

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE FORMAS DE FUNDO GERADAS
POR CORRENTES DE DENSIDADE SALINA EM CANAL DE
FUNDO MÓVEL**

DÉBORA KARINE KOLLER

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul com requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Manica

Banca Examinadora:

Prof ^ª . Dr ^ª . Ana Luiza de Oliveira Borges	IPH/UFRGS
Prof. Dr. Eduardo Puhl	IPH/UFRGS
Prof. Dr. Elírio E. Toldo Junior	CECO/UFRGS
Eng. Dr. Juan José Fedele	ExxonMobil/USA

Porto Alegre, abril de 2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**ESTUDO EXPERIMENTAL DE FORMAS DE FUNDO POR
CORRENTES DE DENSIDADE SALINA**

DÉBORA KARINE KOLLER

Orientador: Prof. Dr. Rafael Manica

Porto Alegre, 15 de abril de 2016

APRESENTAÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Rafael Manica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Um grande número de amigos foi essencial para tornar o desenvolvimento e a conclusão dessa etapa um processo proveitoso, enriquecedor e espontâneo. A todas elas, meu sincero agradecimento.

Gratidão eterna a minha família, pai, mãe e manas, sempre acreditando e incentivando a continuidade dos estudos, seja financeira e amorosamente.

Aos amigos dos diversos grupos de amigos: amigos da igreja, gurias do handebol, grupinho da academia e colegas da UFRGS. A todos vocês, minha gratidão.

A toda equipe NECOD, com seus professores, técnicos e bolsistas, que transmitiram seu conhecimento científico e técnico e com quem desfrutei muitos momentos de descontração.

Ao meu orientador, professor Manica, pelo conhecimento, incentivo e tranquilidade transferidos a mim até a entrega desse trabalho.

Ao CNPq, pela bolsa de mestrado.

A empresa Exxon Mobil, por meio de seus engenheiros Juan Fedele, David Hoyal e geólogo Vitor Abreu, pelo auxílio financeiro que possibilitou o desenvolvimento dessa pesquisa.

A Deus, que me deu vida, sabedoria e amor, para que eu não desistisse perante qualquer adversidade.

RESUMO

A interação proporcionada pela passagem de correntes sobre leitos móveis pode resultar na gênese das formas de leito, geralmente encontradas em ambientes subaéreos, rios, lagos, reservatórios e ambientes submarinos. Essas últimas podem ser geradas por correntes de densidade, definidas como fluxos gravitacionais cujo movimento é regido pela diferença de densidade entre o fluxo e o fluido ambiente. Com o intuito de compreender a geração das formas de fundo por correntes de densidade, foram realizados 29 experimentos, nos quais cerca de 4000 litros de uma corrente salina eram injetados em um canal de acrílico de 18 m de comprimento, 0,2 m de largura e 0,5 m de altura, de declividade variável, submerso em um canal maior, preenchido por água. Realizaram-se medições de vazão, velocidade e concentração, além do registro fotográfico da alteração do leito, durante a passagem da corrente e após o término do experimento e esvaziamento do tanque. Os resultados mostraram perfis de velocidade e concentração típicos de correntes de densidade. Além disso, algumas correlações foram encontradas, como a diminuição da altura da velocidade máxima em relação ao leito e aumento da velocidade média, com consequente diminuição da espessura da corrente, devido ao aumento da concentração e/ou inclinação do canal. A ocorrência das formas de fundo se mostrou mais comum para altos valores de vazão e de concentração da corrente de densidade, influenciando diretamente o valor do número de Froude densimétrico (Fr_d). As correntes reproduziram 8 escoamentos de regime subcrítico e 21 supercríticos, com Fr_d entre 0,5 e 2,2. As formas geradas foram classificadas conforme a presença de sedimentos em suspensão durante a sua geração e, também, em relação aos valores das tensões de cisalhamento aplicadas pela corrente junto ao leito, resultando na geração de formas de leito plano inferior, ondulações e dunas. As dunas e também, em alguns ensaios, as ondulações, foram observadas em condições supercríticas de escoamento, cenário hidráulico de geração não previsto por modelos fluviais de formas de fundo. Sendo assim, esse estudo evidenciou a existência de diferenças na geração e, consequentemente, na abordagem de classificação das formas de fundo por correntes de densidade, em relação às geradas por escoamentos fluviais. Conclui-se, também, que a metodologia e os equipamentos empregados nