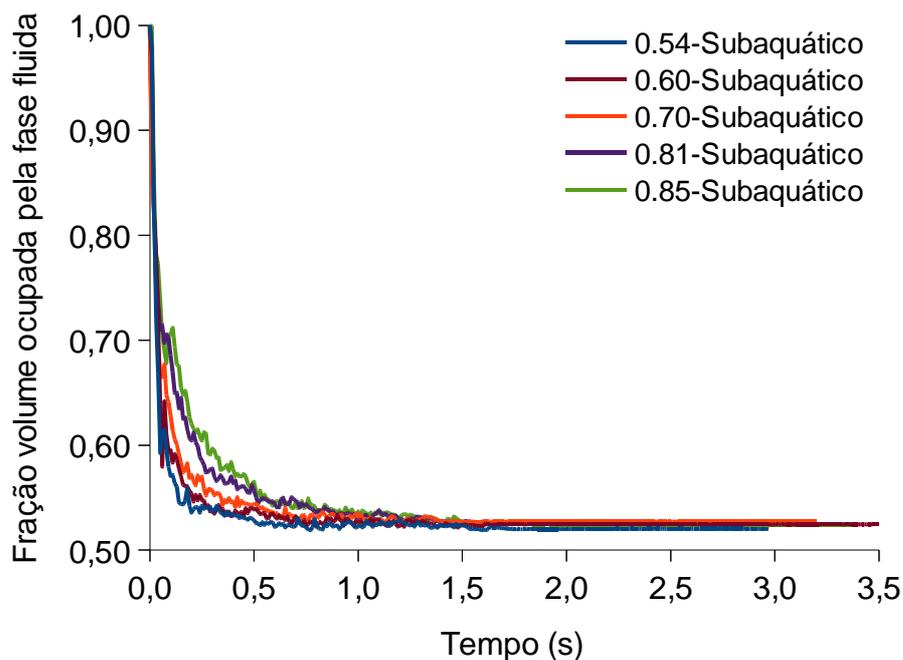


Figura 5.44 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaquáticos na Região 4

5.4.2.3 Região 2

Observa-se que as curvas que representam as variações da fração de volume ocupada pela fase fluida na Região 2 (Figura 5.45) mantém, aproximadamente, o mesmo comportamento das regiões anteriores. Entretanto, na parte final das curvas começam a aparecer maiores distâncias entre as curvas, evidenciando uma propensão do valor final de fração de volume ocupada pela fase fluida aumentar com o aumento do coeficiente de atrito das partículas, com exceção do fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,54. Esse comportamento indica que há uma diminuição da concentração de partículas nos fluxos conforme acontece o aumento do coeficiente de atrito das partículas.

Repete-se a tendência do vértice da curva ocorrer em valores maiores de fração de volume ocupada pela fase fluida com o aumento do coeficiente de atrito das partículas.

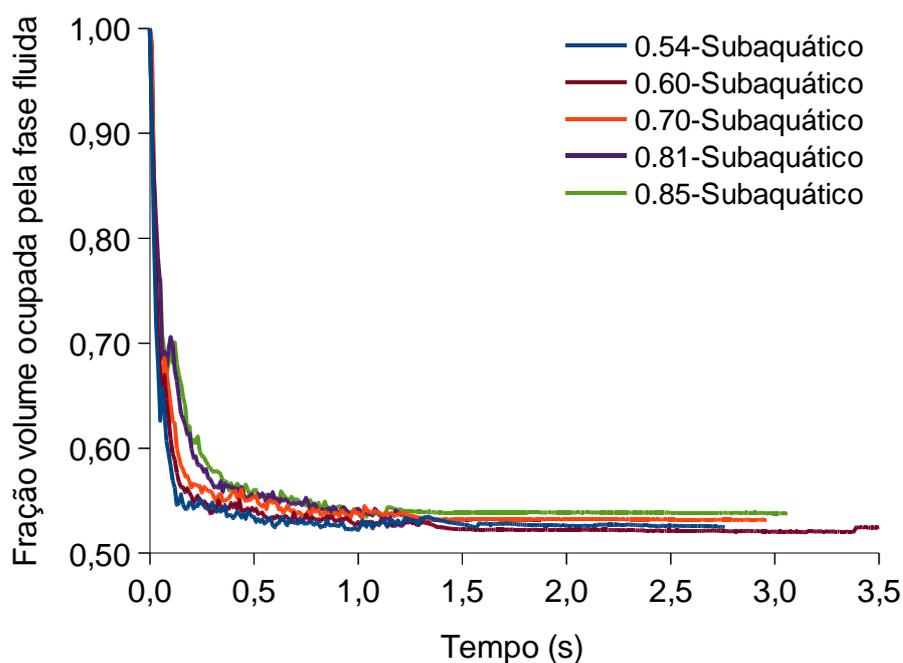


Figura 5.45 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaquáticos na Região 2

5.4.2.4 Região 5

Através da Figura 5.46 pode-se observar o comportamento da variação da fração de volume ocupada pela fase fluida na Região 5 para os diferentes fluxos subaquáticos analisados. As curvas que representam as variações da fração de volume mantêm as características das curvas analisadas nas regiões anteriores, entretanto, aparecem oscilações de valores mais intensas nos seus trechos finais. Também nesses trechos, comparando-os às regiões anteriores, verifica-se um maior distanciamento entre as curvas, porém, mantém-se a tendência dos valores finais de fração de volume ocupada pela fase fluida aumentar com o aumento do coeficiente de atrito das partículas. Os vértices das curvas novamente apresentam a tendência de ocorrerem em valores maiores conforme aumenta o coeficiente de atrito das partículas.

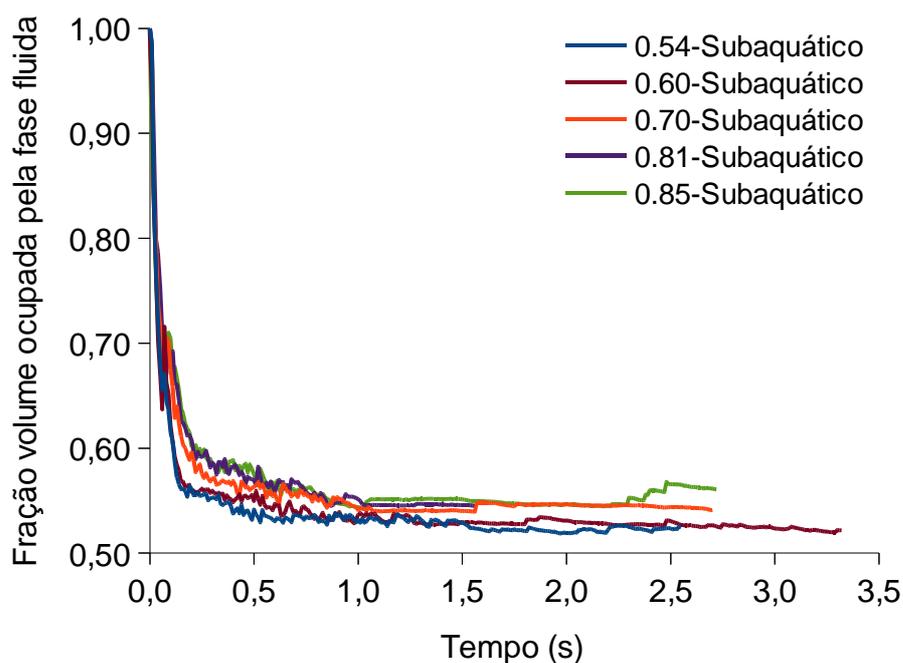


Figura 5.46 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaquáticos na Região 5

5.4.2.5 Região 3

A Figura 5.47 demonstra que o comportamento das curvas que representam as variações da fração de volume ocupada pela fase fluida dos diferentes fluxos na Região 3 permanece semelhante aos observados nas regiões anteriores, porém, no trecho final das curvas, os valores apresentam oscilações mais expressivas do que as observadas anteriormente. Na Região 3, o distanciamento das curvas nos seus trechos finais aumenta em relação a região imediatamente anterior, todavia, as curvas mantêm a tendência de alcançarem valores finais de fração de volume ocupada pela fase fluida maiores conforme o aumento do coeficiente de atrito das partículas.

Reitera-se o comportamento do vértice da curva ocorrer em valores maiores de fração de volume ocupada pela fase fluida conforme há o aumento do coeficiente de atrito das partículas.

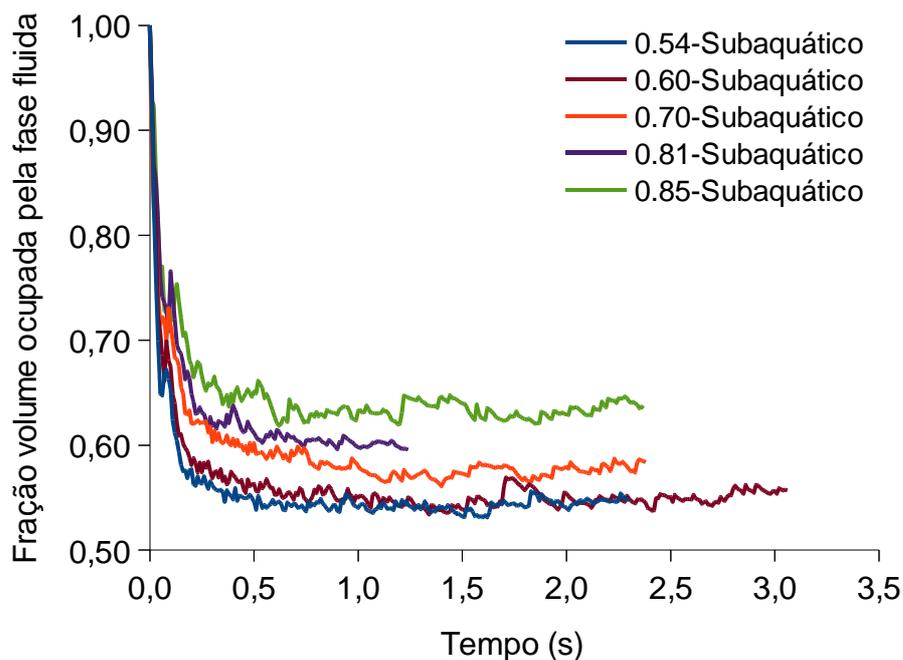


Figura 5.47 – Fração de volume ocupada pelo fluido dos fluxos subaquáticos na Região 3

5.4.3 Comparação da concentração de partículas dos fluxos subaéreos e subaquáticos

Através da análise da fração de volume ocupada pela fase fluida é possível avaliar a concentração de partículas no fluxo. Quanto maior a fração de volume ocupada pela fase fluida menor é a concentração de partículas do fluxo.

Chama a atenção que a inclinação do trecho inicial das curvas dos fluxos subaquáticos é praticamente a mesma para todos os fluxos e não apresenta alteração significativa, entre as diferentes regiões analisadas, do coeficiente angular da reta tangente a esse trecho, diferente do que acontece com o fluxo subaéreo. Esse comportamento indica que a parte frontal do escoamento mantém a sua concentração ao longo do deslocamento.

Nos fluxos subaéreos, nota-se que a parte frontal do escoamento vai ficando menos concentrada conforme ocorre seu deslocamento, indicando um processo de dispersão das partículas da frente do escoamento ao longo do escoamento.

Em ambos os fluxos, subaéreos e subaquáticos, observa-se que o fluxo se torna menos concentrado conforme ocorre o seu deslocamento, ou seja, nas regiões

mais afastadas do início do escoamento, a concentração das partículas é menor que nas regiões mais próximas. Também, se observa que nas regiões mais próximas do início do escoamento, Regiões 1 e 4, os fluxos tendem a concentrações finais muito próximas. A partir da Região 2, é possível observar uma tendência das concentrações das partículas diminuírem com o aumento do coeficiente de atrito das partículas, especialmente nas Regiões 5 e 3.

Considerando a classificação do tipo de fluxo proposta por Mulder e Alexander (2001), podem-se denominar os fluxos analisados como sendo correntes de densidade hiperconcentradas.

5.5 Perfil vertical de velocidade e de concentração de partículas

Esse item contempla as análises dos perfis de velocidade e de concentração de partículas dos fluxos subaéreos e subaquáticos nas diferentes regiões analisadas. As Figuras A.1 a A.25 (Anexo A) ilustram os perfis dos fluxos subaéreos nas diferentes regiões, enquanto que, as Figuras B.1 a B.25 (Anexo B) mostram os perfis dos fluxos subaquáticos.

5.5.1 Fluxos subaéreos

Através da análise dos perfis é possível observar um comportamento de velocidade padrão em todos os fluxos, onde nos primeiros instantes da passagem do escoamento a velocidade máxima ocorre na altura média do escoamento. Com o passar do tempo, e o aumento da altura do escoamento, a velocidade máxima ocorre no topo do escoamento. Observa-se, também, que as partículas próximas a base tendem a ter as menores velocidades. Pode-se afirmar que, com exceção do início da passagem dos escoamentos pelas regiões, as partículas tendem a passarem umas sobre as outras.

Nos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,54 e 0,60 observa-se que o escoamento mantém partículas próximas a base com altas velocidades. Com o aumento do coeficiente de atrito esse comportamento desaparece. Também, verifica-se um aumento da inclinação do perfil da velocidade com o aumento do

coeficiente de atrito, indicando uma maior variação da velocidade entre a base e o topo do escoamento no seu corpo.

Em relação à concentração das partículas, nota-se que na cabeça do escoamento há uma maior concentração de partículas em altura intermediária próxima a base. Com a passagem da frente dos escoamentos pelas regiões em análise ocorre uma tendência de uniformização da concentração com valores constantes ao longo da altura do escoamento.

Conforme o escoamento se afasta do ponto inicial, observa-se que a frente do escoamento apresenta partículas mais dispersas.

A Figura 5.48 apresenta as curvas de velocidade média das partículas nas diferentes regiões analisadas. Verifica-se que o comportamento típico das curvas apresenta um crescimento rápido da velocidade em um pequeno intervalo de tempo, devido à entrada das partículas que estão na vanguarda do escoamento, até atingir um valor de velocidade média máximo, seguido de um período de tempo onde há um decréscimo da velocidade até o instante em que ocorre um novo aumento dessa a fim de alcançar um ponto de pico, inferior ao ponto de velocidade média máxima, para na sequência haver uma nova diminuição da velocidade conforme o escoamento busca a imobilidade.

Pode-se notar que a velocidade média das partículas tende a diminuir com o aumento do coeficiente de atrito das partículas. Além disso, observa-se que a velocidade média máxima, função das partículas na vanguarda do escoamento, muitas vezes desprendidas do escoamento principal, tende a crescer até a Região 2. Nas regiões sequentes, a velocidade média máxima aproximadamente manteve-se constante.

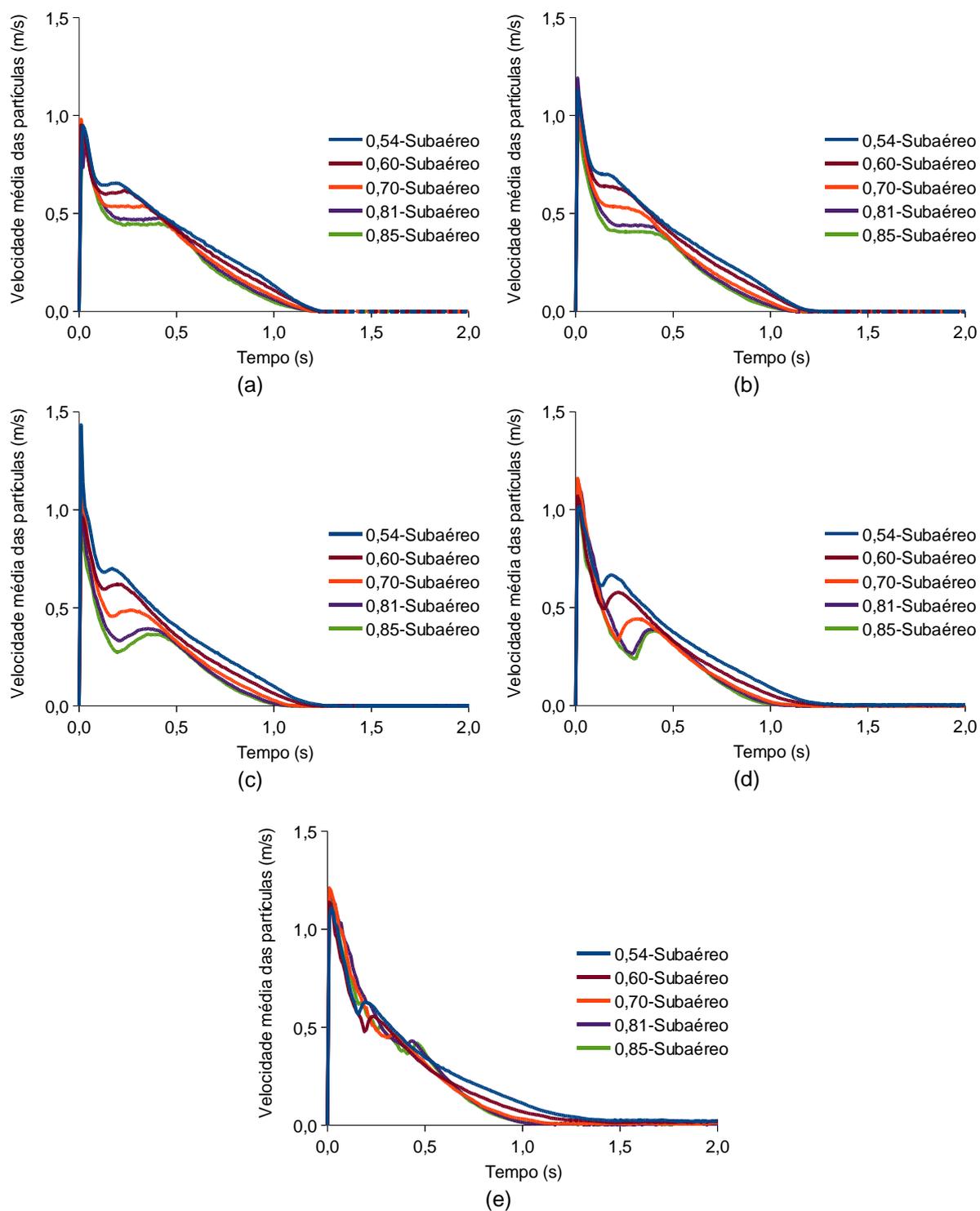


Figura 5.48 – Velocidade média das partículas dos fluxos subaéreos nas diferentes regiões de análise: (a) Região 1; (b) Região 4; (c) Região 2; (d) Região 5; (e) Região 3

5.5.2 Fluxos subaquáticos

Nos perfis de velocidade e de concentração de partículas dos fluxos subaquáticos (Figuras B.1 a B.25 – Anexo B), chama a atenção o perfil de velocidade da frente do escoamento, o qual passa a ter um formato característico em meia-lua, principalmente na Região 1 e nos fluxos com coeficientes de atrito menores.

Assim como nos fluxos subaéreos, a máxima velocidade das partículas na frente do escoamento são de partículas em altura intermediária, tendo o topo e a base velocidades inferiores, sendo a base a região onde se encontram as menores velocidades.

Após a passagem da frente, o escoamento apresenta características de velocidade bem semelhantes aos fluxos subaéreos, porém, é nítida a velocidade inferior dos fluxos subaquáticos em relação aos subaéreos, tanto na frente quanto no corpo do escoamento.

Em relação aos perfis de concentração das partículas, o comportamento dos fluxos subaquáticos se assemelha aos fluxos subaéreos, porém, nos subaquáticos ocorrem oscilações de valores significativas ao longo do perfil, contudo, mantêm a mesma tendência dos fluxos subaéreos.

Considerando as curvas de velocidade média das partículas (Figura 5.49), nota-se, como comportamento característico, um aumento da velocidade em um pequeno intervalo de tempo até que se alcança um valor de pico. Em seguida há uma oscilação na curva para então começar a ocorrer a diminuição da velocidade média das partículas conforme o escoamento busca a imobilidade.

A oscilação que acontece na curva de velocidade média diminui, tanto em amplitude quanto em comprimento, conforme o escoamento passa pela rampa, até que praticamente desaparece nas Regiões 5 e 3. Essa oscilação está intimamente ligada à variação do perfil de velocidade do escoamento, conforme acontece a transição da distribuição em meia-lua para uma distribuição mais verticalizada.

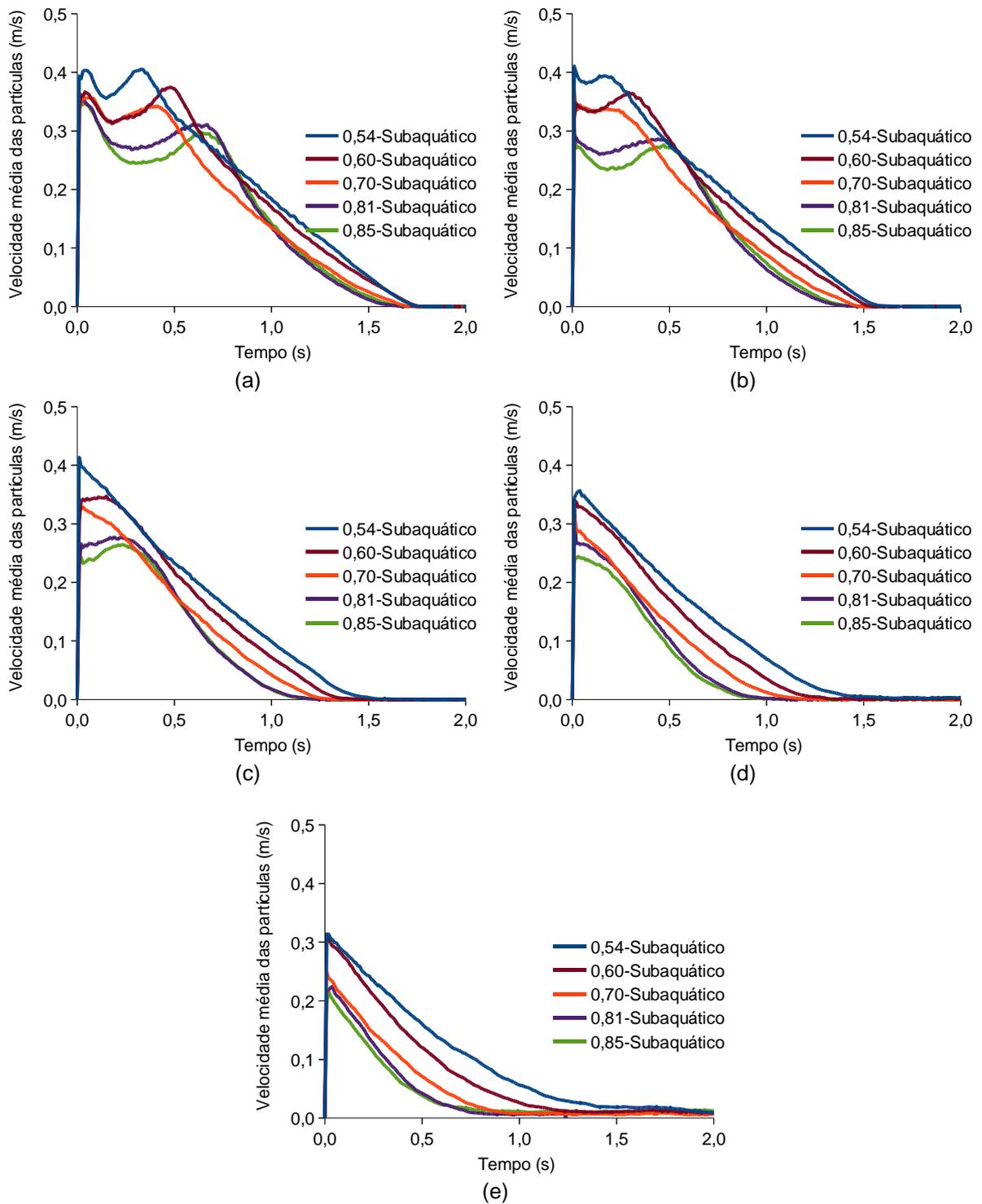


Figura 5.49 – Velocidade média das partículas dos fluxos subaquáticos nas diferentes regiões de análise: (a) Região 1; (b) Região 4; (c) Região 2; (d) Região 5; (e) Região 3

5.6 Pressão sobre a superfície da rampa

Nesse item é apresentado o comportamento da pressão gerada sobre a superfície da rampa devido a passagem do fluxo. Vale salientar que nas simulações subaéreas, foram registrados os valores de pressão nas Regiões 1, 2 e 3, enquanto que, nas simulações subaquáticas foram utilizadas todas as cinco regiões.

5.6.1 Fluxos subaéreos

5.6.1.1 Região 1

A Figura 5.50 ilustra as variações da pressão sobre a superfície na Região 1 para todos os fluxos subaéreos analisados. Observa-se, que ocorre um crescimento da pressão conforme ocorre a passagem do fluxo sobre a região, até que se atinge um valor constante que praticamente é mantido até o final do tempo de simulação. Nota-se, que nos trechos iniciais das curvas ocorrem oscilações constantes nos valores de pressão, essas oscilações são decorrência do escoamento do fluxo, onde é preciso levar em consideração os diversos choques entre as partículas. Nos trechos finais das curvas verifica-se que essas oscilações praticamente desaparecem, mostrando que o fluxo sobre essa região da rampa tende a parar, sendo mantida uma pressão constante sobre a superfície, pressão essa relacionada a altura do fluxo naquela região.

Observa-se, também, que há uma tendência da pressão sobre a superfície ao final do tempo de escoamento aumentar conforme há o aumento do coeficiente de atrito das partículas, satisfazendo o comportamento da altura média final observada na região.

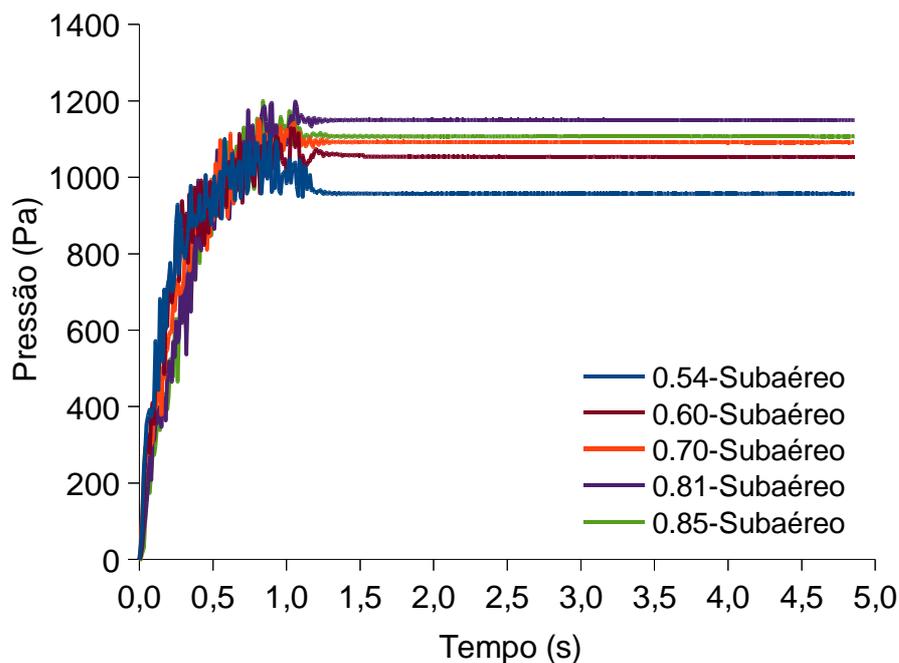


Figura 5.50 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaéreos na Região 1

5.6.1.2 Região 2

Na Região 2, observa-se, através da Figura 5.51, que o comportamento das curvas de pressão permanecem praticamente o mesmo observado na Região 1, com exceção da curva do fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,54, onde nota-se que há uma tendência de diminuição da pressão sobre a superfície em decorrência da diminuição da altura final observado nesse fluxo. Também, verifica-se que as curvas apresentam uma inflexão logo no início da passagem do escoamento pela região, que provavelmente está relacionada ao patamar que existe nas curvas das alturas médias dos fluxos.

Vale salientar que os valores de pressão sobre a superfície na Região 2 são menores que os observados na Região 1. Porém, na Região 2 ocorre uma tendência da pressão final aumentar com a diminuição do coeficiente de atrito das partículas, com exceção do fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,54.

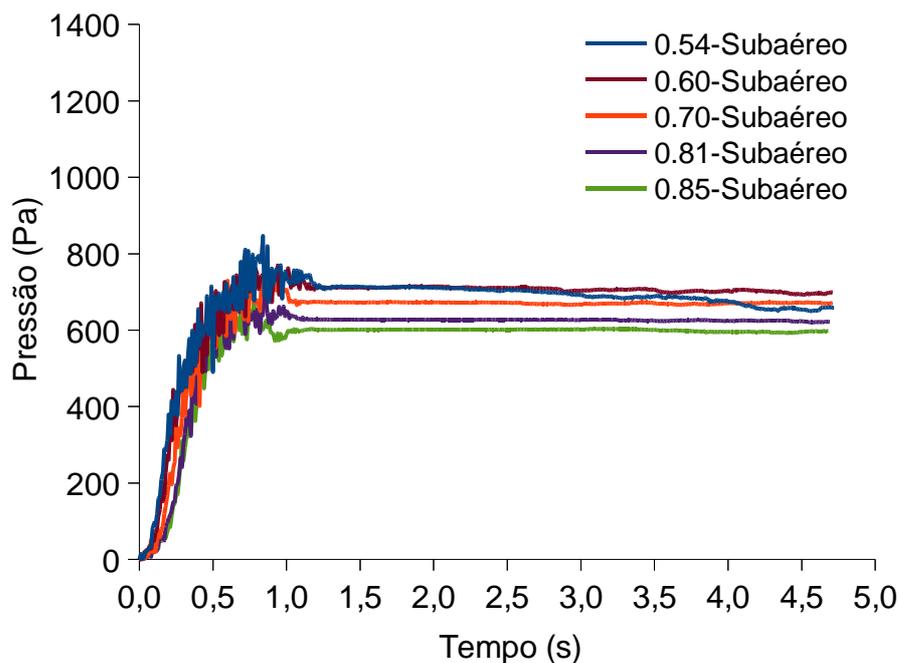


Figura 5.51 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaéreos na Região 2

5.6.1.3 Região 3

Através da Figura 5.52, a qual ilustra as variações da pressão sobre a superfície da rampa para os diferentes fluxos analisados na Região 3, é possível observar que todos os fluxos apresentam a tendência de aumentar a pressão na superfície da rampa, conforme o escoamento passa, até atingir um ponto onde o valor de pressão é máxima, e, a partir desse ponto, a pressão passa a diminuir sem alcançar um valor contante dentro do intervalo de tempo da simulação.

Reitera-se o comportamento da pressão aumentar com o aumento do coeficiente de atrito das partículas. Chama a atenção que as oscilações nos valores de pressão tendem a diminuir conforme há o aumento do coeficiente de atrito das partículas.

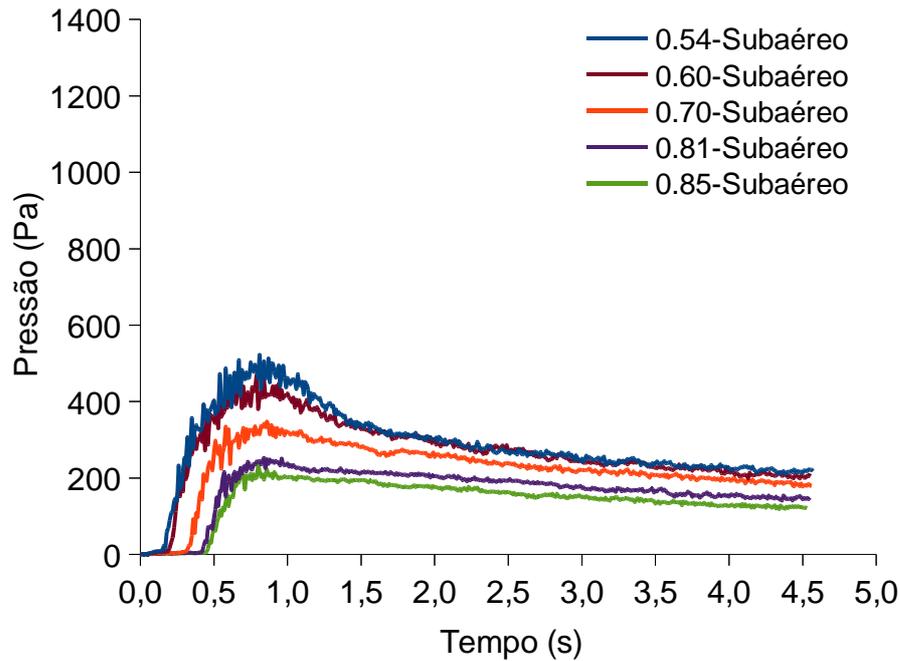


Figura 5.52 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaéreos na Região 3

5.6.2 Fluxos subaquáticos

5.6.2.1 Região 1

Conforme ilustra a Figura 5.53, a pressão sobre a superfície da Região 1 durante a passagem dos fluxos subaquáticos aumenta conforme o escoamento passa, em decorrência do aumento da altura do fluxo, até atingir um valor, o qual se mantém praticamente constante até o final do período da simulação. Observa-se que ocorrem oscilações significativas nos valores de pressão enquanto esses valores estão crescendo, porém, após as curvas se tornarem assíntotas ao eixo do tempo as oscilações desaparecem. Também, pode-se verificar que o valor de pressão final aumenta conforme há o aumento do coeficiente de atrito das partículas.

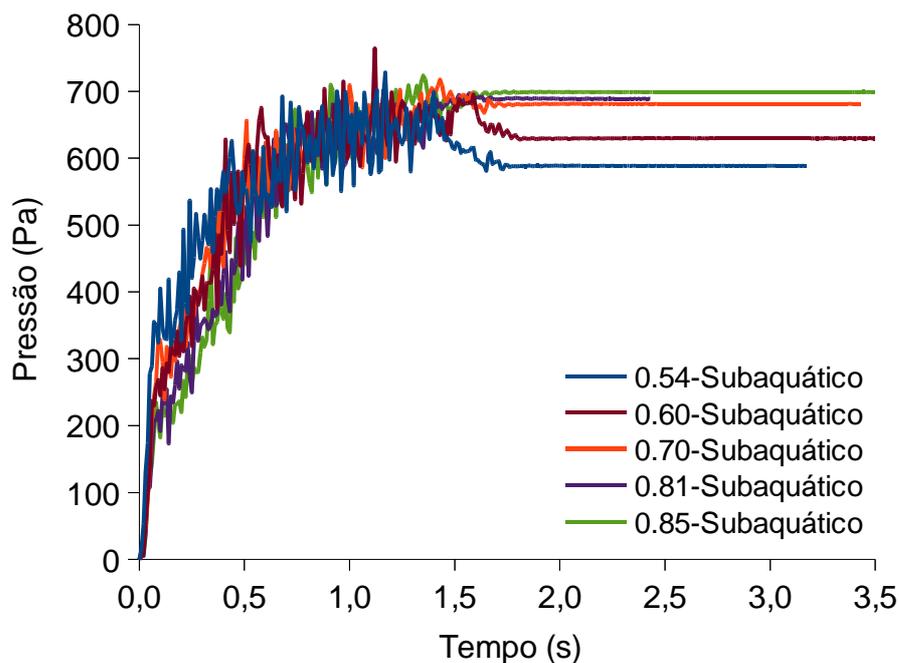


Figura 5.53 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaquáticos na Região 1

5.6.2.2 Região 4

A Figura 5.54 ilustra as curvas de pressão sobre a superfície da rampa para os diferentes fluxos subaquáticos analisados na Região 4. Observa-se que as curvas da Região 4 apresentam comportamentos bem parecidos com os verificados na Região 1, porém, os fluxos com coeficientes de atrito maiores (0,81 e 0,85) passam a ter os menores valores de pressão. Não é possível determinar uma tendência clara no comportamento da pressão em função do coeficiente de atrito, tornando a Região 4 uma zona de transição de comportamento. Pode-se notar, que os valores de pressão alcançados pelos fluxos na Região 4 são inferiores aos da região imediatamente anterior.

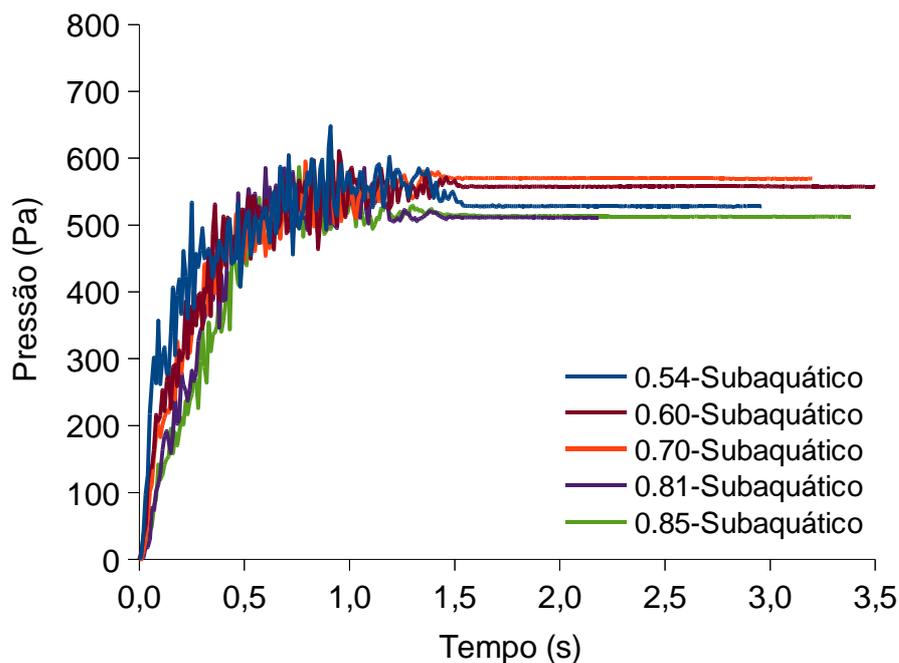


Figura 5.54 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaquáticos na Região 4

5.6.2.3 Região 2

Na Região 2 fica claro que a pressão final sobre a superfície da rampa aumenta com a diminuição do coeficiente de atrito das partículas, conforme ilustra a Figura 5.55, demonstrando que a Região 4 é realmente uma zona de transição. Repete-se o comportamento das curvas que aumenta seu valor de pressão até alcançar um valor o qual permanece constante até o final do período da simulação nos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,70, 0,81 e 0,85, entretanto, nos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,54 e 0,60 observa-se uma pequena tendência de diminuição do valor de pressão sem atingir um valor constante.

Nota-se uma diminuição do coeficiente angular da reta tangente ao trecho inicial da curva conforme o fluxo se desloca entre as regiões, principalmente nos fluxos com valores coeficientes de atrito mais altos.

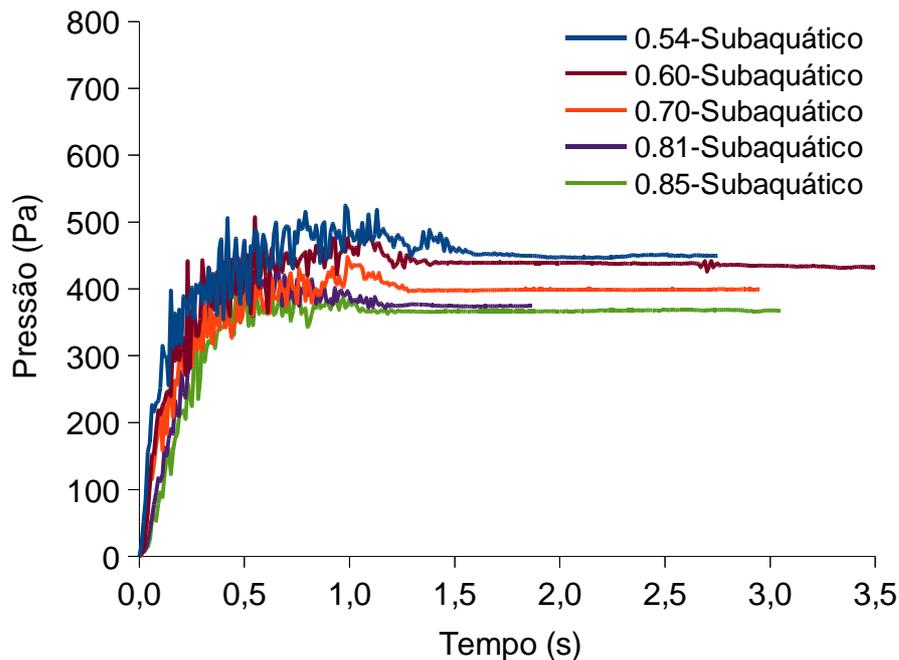


Figura 5.55 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaquáticos na Região 2

5.6.2.4 Região 5

As variações dos valores de pressão sobre a rampa na Região 5 devido a passagem dos fluxos subaquáticos (Figura 5.56) mantêm basicamente o mesmo comportamento apresentado na Região 2, porém, os valores finais alcançados pelos fluxos são inferiores aos observados na região imediatamente anterior. Além disso, verifica-se que aparecem oscilações um pouco mais significativas nos trechos finais das curvas dos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,54 e 0,60.

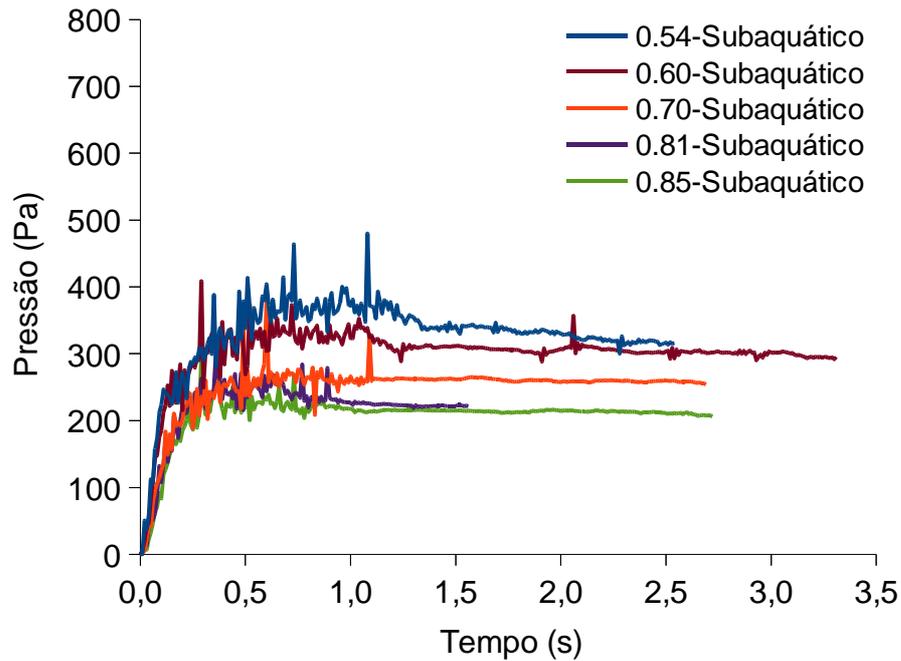


Figura 5.56 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaquáticos na Região 5

5.6.2.5 Região 3

Observa-se, através da Figura 5.57, que na Região 3 a variação da pressão sobre a rampa aumenta até atingir um ponto máximo e a partir desse ponto passa a diminuir sem estabilizar em um valor constante, dentro do período de tempo da simulação. Entretanto, repetem-se os comportamentos do valor de pressão final diminuir com o aumento do coeficiente de atrito das partículas e do coeficiente angular da reta tangente ao trecho inicial das curvas diminuir em relação as regiões anteriores.

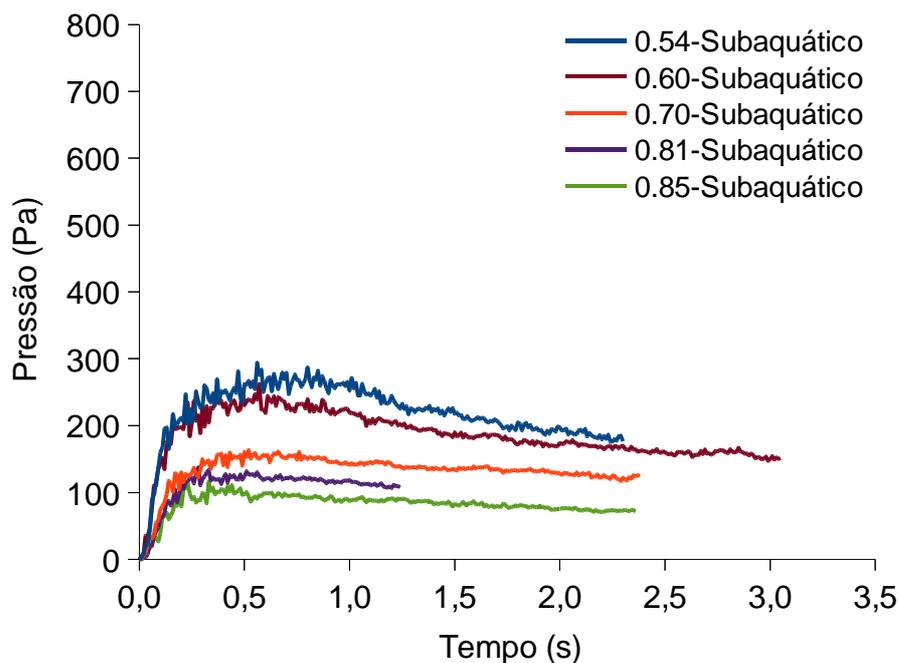


Figura 5.57 – Pressão sobre a superfície dos fluxos subaquáticos na Região 3

5.7 Pressão de água sobre a superfície da rampa

5.7.1 Região 1

Na Região 1, em todos os fluxos analisados observa-se que, antes dos instantes de chegada das primeiras partículas na região, representados pelas linhas tracejadas na Figura 5.58, ocorre um aumento da pressão de água sobre a superfície da rampa. Bem próximo ao instante em que a primeira partícula chega na região, ocorre uma oscilação na curva da pressão de água para em seguida acontecer um aumento significativo da pressão até atingir um ponto máximo, talvez devido a chegada do corpo do escoamento. Em seguida, ocorre uma diminuição dos valores de pressão de água até estabilizar aos valores iniciais.

Observa-se que todos os fluxos chegam a valores de pressão de água bem próximos.

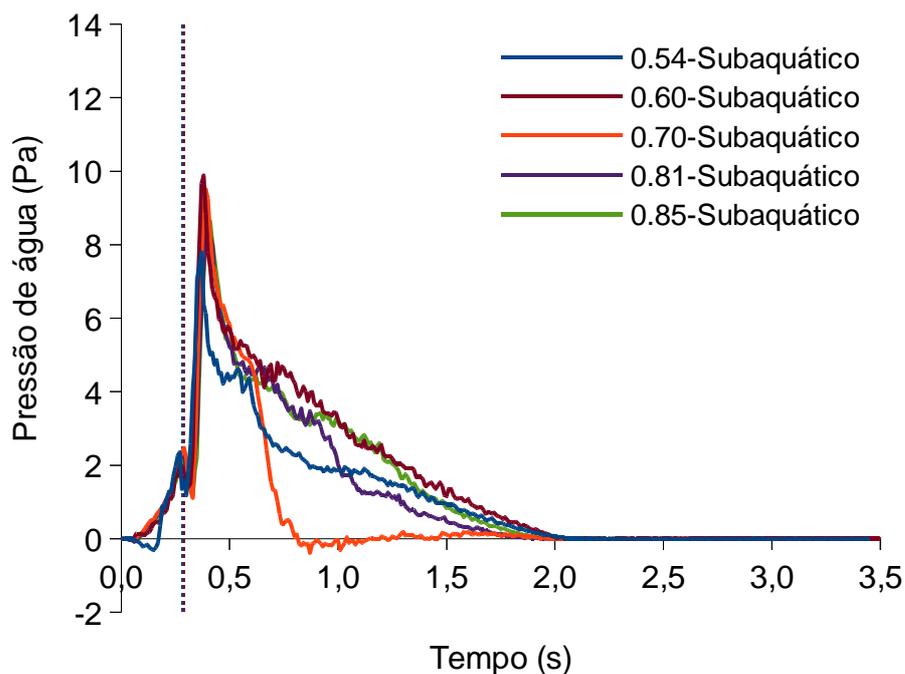


Figura 5.58 – Pressão de água sobre a superfície da rampa na Região 1

5.7.2 Região 4

A Região 4 apresenta um comportamento distinto dos valores de pressão de água na superfície da rampa, conforme ilustra a Figura 5.59. Nota-se que antes da chegada da primeira partícula há um leve aumento dos valores de pressão de água, seguido de uma diminuição, a qual leva a valores inferiores aos valores iniciais. Após a passagem da primeira partícula pela região ocorre um aumento da pressão até um valor máximo, para em seguida diminuir até retornar ao valor inicial.

Observa-se que os fluxos com coeficientes de atrito maiores (0,81 e 0,85) atingem valores de pressão máxima inferiores aos demais fluxos. Pode-se ver também que, os valores máximos de pressão de água na Região 4 são inferiores aos da Região 1.

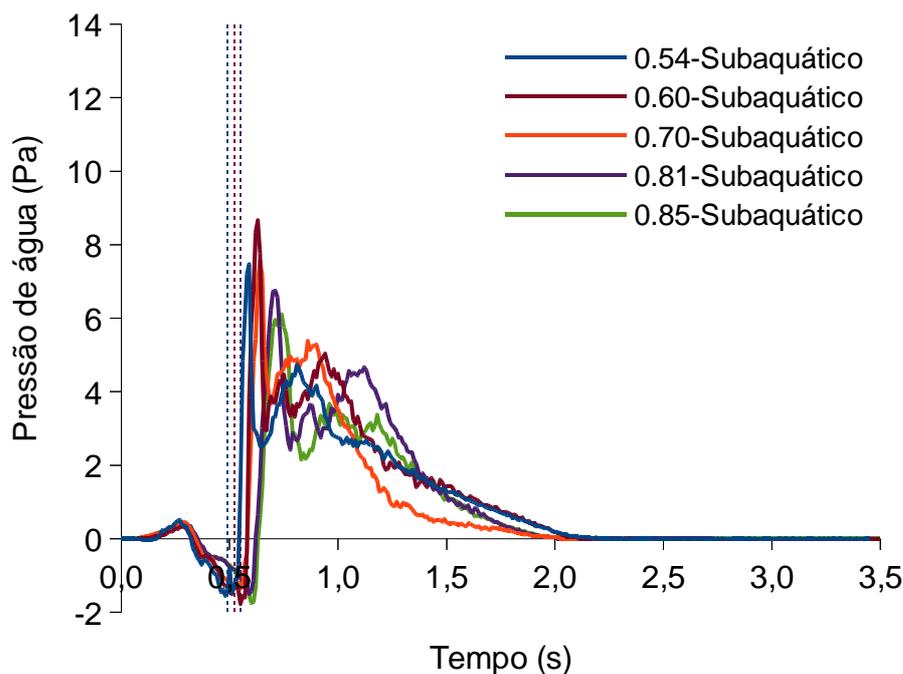


Figura 5.59 – Pressão de água sobre a superfície da rampa na Região 4

5.7.3 Região 2

Na Região 2 (Figura 5.60), nota-se que ocorre uma oscilação inicial, antes da passagem da primeira partícula na região, com a diminuição dos valores, seguido de um aumento. Próximo do instante da passagem da primeira partícula ocorre uma nova diminuição dos valores para em seguida ter um aumento até um valor de pressão máxima, havendo na sequência uma diminuição dos valores até o retorno aos valores iniciais.

Nota-se que os fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,60 e 0,70 alcançam os maiores valores de pressão de água na superfície da rampa, seguido dos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,85, 0,81 e 0,54. Observa-se que na Região 2 é onde se atingem os maiores valores de pressão na superfície da rampa.

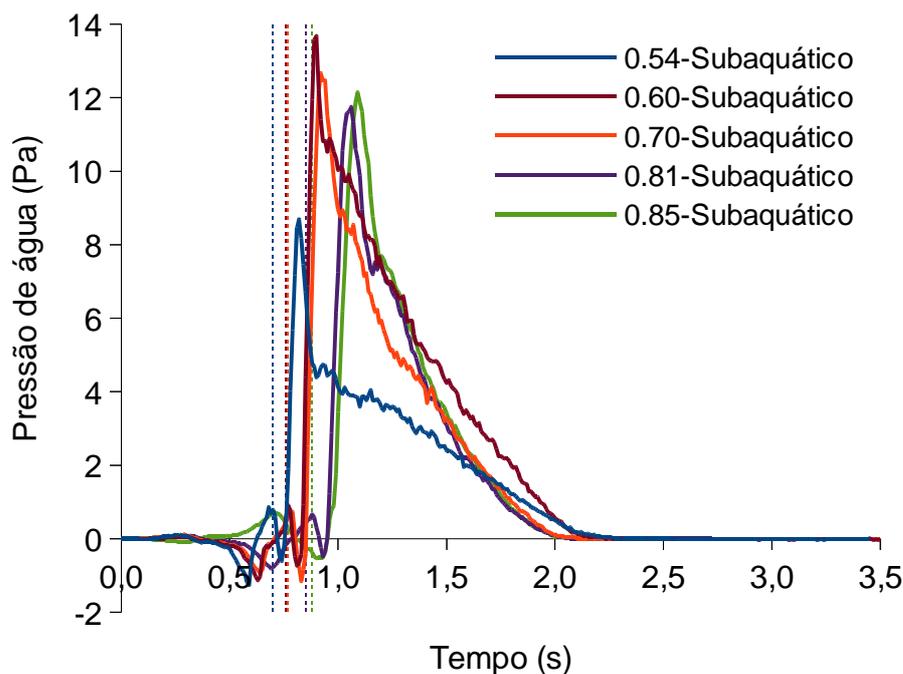


Figura 5.60 – Pressão de água sobre a superfície da rampa na Região 2

5.7.4 Região 5

O comportamento das curvas de variação da pressão de água na Região 5 (Figura 5.61) apresentam leves oscilações nos valores para, em seguida, ocorrer uma oscilação significativa com o aumento e a diminuição dos valores antes da passagem da primeira partícula. Nos instantes próximos a passagem da primeira partícula ocorre um aumento da pressão até atingir um valor máximo, para posterior diminuição até voltar aos valores de pressão iniciais.

Os valores máximos alcançados na Região 5 são inferiores aos da Região 2, sendo o fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,54 o que atinge o maior valor, seguido dos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,81, 0,70, 0,85 e 0,60.

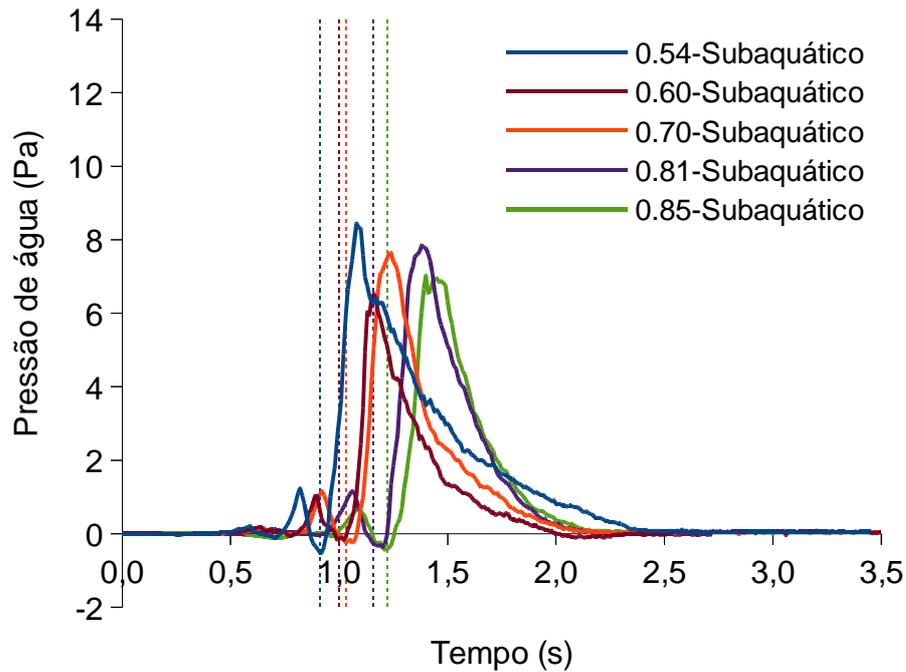


Figura 5.61 – Pressão de água sobre a superfície da rampa na Região 5

5.7.5 Região 3

Na Região 3 (Figura 5.62) os fluxos apresentam comportamentos sem um padrão bem definido, com exceção dos fluxos com coeficientes de atrito iguais a 0,54 e 0,60, onde ocorrem comportamentos semelhantes aos da Região 5, porém, os valores máximos alcançados são significativamente menores.

Chama a atenção, o comportamento do fluxo com coeficiente de atrito igual a 0,54 após o valor de pressão máxima, onde ocorre uma diminuição da pressão abaixo do valor inicial, com uma tendência de estabilização do valor ao longo do tempo, para em seguida haver um posterior aumento do valor da pressão até retornar ao valor inicial.

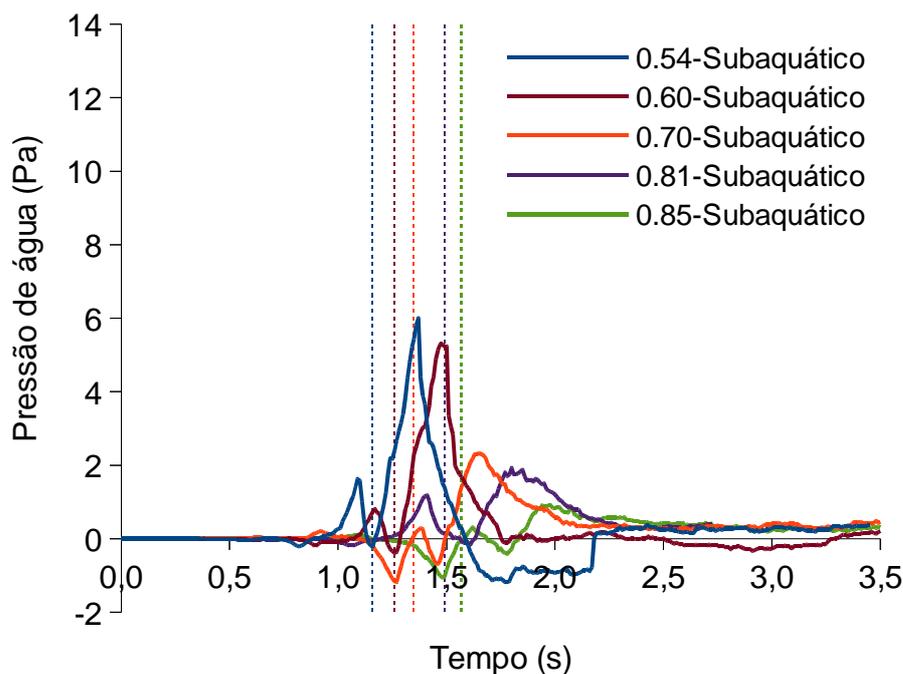


Figura 5.62 – Pressão de água sobre a superfície da rampa na Região 3

5.8 Comparação entre os valores obtidos pela equação do perfil vertical para fluxos subaquáticos com resultados de ensaio com modelo reduzido em centrífuga geotécnica

Para avaliar a aplicação da equação do contorno do perfil vertical para fluxos subaquáticos foram utilizadas imagens capturadas durante um ensaio com modelo reduzido de uma corrente de densidade, submetida a uma aceleração induzida de 40g, realizado por Acosta (2015) na centrífuga geotécnica da UENF. No ensaio utilizado para a comparação (denominado de Ensaio 4 pelo autor supracitado), o material da corrente era composto por uma mistura, em massa, de 60% de metacaulim e 40% de caulim de argila, sendo o teor de umidade dessa mistura igual ao seu limite de liquidez ($LL = 59,8\%$). As imagens foram capturadas por uma câmera de alta velocidade instalada de maneira a enquadrar a lateral da caixa de testes utilizada para o ensaio, a fim de registrar o movimento do escoamento através do seu perfil (Figura 5.63).

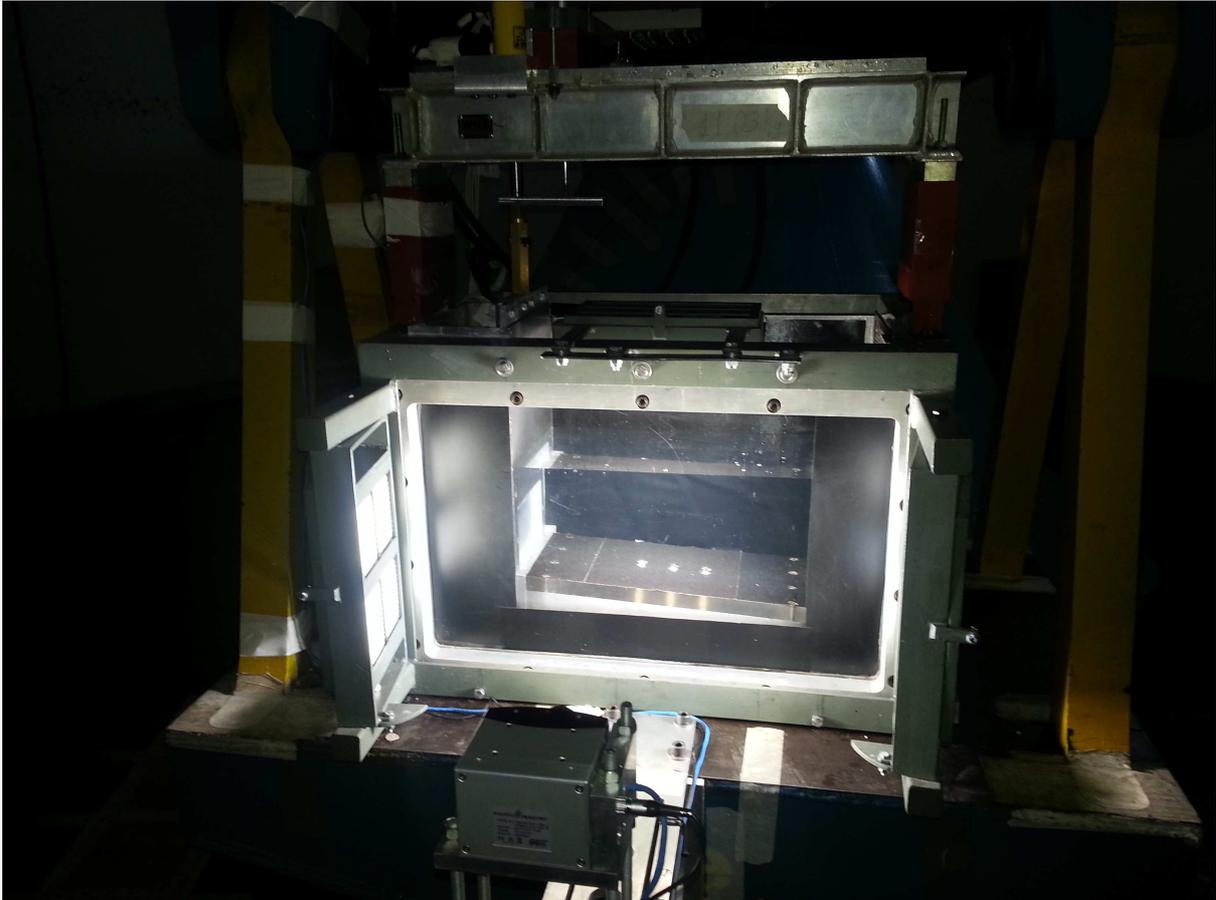


Figura 5.63 – Aparato utilizado para a captura das imagens durante os ensaios na centrífuga geotécnica

Com base nas imagens capturadas, foram determinadas a posição da frente e o contorno do perfil vertical do escoamento nos seguintes instantes (em ms) 5182.1, 5212.2, 5236.1, 5252.2, 5262.2, 5280.1, 5288.2, 5302.1, 5314.1, 5330.2, 5338.1, 5352.2, 5360.1, 5378.2, 5394.1. A análise iniciou no instante 5182.1 ms, pois nos instantes anteriores não foi possível determinar com exatidão a posição do fluxo principal que escoou no centro da rampa. Os demais instantes foram selecionados de acordo com a posição da frente do escoamento (instantes onde a frente do escoamento estava em posição intermediária aos transdutores instalados na rampa e instantes onde a frente estava em posição próxima aos transdutores instalados). Não foram realizadas análises quando a frente estava sobre os transdutores, pois havia uma maior imprecisão na determinação da sua posição em virtude do fraco contraste nas imagens entre o transdutor e o escoamento. As imagens onde o escoamento está entre os transdutores apresentam um contraste melhor.

5.8.1 Velocidade da frente do escoamento

Foi determinada a posição da frente do escoamento em cada um dos quadros selecionados. Como cada quadro está relacionado a um instante de tempo, foi possível gerar um gráfico relacionando a posição da frente do escoamento em função do tempo, conforme ilustra a Figura 5.64.

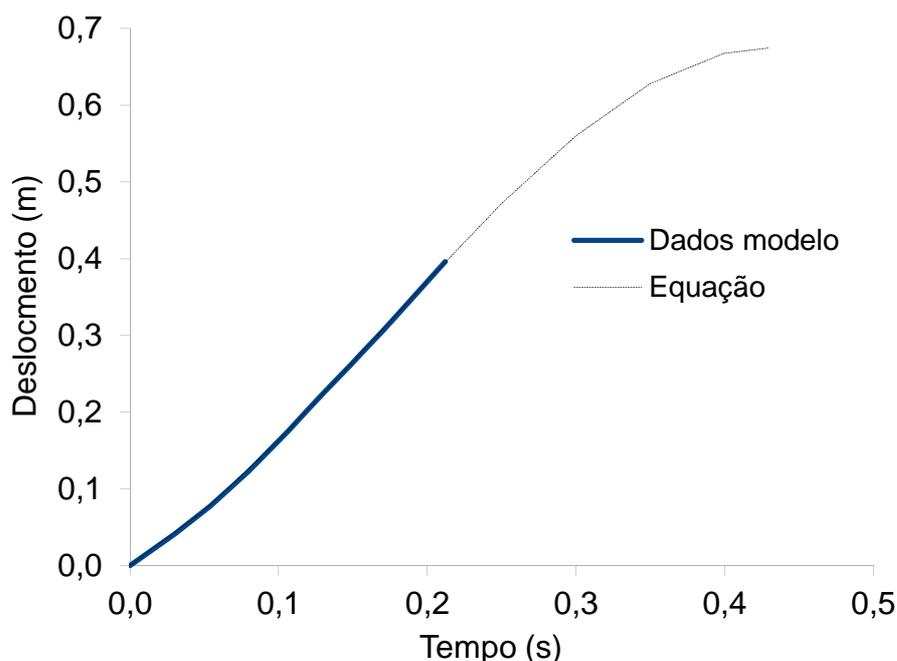


Figura 5.64 – Deslocamento da frente do escoamento em função do tempo

A curva contínua em linha cheia representa o deslocamento da frente do escoamento do modelo ensaiado na centrífuga, utilizando os dados determinados através das imagens capturadas. A curva tracejada representa uma equação de ajuste do deslocamento em função do tempo:

$$s = -10,602142t^3 + 5,444061t^2 + 1,186429t \quad (5.16)$$

onde:

s = deslocamento [m];

t = tempo [s].

A curva de ajuste (Equação 5.16) é de terceira ordem. Esse grau foi determinado com base nos ensaios realizados no software CFDEMcoupling, onde observou-se que o comportamento da curva de deslocamento em função do tempo obedece uma curva de terceira ordem. A Equação 5.16 apresentou um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,999988.

Conhecendo a posição do escoamento em cada instante de tempo analisado foi possível determinar a velocidade média entre dois instantes sucessivos, o que gerou a curva contínua apresentada na Figura 5.65.

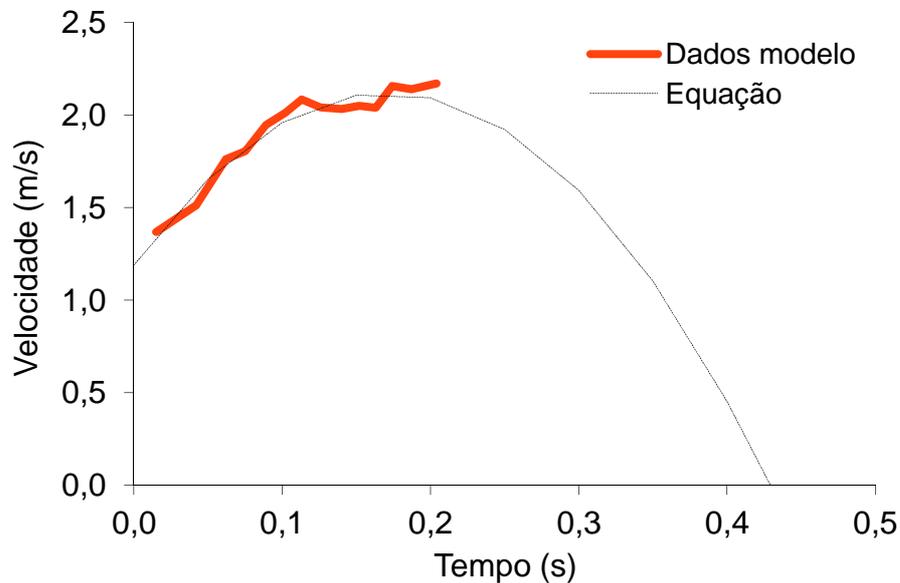


Figura 5.65 – Velocidade média do escoamento em função do tempo

A curva tracejada é a equação de ajuste da velocidade do escoamento, a qual foi determinada através da derivada primeira da função deslocamento em relação ao tempo:

$$v = -31,806426t^2 + 10,888122t + 1,186429 \quad (5.17)$$

onde:

v = velocidade [m/s].

Observa-se uma boa conformidade entre os valores de velocidade média e a curva de ajuste (Equação 5.17). A velocidade do escoamento obedece a uma função de segundo grau, onde pode-se observar que o escoamento irá atingir uma velocidade igual a 0, isto é, parar, após 0,429228 s. Conhecendo essa informação e a equação do deslocamento em função do tempo, é possível determinar qual será a posição da frente do escoamento ao final do fluxo, nesse caso, o fluxo atingirá um deslocamento máximo estimado de 0,673832 m a partir da posição onde ocorreu o início da análise, ou seja, na posição que a frente do escoamento estava no instante 5182.1 ms.

Com base nos dados de deslocamento e velocidade foi determinada a variação da velocidade em função do deslocamento (Figura 5.66)

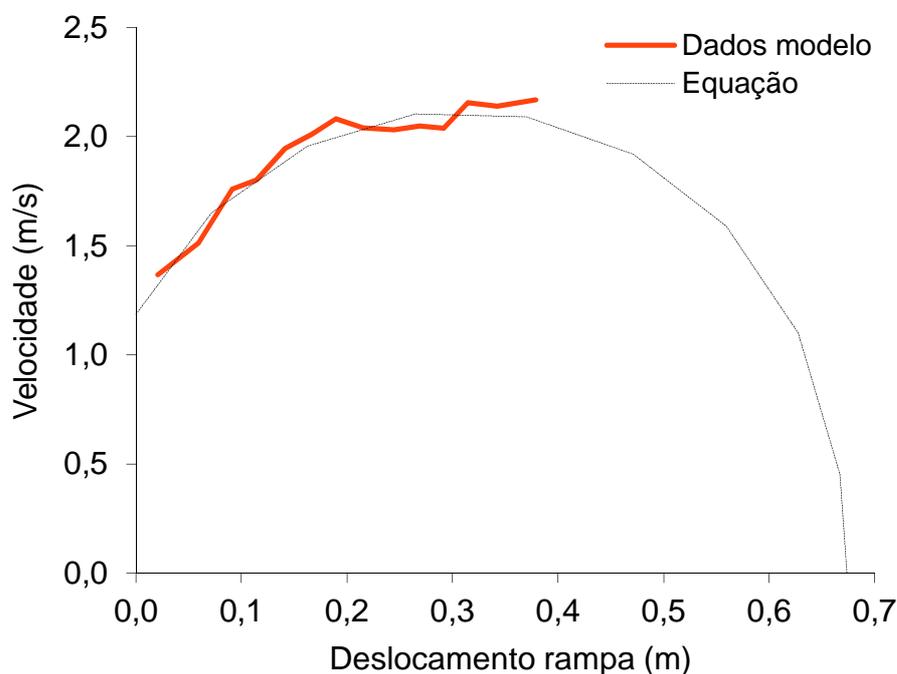


Figura 5.66 – Velocidade média do escoamento em função do deslocamento

A partir dessas informações é possível verificar que o escoamento realizado utilizando o modelo reduzido na centrífuga geotécnica atingiu aproximadamente sua velocidade máxima durante o ensaio, percorrendo aproximadamente 60% do deslocamento máximo estimado.

5.8.2 Contorno do perfil de altura do escoamento

Durante as análises dos dados das simulações realizadas no software CFDEMcoupling, foi estimada uma equação empírica para determinar aproximadamente o contorno do perfil de altura do escoamento ao longo da simulação, a qual pudesse ser utilizada para extrapolar o possível contorno do escoamento em qualquer instante. Como a rampa do ensaio em centrífuga possui uma inclinação de aproximadamente 3,4° e um comprimento de 0,424 m, os quais são diferentes dos valores adotados nas simulações numéricas (inclinação de 6° e comprimento de 0,50 m), foi utilizada uma equação normalizada em função do deslocamento máximo estimado para o escoamento:

$$y = -0,2365[\exp(-x_{m\acute{a}x})]^{f^{0,50}} - 0,0130 \frac{[\ln(x)]}{f^{0,50}} - 2,6823 \left[\frac{(y_0 - y_i)}{(x_0 - x_i)} (x_0 - x) \right] f^{0,55} + C \quad (5.18)$$

onde:

$y_{(N)}$ = coordenada y normalizada;

$x_{(N)}$ = coordenada x normalizada;

$x_{m\acute{a}x(N)}$ = coordenada x normalizada da frente do escoamento no instante da análise;

f = coeficiente de atrito das partículas;

$y_{0(N)}$ = coordenada y normalizada do ponto correspondente ao início da rampa;

$y_{i(N)}$ = coordenada y normalizada do ponto correspondente ao final da rampa;

$x_{0(N)}$ = coordenada x normalizada do ponto correspondente ao início da rampa;

$x_{i(N)}$ = coordenada x normalizada do ponto correspondente ao final da rampa;

C = constante (valor a ser ajustado).

A Equação 5.18 apresentou um bom ajuste nas análises realizadas no software CFDEMcoupling, sendo utilizada, então, para estimar o contorno do escoamento do ensaio realizado em centrífuga.

As Figuras 5.67 e 5.68 apresentam os contornos gerados pela Equação 5.18 (linhas contínuas vermelhas) sobre as imagens capturadas pela câmera de alta velocidade, durante o ensaio em centrífuga, nos instantes utilizados para as análises. A linha contínua amarela indica o eixo longitudinal da rampa.

Para o ajuste da Equação 5.18 com o escoamento foram utilizados os seguintes valores: coeficiente de atrito (f) igual a 1,20 e constante C (normalizada) igual a 0.28. Porém, deve-se tomar cuidado ao considerar esses valores como reais, pois a Equação 5.18 foi determinada através de simulação com coeficientes de atrito das partículas variando de 0,54 a 0,85 e em uma rampa com inclinação igual a 6°, enquanto o ensaio em centrífuga ocorreu com um material coesivo em uma rampa com inclinação de aproximadamente 3,4°.

Observando as Figuras 5.67 e 5.68, nota-se uma aproximação razoável do contorno gerado pela Equação 5.18 com a frente do escoamento. Porém, a parte final do escoamento não apresenta boa aproximação. Isso ocorre porque a equação foi determinada considerando um escoamento com maior volume de material em relação ao escoamento simulado na centrífuga geotécnica, e dessa maneira, o contorno gerado pela equação considera que continua ocorrendo a entrada de material na rampa.

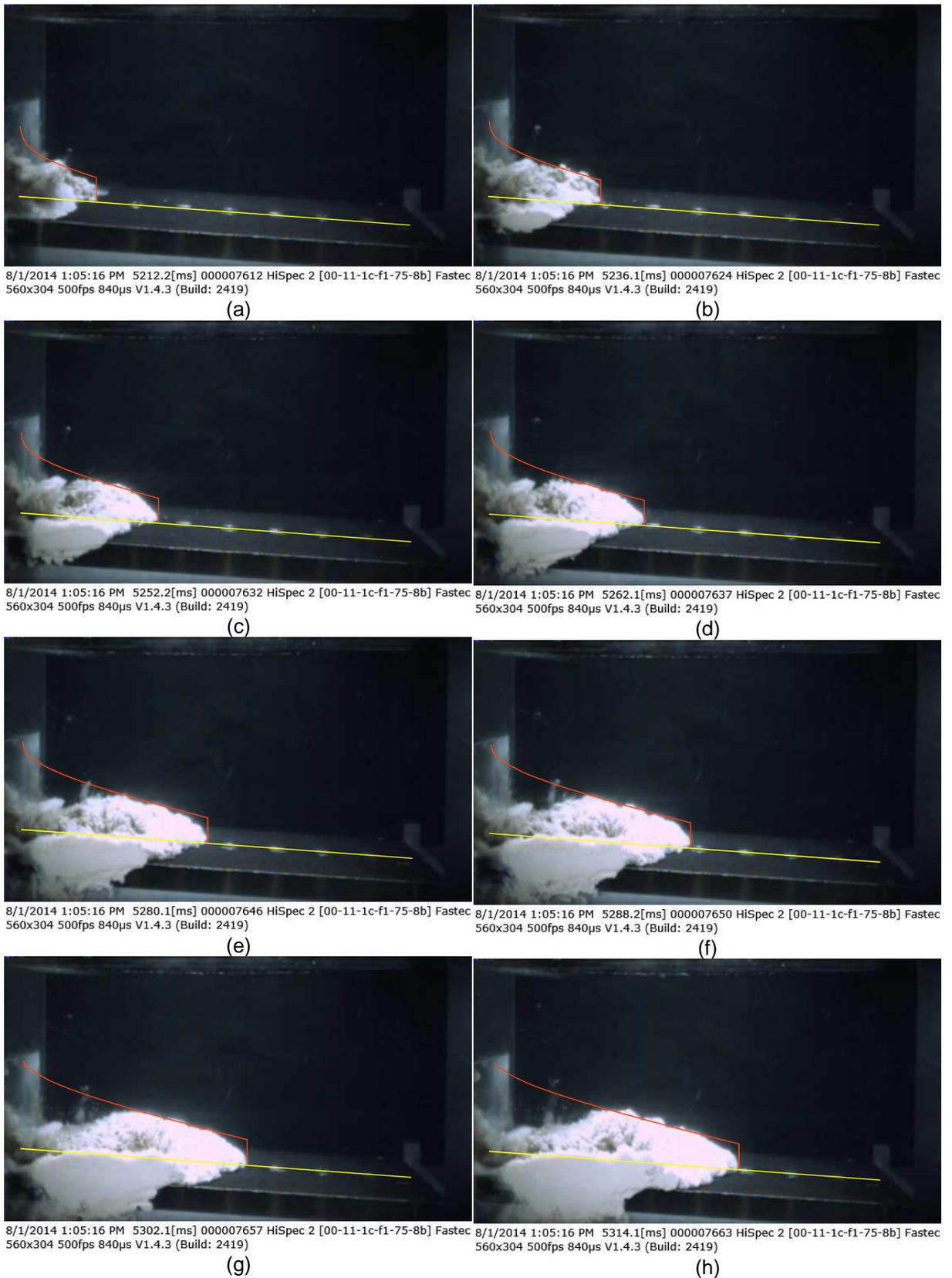


Figura 5.67 – Contornos do escoamento em diferentes instantes (em ms) – (a) 5212.2; (b) 5263.1; (c) 5252.2; (d) 5262.1; (e) 5280.1; (f) 5288.2; (g) 5302.2; (h) 5314.1

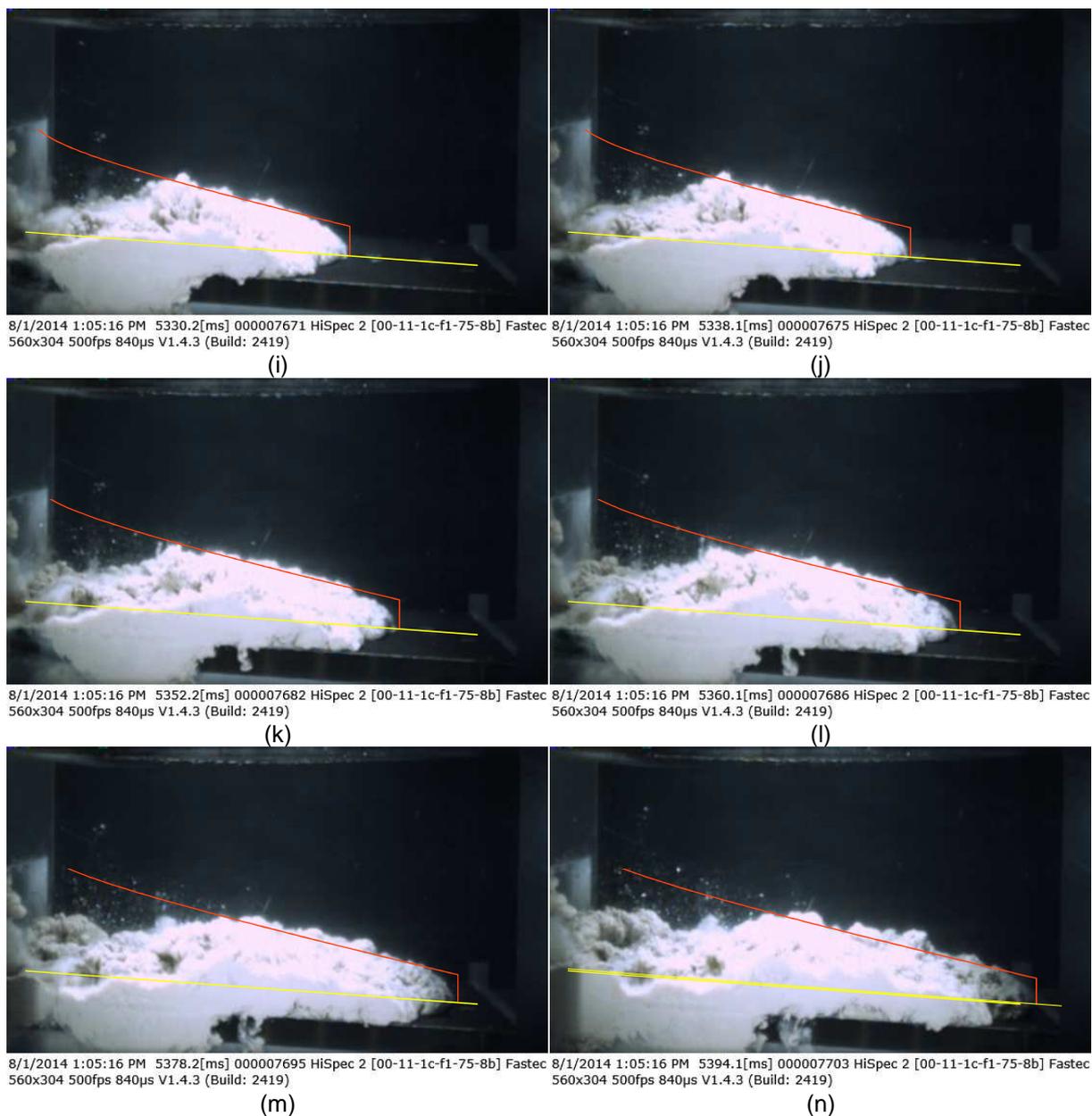


Figura 5.68 – Contornos do escoamento em diferentes instantes (em ms) – (i) 5330.2; (j) 5338.1; (k) 5352.2; (l) 5360.1; (m) 5378.1; (n) 5394.1

Considerando o tempo total de escoamento (0,429228 s), estimado através da Equação 5.17, e utilizando esse valor para estimar o deslocamento máximo do escoamento (0,673832 m), através da Equação 5.16, pode-se utilizar a Equação 5.18 para extrapolar o contorno do escoamento (Figura 5.69), levando-se em consideração os valores utilizados na calibração dessa equação.

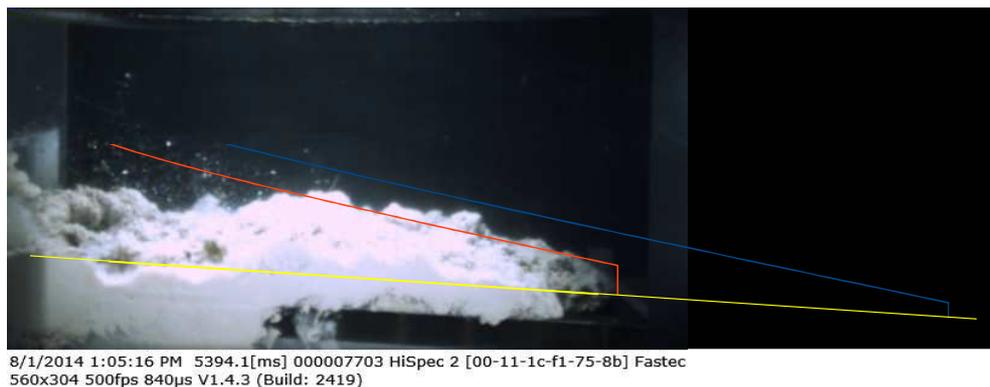


Figura 5.69 – Extrapolação do contorno do escoamento (linha contínua azul)

Na Figura 5.69, a linha contínua de cor vermelha ilustra o contorno do perfil no último instante do escoamento analisado (5394.1 ms), sendo a linha contínua de cor verde o contorno da extrapolação do escoamento no seu deslocamento máximo. Observa-se que a extrapolação do contorno permite ter uma ideia da morfologia do escoamento no final do seu deslocamento. Porém, deve-se salientar que a equação utilizada não foi determinada considerando a rampa e as condições do ensaio em centrífuga, sendo ela determinada através de análises numéricas utilizando um escoamento diferente.

6. CONCLUSÕES

Um estudo preliminar com base na revisão da literatura foi realizado para auxiliar na compreensão do comportamento e das características das correntes de densidade.

O programa CFDEMcoupling é uma ferramenta interessante para a simulação de correntes de densidade. Ele possibilita a utilização de DEM, para simular as partículas de solo, e CFD para simular o fluido ambiente. Porém, as simulações são demoradas para serem realizadas num único computador, se tornando mais interessante com a utilização de *clusters* ou supercomputadores.

O sistema Ubuntu, por diversas vezes apresentou instabilidades durante as simulações, o que dificultou e retardou o desenvolvimento das simulações. A utilização do CFDEMcoupling requer uma grande quantidade de processamento, demandando praticamente 100% da capacidade do processador durante as simulações. O pós-processamento utiliza quase 100% das memórias RAM e Swap. Além disso, os arquivos gerados são grandes, ocupando um espaço significativo do disco rígido (no caso desse trabalho, aproximadamente 80Gb por simulação).

O software Paraview se apresentou como uma excelente ferramenta para visualização e tratamento dos dados, sendo, um belo exemplo de programa de código livre disponível para o meio acadêmico.

Sobre a velocidade média da frente do escoamento para os fluxos subaéreos, verifica-se o crescimento dessa velocidade conforme a frente se desloca sobre a rampa até que se alcança um valor de velocidade máxima. A partir desse ponto, a velocidade diminui até que atinge um a curva de velocidade em função do tempo chega a um ponto de inflexão extrema, o qual limita o deslocamento primário da frente. Após esse ponto, ocorre um aumento da velocidade média até atingir um ponto de pico para em seguida a velocidade diminuir buscando a imobilidade.

No caso dos fluxos subaquáticos, a velocidade média da frente cresce até atingir um valor máximo. Após esse valor, a velocidade tende a cair com o aumento do deslocamento, sendo que essa diminuição se torna mais acentuada conforme há o aumento do coeficiente de atrito.

Os valores de velocidade média da frente do escoamento nos fluxos subaéreos são significativamente maiores que os encontrados nos fluxos subaquáticos analisados.

Em se tratando da quantidade de partículas que escoam pela rampa durante as simulações, observa-se, tanto nos fluxos subaéreos quanto nos subaquáticos, uma diminuição dessa quantidade conforme há o aumento do coeficiente de atrito das partículas, chegando-se a uma relação praticamente linear entre a quantidade de partículas escoadas e o coeficiente de atrito das partículas. Comparando-se os fluxos subaéreos com os subaquáticos, observa que os subaquáticos escoam em média 94,33% da quantidade de partículas que são escoadas pelos subaéreos.

Sobre os dados de vazão de partículas, conclui-se que há o crescimento da vazão em ambos os fluxos, subaéreos e subaquáticos, até o momento em que as partículas que estão sobre a rampa começam a se depositar. A partir desse momento, as partículas sobre a rampa passam a restringir à saída de novas partículas do reservatório, diminuindo a vazão até praticamente cessá-la.

Avaliando os máximos valores de vazão de partículas, verifica-se uma tendência de diminuição dos valores com o aumento do coeficiente de atrito das partículas. Também, se observa que os máximos valores alcançados pelos fluxos subaquáticos são, em média, iguais a 72,09% dos máximos valores alcançados pelos subaéreos.

Os dados obtidos nas simulações demonstram uma tendência de aumento da altura média máxima do escoamento nas regiões próximas ao início do escoamento e de diminuição dessa altura nas regiões mais distantes do início do escoamento conforme há o aumento do coeficiente de atrito das partículas. Esse comportamento ocorre tanto nos fluxos subaéreos quanto subaquáticos, sendo que os perfis de altura média máxima com o mesmo coeficiente de atrito das partículas são próximos se comparados os valores obtidos entre os fluxos subaéreos e subaquáticos.

Considerando as avaliações da altura média final do escoamento, nota-se que os perfis obtidos através das simulações é função do coeficiente de atrito das partículas.

Durante as análises das alturas médias dos fluxos foi possível determinar equações empíricas, tanto para os fluxos subaéreos quanto para os subaquáticos, a fim de auxiliar na estimativa do perfil vertical desses fluxos nos diferentes instantes de deslocamento da frente dos escoamentos. Essas equações mostram um ajuste satisfatório com os valores obtidos através das simulações, porém, deve-se sempre considerar que elas foram determinadas com base nos dados dessas simulações, levando-se em conta a faixa de variação do coeficiente de atrito das partículas (entre 0,54 e 0,85) e a inclinação da rampa (igual a 6°).

Realizando a avaliação da fração de volume ocupada pela fase líquida foi possível notar que ambos os fluxos, subaéreos e subaquáticos, se tornam menos concentrados conforme ocorre o seu deslocamento, porém os fluxos subaquáticos se apresentam mais concentrados que os fluxos subaéreos, onde se observa uma grande quantidade de partículas dispersas, principalmente na frente da corrente.

Em relação à velocidade das partículas nas regiões selecionadas para a análise, é possível verificar um comportamento padrão de velocidade em todos os fluxos, onde nos primeiros instantes da passagem do escoamento pela região analisada a velocidade máxima ocorre na altura média do escoamento. Com o passar do tempo, e o aumento da altura do escoamento, a velocidade máxima passa a ocorrer no topo. Além disso, as partículas atingem as maiores velocidades no início do escoamento.

Analisando a concentração das partículas, nota-se que na parte frontal do escoamento há uma maior concentração de partículas em altura intermediária próxima a base. Com a passagem da frente do escoamento, ocorre uma tendência de uniformização da concentração ao longo da altura do escoamento.

Considerando as análises de pressão sobre a superfície da rampa para os diversos fluxos simulados, observa-se um comportamento onde ocorre uma tendência de aumento dos valores da pressão final nas regiões próximas ao início do escoamento conforme há o aumento do coeficiente de atrito das partículas, enquanto que, nas regiões mais distantes ao início do escoamento ocorre uma tendência de aumento da pressão final com a diminuição do coeficiente de atrito das partículas. Esse comportamento ocorre tanto nos fluxos subaéreos quanto

subaquáticos, estando intimamente ligado aos valores de altura média final. Os fluxos subaquáticos apresentam valores menores de pressão sobre a superfície, se comparados aos fluxos subaquáticos, devido ao empuxo da água, o qual reduz o peso aparente das partículas.

Sobre as análises do acréscimo de pressão de água sobre a superfície da rampa, verifica-se que a Região 2 foi onde ocorreram as maiores variações de pressão de água devido à passagem do escoamento. Nota-se, em todas as regiões analisadas, que os valores de pressão máxima acontecem após a passagem das primeiras partículas sobre as regiões analisadas. Conforme ocorre a passagem do restante do escoamento a pressão de água tende a diminuir até retornar aos valores observados antes da passagem do escoamento. Entretanto, não foi notado um padrão claro de comportamento entre as diferentes regiões analisadas. Cabe uma análise melhor sobre esse item em trabalhos futuros.

Utilizando uma versão normalizada da equação empírica determinada neste trabalho para a estimativa do perfil de altura dos fluxos subaquáticos, foi realizada uma comparação entre os valores obtidos com essa equação e os resultados de um ensaio com modelo reduzido em centrífuga geotécnica. Essa comparação mostrou uma razoável aproximação com o contorno da frente do escoamento. Não foi observada uma boa aproximação com a parte final do escoamento, pois a equação utilizada foi determinada considerando um escoamento com maior volume de material.

Para a realização de trabalhos futuros, sugere-se a realização de análises numéricas utilizando diferentes coeficientes de atrito de partículas com diferentes inclinações de rampa. Também é interessante realizar simulações com rampas mais compridas, para poder simular os escoamentos do seu início até a parada por completo, a fim de avaliar o comportamento do perfil do fluxo e a sua deposição. Além disso, é interessante realizar uma análise específica sobre a pressão de água sobre a rampa, pois considerando os valores obtidos através das simulações não foi possível observar um comportamento claro entre as regiões analisadas.

O software CFDEMcoupling é uma ferramenta que permite ser mais explorada, podendo-se realizar simulações com um empacotamento de partículas

com diversos diâmetros, representando a curva granulométrica de um solo real. Porém, simulações com muitas partículas requerem uma ferramenta computacional mais potente (*cluster* ou supercomputador).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Absi, E. (1971) Théorie des equivalences-determination de quelques éléments types. *Proceedings of L'institut Technique Du Balument el dès Travau Publics*. n. 281: 83-86.
- Acosta, E.A. (2015) Simulação de instabilidade de taludes submarinos usando modelagem centrífuga. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Rio de Janeiro – RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE/UFRJ.
- Ajiz, M.A., Jennings, A. (1984) A robust incomplete Choleski-conjugate gradient algorithm. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. v. 20: 949-966.
- Alexander, J., Mulder, T. (2002) Experimental quasi-steady density currents. *Marine Geology*, Amsterdam, 186: 195-210.
- Alvarado, L.A.S. (2006) *Simulação bidimensional de corridas de detritos usando o método de elementos discretos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Rio de Janeiro – RJ, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, 154p.
- Baas, J.H., Kesteren, W.V., Postma, G. (2004) Deposits of depletive high-density turbidity currents: a flume analogue of bed geometric, structure and texture. *Sedimentology*, Oxford, v. 51: 1053-1088.
- Bagnold, R.A. (1954) Experiments on a Gravity-Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. London. Vol. 225, n. 1160: 49-63.
- Bagnold, R.A. (1962) Auto-suspension of transported sediment: turbidity currents. *Proceedings of the Royal Society of London*. London, n. 265: 315-319.
- Boffo, C.H. (2010) *Caracterização física de correntes de densidade em ambientes salinos sob diferentes contrastes de densidades*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – IPH/UFRGS, 121p.

- Bouma, A.H. (1962) *Sedimentology of some flysch deposits: a graphic approach to facies interpretation*. Amsterdam: Elsevier; 168p.
- Costa, A.M., Amaral, C.S., Kowsmann, R.O. (1997) Geotechnical-geological appraisal of the Marlin submarine slope. *In: Azevedo, R.F., Vargas, E.A., Ribeiro e Souza, L.M., Matos Fernandes, M. (eds.), Applications of Computational Mechanics in Geotechnical Engineering*. 1ª Ed. Rotterdam: A.A. Balkema, v. 1: 237-262.
- Crochet, M.J., Pilate, G. (1976) Plane flow of a fluid of second grade through a contraction. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, v. 1: 247-258.
- Cundall, P.A., Strack, D.L. A discrete numerical model for granular assemblies. *Geotechnique*. v. 1: 47-65.
- Del Ray, A.C., Viana, A.R.; Manica, R.; Borges, A.L.O.; Maestri, R.D (2003) Impact of flow oscillations in the depositional geometry and architectural elements distribution of sand-rich density current-driven deposits. *In: ENERGY: Our Monumental Task*. AAPG - Annual Meeting of the American Association of Petroleum Geologists. Salt Lake City-Utah/EUA.
- Del Rey, A.C. (2006) *Simulação física de processos gravitacionais subaquosos: uma aproximação para o entendimento da sedimentação marinha profunda*. Tese (Doutorado em Geociências) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – IPH/UFRGS, 229p.
- Dott Jr., R.H. (1963) Dynamics of subaqueous gravity depositional processes. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. v. 47: 104-128.
- Eisenmann, E.G.G. (2013) *Um modelo matemático de otimização para geração de energia elétrica a partir de correntes hidrodinâmicas*. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) – Rio de Janeiro – RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 128p.
- Ellison, T.H., Turner, J.S. (1959). Turbulent entrainment in stratified flows. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 6: 423-448.
- Elverhøi, A., Issler, D., De Blasio, F.V., Ilstad, T., Harbitz, C.B., Gauer, P. (2005) Emerging insights into the dynamics of submarine debris flows. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. v. 5: 633-648.

- Fabian, S. (2002) *Modelagem física de correntes de densidade conservativas em canal de declividade variável*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – IPH/UFRGS, 72p.
- Fávero, J.L. (2009) *Simulação de escoamentos viscoelásticos: Desenvolvimento de uma metodologia de análise utilizando o software OpenFoam e equações constitutivas diferenciais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Porto Alegre – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 127p.
- Felletti, F., Carruba, S., Casnedi, R. (2009) Sustained turbidity currents: evidence from the Pliocene periadriatic foredeep (Cellino Basin, Central Italy). *In*: Kneller, B.C., Martinsen, O.J., McCaffrey, B., *External controls on deep-water depositional systems*. SEPM Society for Sedimentary Geology, 402p.
- Ferreira, L.R.D. (2010) *Desenvolvimento de uma bancada de testes para validação de um tanque de ondas numérico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Niterói – RJ, Universidade Federal Fluminense – UFF, 98p.
- Figueiredo, F.P. (2010) *Simulação numérica e computacional de correntes de turbidez de baixa densidade para sedimentação de bacias*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Rio de Janeiro – RJ, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, 109p.
- Fischer, R.V. (1983) Flow transformations in sediment gravity flows. *Geology*, Boulder, v. 11: 273-274.
- Giacomel, R.S. (2005) *Avaliação de depósitos turbidíticos gerados através de simulação de fluxos com diferentes concentrações de sedimentos*. Monografia (Graduação em Geologia do Petróleo) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio grande do Sul – IGEO/UFRGS, 56p.
- Goniva, C., Kloss, C., Hager, A., Pirker, S. (2010) An Open Source CFD-DEM Perspective. *Proceeding of OpenFOAM Workshop*. Gothenburg: 22-24.
- Hampton, M.A., Lee, H.J., Locat, J. (1996) Submarine landslides. *Reviews of Geophysics*. 34(1): 33-59.
- Hance, J.J. (2003) *Development of a database and assessment of seafloor slope stability based on published literature*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Austin – TX, The University of Texas at Austin – OTRC/UT, 245p.

- Hrennikoff, A (1941) Solution of Problems of Elasticity by the Frame-Work Method. *ASME Journal of Applied Mechanics*, v. 8: A619-A715
- Ilstad, T., Marr, J.G., Elverhøi, A., Harbitz, C.B. (2004) Laboratory studies of subaqueous debris flows by measurements of pore-fluid pressure and total stress. *Marine Geology*. v. 213: 403-414.
- Issa, R.I (1986) Solution of the implicit discretised fluid flow equations by operator-splitting. *Journal of Computational Physics*. v. 63: 40-65.
- Jacobs, D.A.H. (1980). A summary of subroutines and packages (employing the strongly implicit procedure) for solving elliptic and parabolic partial differential equations. Report RD/L/N 55/80, Central Electricity Research Laboratories.
- Jasak H. (1996) *Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, London, 394p.
- Kneller, B., Branney, M.J. (1995) Sustained high-density turbidity currents and the deposition of thick massive sands. *Sedimentology*. Oxford, v.42: 607-616.
- Kneller, B.C., Bennett, S.J., & McCaffrey, W.D. (1999). Velocity structure, turbulence and fluid stresses in experimental gravity currents. *Journal of Geophysical Research*. v. 104: 5381–5391.
- Kneller, B., Buckee, C. (2000) The structure and fluid mechanics of turbidity currents: a review of some recent studies and their geological implications. *Sedimentology*. Oxford, v.47, Suppl. 1: 62-94.
- Kuenen, P.H.H., Migliorini, C.I. (1950) Turbidity currents as a cause of graded bedding. *Journal of Geology*, v. 58: 91-127.
- Lee, J., Zhang, J., Lu, C.C (2003) Incomplete LU preconditioning for large scale dense complex linear systems from electromagnetic wave scattering problems. *Journal of Computational Physics*. v. 185: 158-175.
- Liu, X.D., Osher, S., Chan, T. (1994) Weighted essentially non-oscillatory schemes. *Journal of Computational Physics*. v. 115: 200-212.
- Locat, J., Lee, H.J. (2000) Submarine landslides: advances and challenges. *Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides*. Cardiff: A.A. Balkema, v. 1: 1-30.

- Lowe, D.R. (1982) Sediment gravity flows: II. Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Journal of Sedimentary Petrology*. Tulsa, v. 52: 279-297.
- Manica, R. (2009) *Geração de correntes de turbidez de alta densidade: condicionantes hidráulicos e deposicionais*. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – IPH/UFRGS, 391p.
- Middleton, G.V. (1966) Experiments of density and turbidity currents I. Motion of the head *Canadian Journal of Earth Sciences*. Ottawa, v. 3: M59-M68.
- Middleton, G.V. (1967) Experiments on density and turbidity currents: III. Deposition of sediment. *Canadian Journal of Earth Sciences*. v. 4: 475-505.
- Middleton, G.V. (1970) Experiments studies related to problems of flysch sedimentation. *Flysch Sedimentology in North America*. In: Lajoie, J. (Ed.), *Flysch Sedimentology in North America*, Geological Association of Canada Special Paper, n. 7: 253-272.
- Middleton, G.V. (1993) Sediment deposition from turbidity currents. *Annual Review of Earth Planet Science*. Palo Alto, v. 21: 89-114.
- Middleton, G.V., Hampton, M.A. (1976) Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity flows. In: *Marine Sediment Transport and Environmental Management*. New York, Willey: 197-218.
- Minkowycz, W.J., Sparrow, W.M., Schneider, G.E., Pletcher, R.H. *Handbook of Numerical Heat Transfer*. New York: Wiley-Interscience, 1024p.
- Mohring, D., Marr, J.G. (2003) Constraining the efficiency of turbidity current generation from submarine debris flows and slides using laboratory experiments. *Marine and Petroleum Geology*. v. 20: 883-899.
- Mulder, T., Alexander, J. (2001) The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits. *Sedimentology*. Oxford, v. 48: 269-299.
- Muniz, A.R. (2003) *Desenvolvimento de um método de volumes finitos de alta ordem para a simulação de escoamentos de fluidos viscoelásticos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 141p.

- Mutti, E., Tinterri, R., Remancha, E., Mavilla, N., Angela, S., Faval, L. (1999) *An introduction to the analysis of ancient turbidite basins from an outcrop perspective*. Tulsa: AAPG 86p.
- O'Sullivan, C. (2011) *Particulate discrete element modelling: A geomechanics perspective. Volume 4 of applied geotechnics*. 1^a Ed. Londres: Taylor & Francis, 576p.
- Parker, G., Fukushima, Y., Pantin, H.M. (1986) Self accelerating turbidity currents. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 171: 145-181.
- Parsons, J.D., Friedrichs, C.T., Traykovski, P., Mohrig, D., Imran, J., Syvitski, J.P.M., Parker, G., Buttles, J., Garcia, M.H. (2006) The mechanics of marine sediment gravity flows. *In: Nittroues, C.A., Austin, J., Field, M. Steckler, M.; Syvitski, J.P.M., Wiberg, P. (Eds.), Continental margin sedimentation: Transport to sequence*. Blackwell, Oxford, in press.
- Patankar, S.V.; Spalding, D.B. (1972) A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. v. 15: p.1787-1806.
- Patankar, S.V. (1980) *Numerical heat transfer and fluid flow - Series in Computational Methods in Mechanics and Thermal Sciences*. New York: McGraw-Hill Book Company, 197p.
- Perera, M.G.N, Walters, K. (1977) Long-range memory effects in flows involving abrupt changes in geometry. Part I. Flows associated with L-shaped and T-shaped geometries. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. v. 2: 49-81.
- Peric, M., Kessler, R., Scheuerer, G. (1988) Comparison of finite-volume numerical methods with staggered and collocated grids. *Computers and Fluids*, v. 16: 389–403.
- Postma, G., Nemec, W., Kleinspehn, K.L. (1988) Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement. *Sedimentary Geology*. v. 58: 47-61.
- Poulos, H.G. (1988) *Marine geotechnics*. 1^a Ed. Londres: Routledge, 473p.
- Pratson, L.F., Imran, J., Parker, G., Syvitski, J.P.M., Hutton, E. (2000) Dbris flows vs. Turbidity currents: A modeling comparing of their dynamics and deposits. *In: Bouma, A.H., Stone, C.G.: Fine-grained Turbidite Systems, AAPG Mem, 72: 57-72*.

- Puhl, E. (2007) *Parametrização de ensaios de simulação física de correntes de densidade*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – IPH/UFRGS, 104p.
- Puhl, E. (2012) *Morfodinâmica e condição de equilíbrio do leito sob a ação de correntes de turbidez*. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – IPH/UFRGS, 155p.
- Ravenne, C., Beghin, P. (1983) Apport des experiences en canal à l'interprétation sédimentologique des depots de cones détritiques sous-marins. *Revue de l'I.F.P.*, v. 38: 279-297.
- Rhie, C.M., Chow, W.L. (1983) Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation. *American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, v. 21: 1525–1532.
- Rios, R.D. (2002) *Aplicação do Método dos Elementos Discretos em estruturas de concreto*. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 151p.
- Rusche, H. (2002) *Computational fluid dynamics of dispersed two-phase flows at high phase fraction*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Imperial College of Science, Technology and Medicine, University of London, London.
- Schlichting, H. (1979) *Boundary layer theory*. 4ª Ed., New York: McGraw-Hill, 817p.
- Shanmugam, G. (1996) High-density turbidity currents: Are they sandy debris flows? *Journal of Sedimentary Research*. Tulsa, v. 66. n. 1: 2-10.
- Shanmugam, G. (2000) 50 years of the turbidite paradigm 1950s-1990s. Deep-water processes and facies models: a critical perspective. *Marine and Petroleum Geology*. Guilford, v. 17: 285-342.
- Silva, B.A. (2005) *Análise de estabilidade de taludes ao longo da rota de um duto submarino na Bacia de Campos, RJ*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Rio de Janeiro – RJ, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, 117p.

- Silva, L.F.L.R. (2008) *Desenvolvimento de metodologias para simulação de escoamentos polidispersos usando código livre*. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Rio de Janeiro – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, 244p.
- Simpson, J.E., Britter, R.E. (1979) The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface. *Journal of Fluid Mechanics*. v. 94: 477-495.
- Simpson, J.E. (1997) *Gravity currents in the environment and the laboratory*. Cambridge University Press. 244p.
- Távora, D.I.M. (2011) *Estudo numérico de jato circular espiralado incidente em uma placa aquecida*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Rio de Janeiro – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC/Rio, 211p.
- Terzaghi, K. (1956) Varieties of submarine slope failure. *Proceedings of the 8th Texas Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, University of Texas, Austin, Bureau of Engineering Research, Special Publication No. 29: 1-41.
- Vorst, H.A. (1992) Bi-CGSTAB: A fast and smoothly converging variant of Bi-CG for the solution of nonsymmetric linear systems. *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing*. v. 13: 631–644.
- Wan, Z., Wang, Z. (1994) Hyperconcentrated flow. *IAHR Monograph Series*, A.A. Balkema, Rotterdam, 290p.
- Ward, S.N., Day, S. (2002) Suboceanic landslides. In: Licker, M.D., McGraw-Hill Staff (eds.), *2002 Yearbook of Science and Technology*, 1ª Ed. New York: McGraw-Hill: 349-352.
- Winterwerp, J.C. (2001) Stratification effects by cohesive and non-cohesive sediment. *Journal Geophysics Research*, 106: 559-574.

ANEXOS

A – Perfis de altura ao longo do deslocamento dos fluxos subaéreos

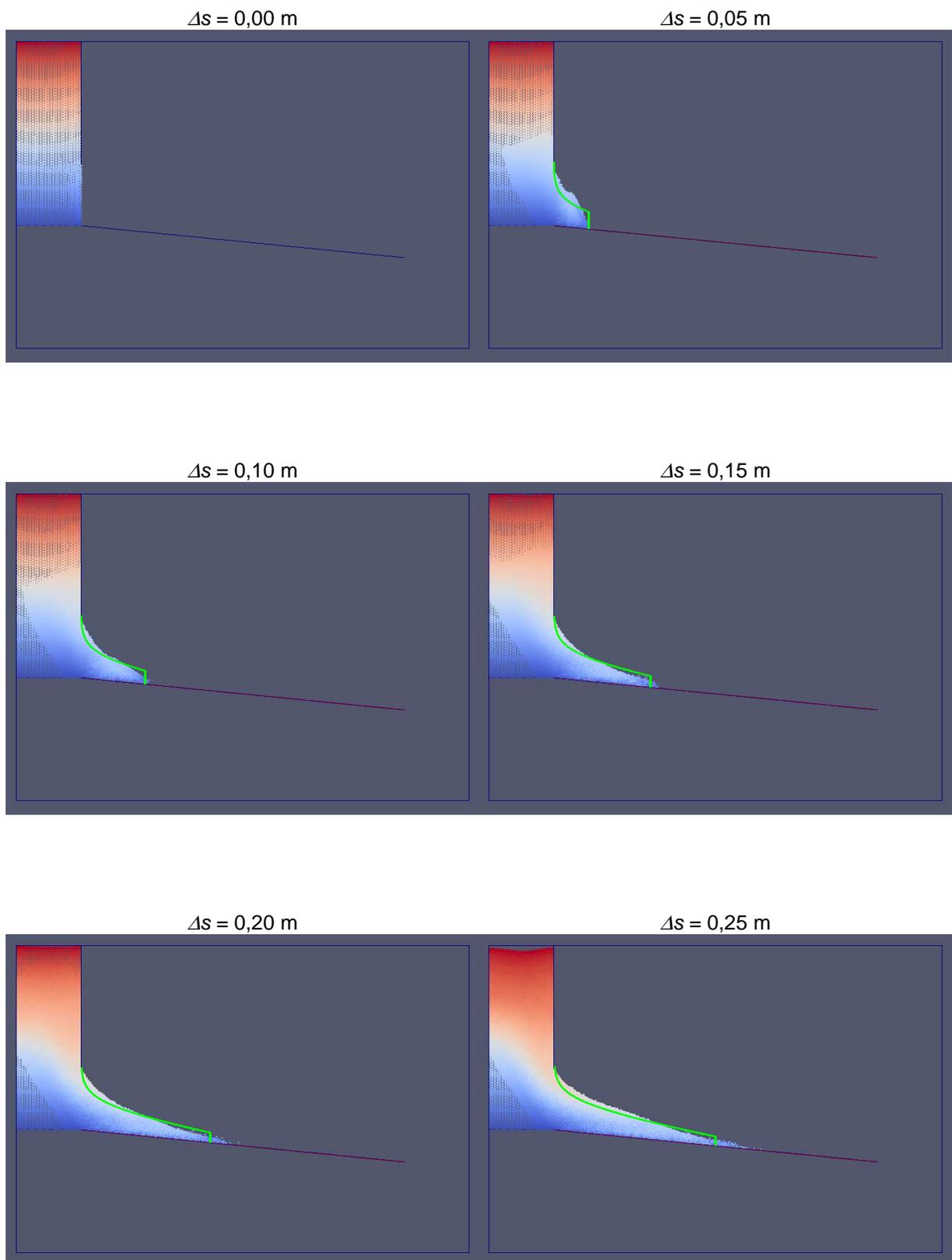


Figura A.1 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m

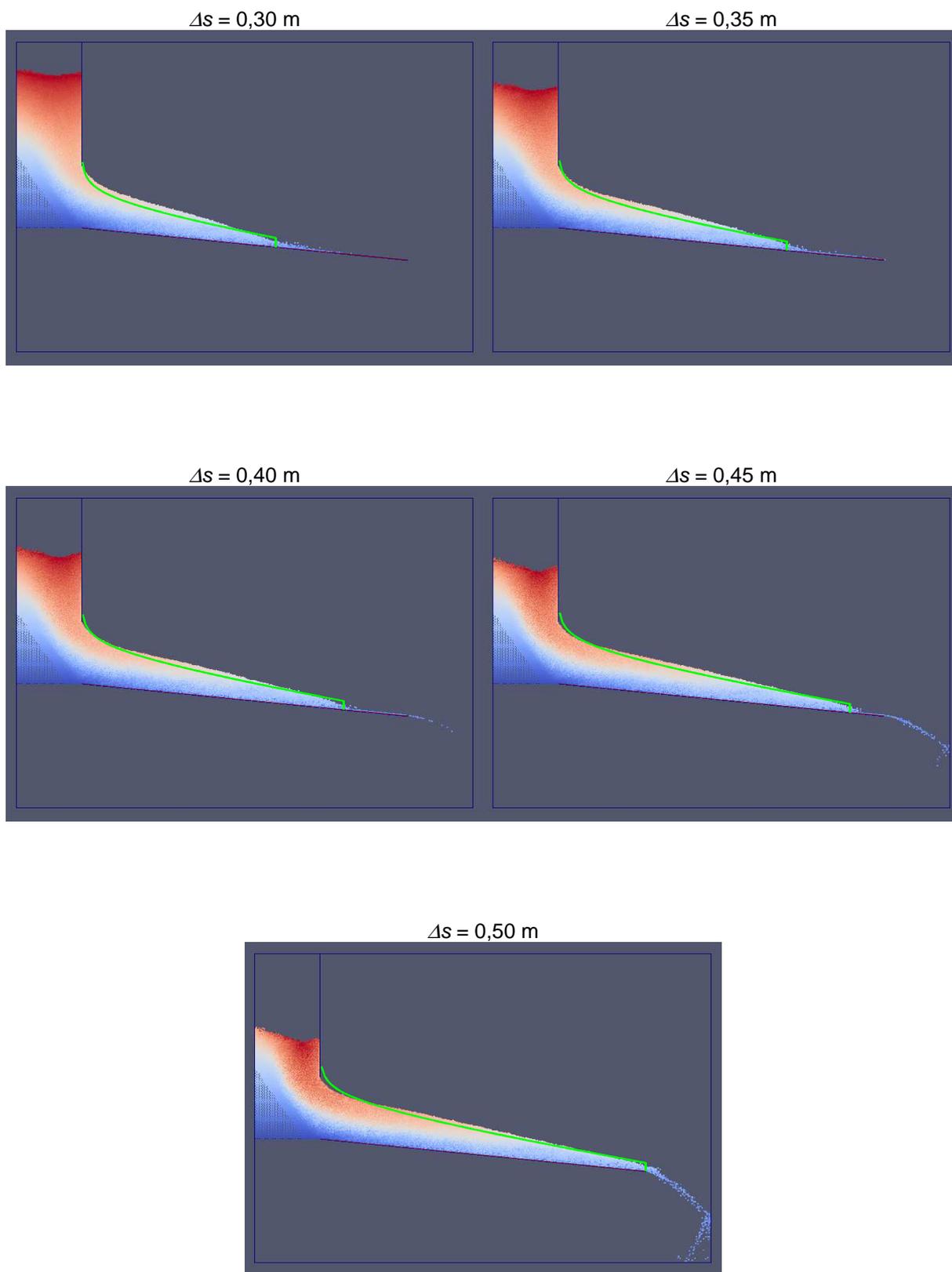


Figura A.2 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m

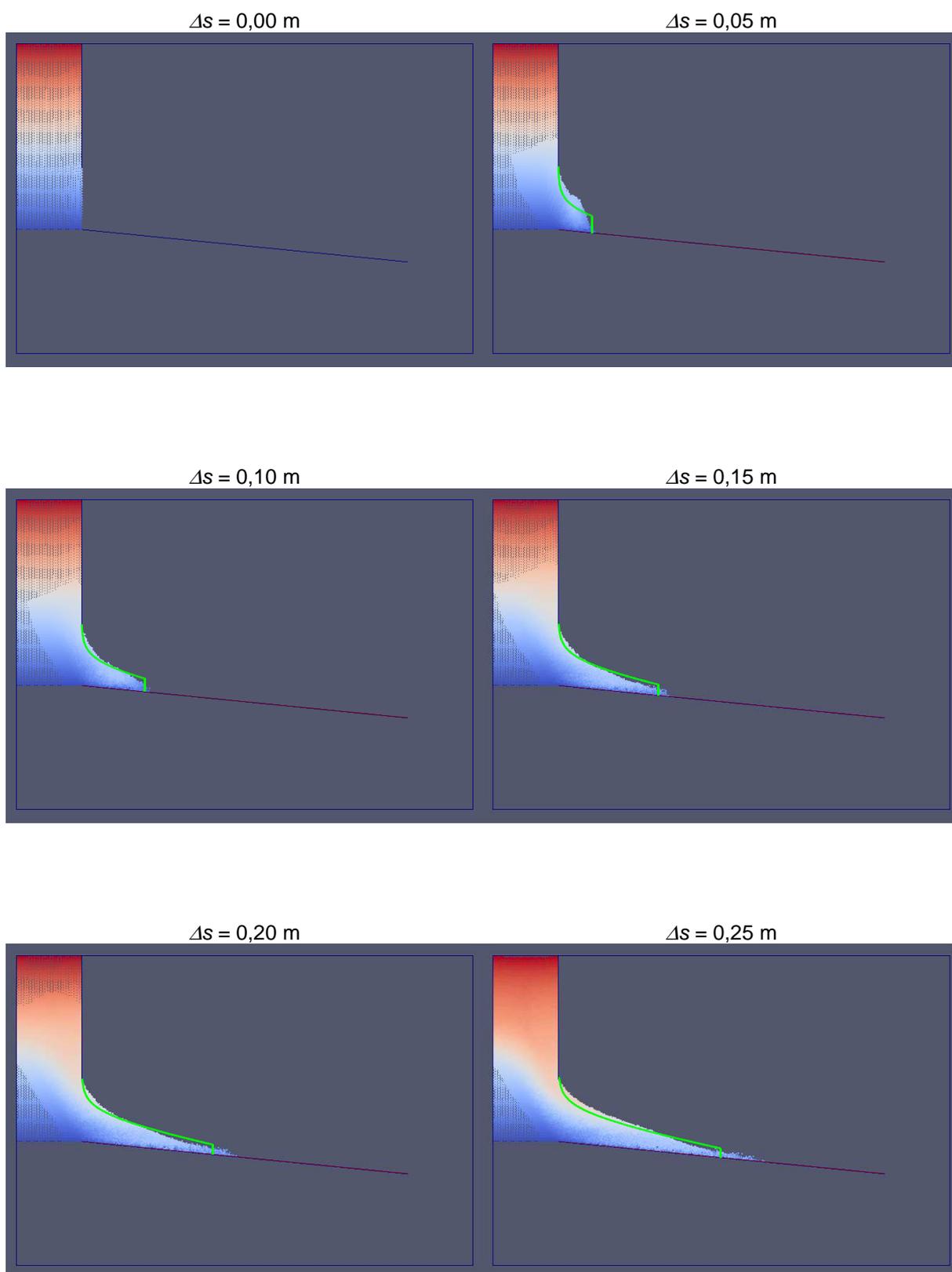


Figura A.3 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m

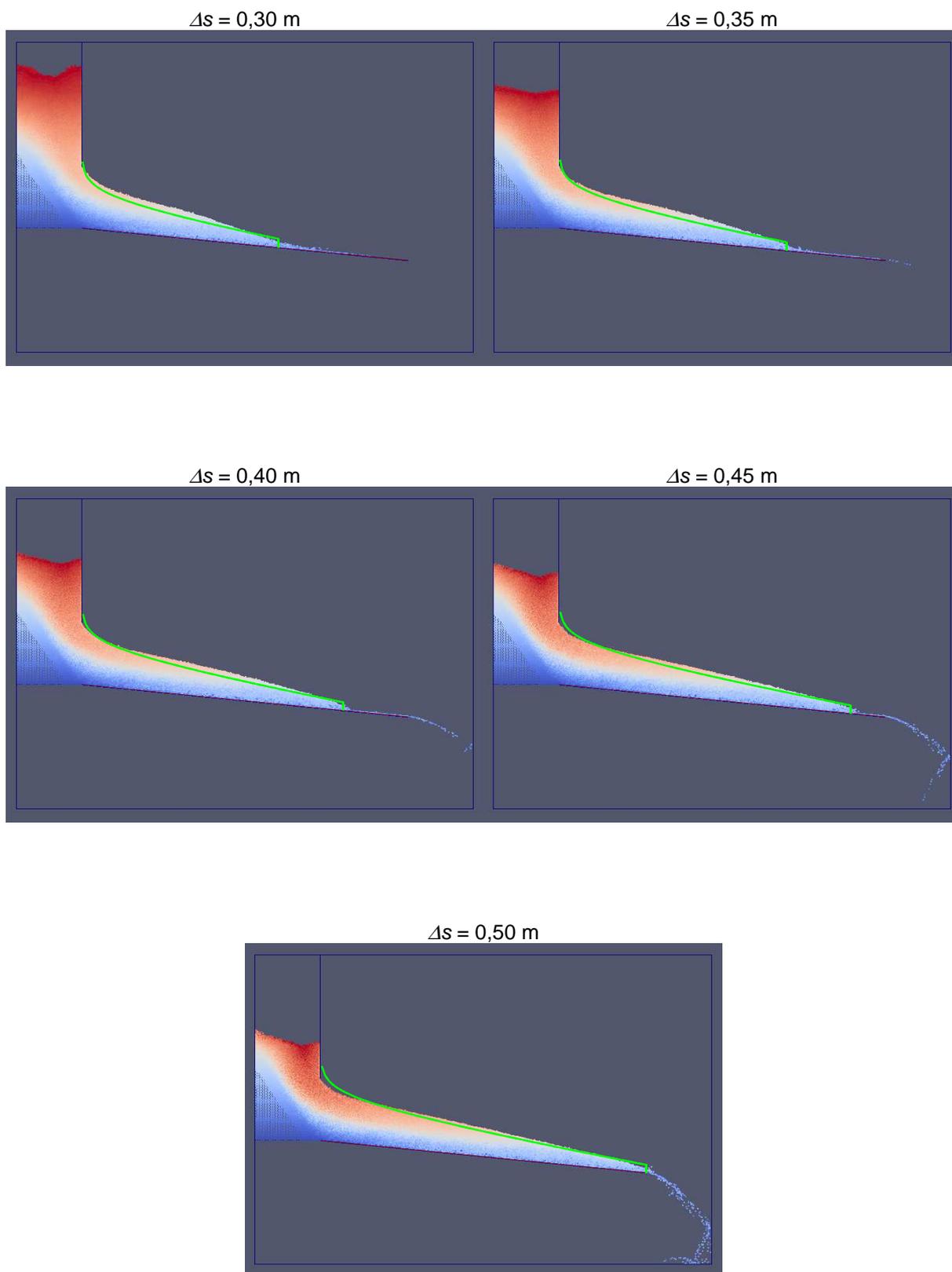


Figura A.4 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m

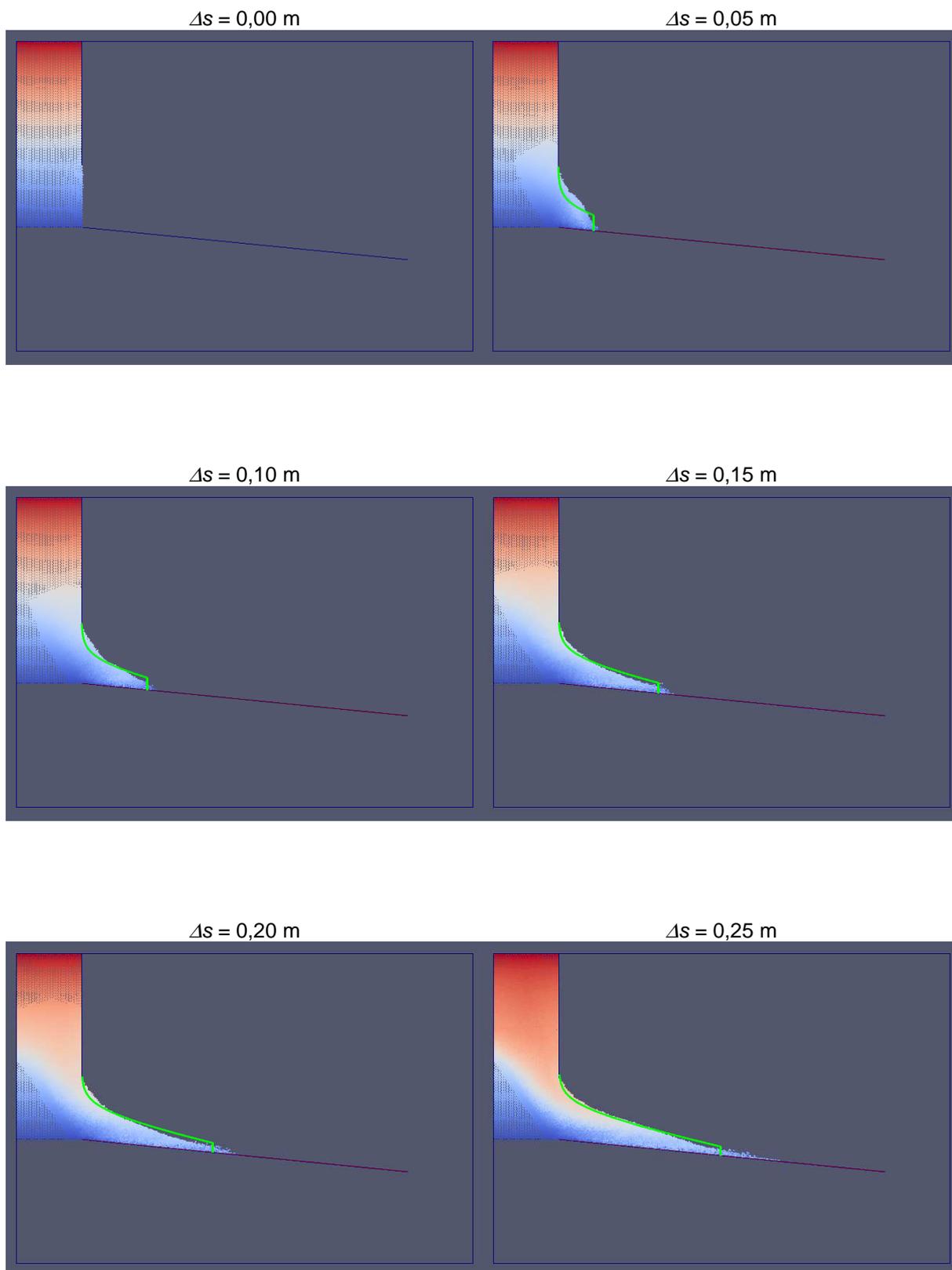


Figura A.5 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m

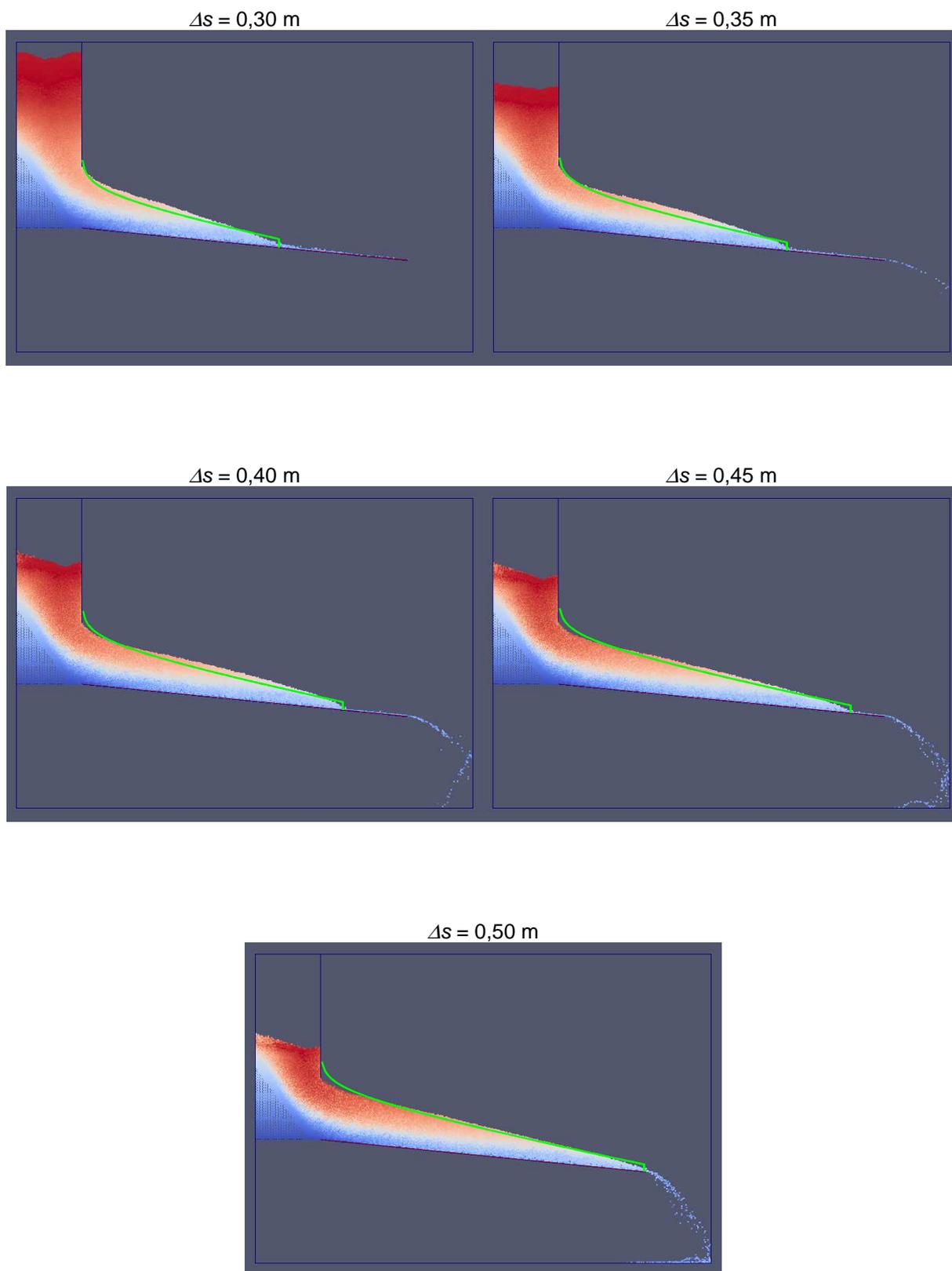


Figura A.6 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m

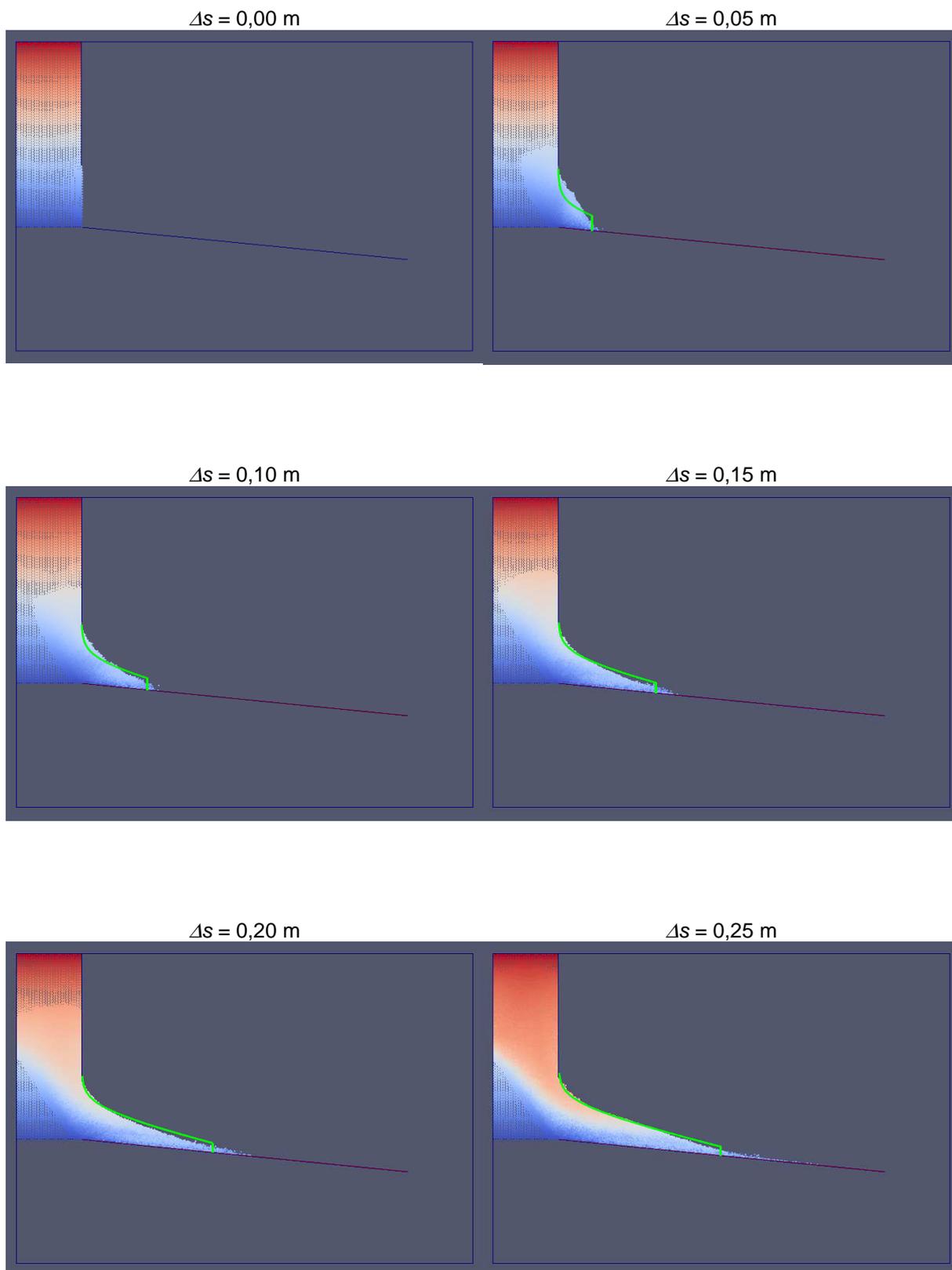


Figura A.7 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m

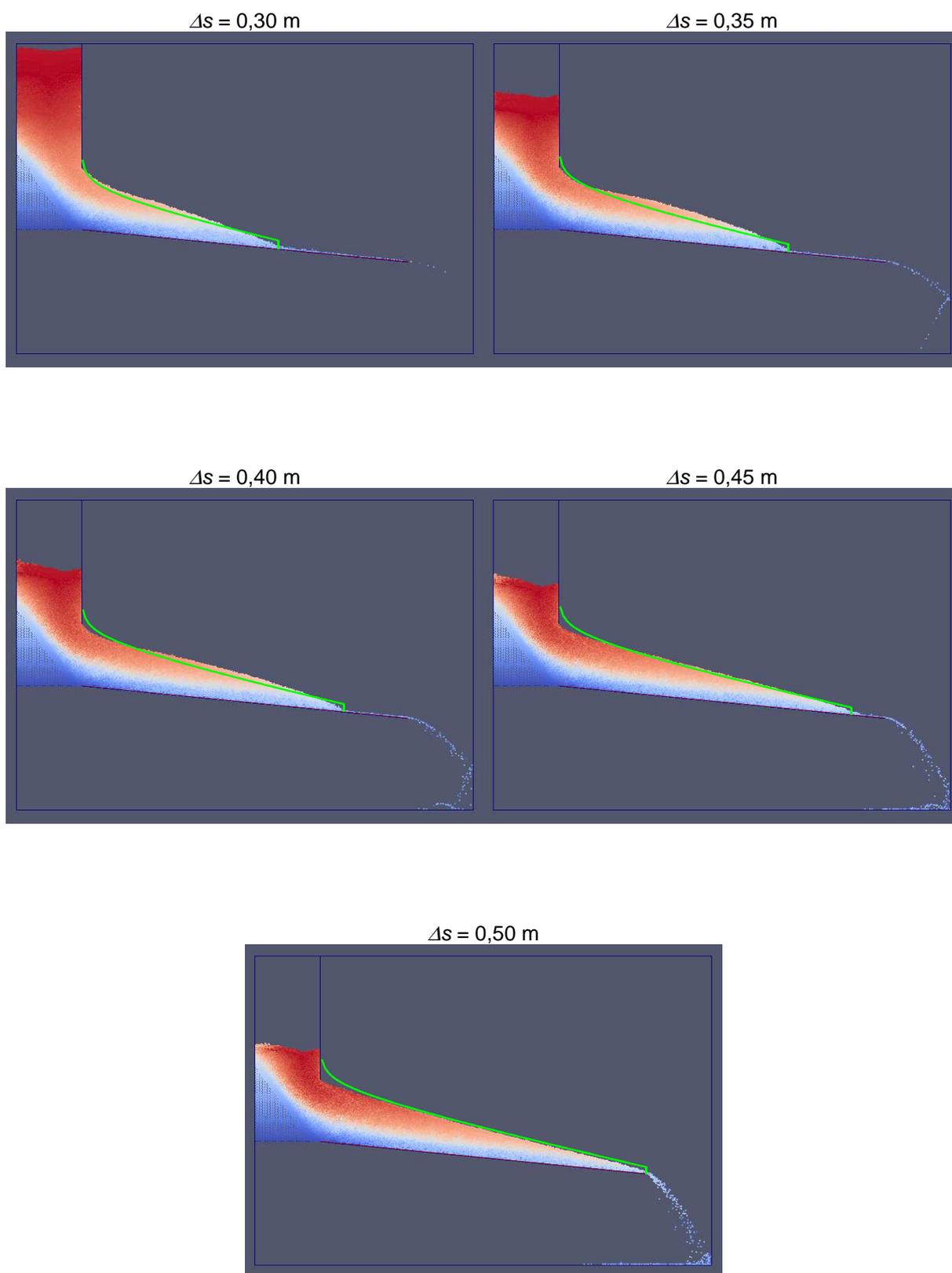


Figura A.8 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m

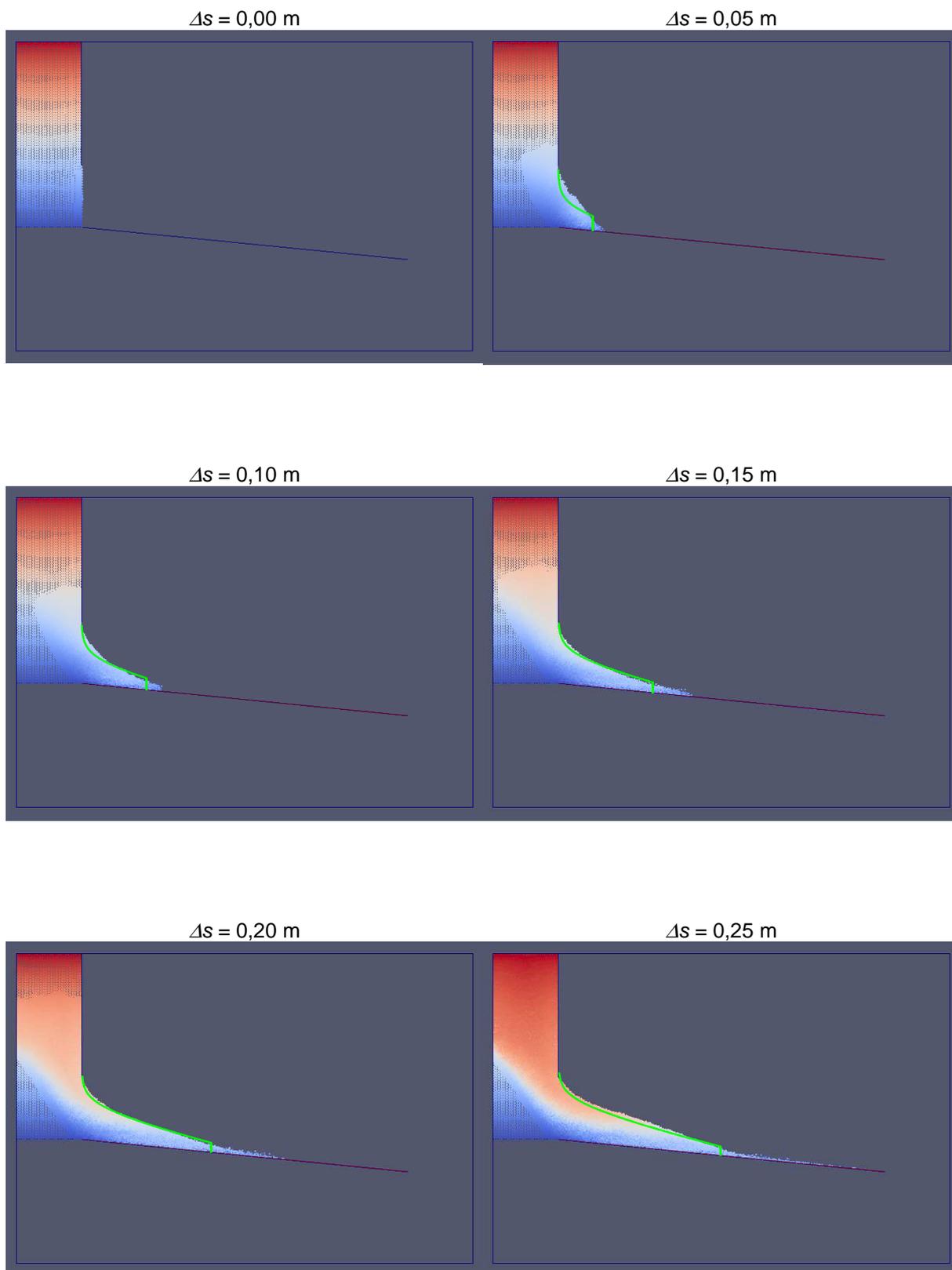


Figura A.9 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m

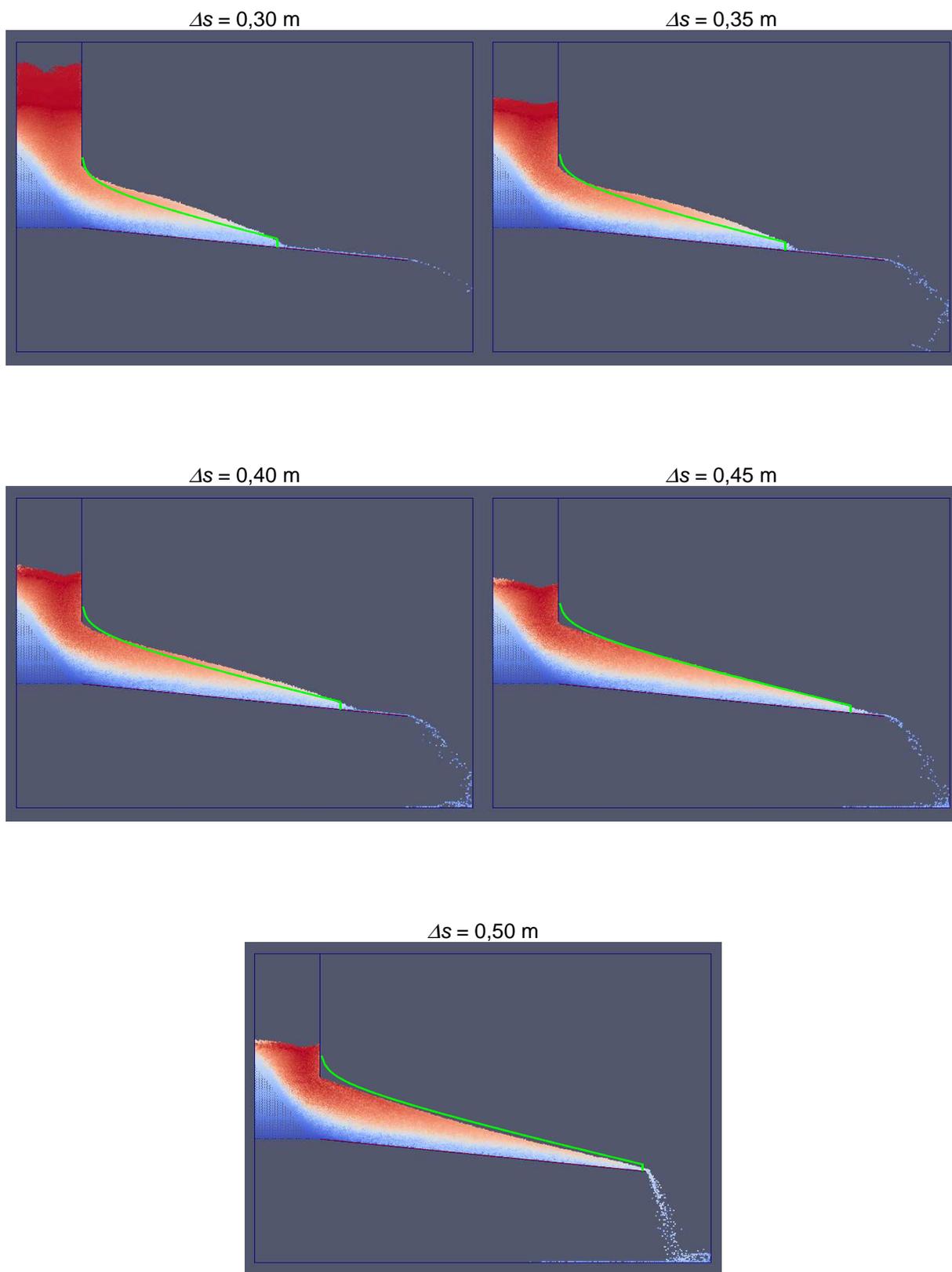


Figura A.10 – Imagens do escoamento subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m

B – Perfis de altura ao longo do deslocamento dos fluxos subaquáticos

176

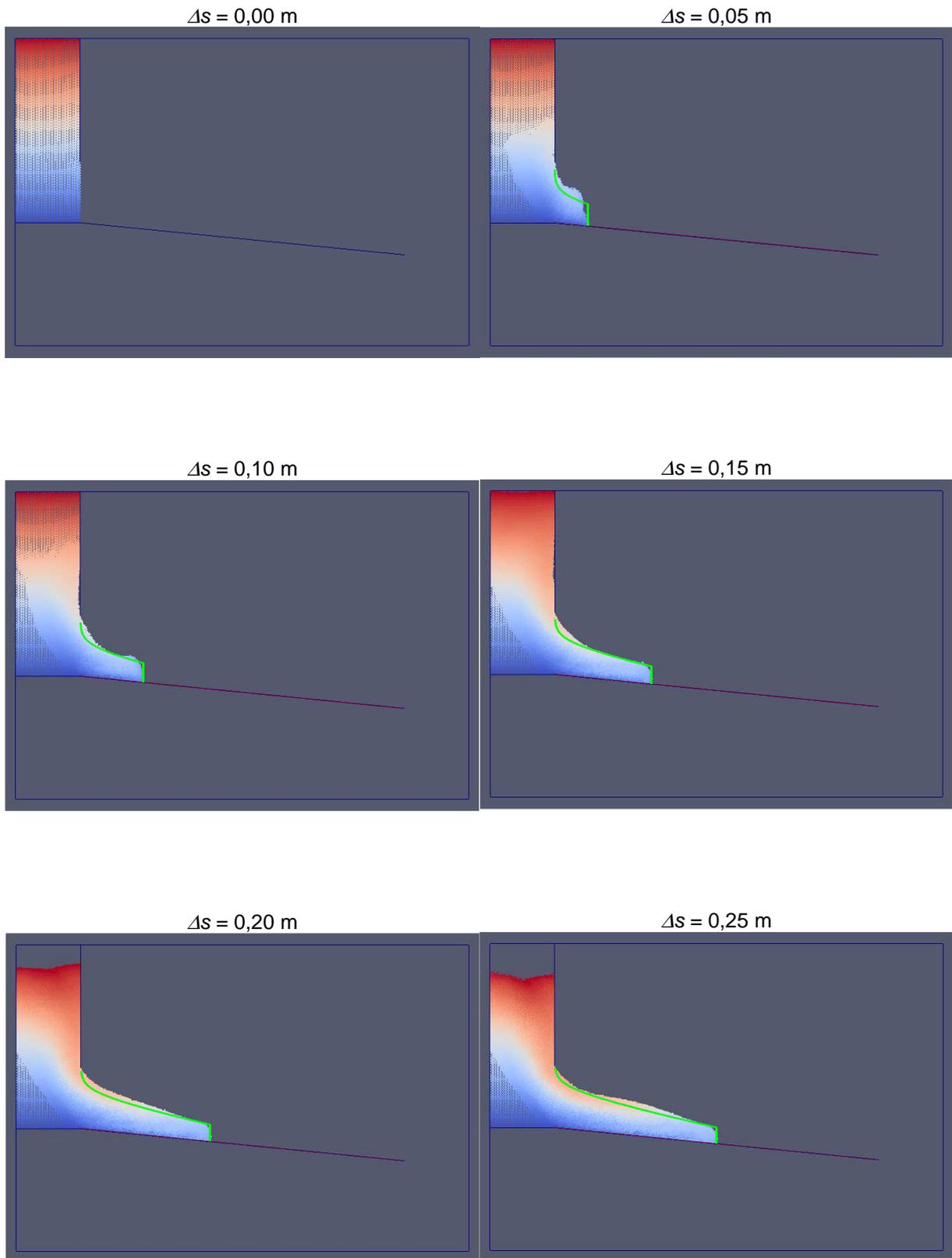


Figura B.1 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m

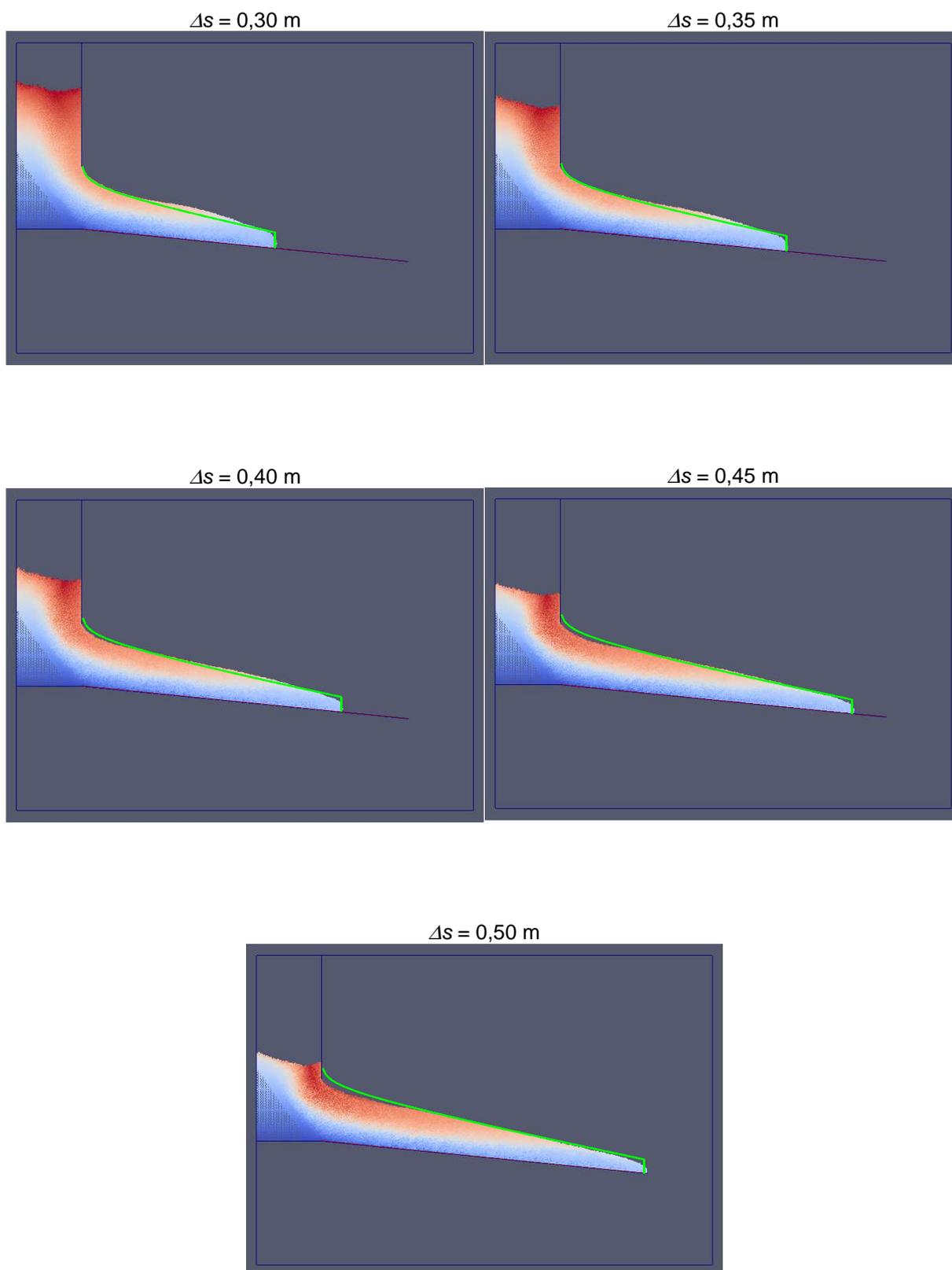


Figura B.2 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50

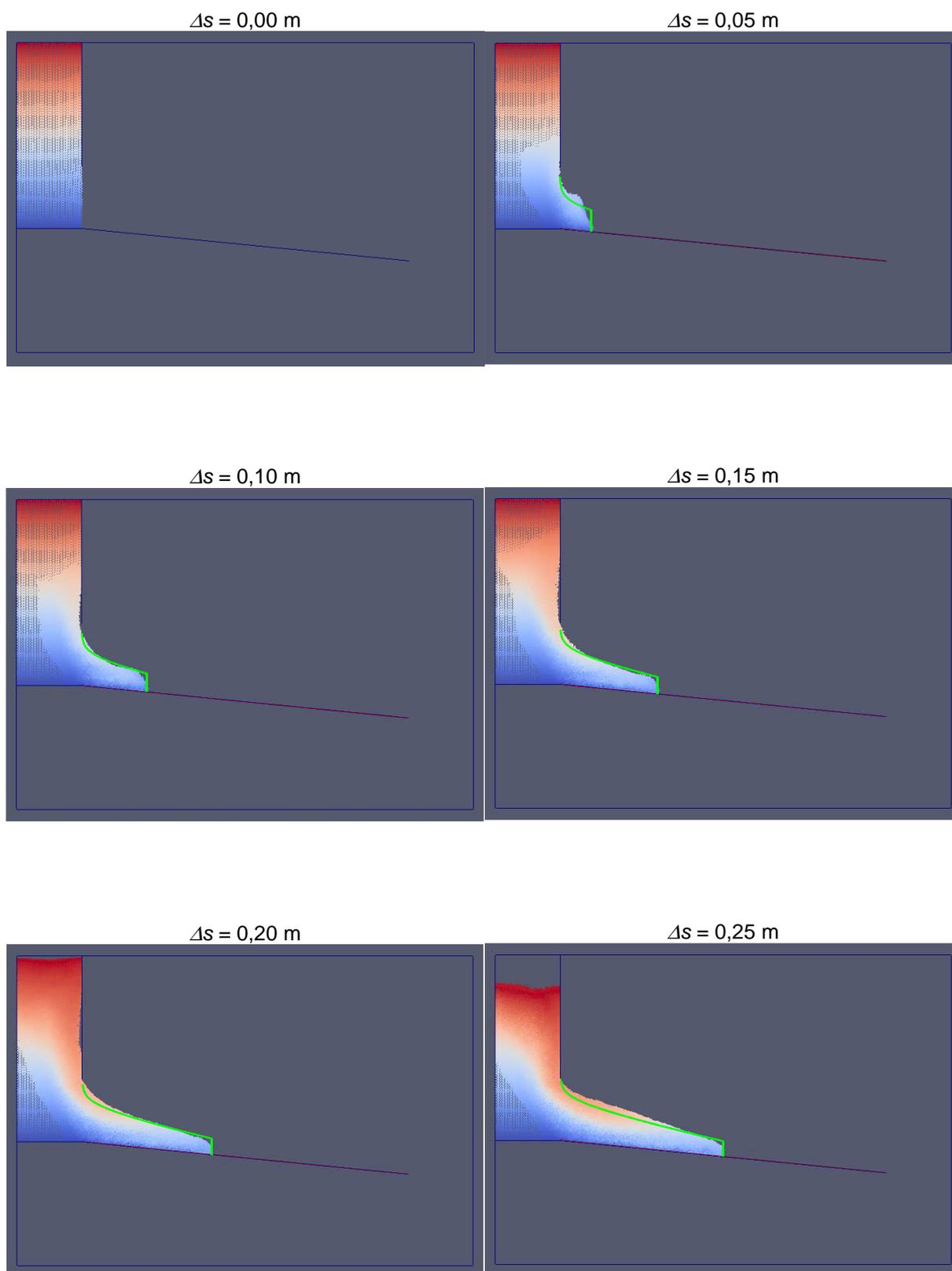


Figura B.3 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m

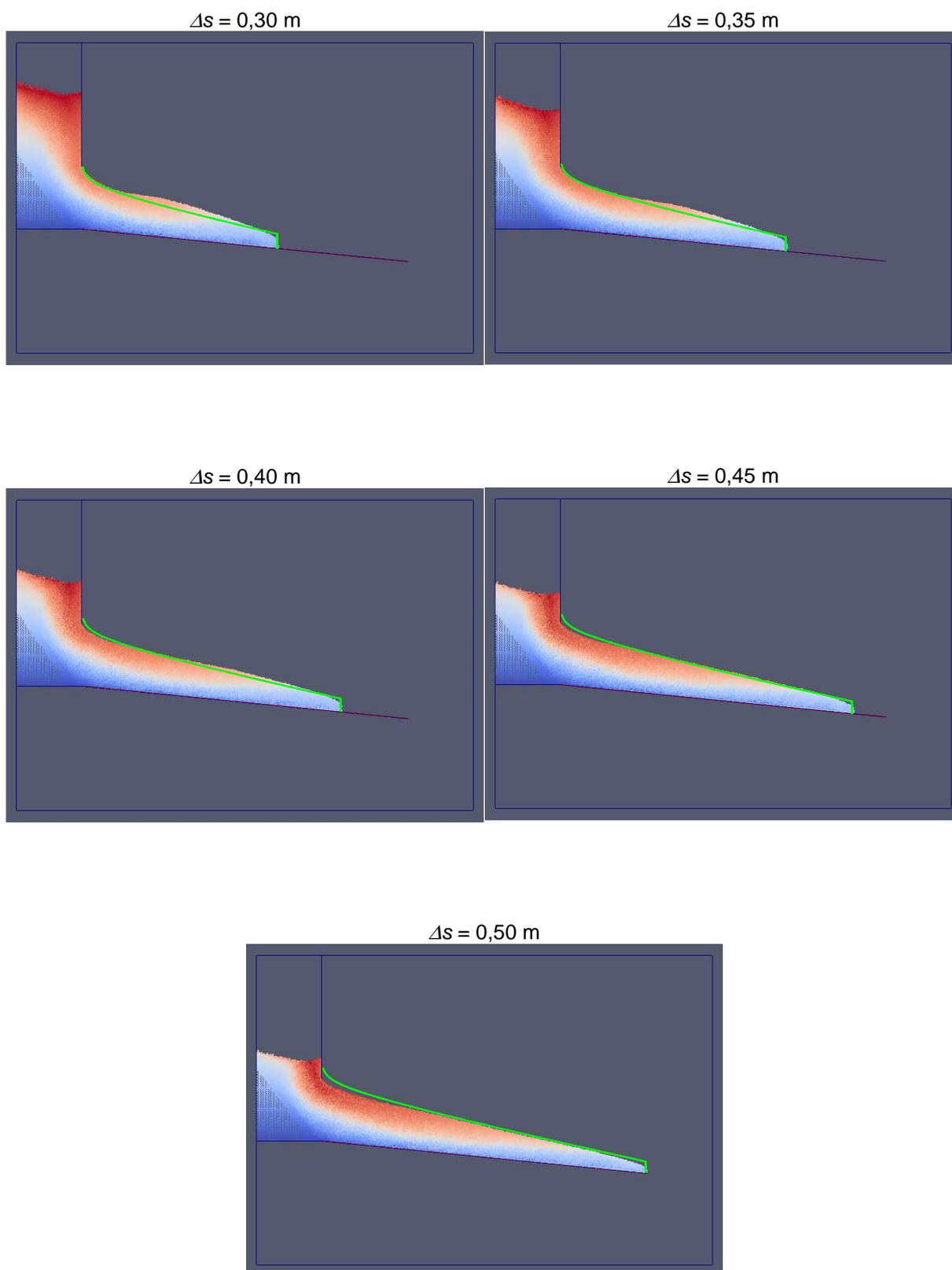


Figura B.4 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m

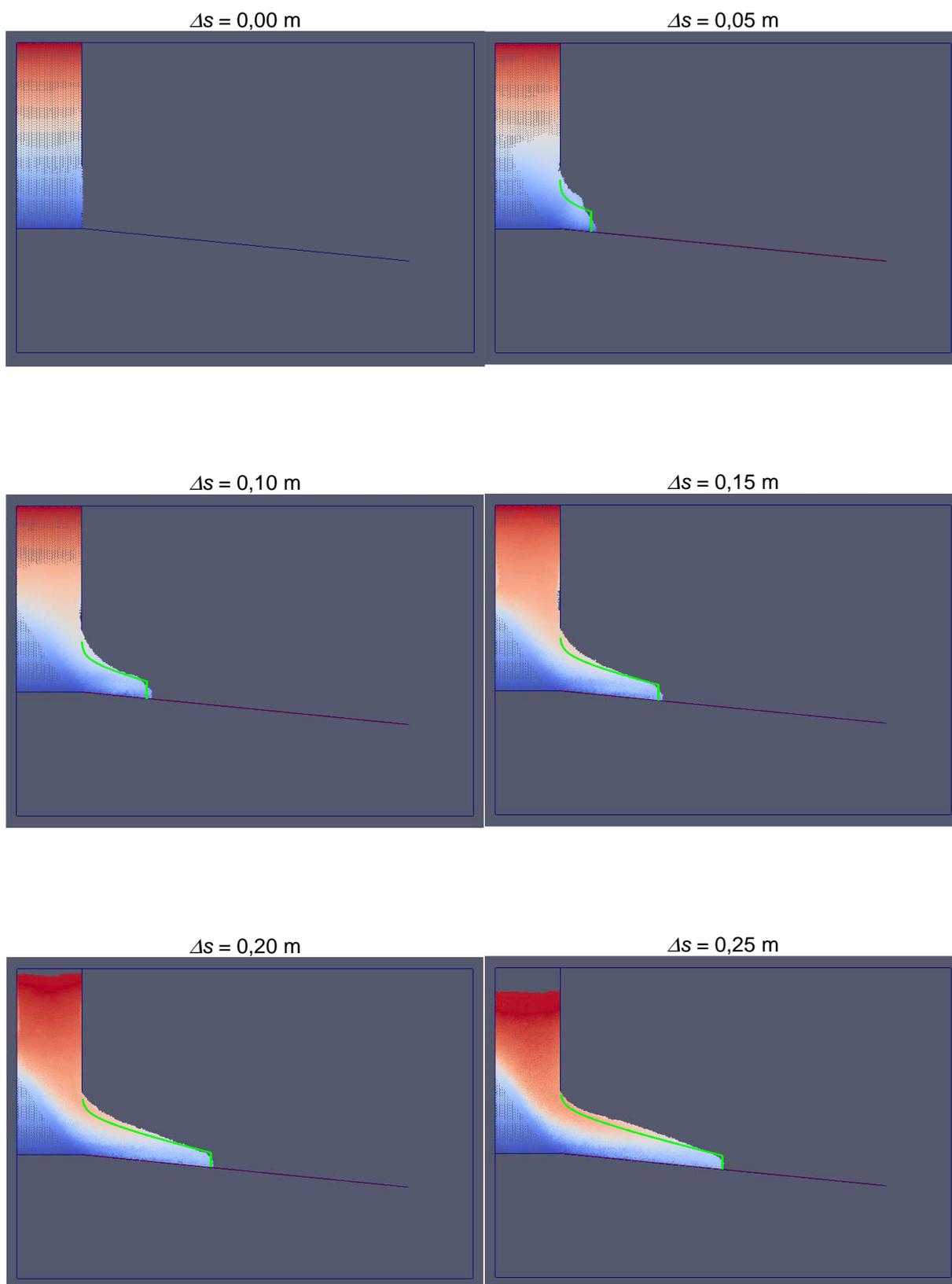


Figura B.5 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m

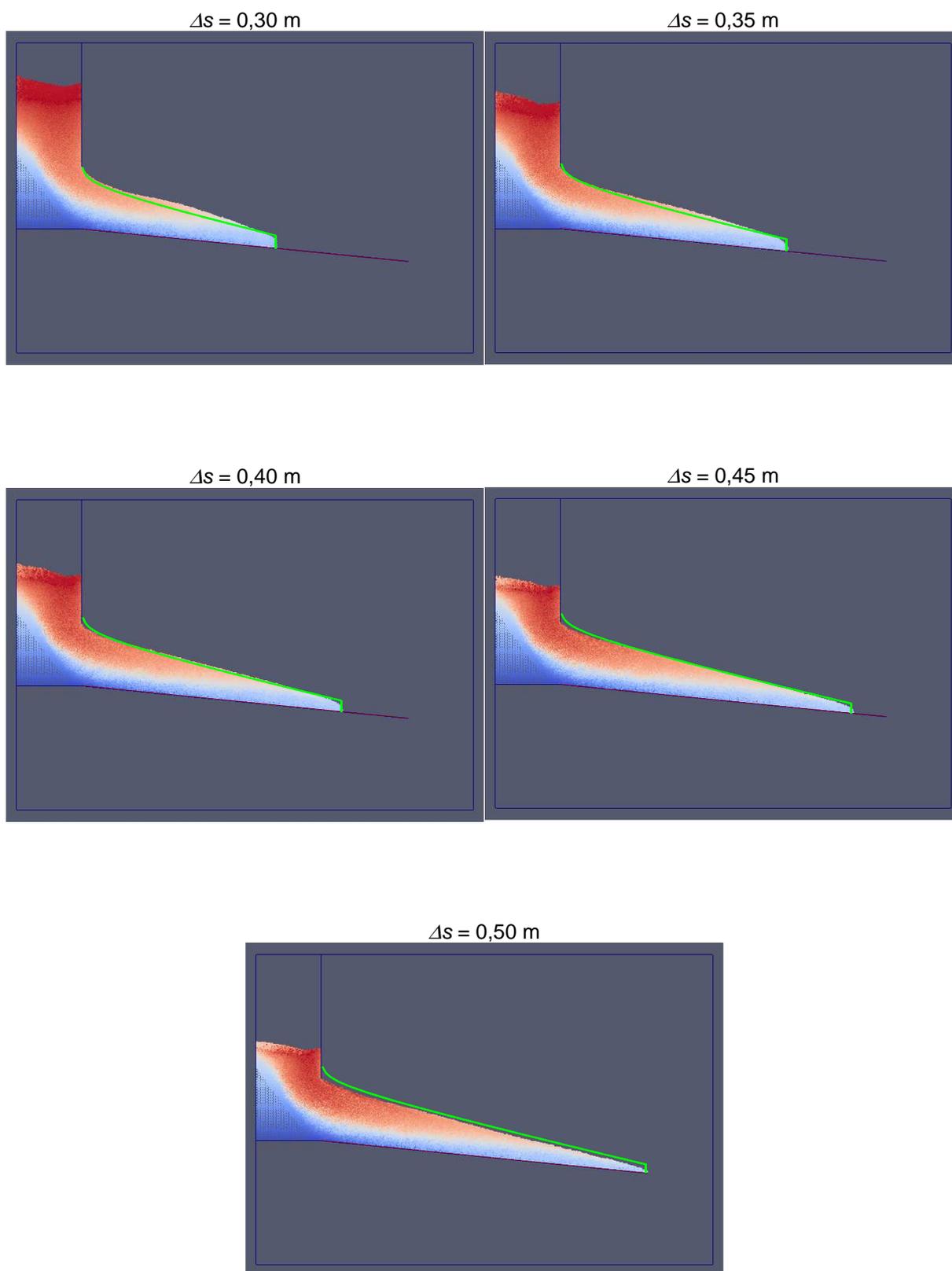


Figura B.6 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m

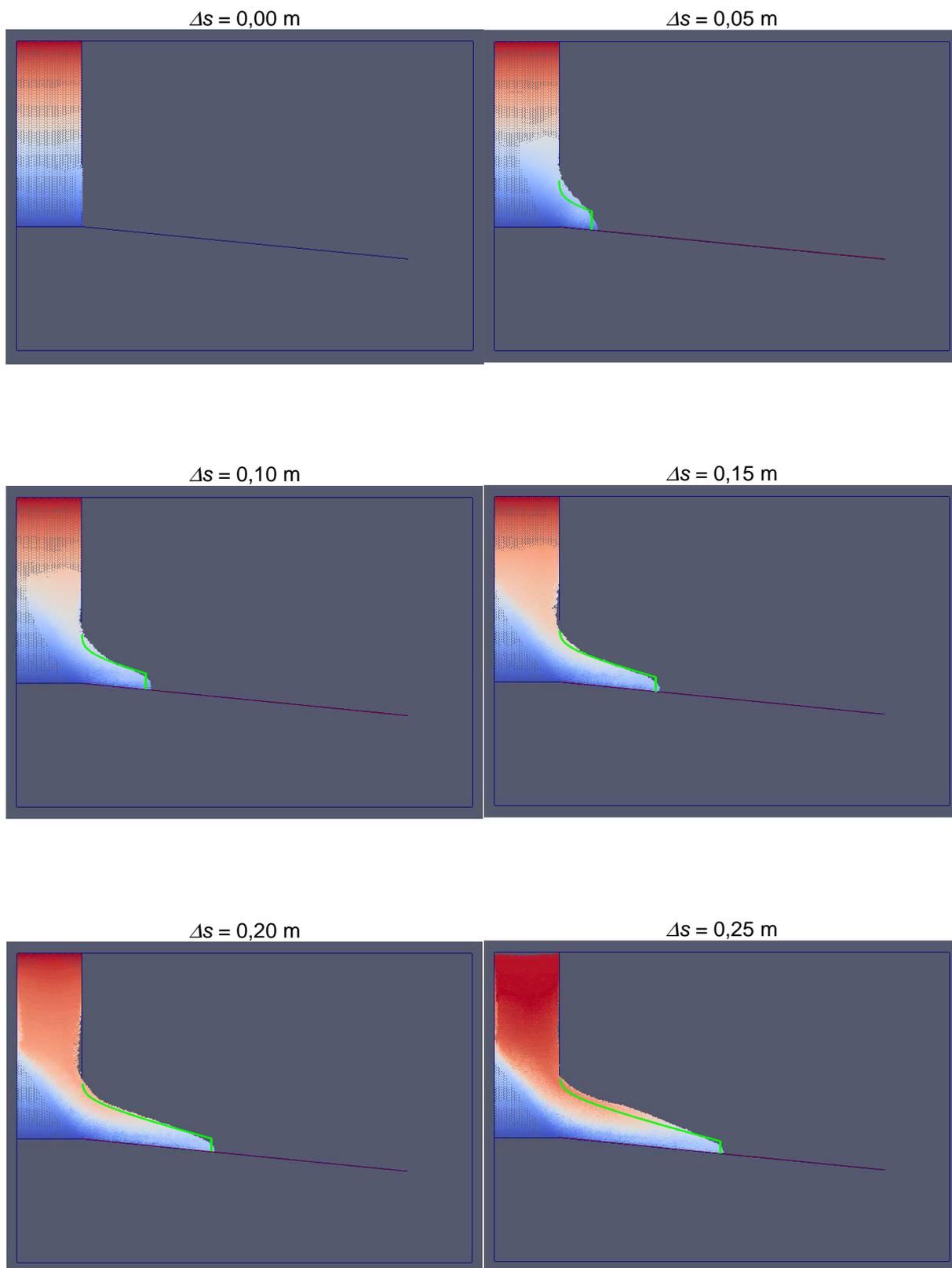


Figura B.7 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m

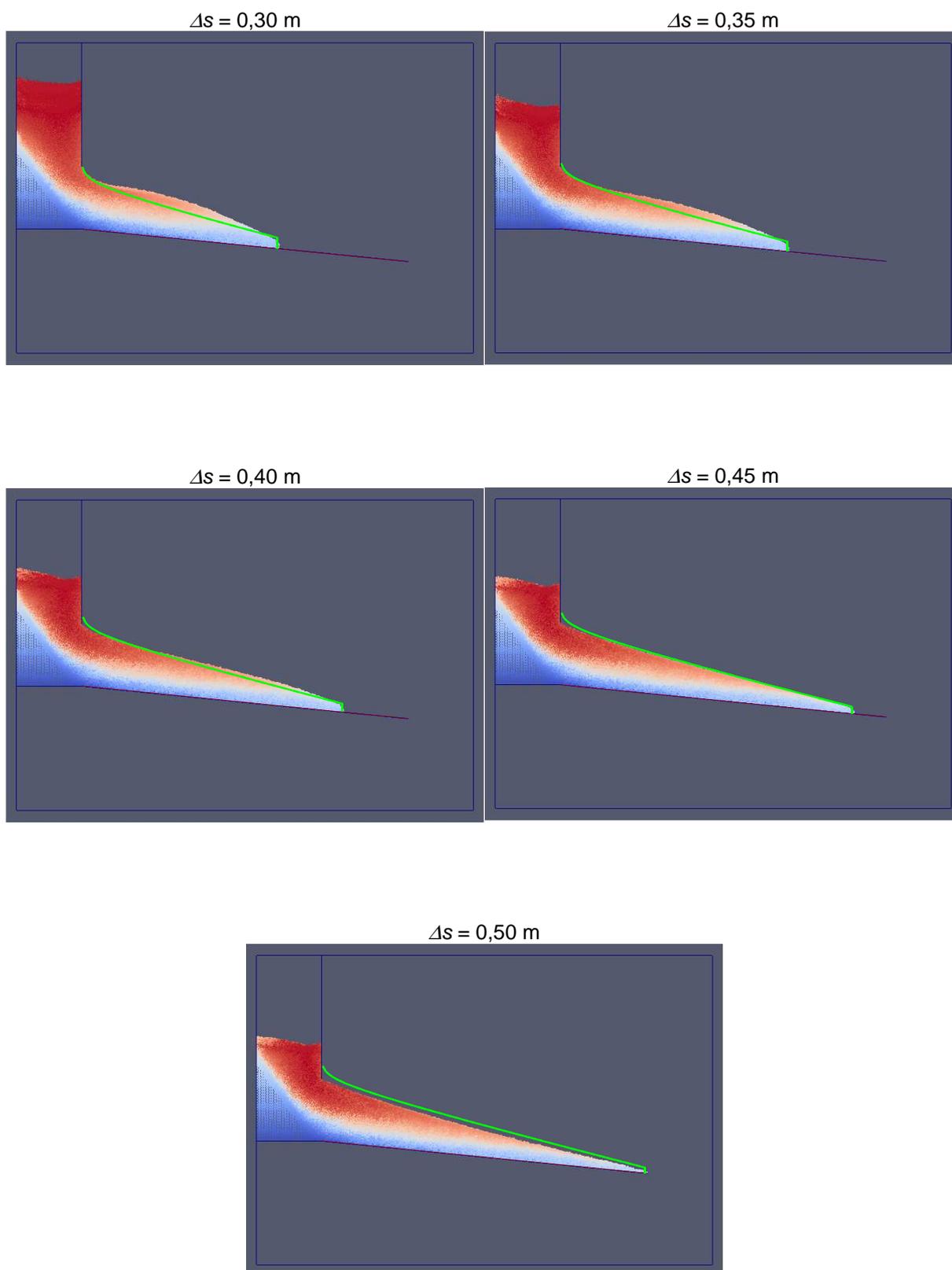


Figura B.8 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m

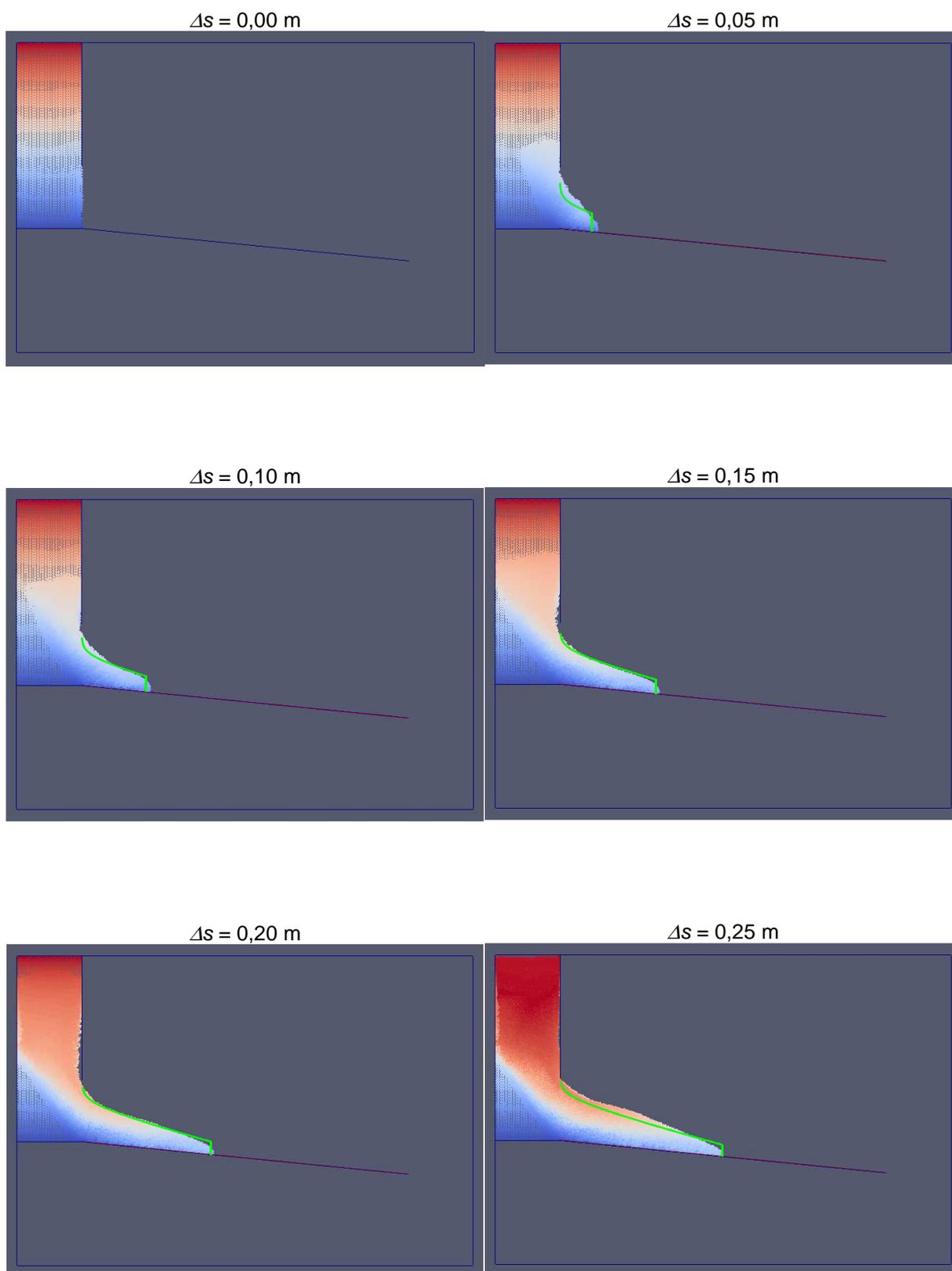


Figura B.9 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,00 m e 0,25 m

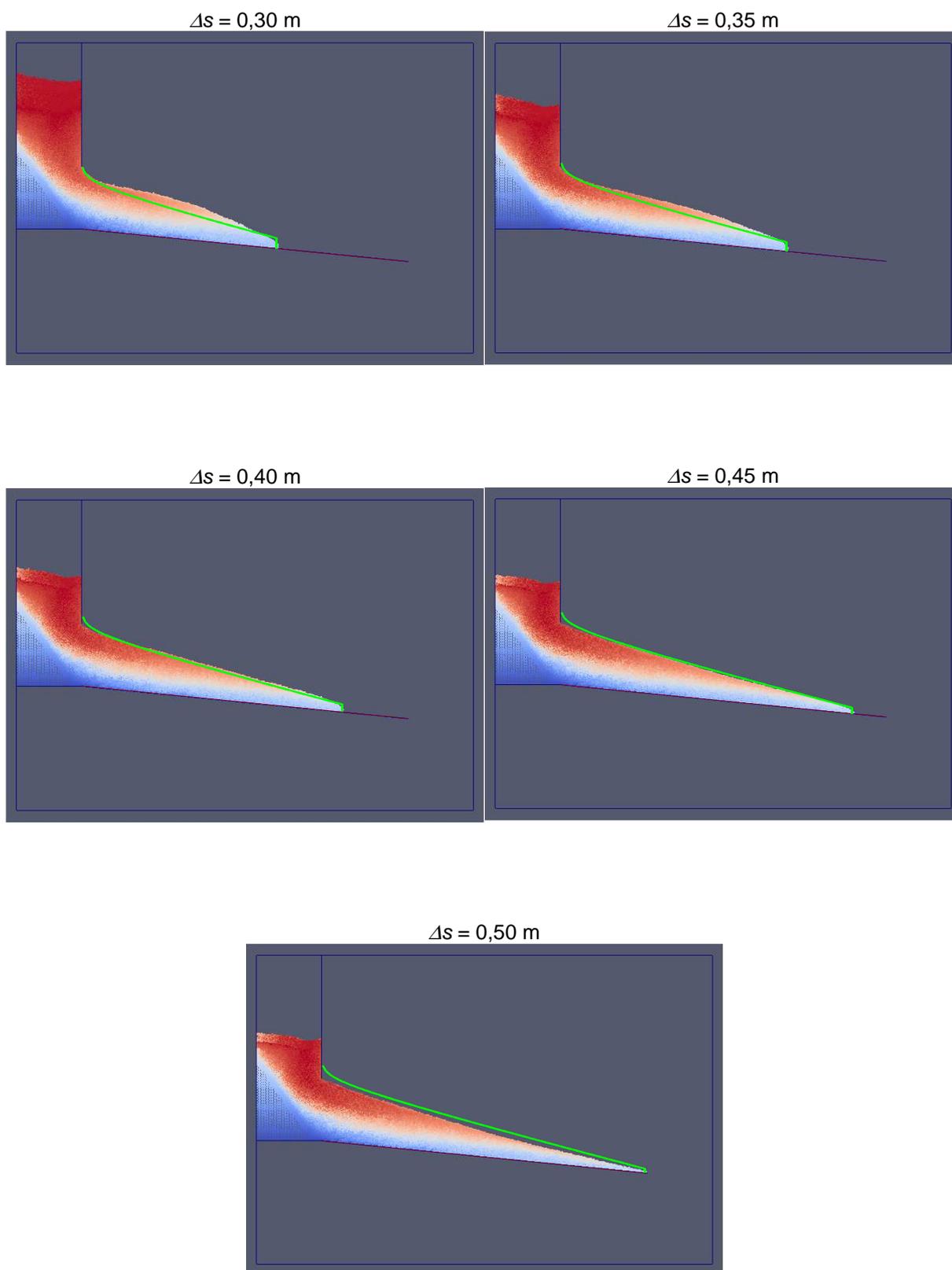


Figura B.10 – Imagens do escoamento subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 entre os deslocamentos da frente do escoamento iguais a 0,30 m e 0,50 m

C – Perfis verticais de velocidade e de concentração dos fluxos subaéreos

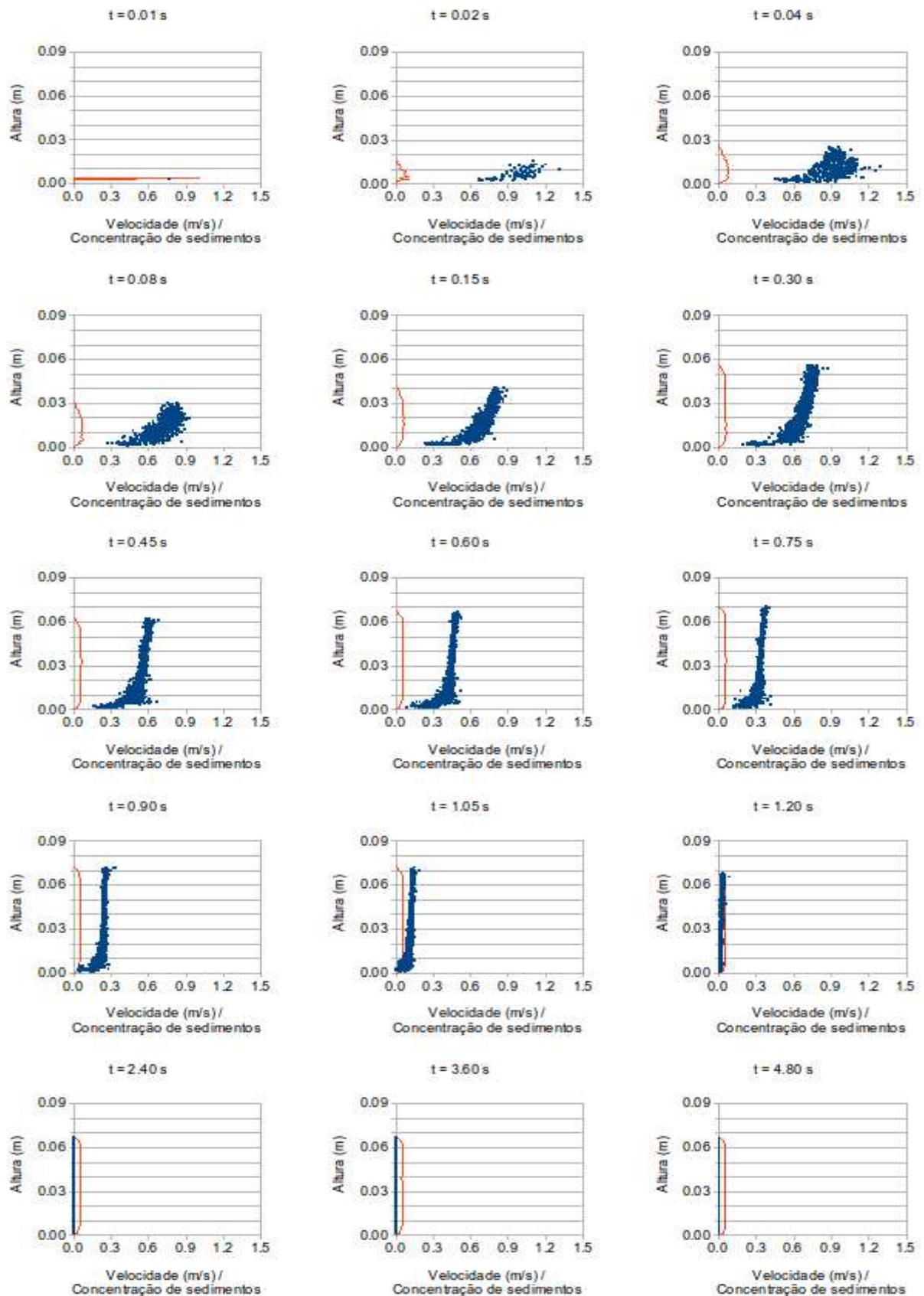


Figura C.1 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 1

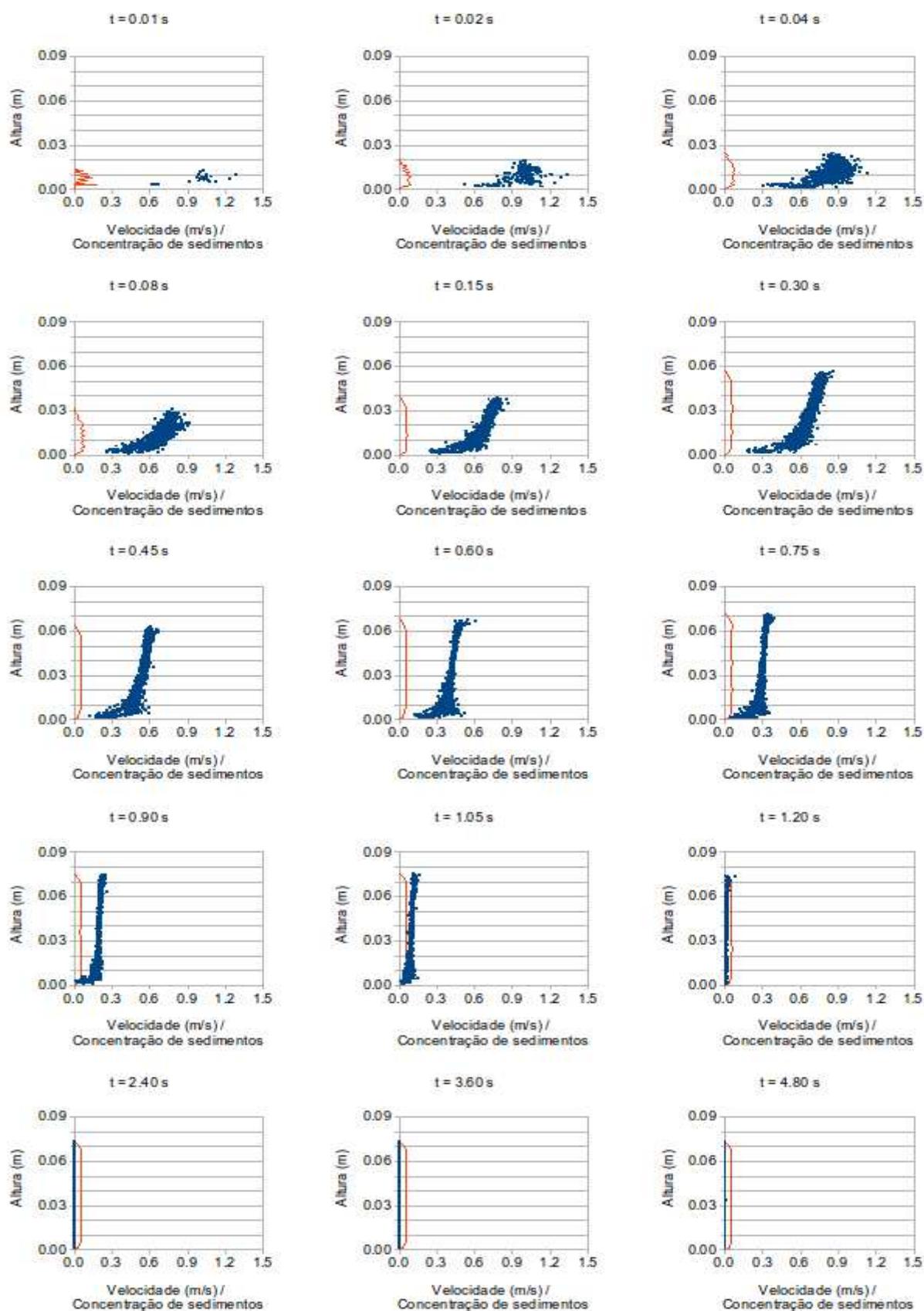


Figura C.2 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 1

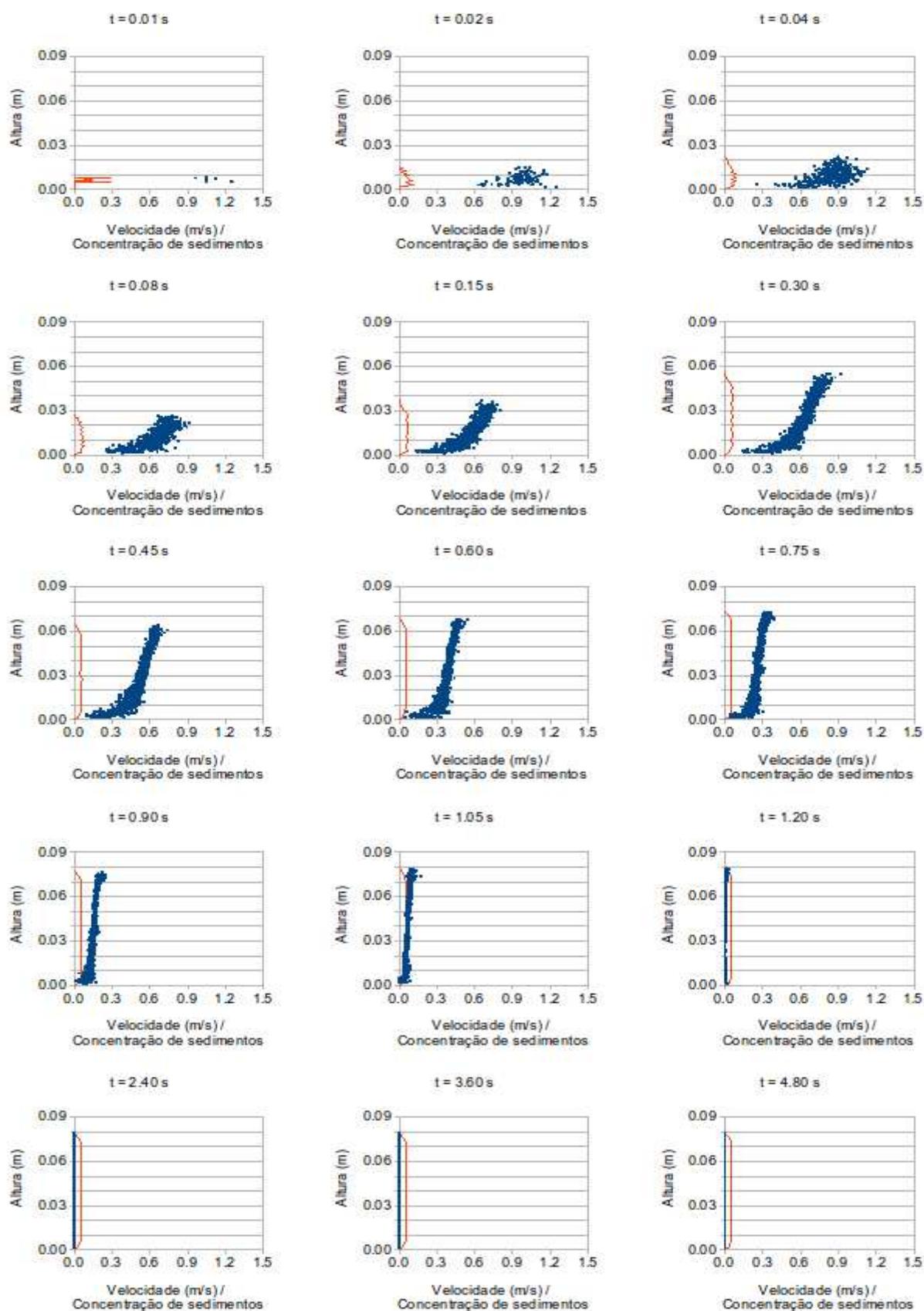


Figura C.3 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 1

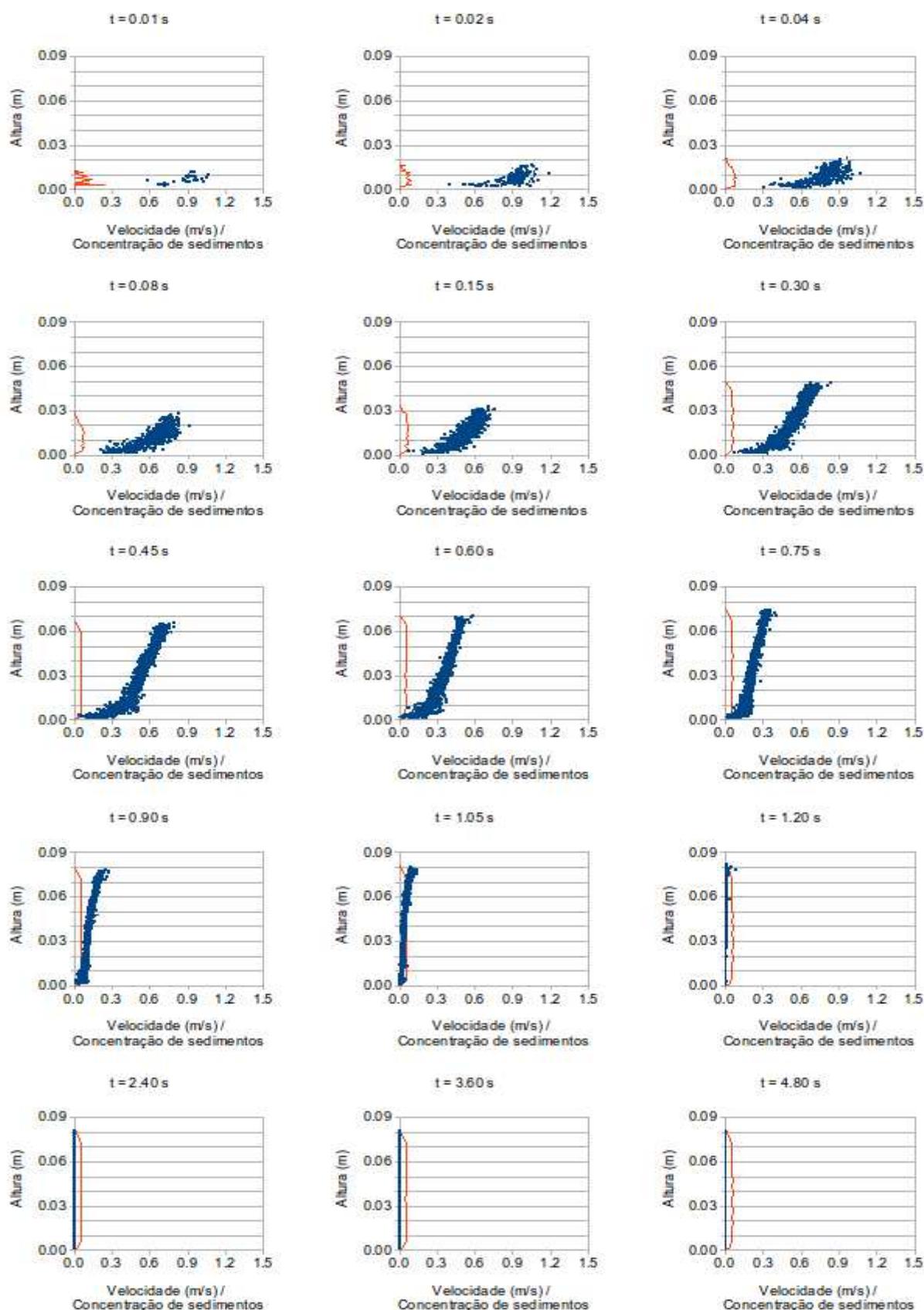


Figura C.4 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 1

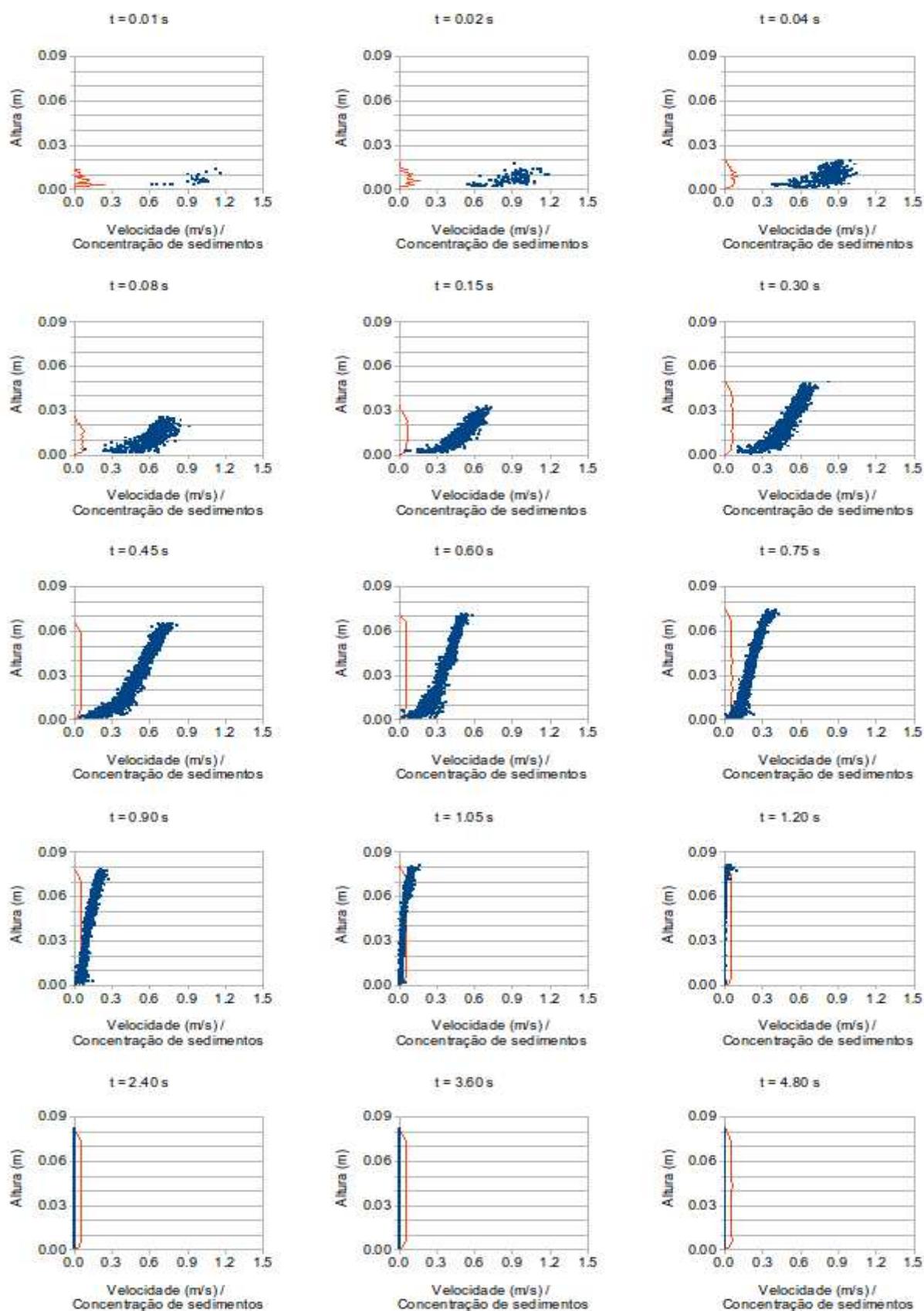


Figura C.5 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 1

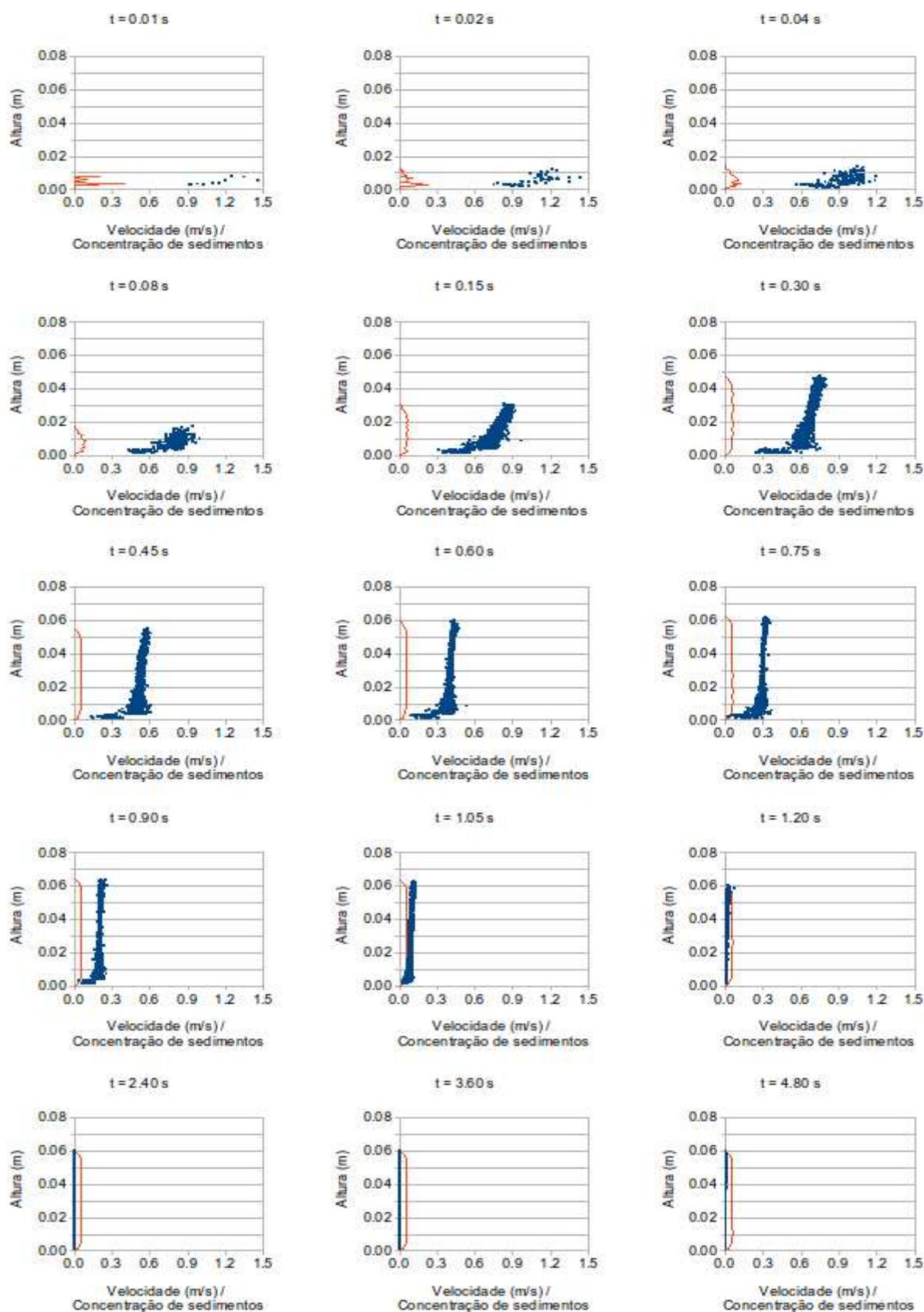


Figura C.6 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 4

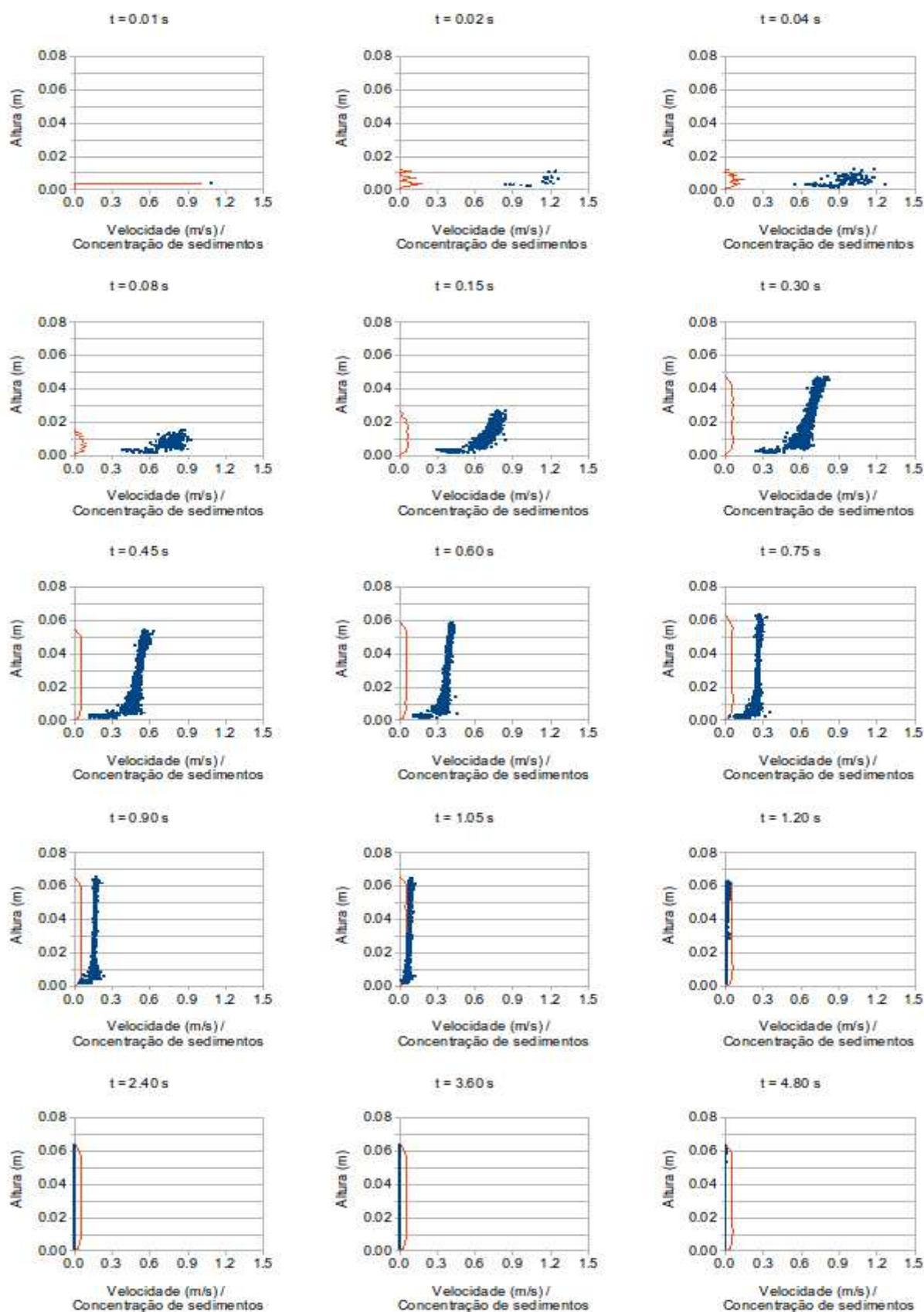


Figura C.7 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 4

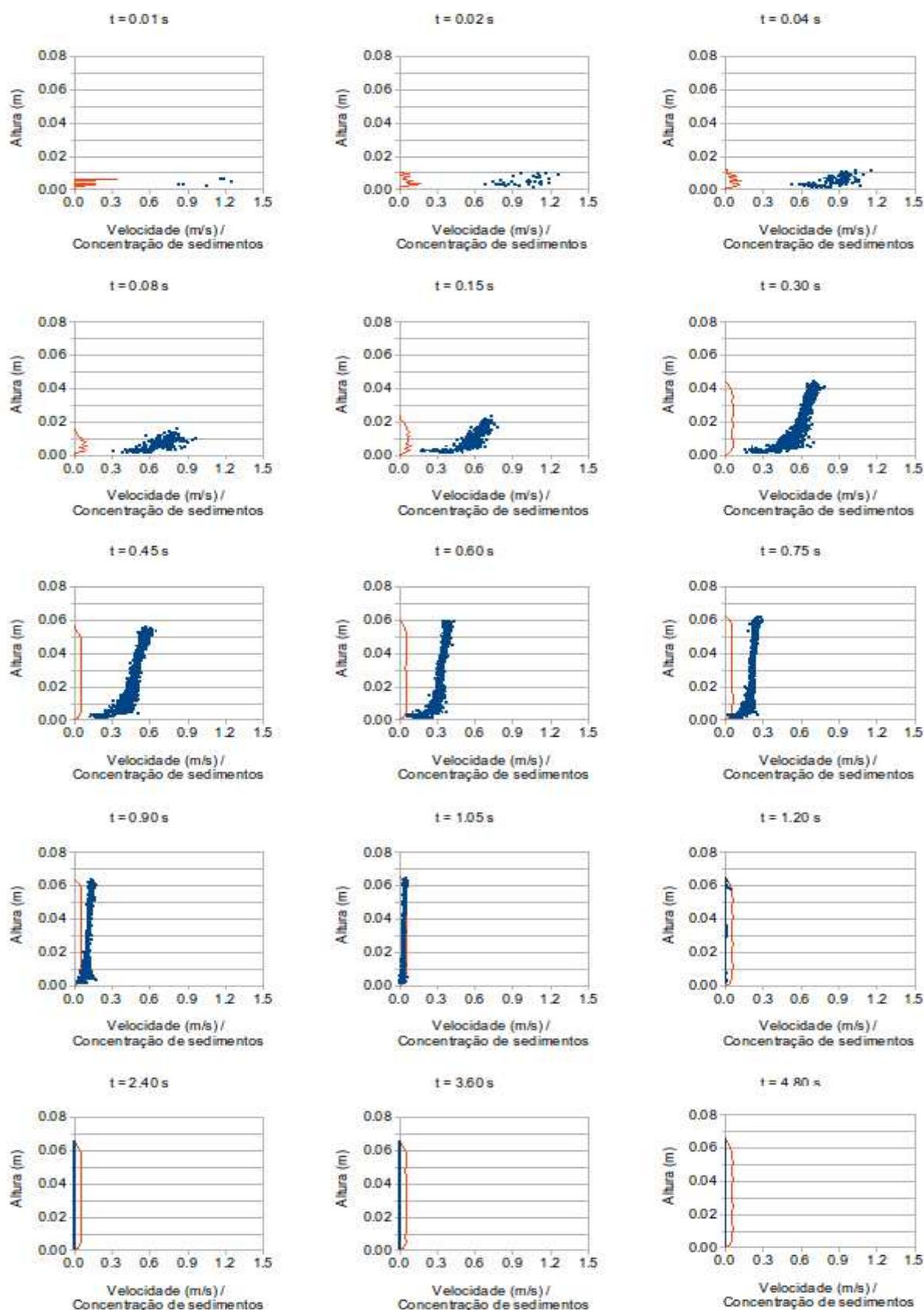


Figura C.8 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 4

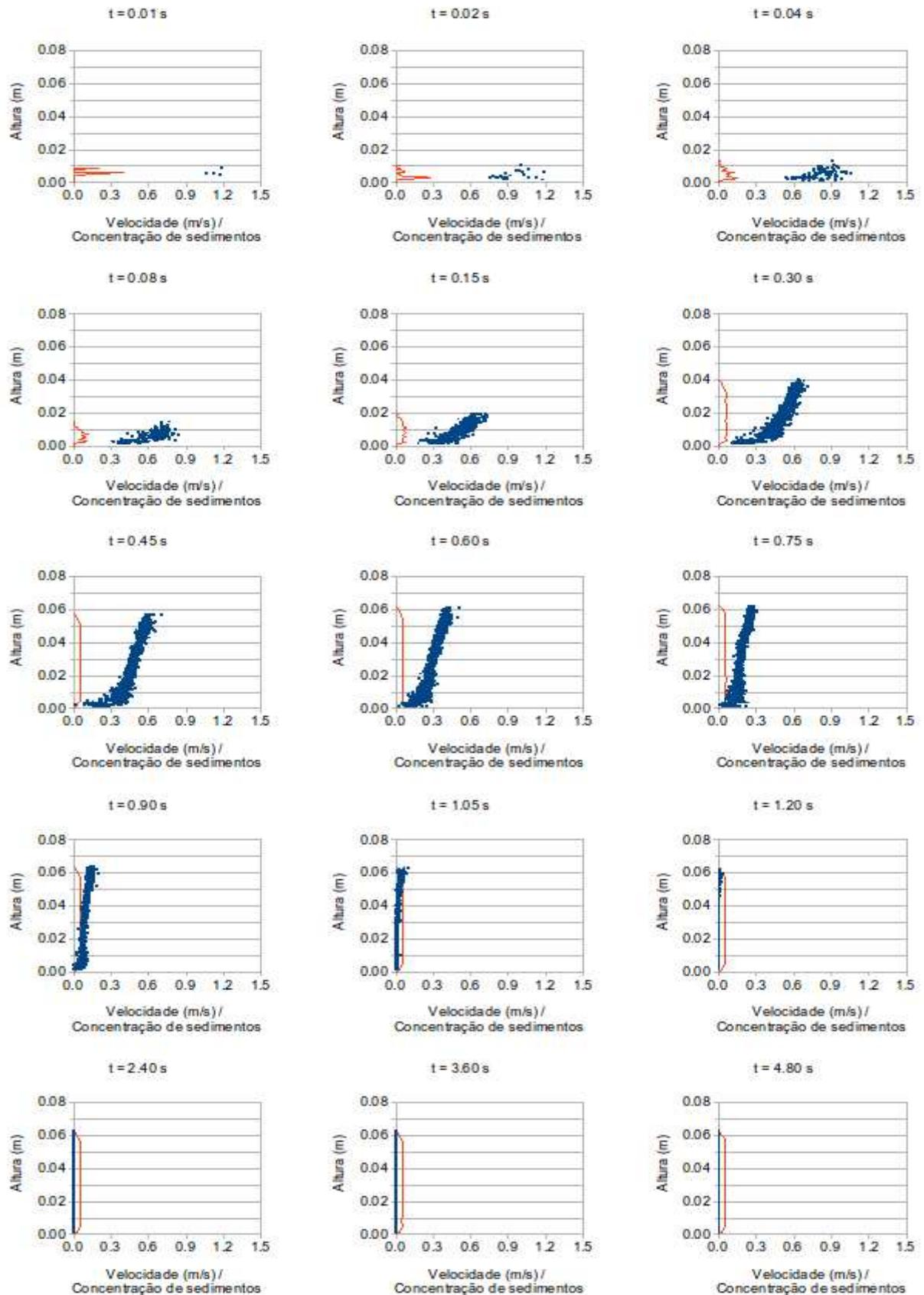


Figura C.9 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 4

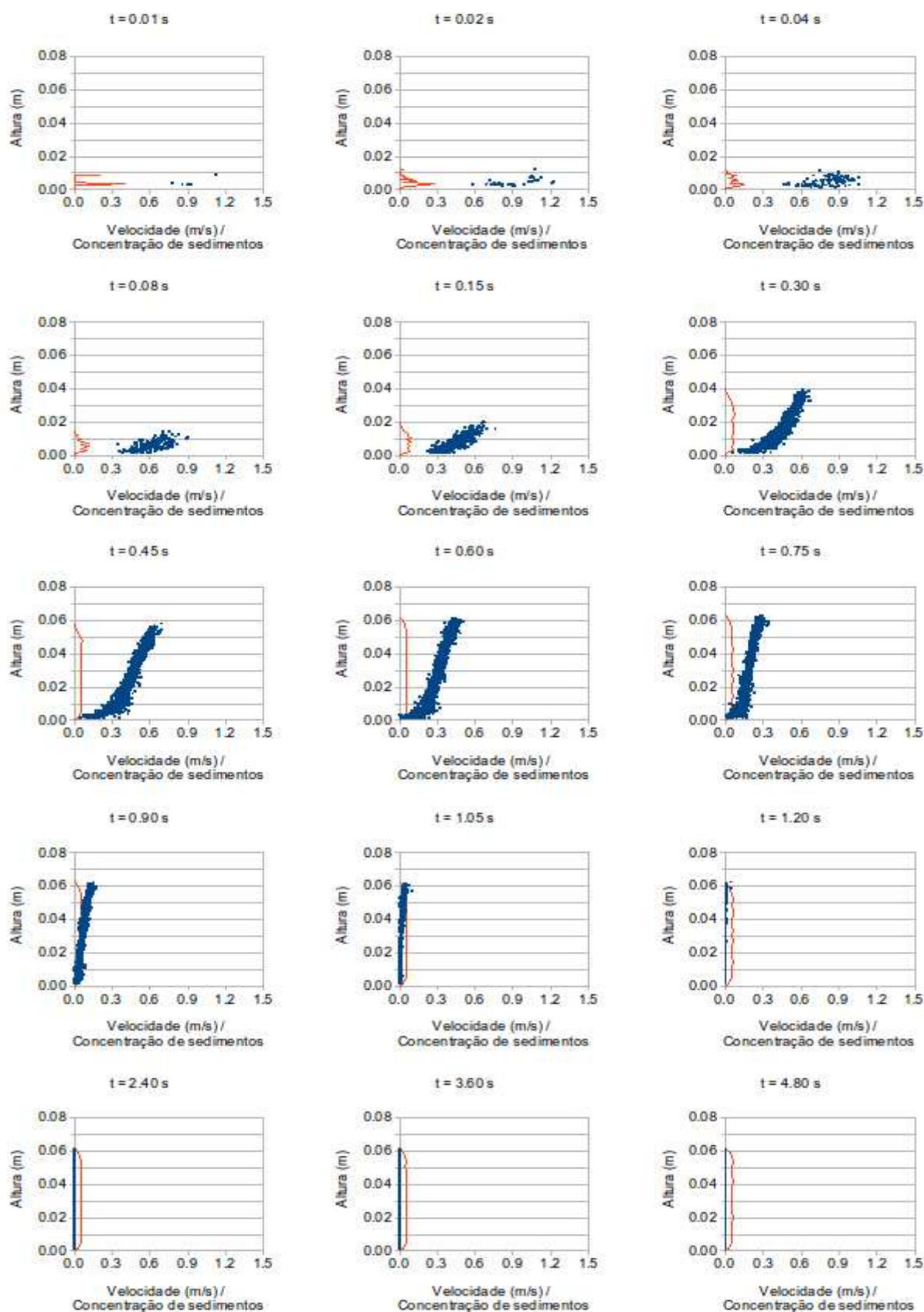


Figura C.10 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 4

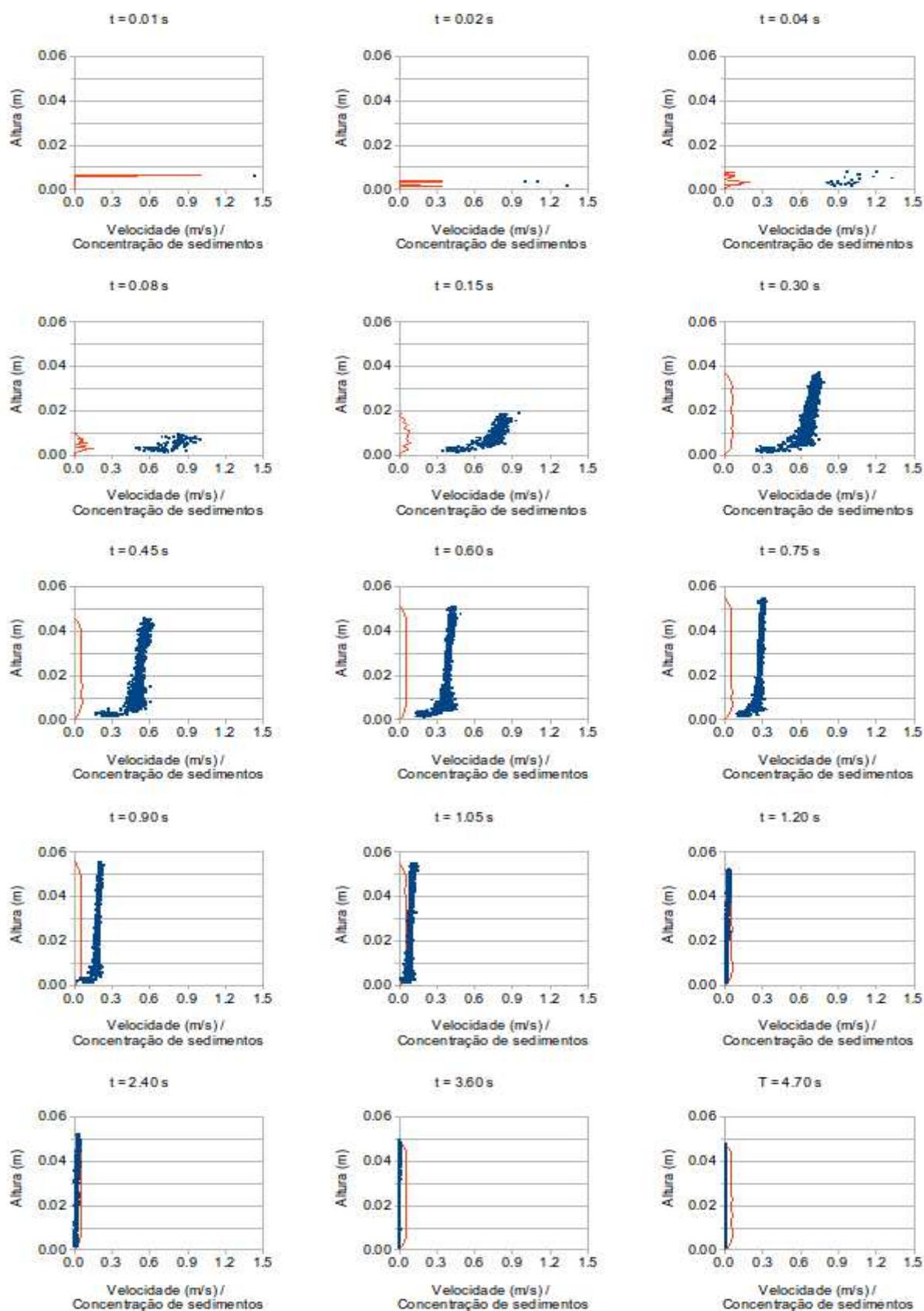


Figura C.11 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 2

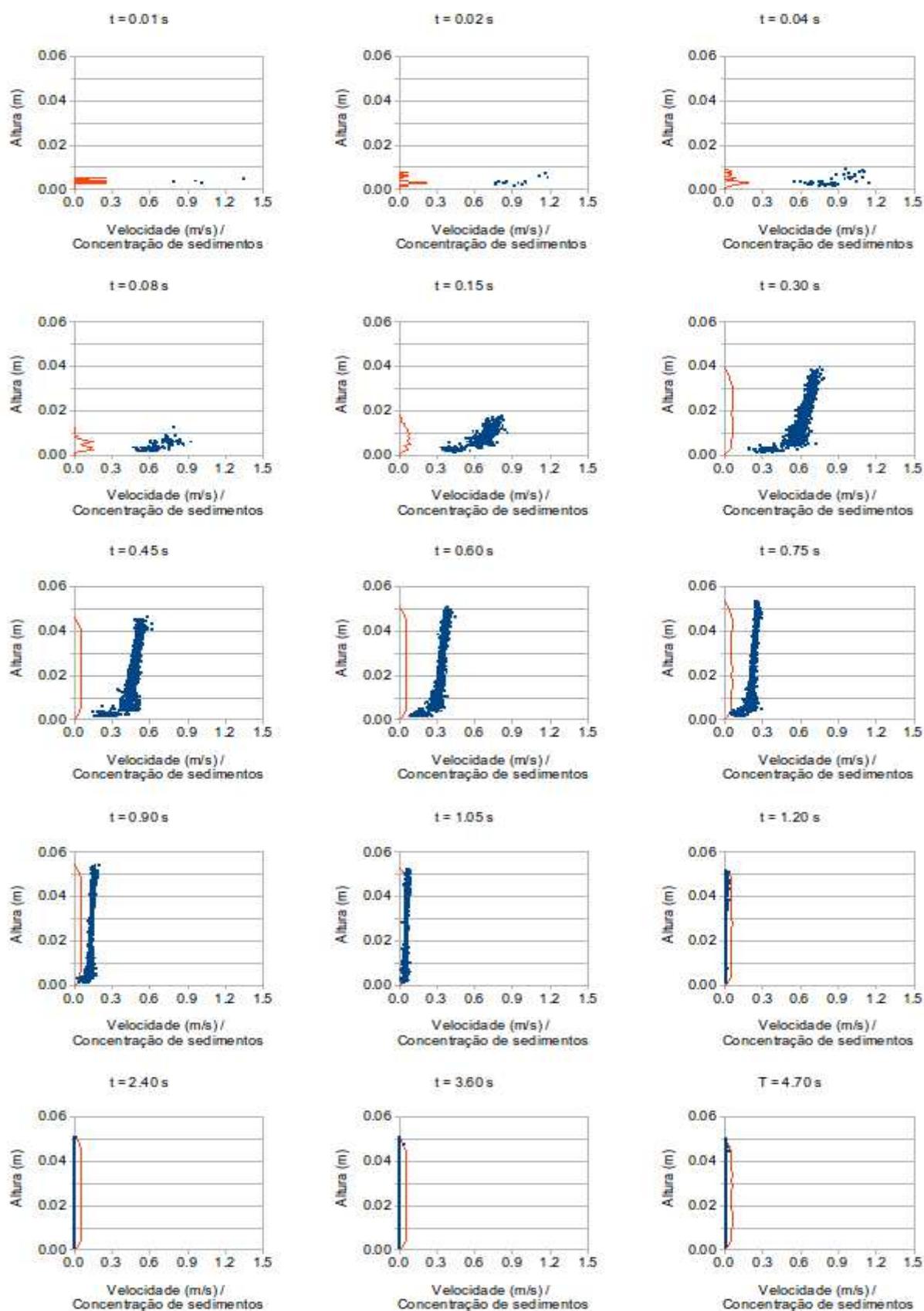


Figura C.12 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 2

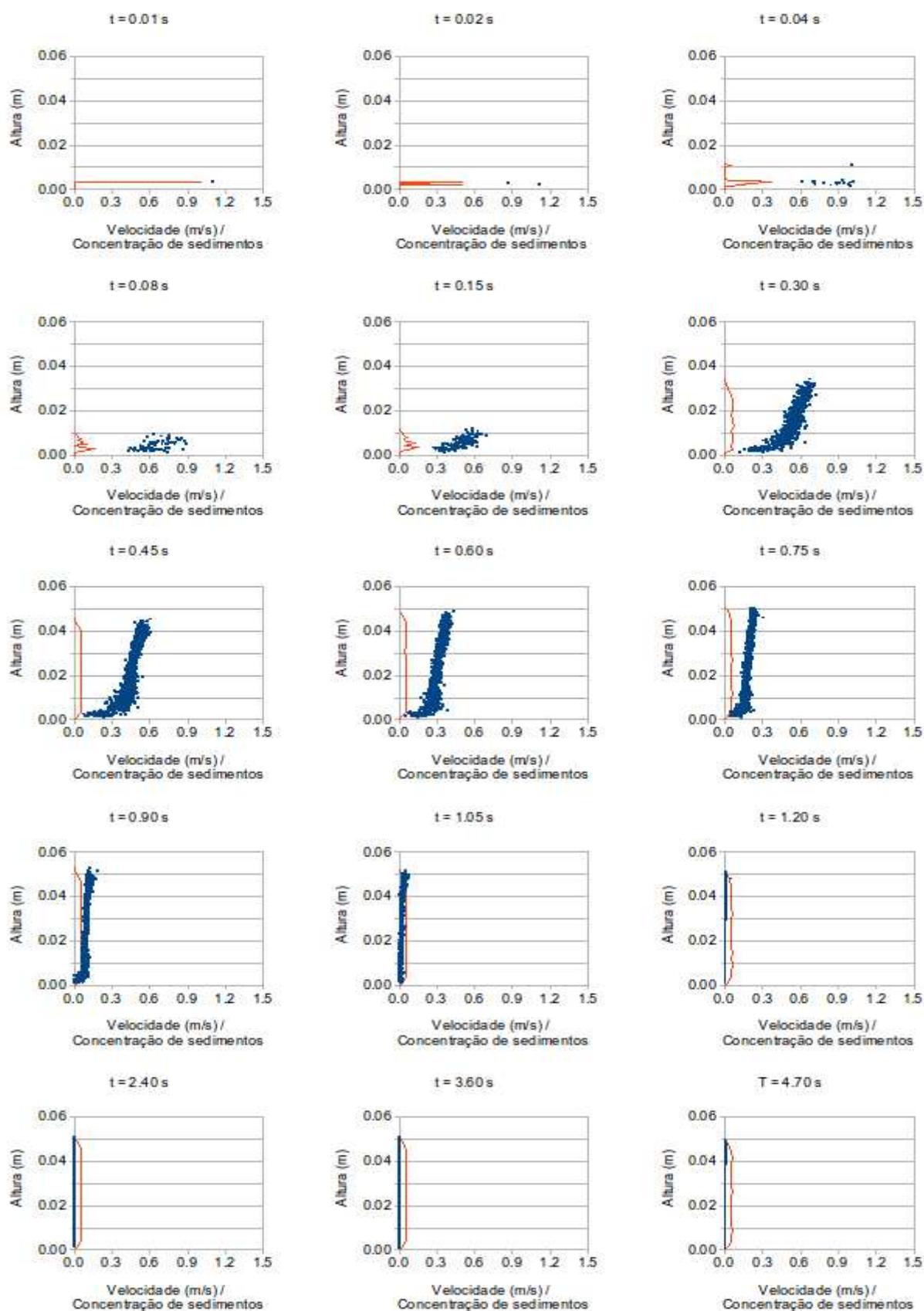


Figura C.13 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 2

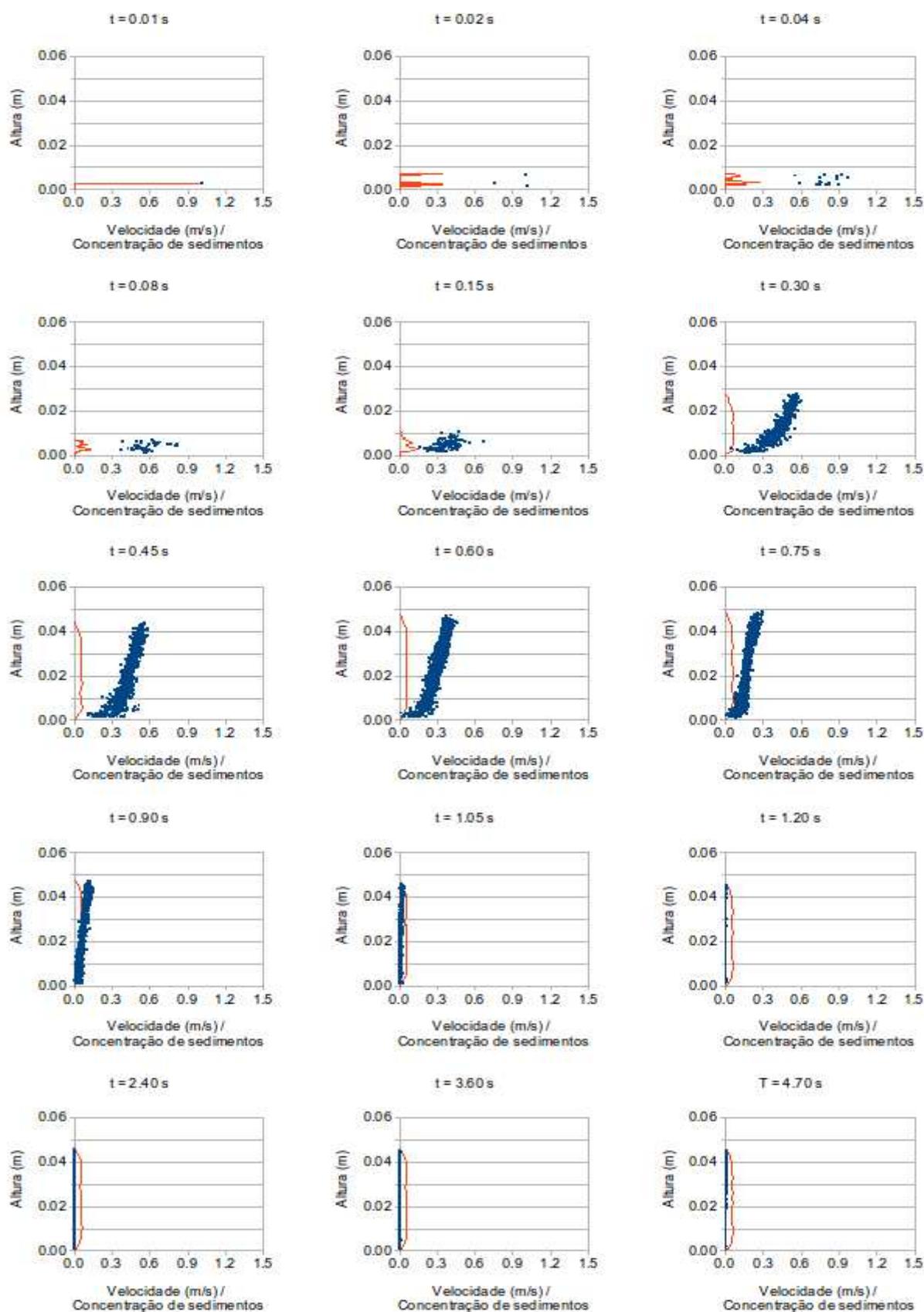


Figura C.14 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 2

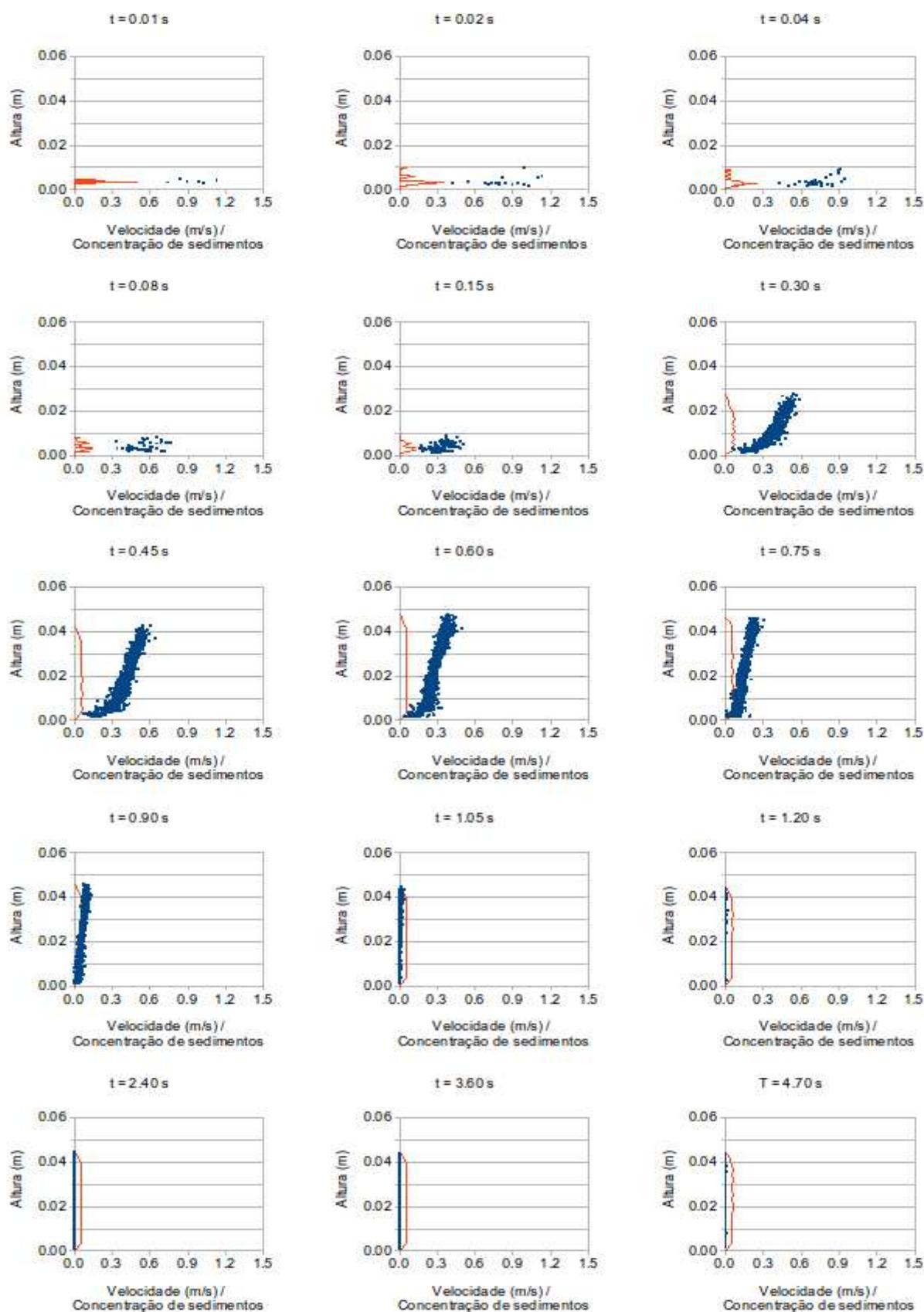


Figura C.15 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 2

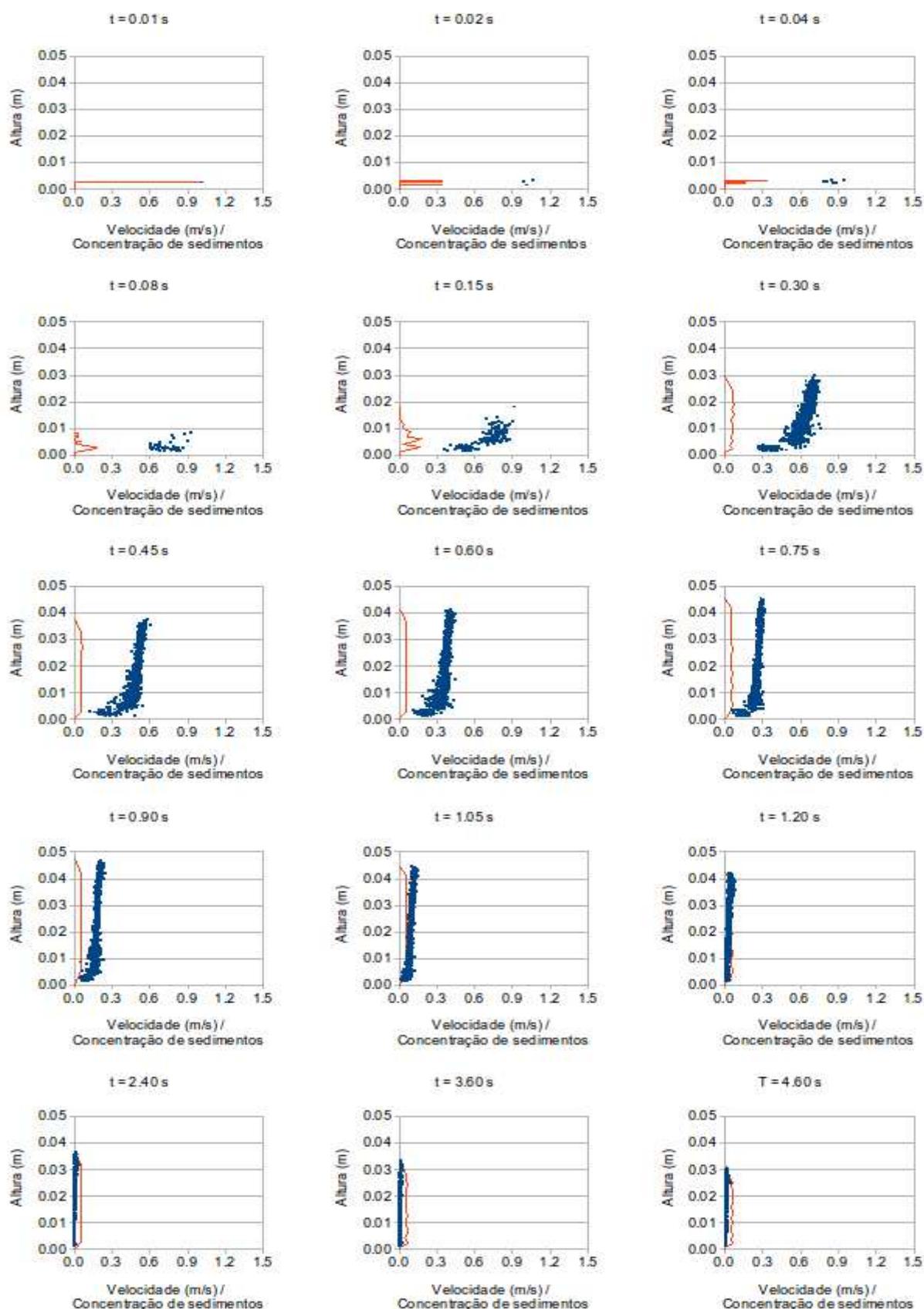


Figura C.16 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 5

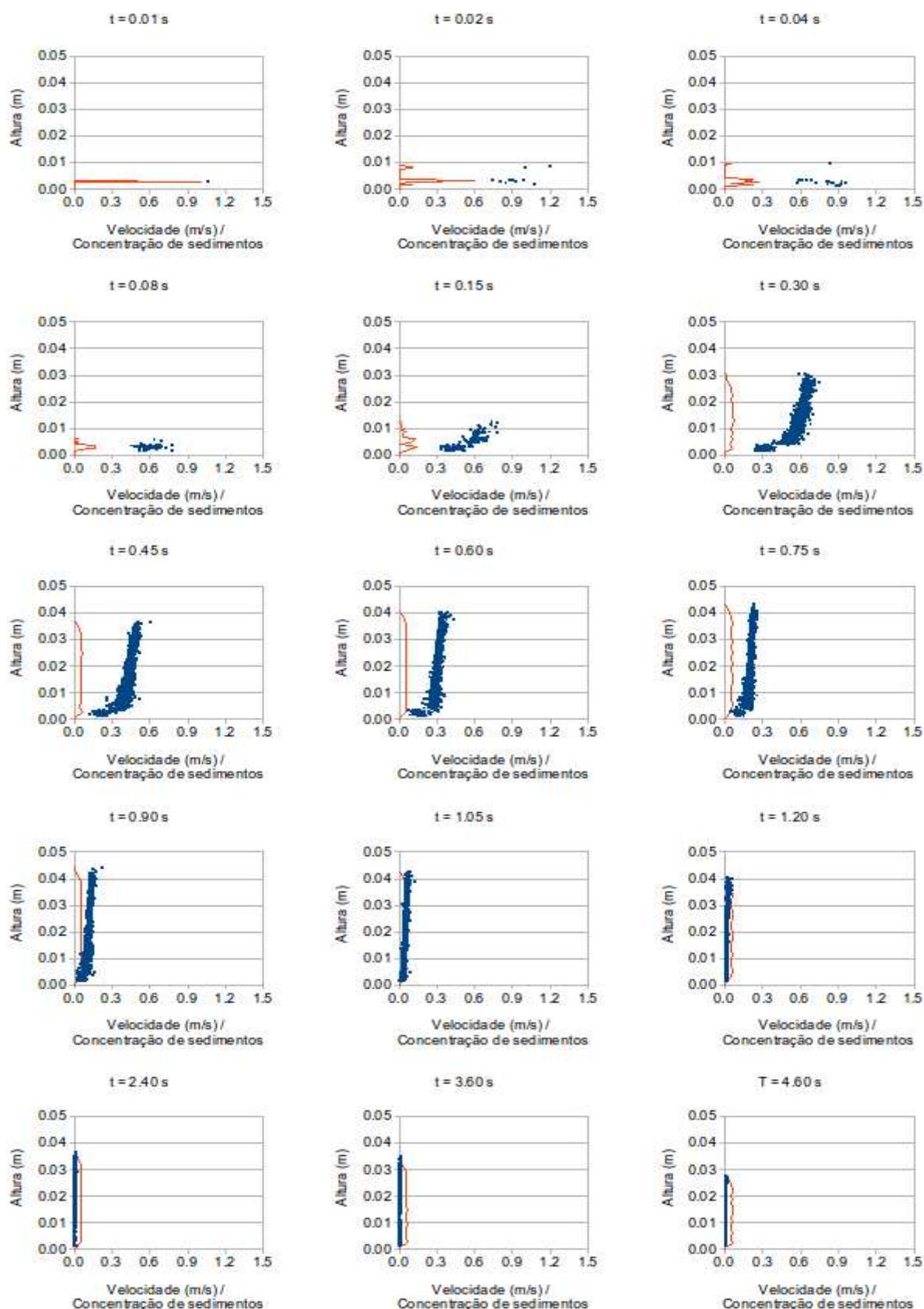


Figura C.17 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 5

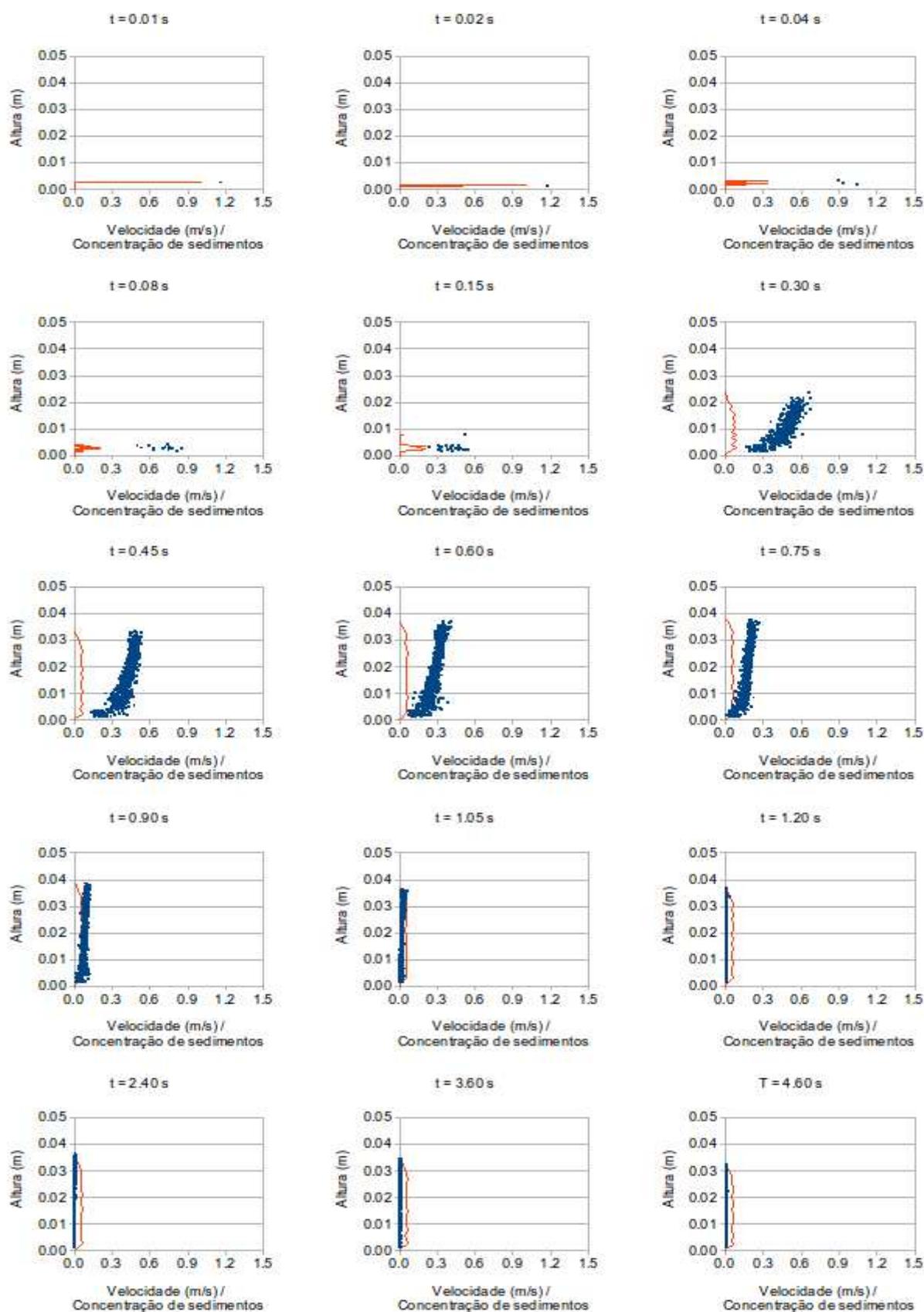


Figura C.18 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 5

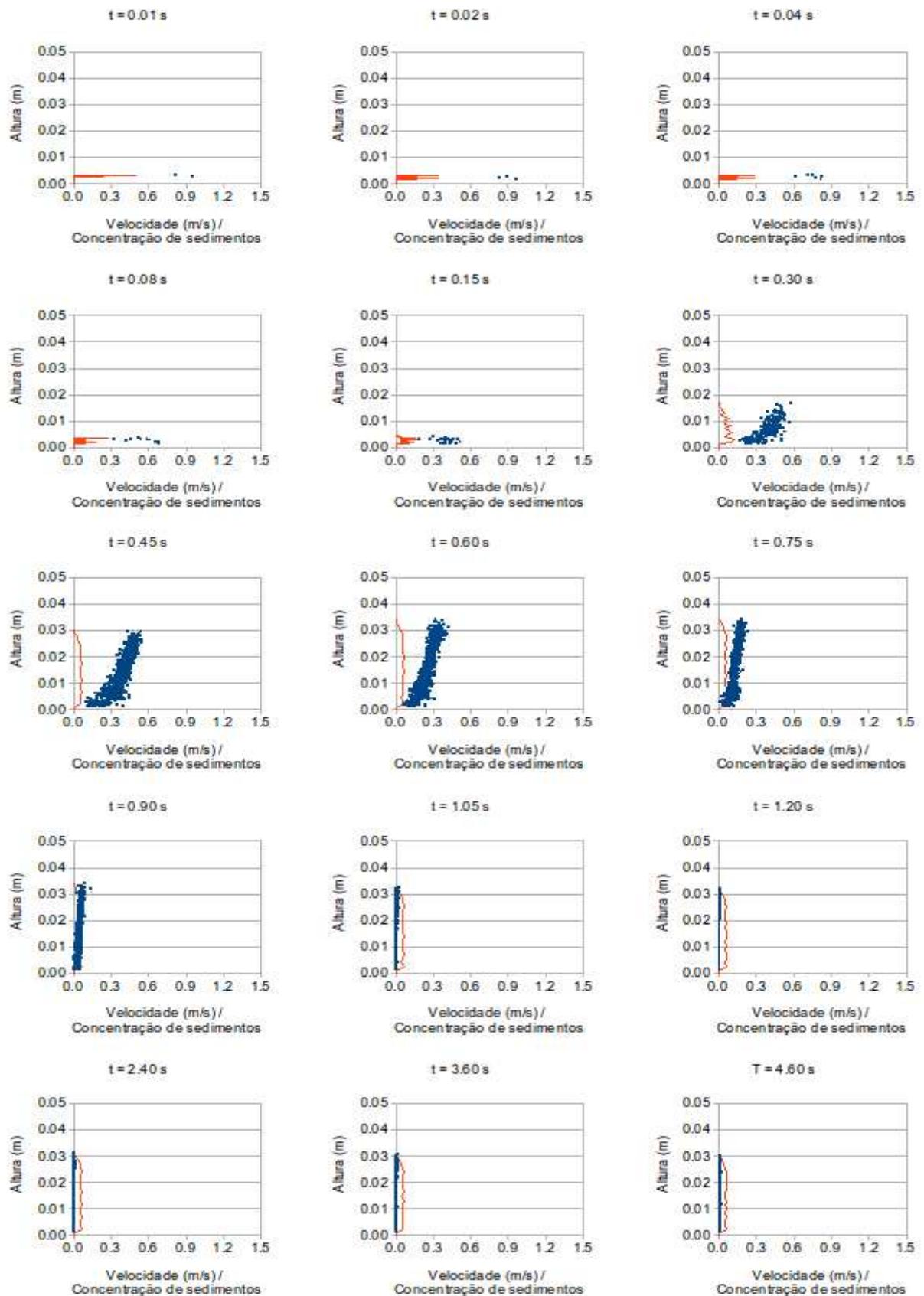


Figura C.19 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 5

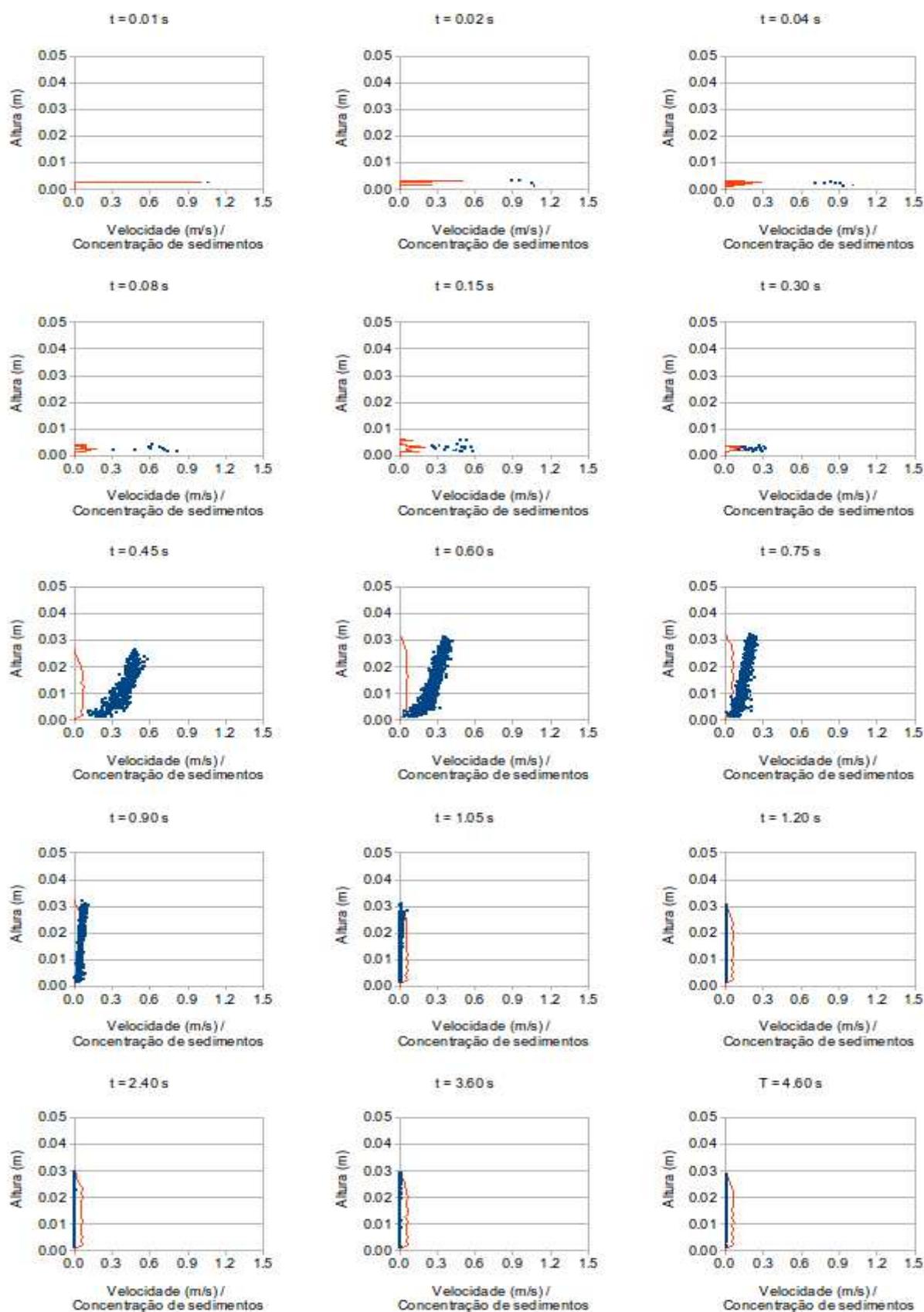


Figura C.20 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 5

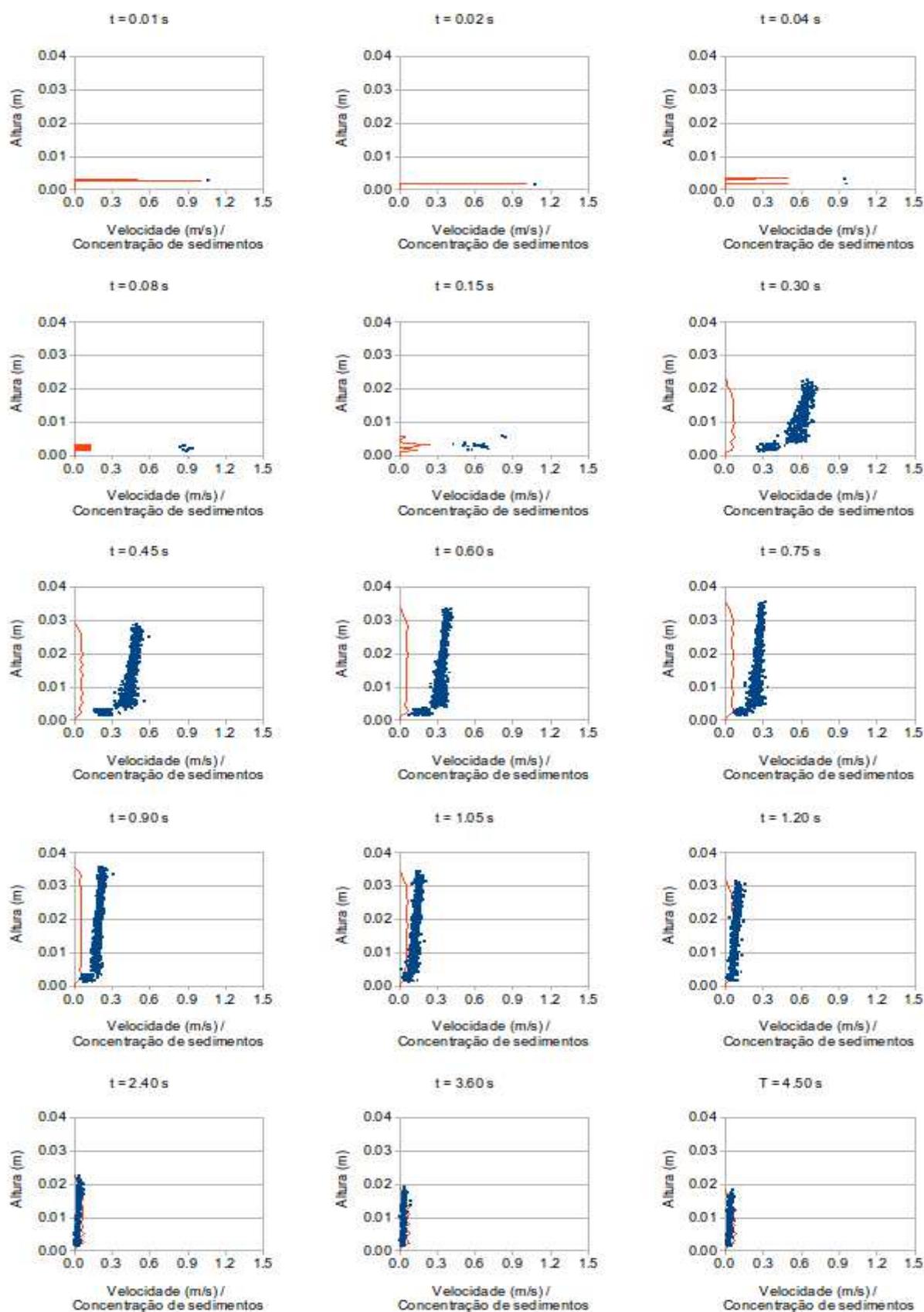


Figura C.21 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 3

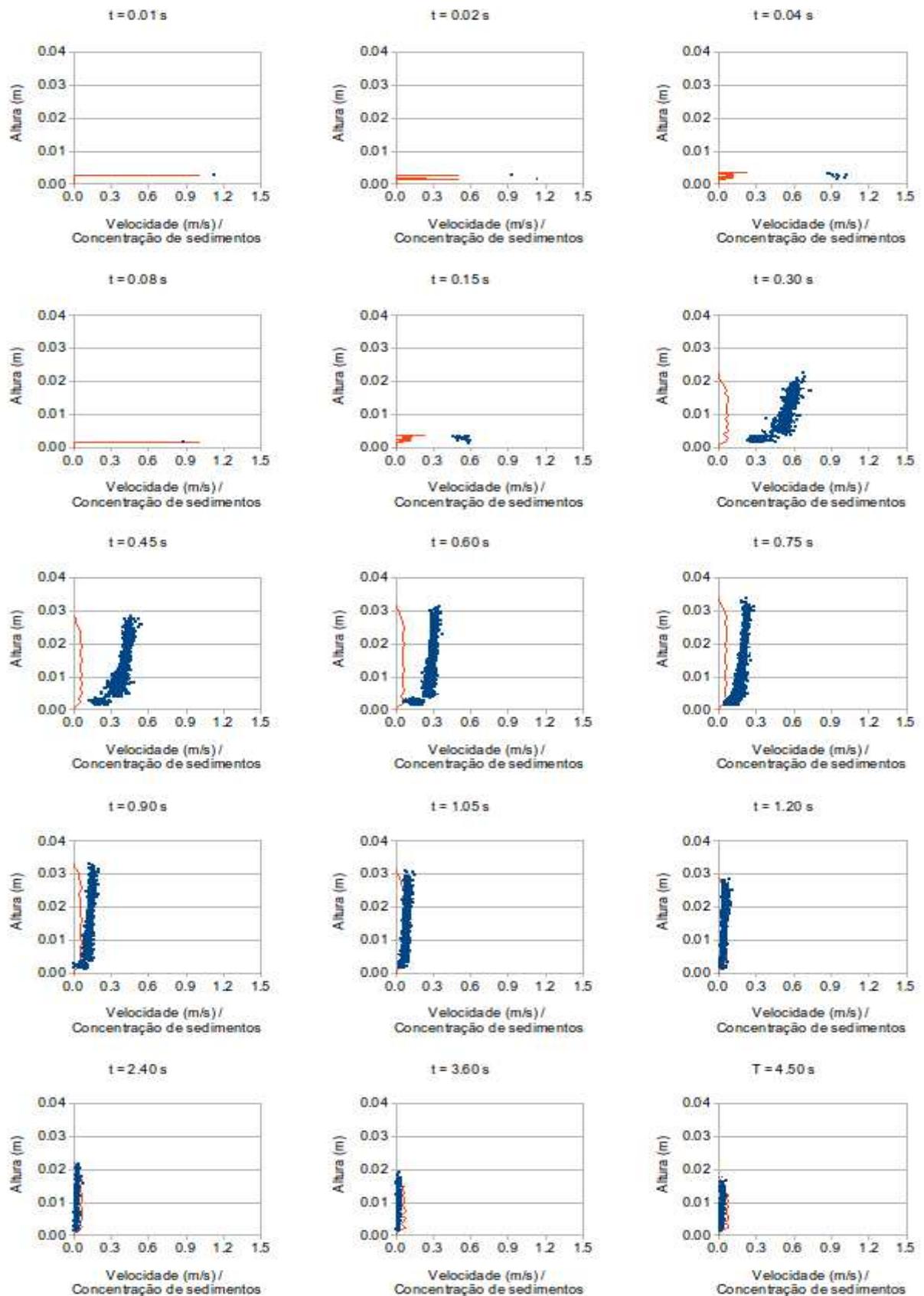


Figura C.22 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 3

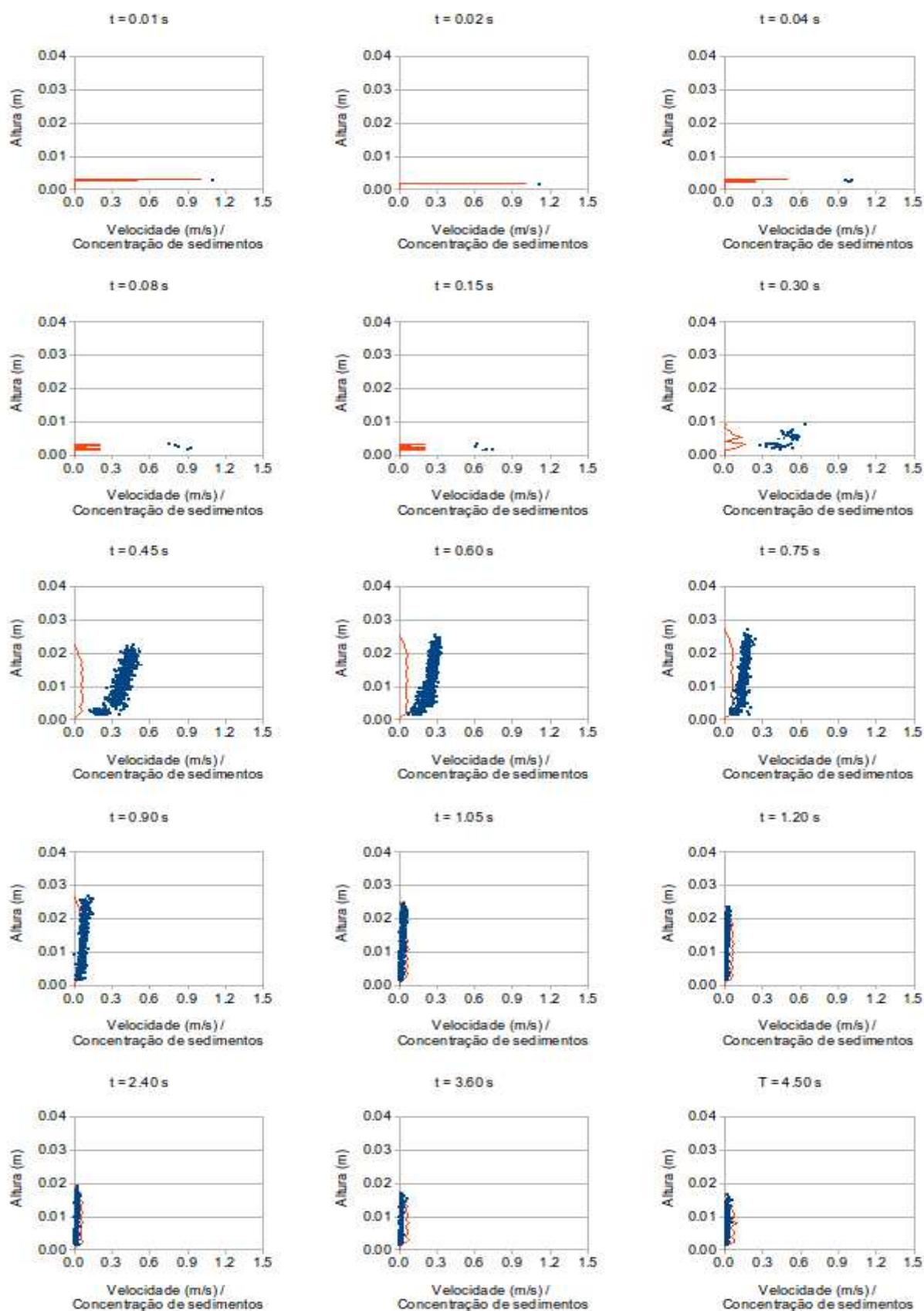


Figura C.23 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 3

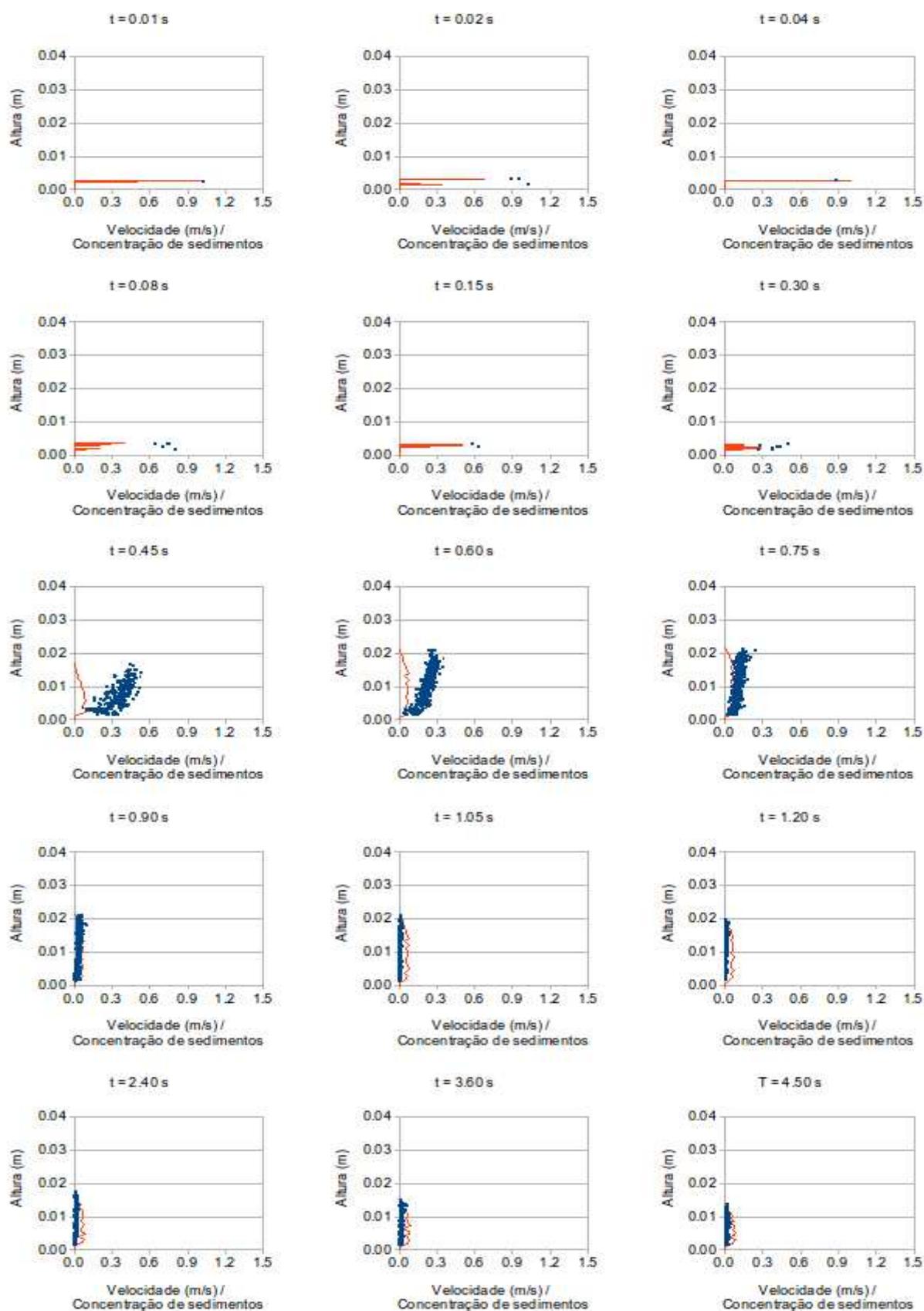


Figura C.24 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 3

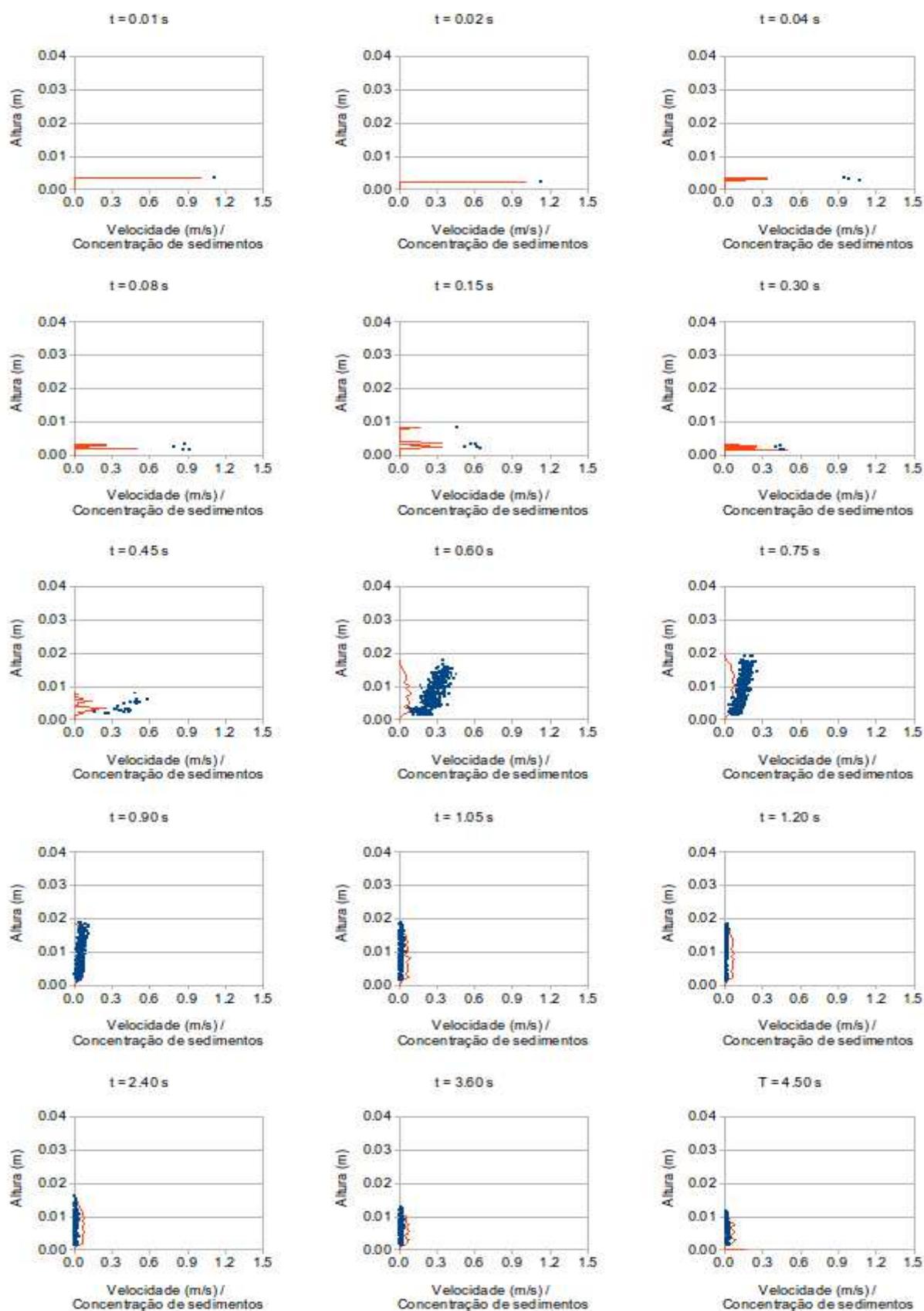


Figura C.25 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaéreo com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 3

D – Perfis verticais de velocidade e de concentração dos fluxos subaquáticos

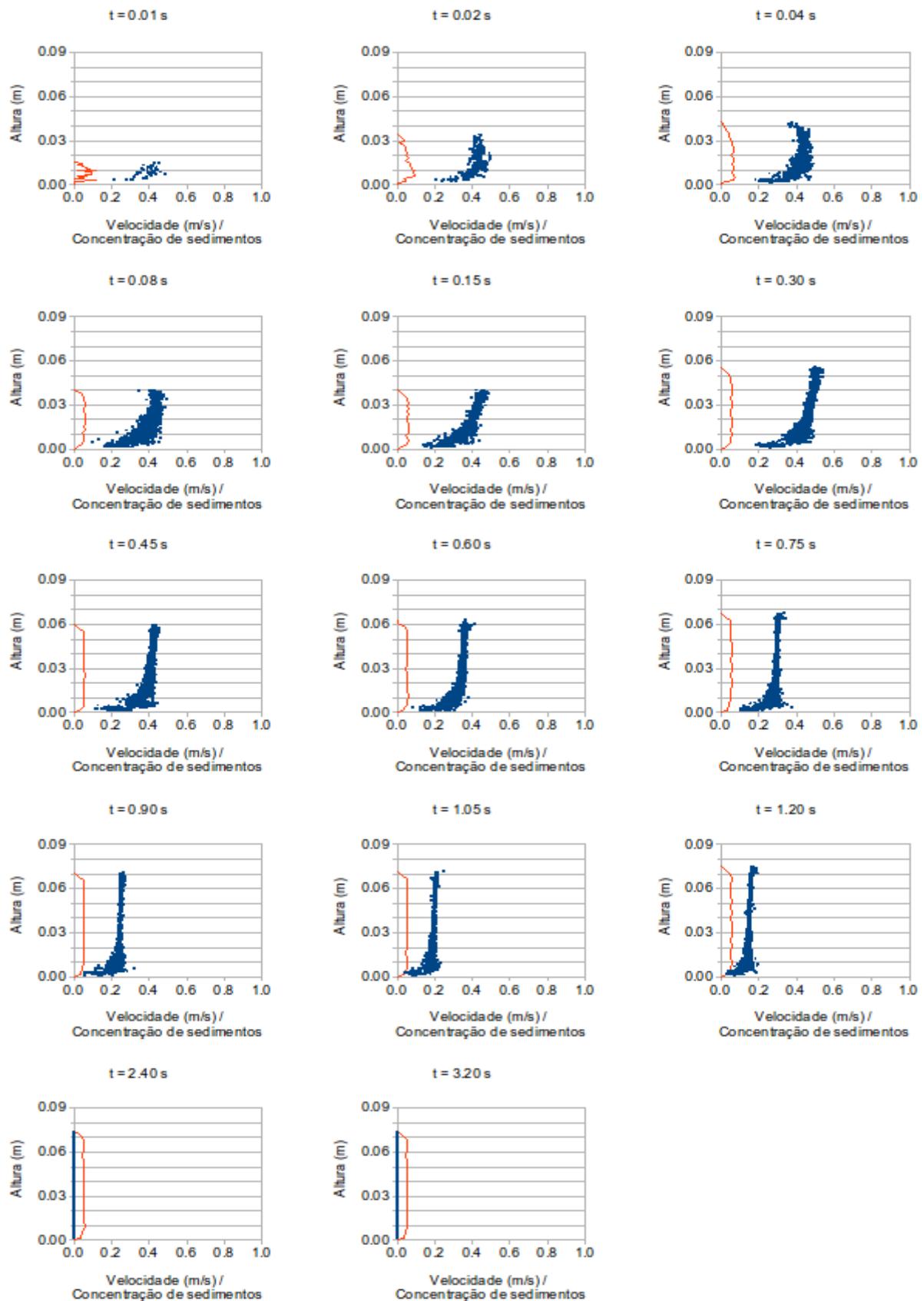


Figura D.1 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 1

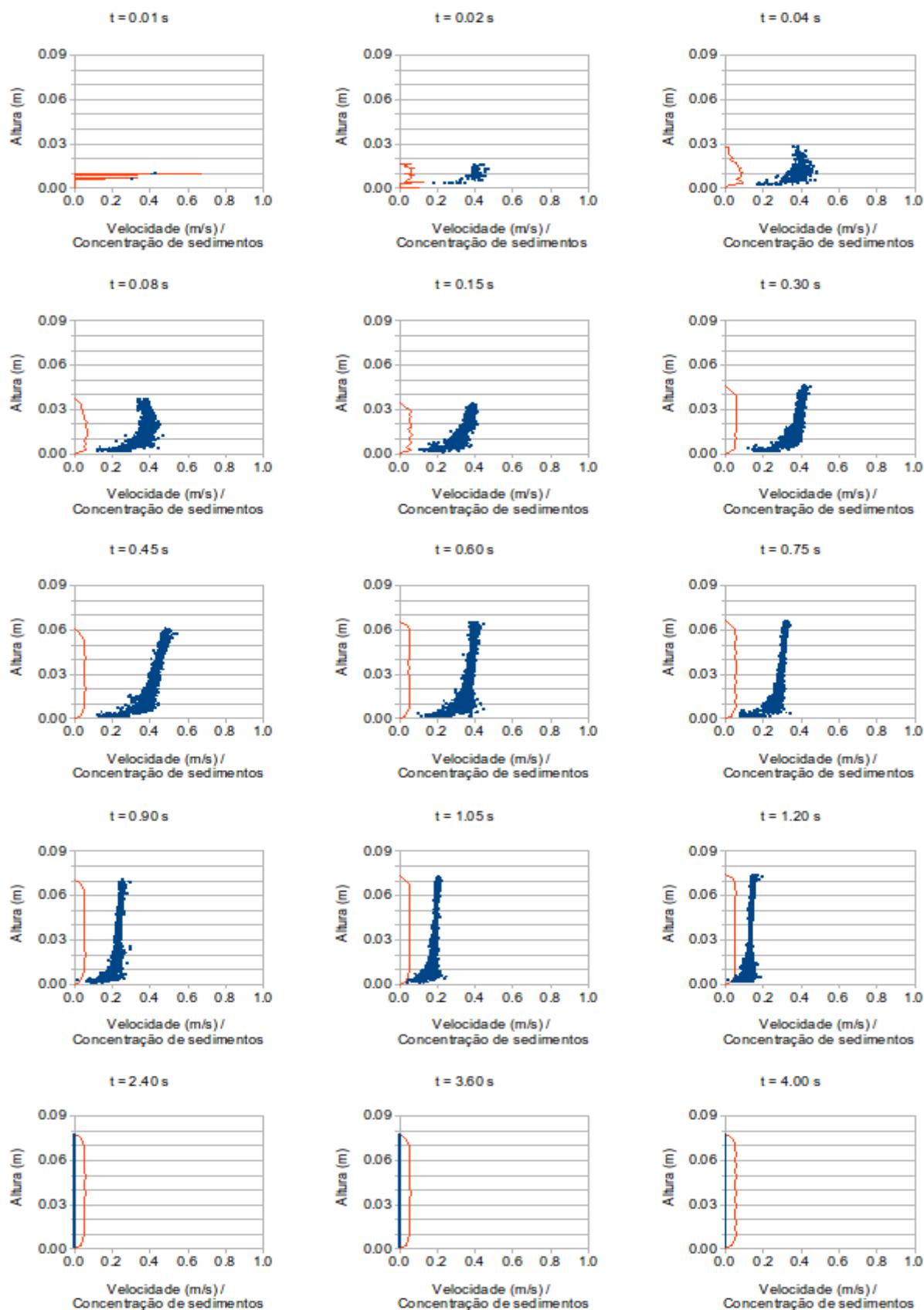


Figura D.2 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 1

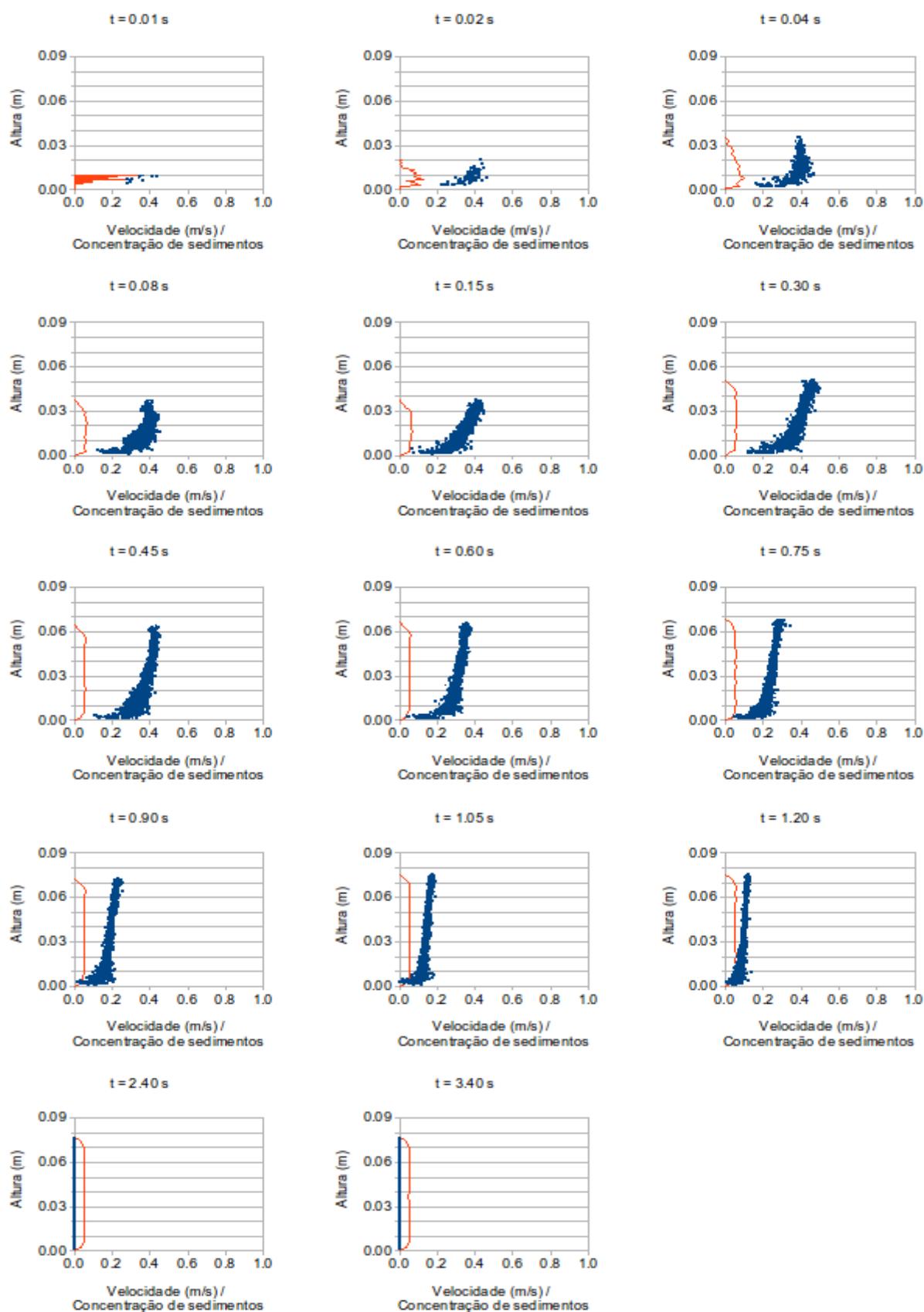


Figura D.3 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 1

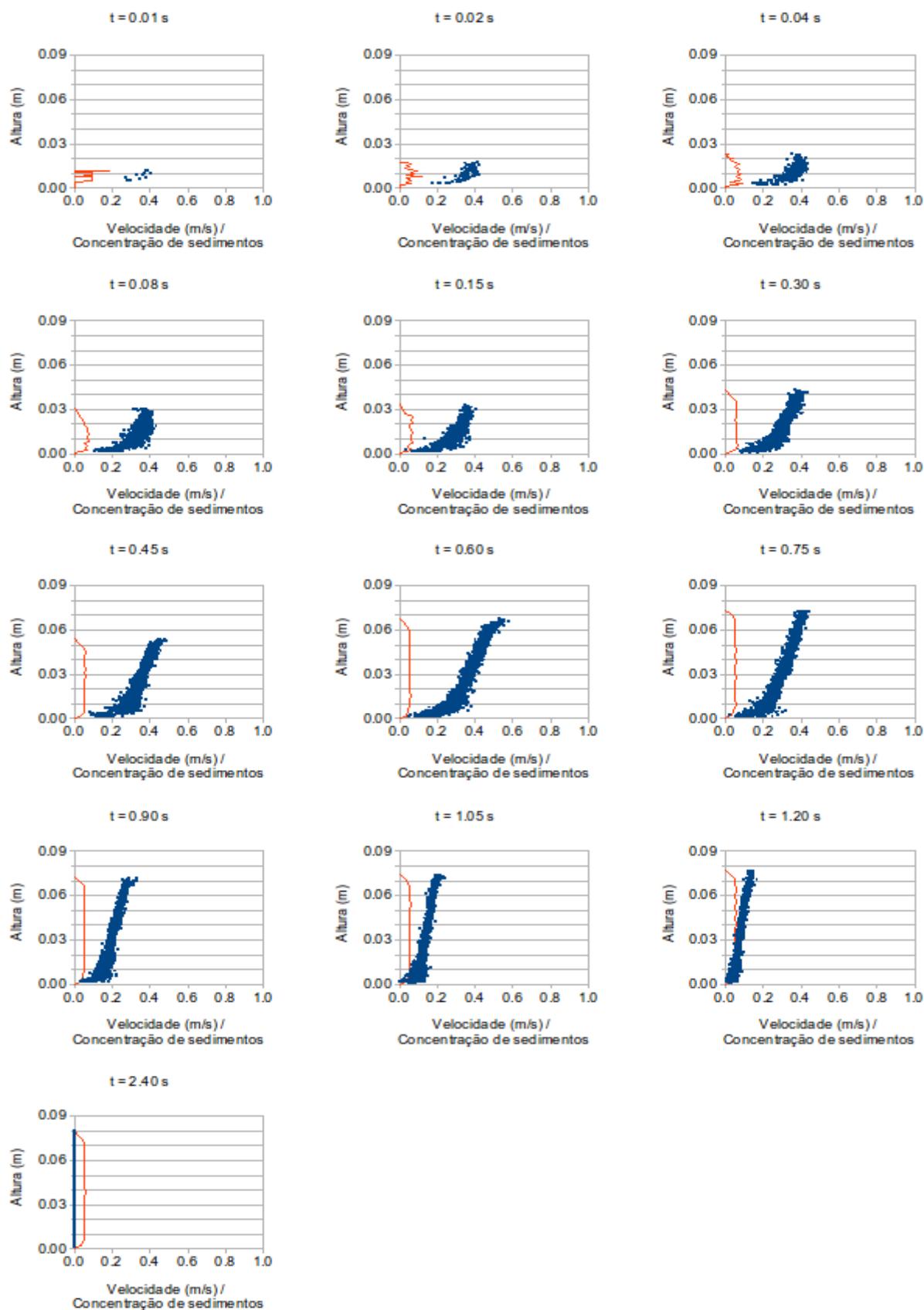


Figura D.4 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 1

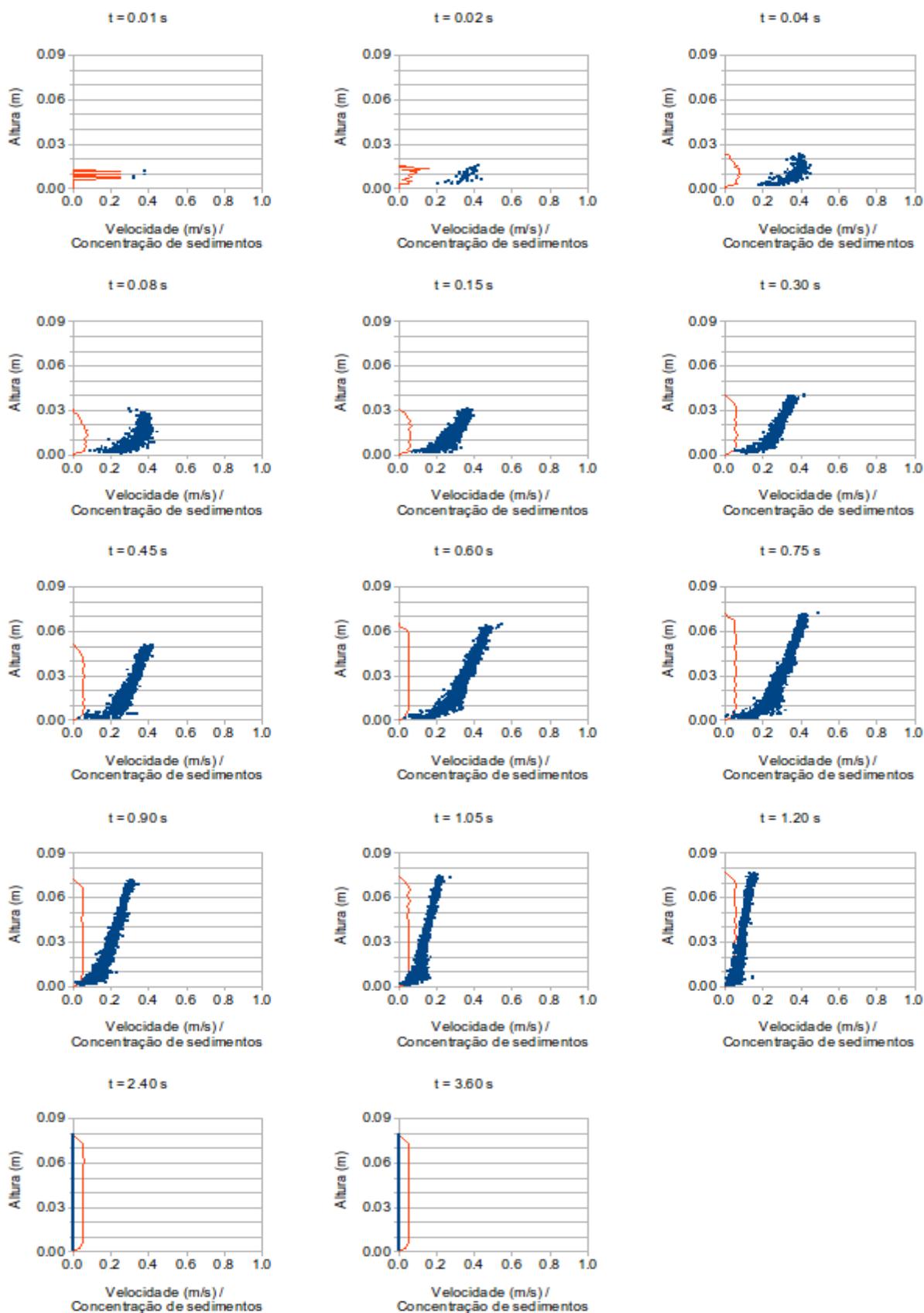


Figura D.5 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 1

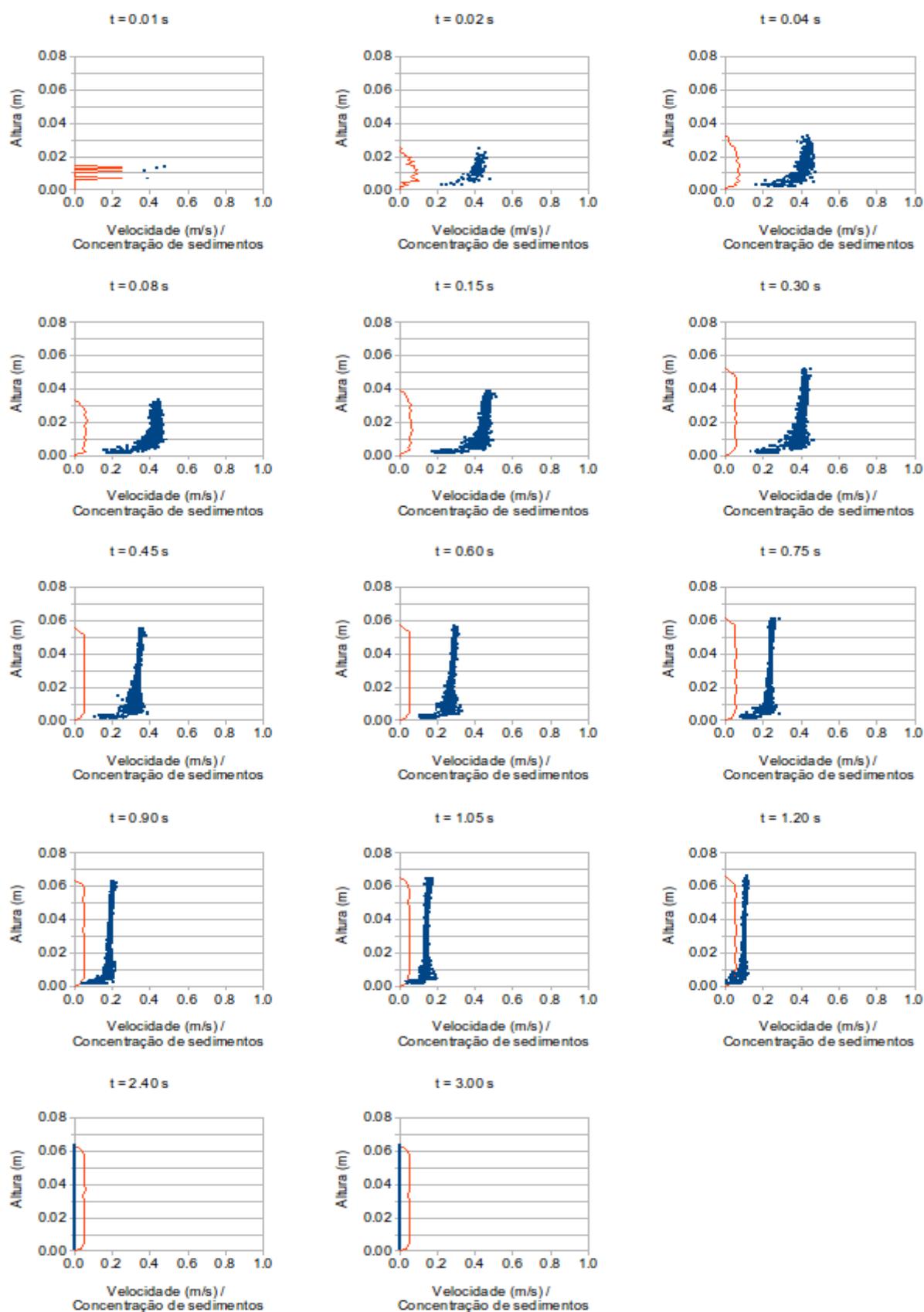


Figura D.6 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 4

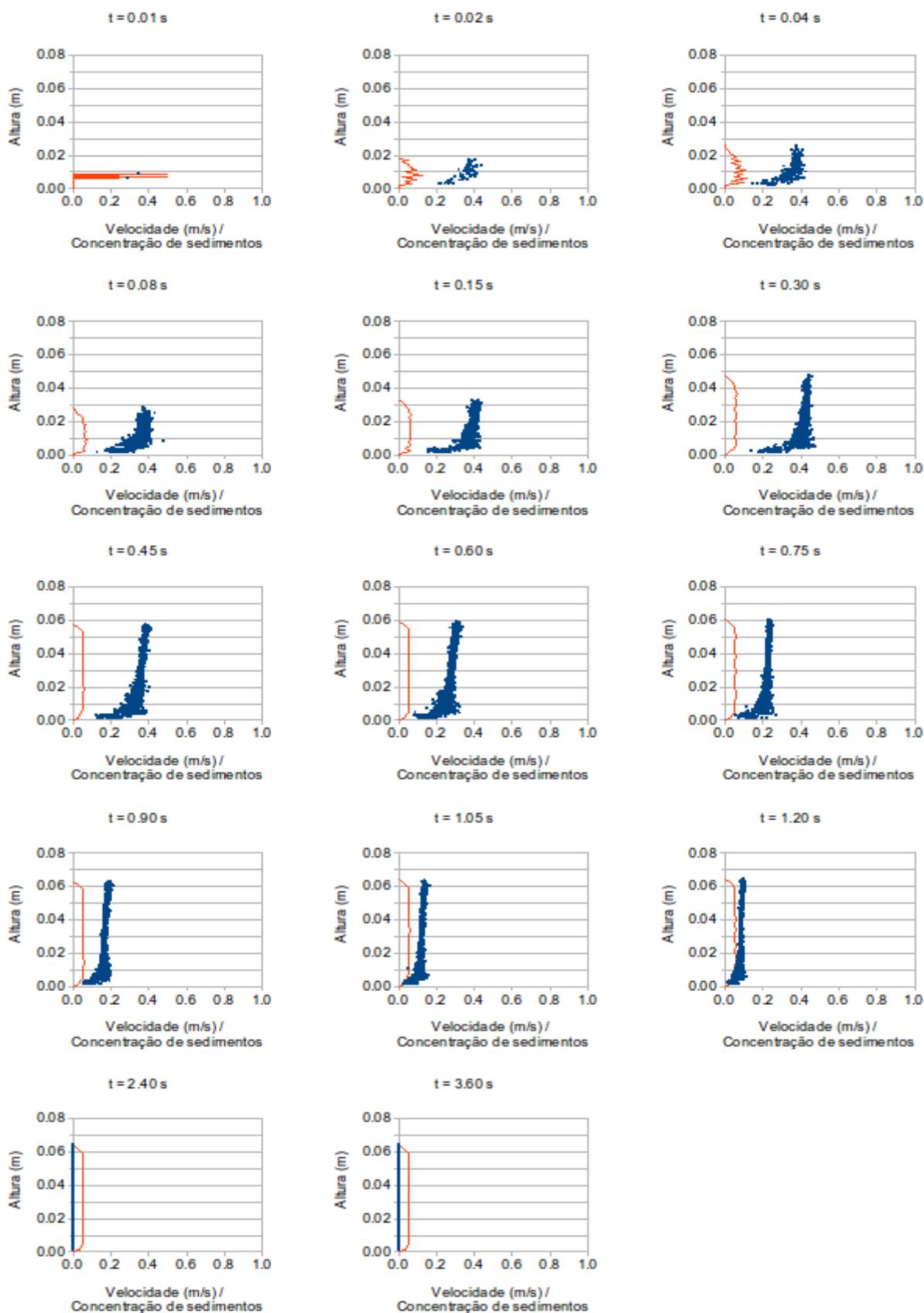


Figura D.7 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 4

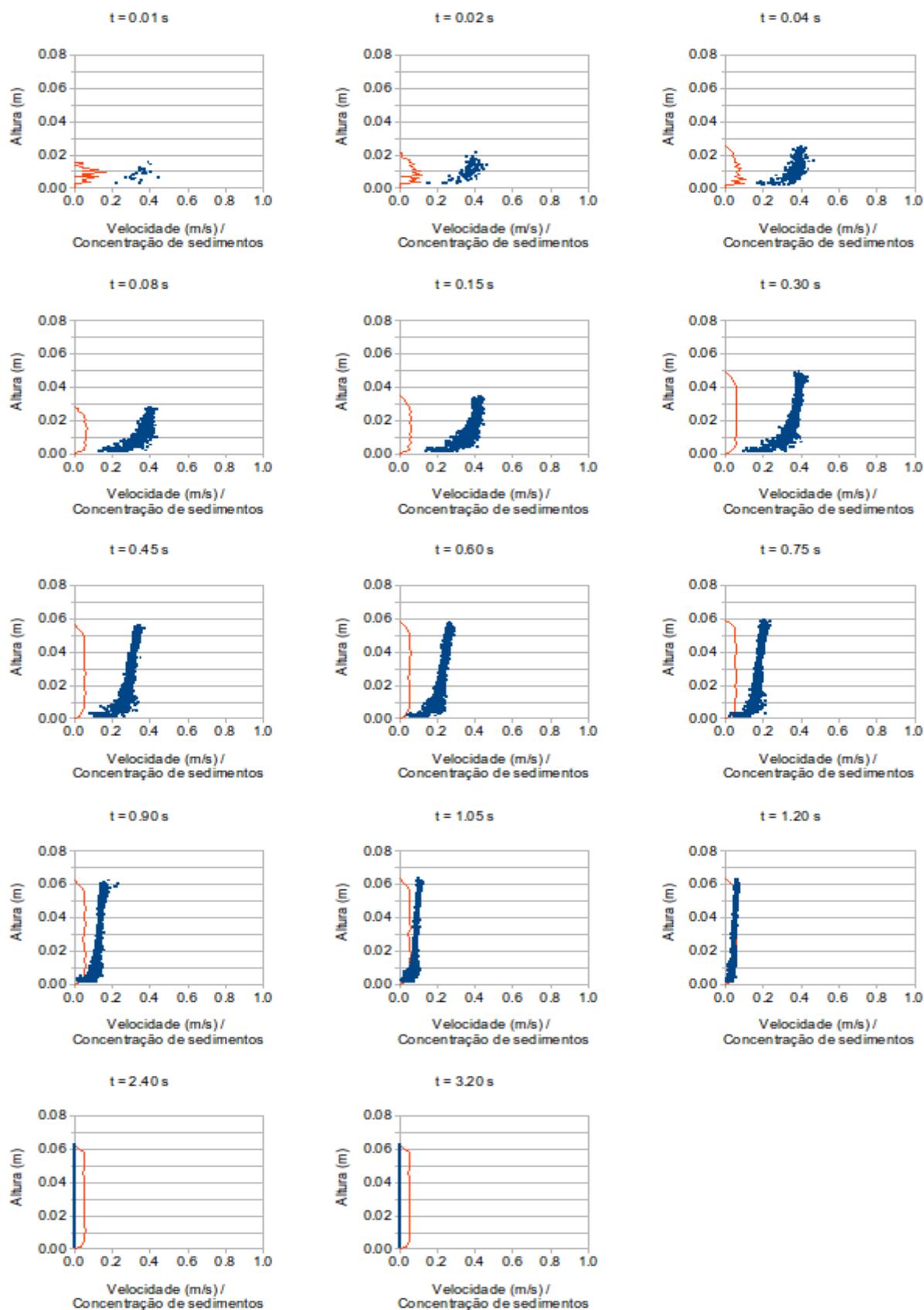


Figura D.8 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 4

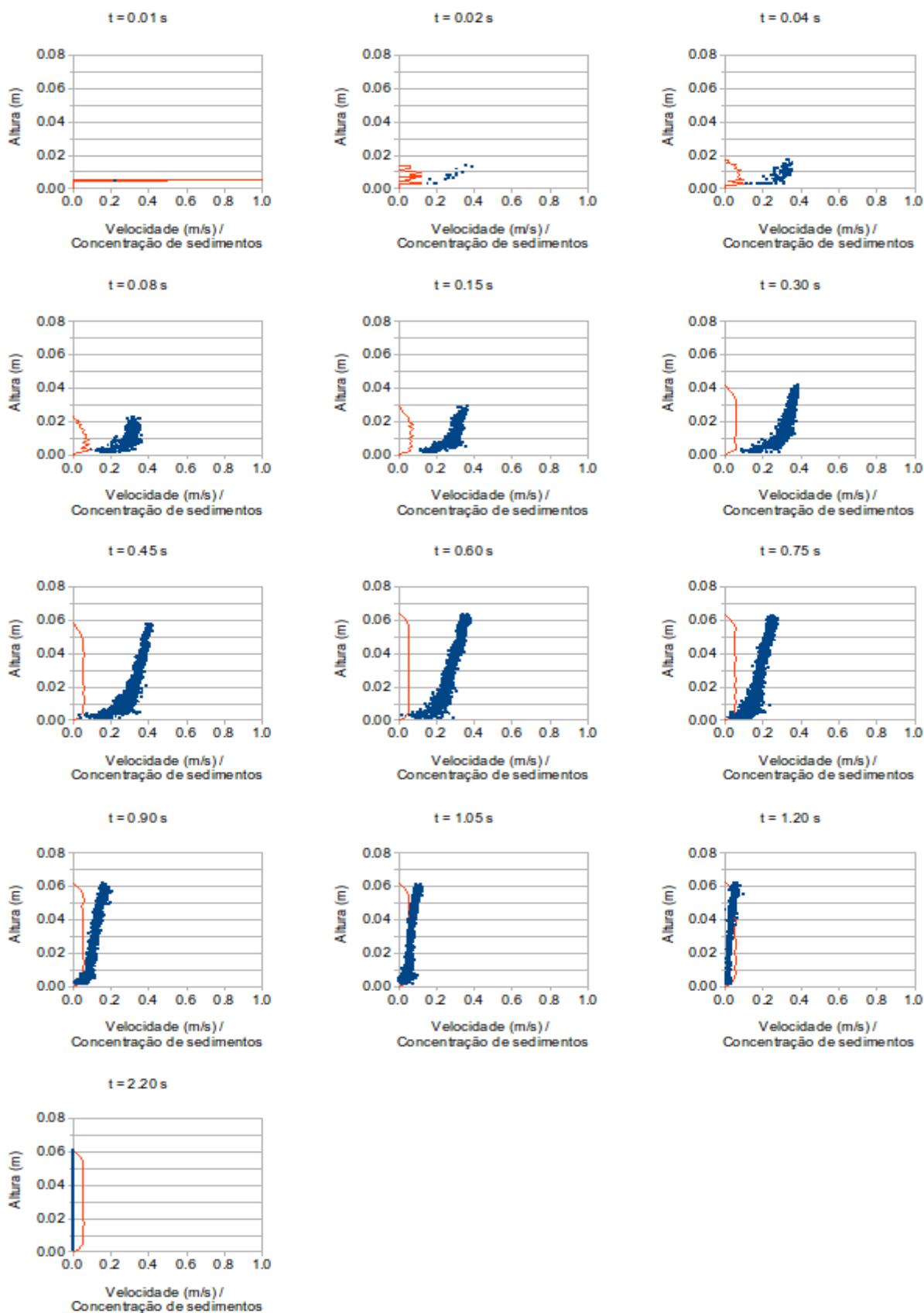


Figura D.9 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 4

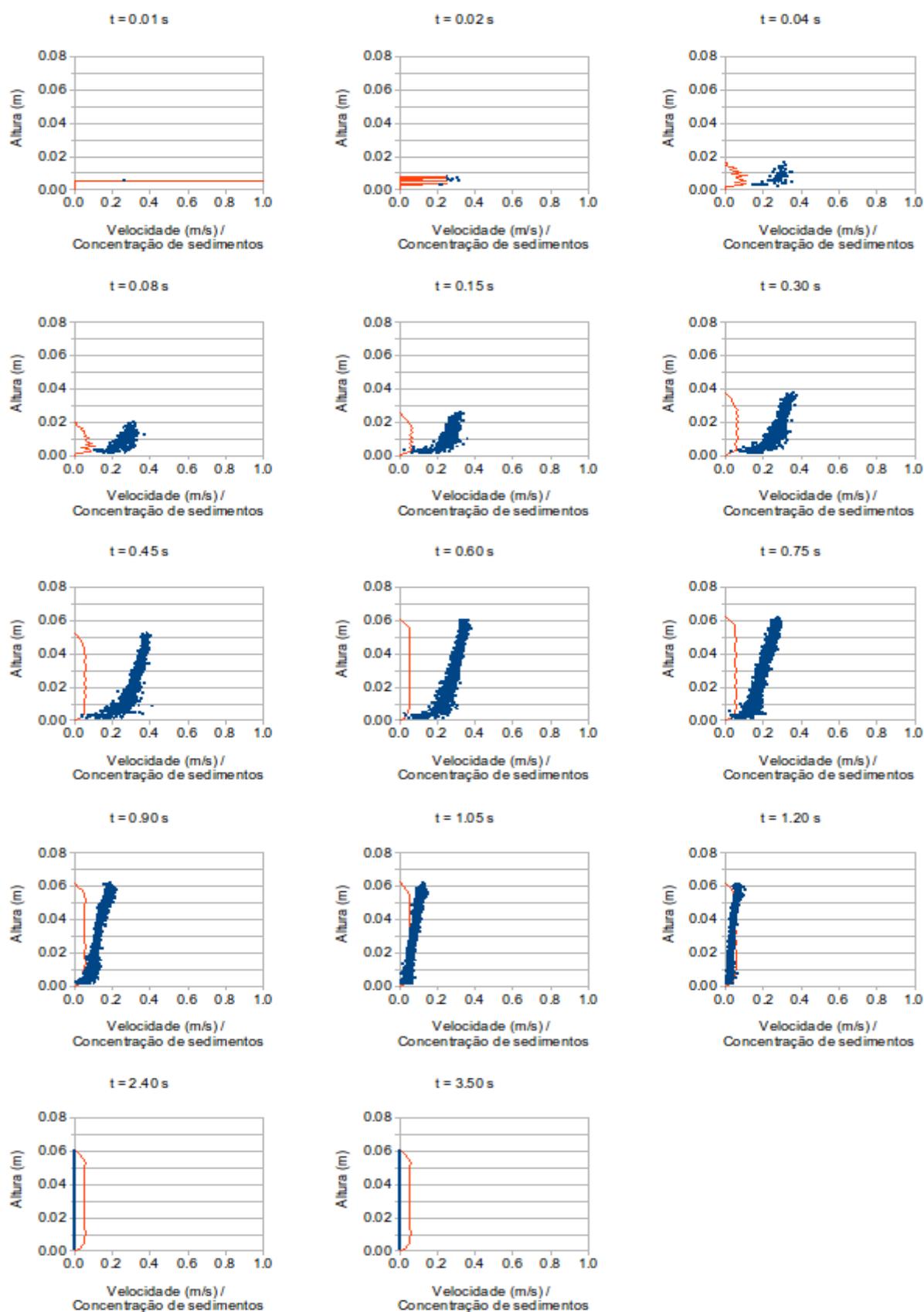


Figura D.10 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 4

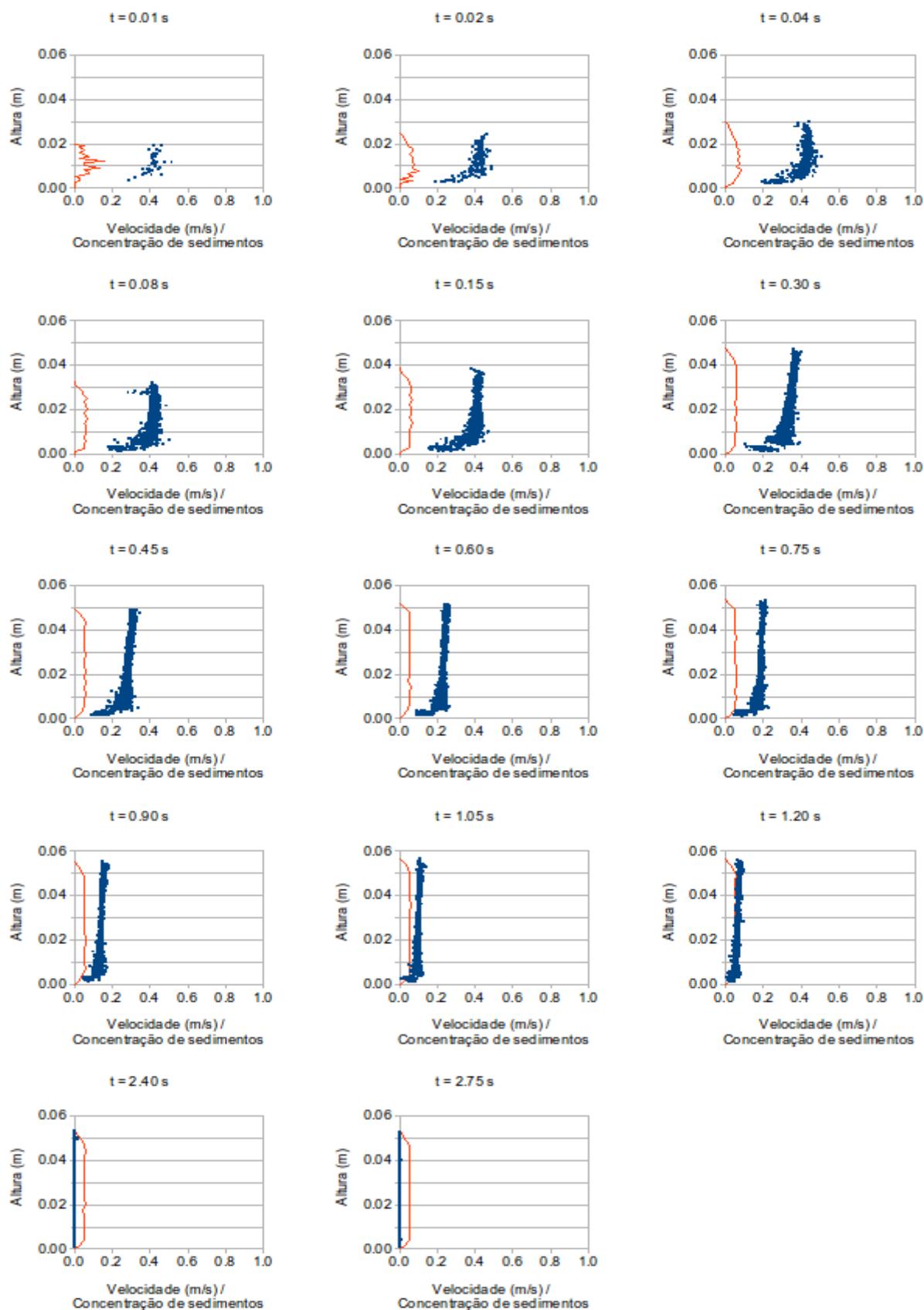


Figura D.11 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 2

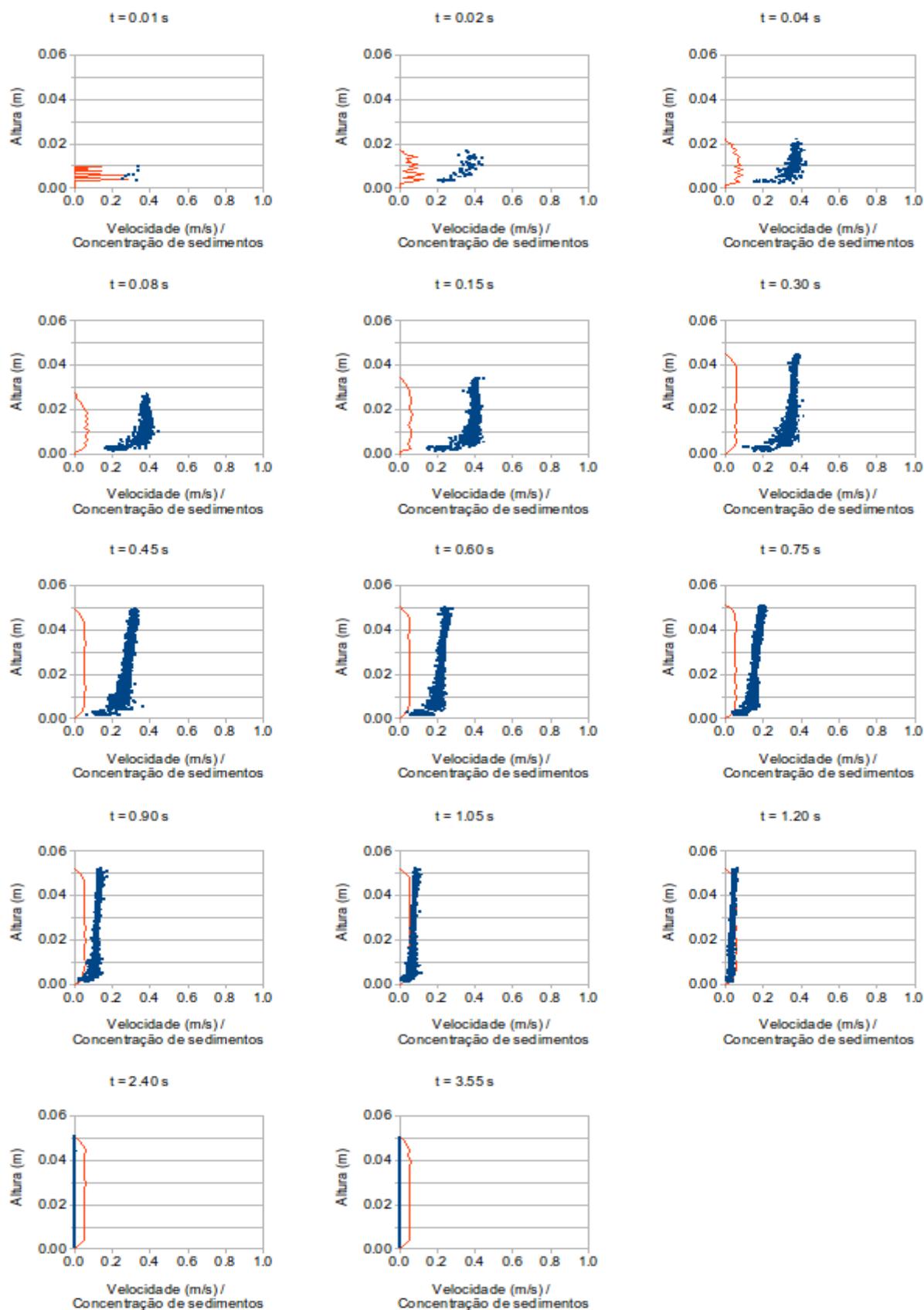


Figura D.12 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 2

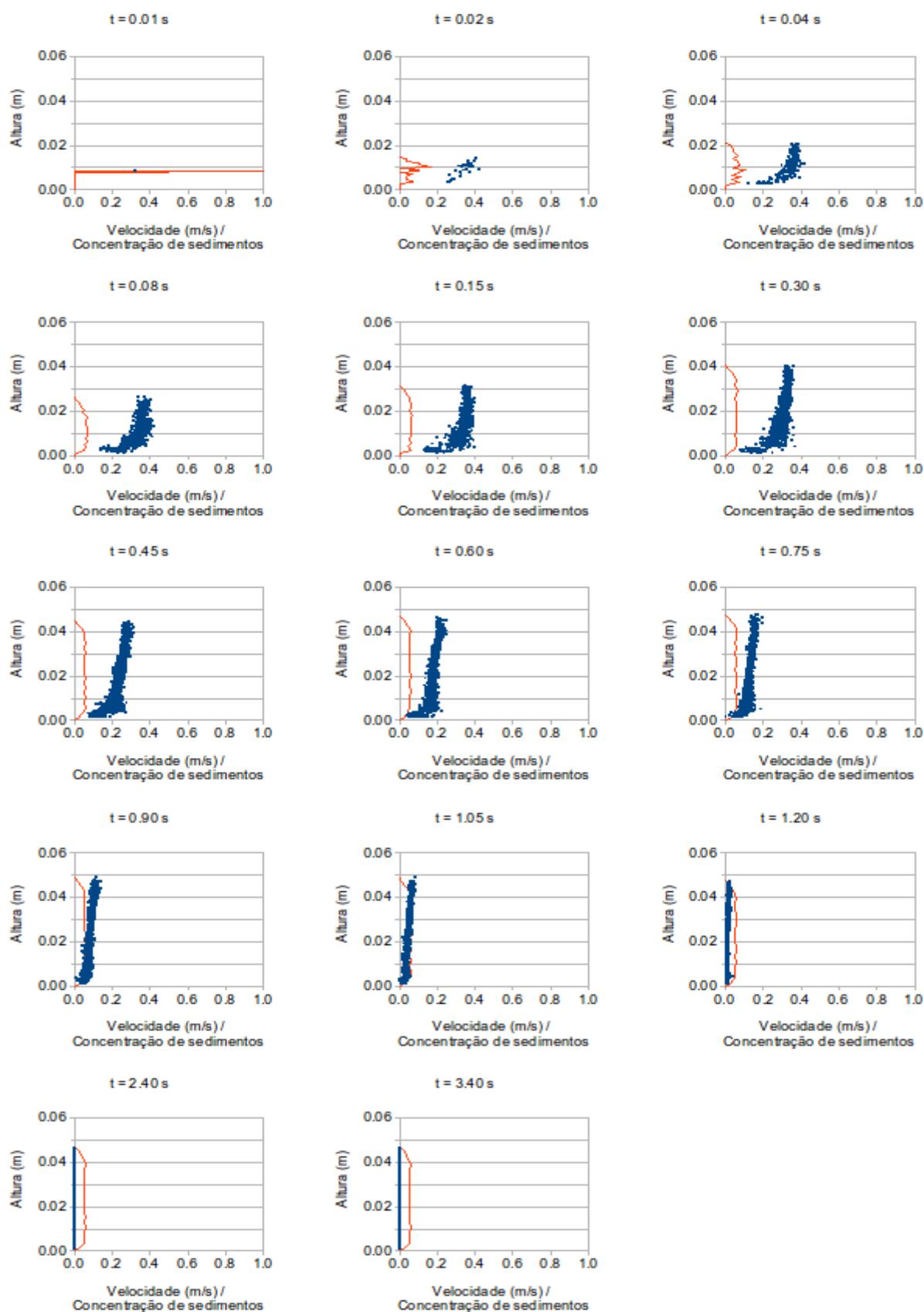


Figura D.13 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 2

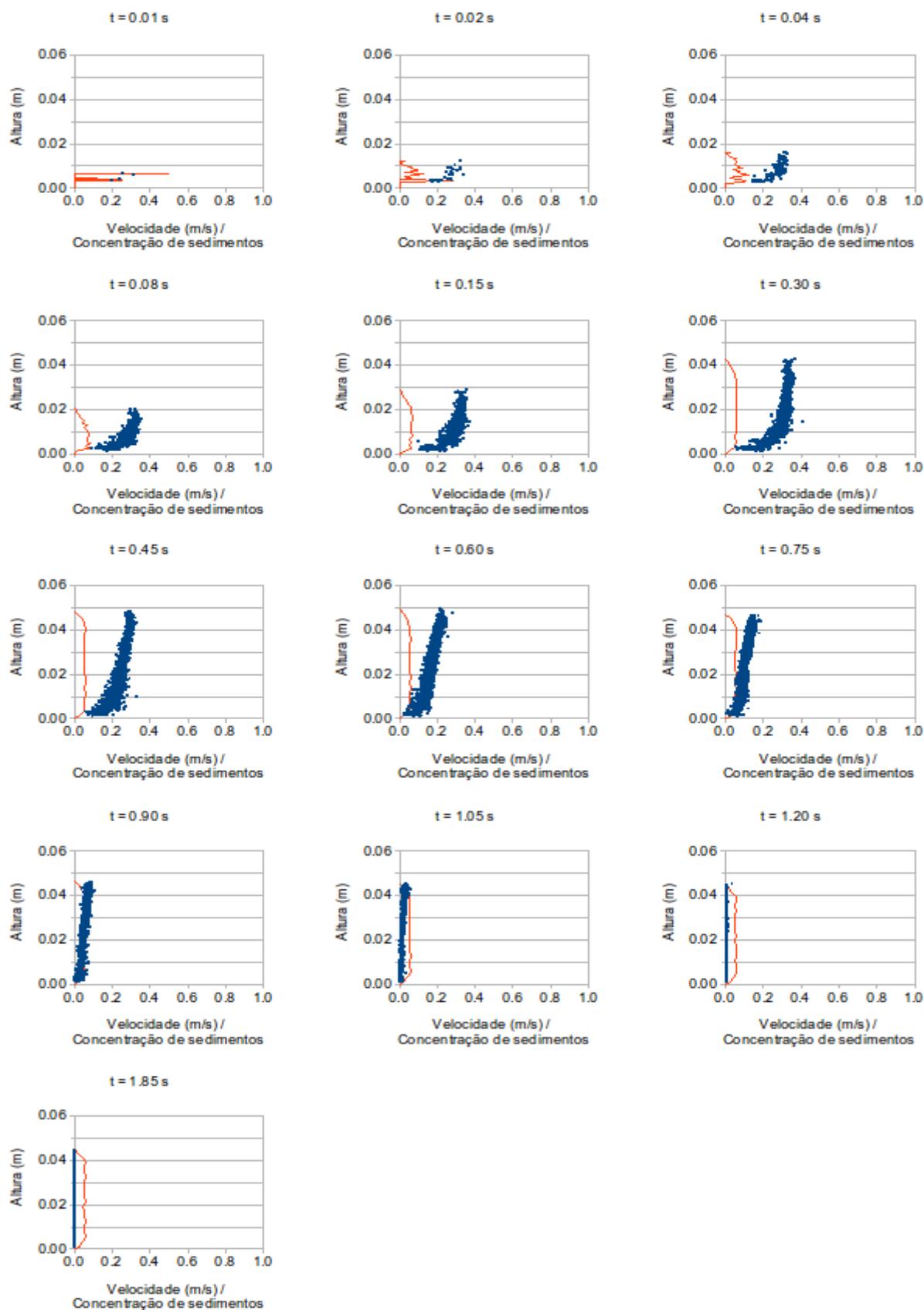


Figura D.14 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 2

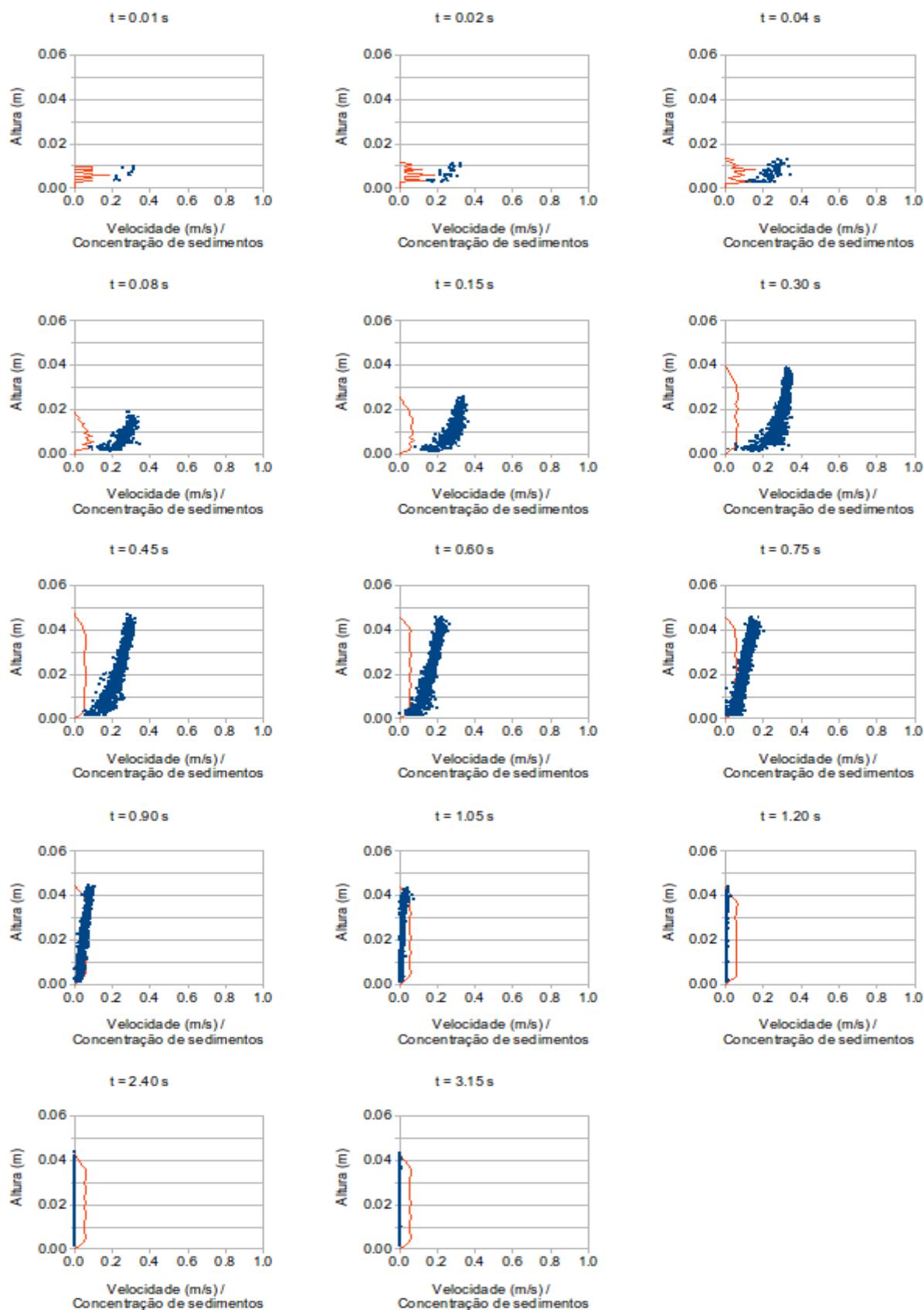


Figura D.15 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 2

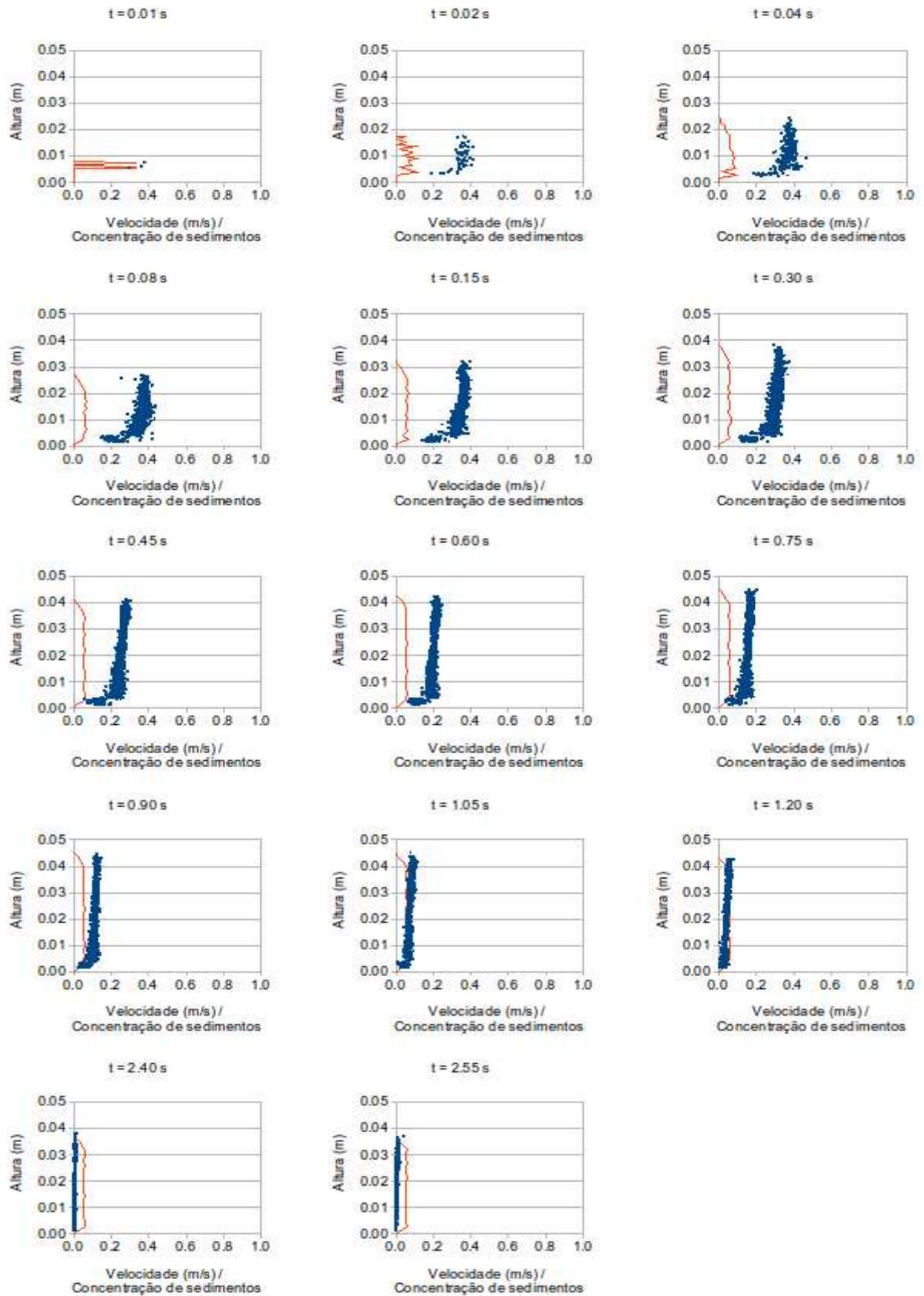


Figura D.16 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 5

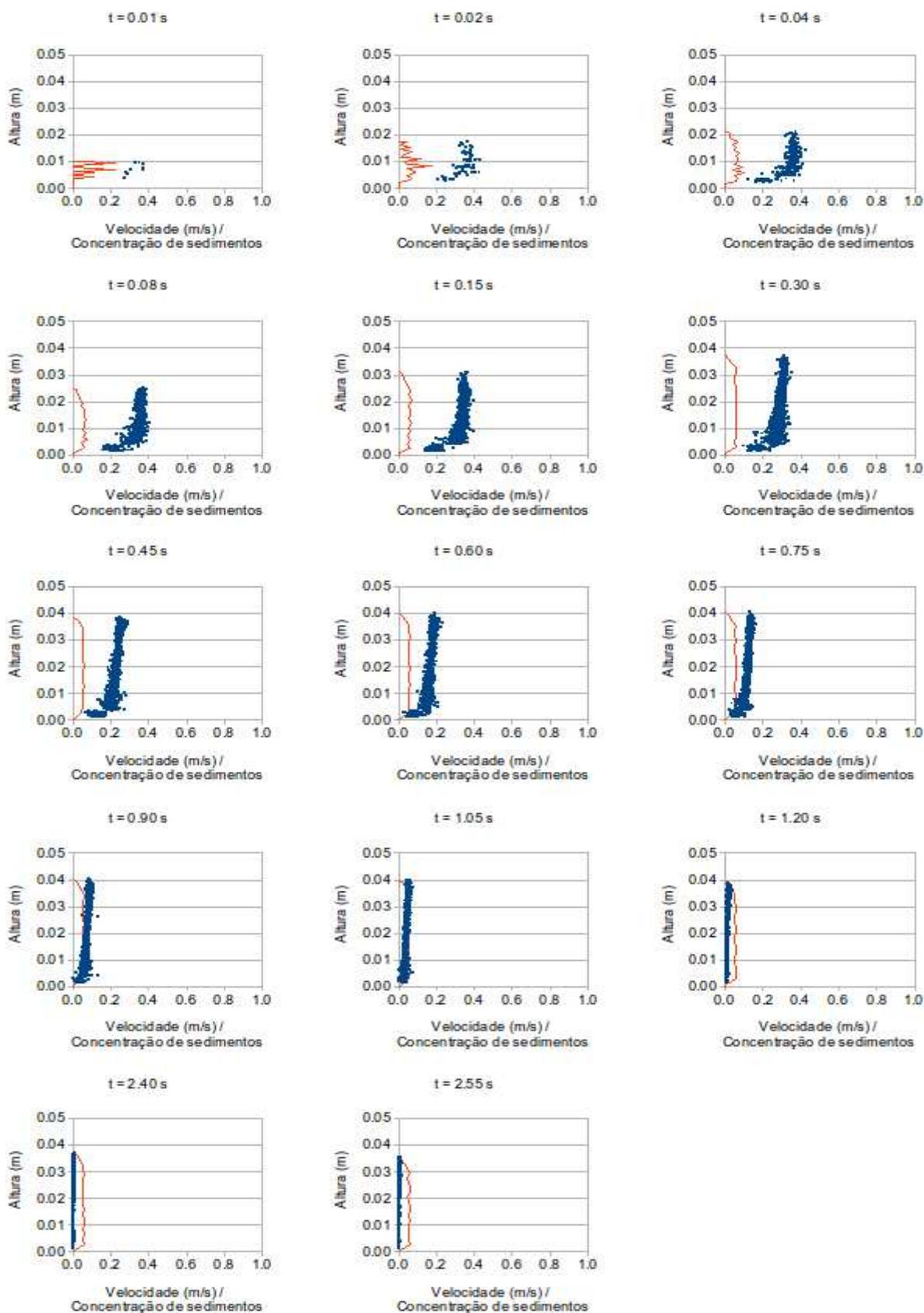


Figura D.17 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 5

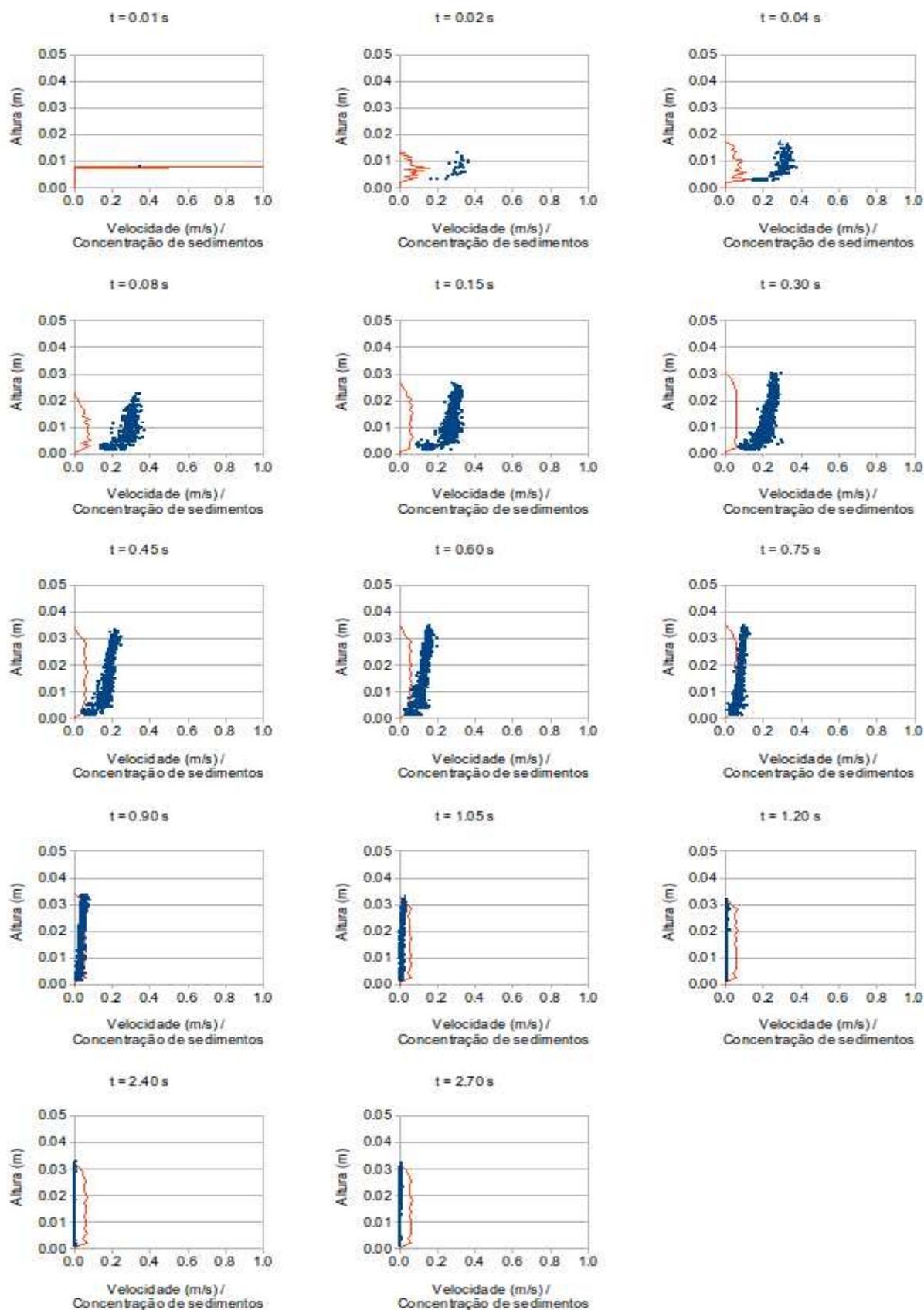


Figura D.18 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 5

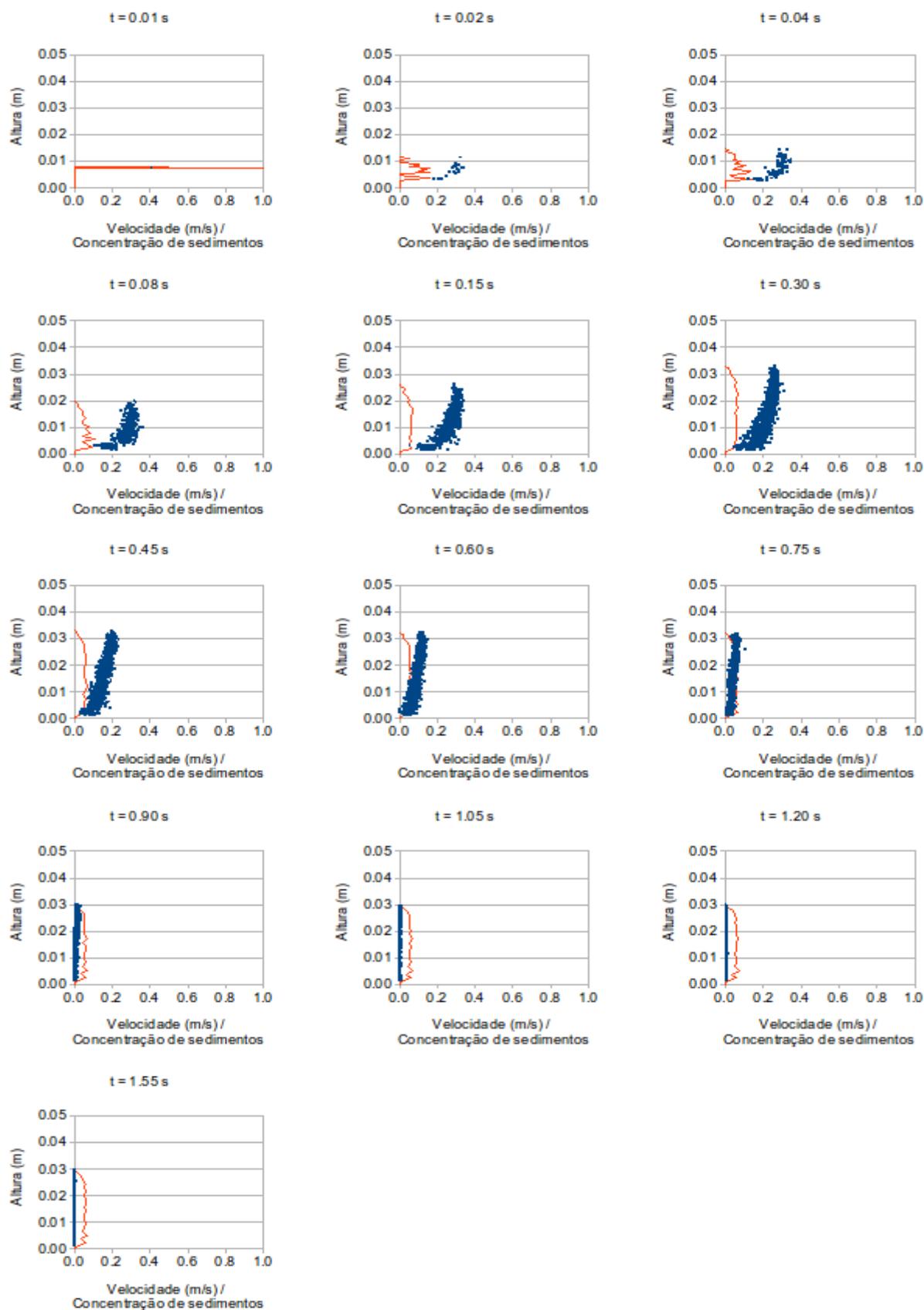


Figura D.19 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 5

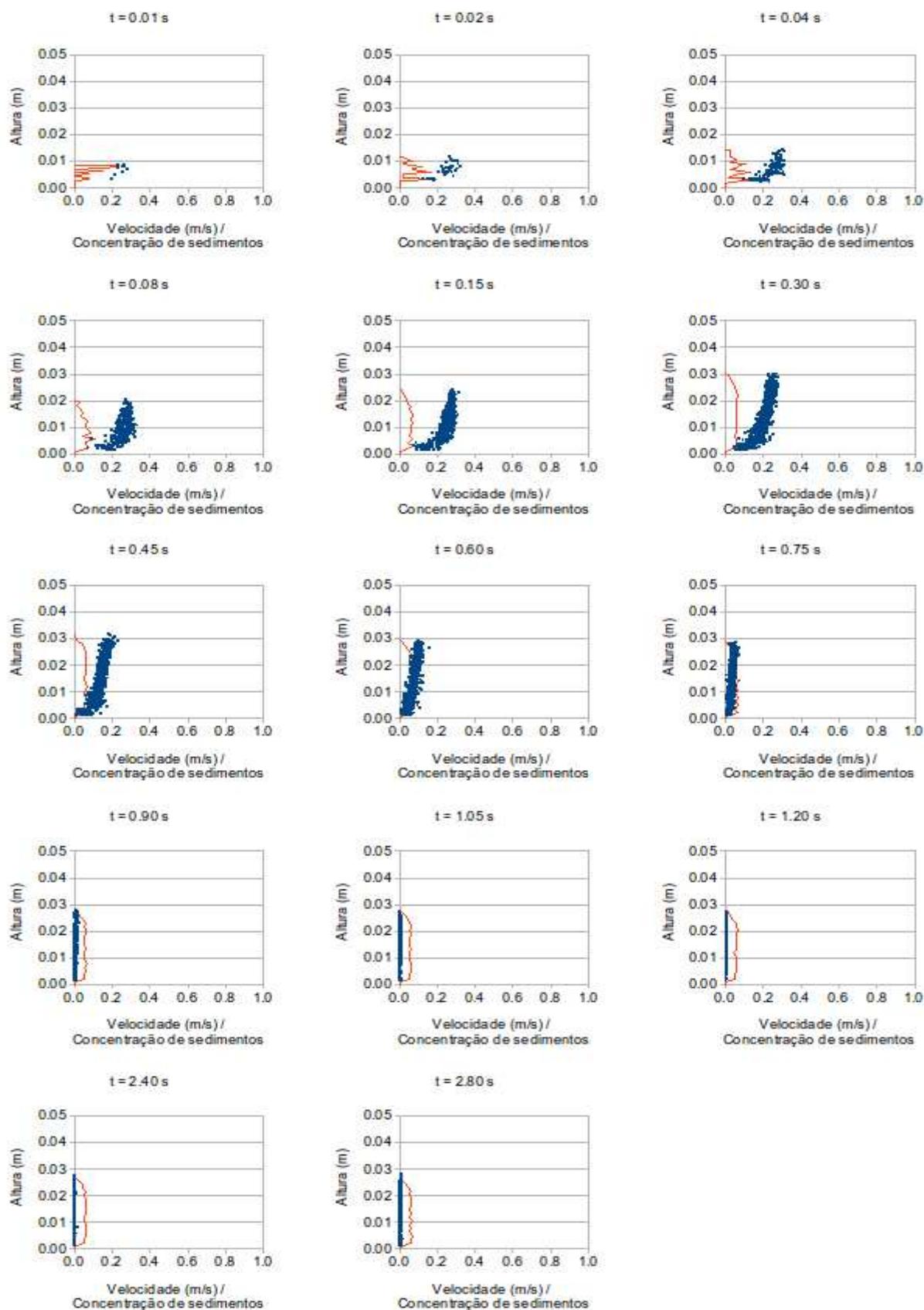


Figura D.20 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 5

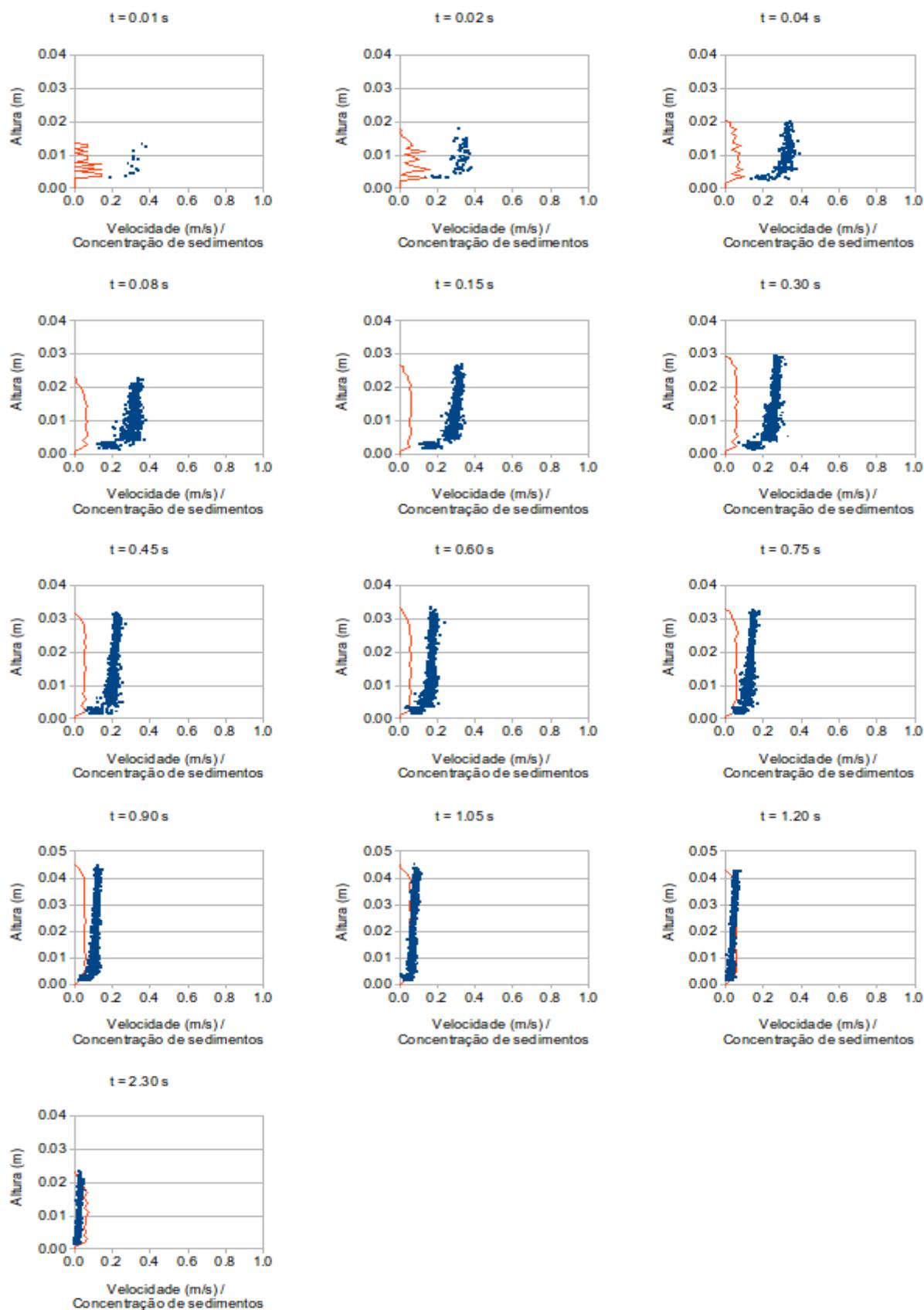


Figura D.21 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,54 na Região 3

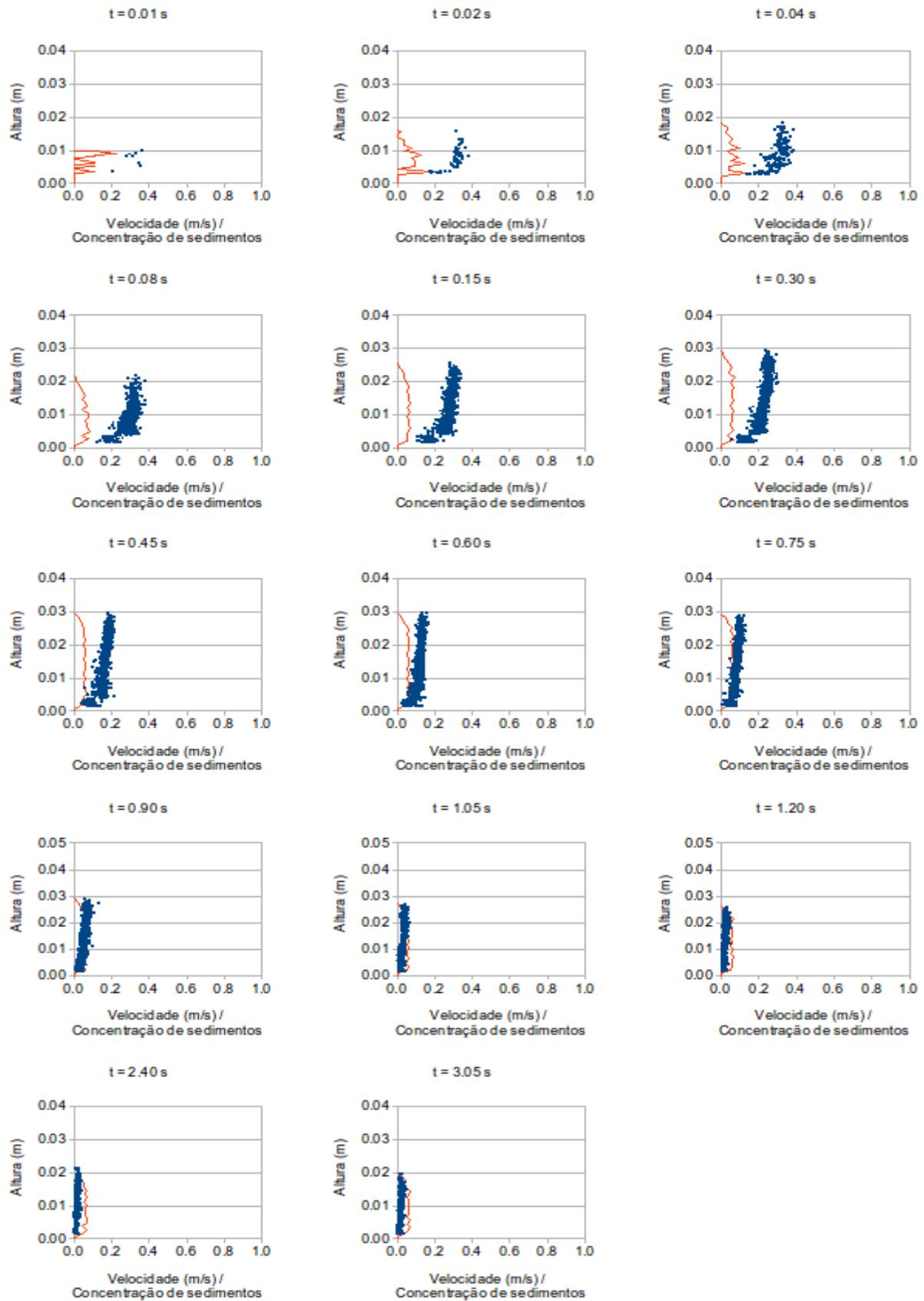


Figura D.22 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,60 na Região 3

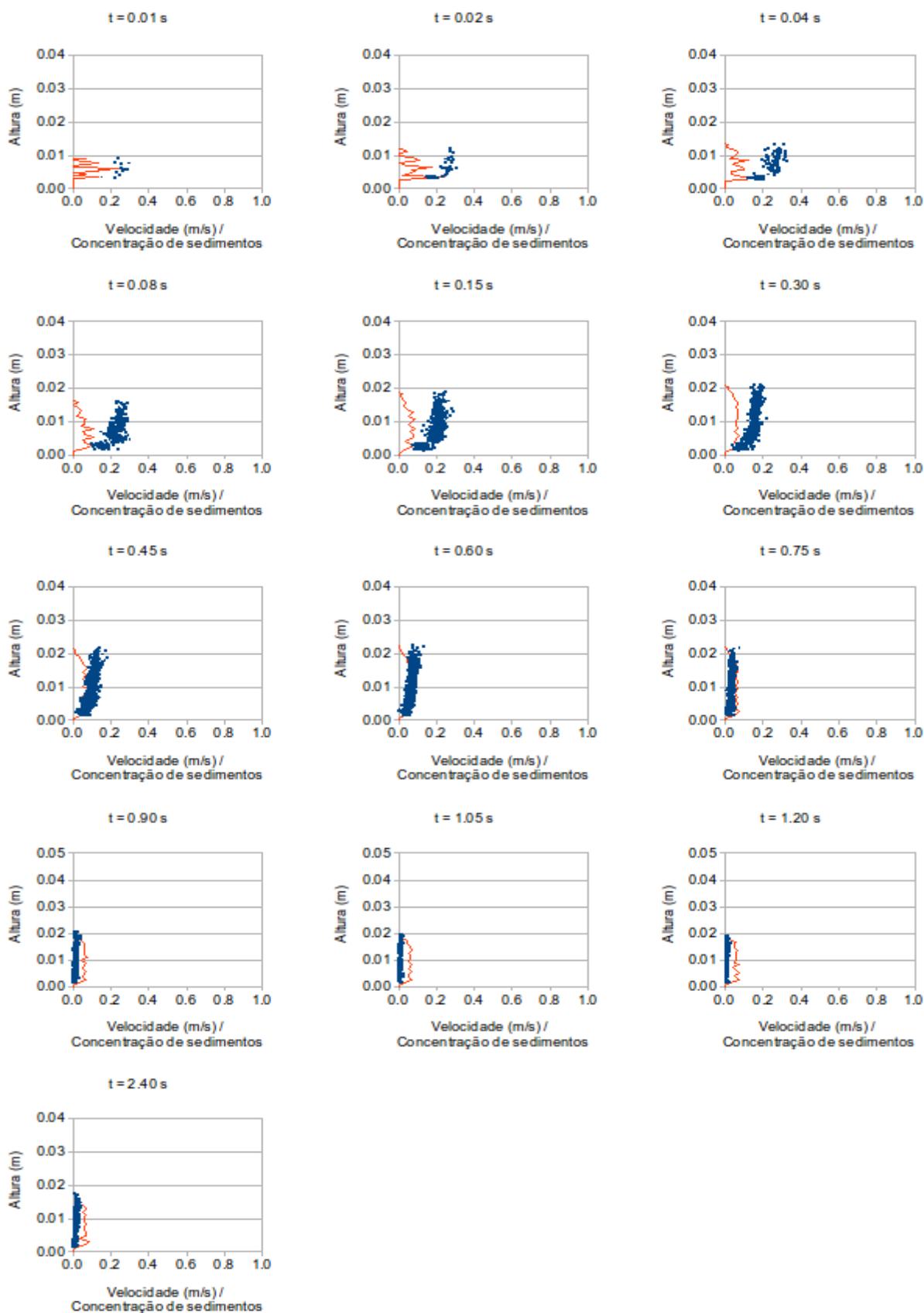


Figura D.23 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,70 na Região 3

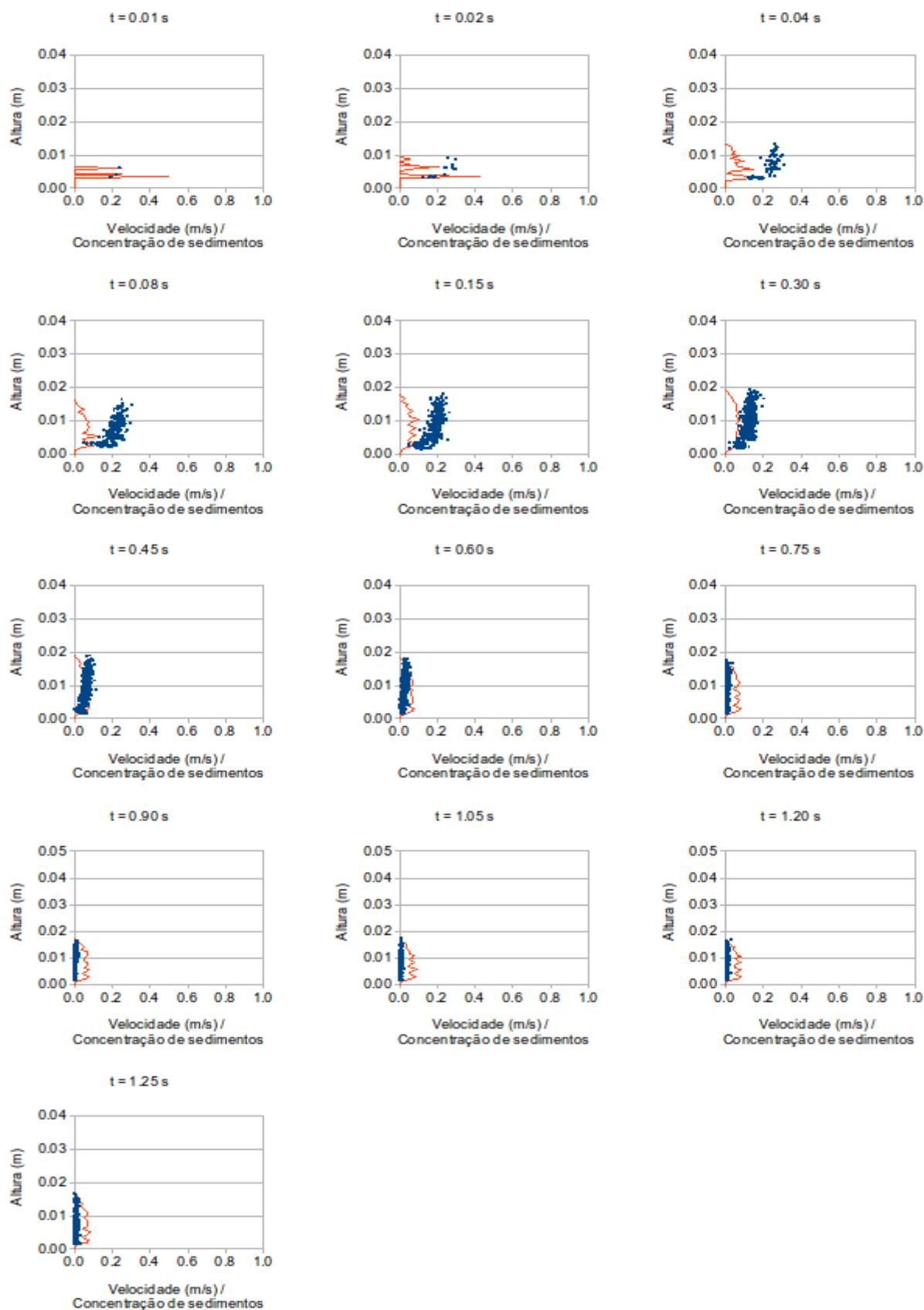


Figura D.24 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,81 na Região 3

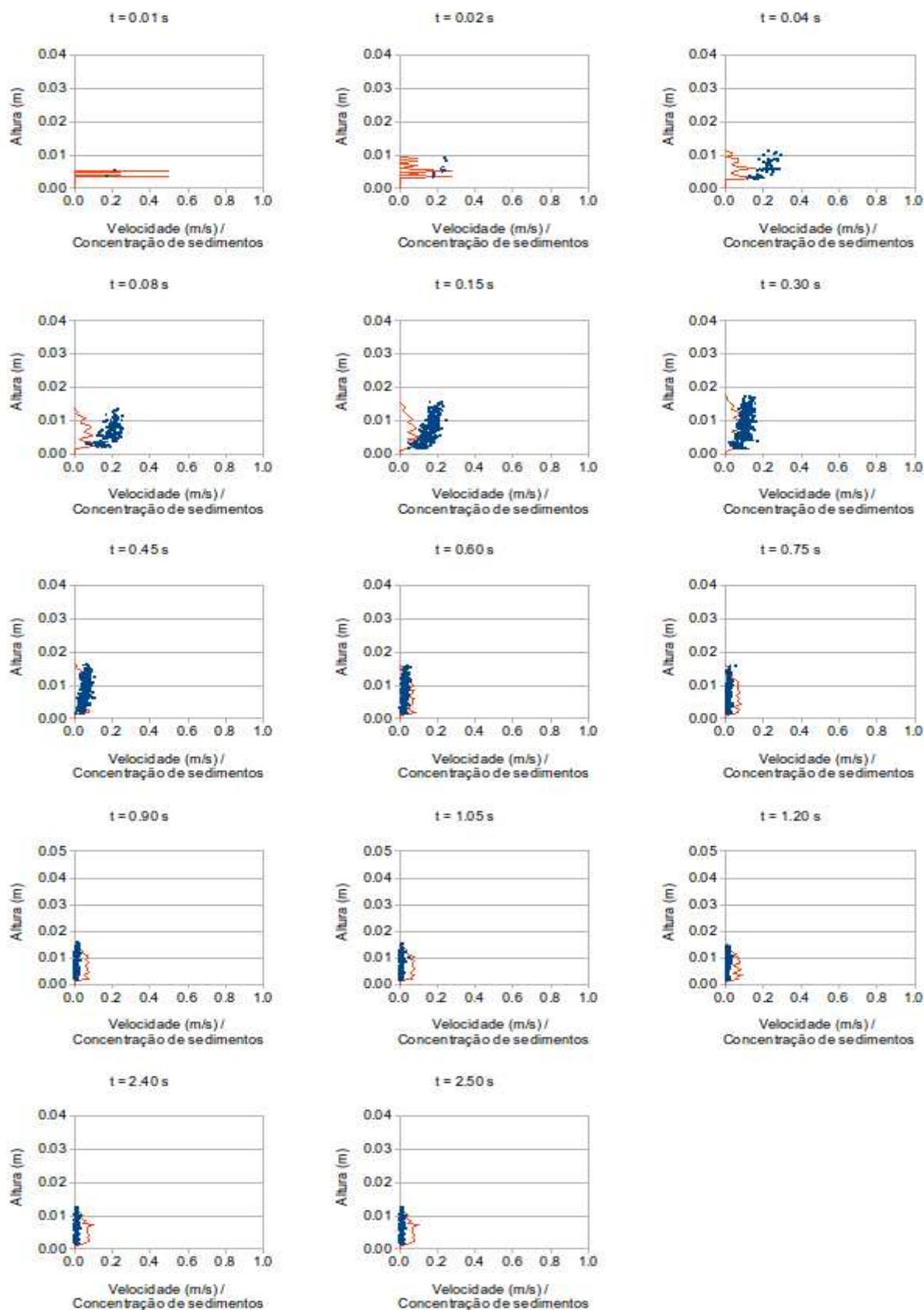


Figura D.25 – Perfis verticais de velocidade e de concentração do fluxo subaquático com coeficiente de atrito igual a 0,85 na Região 3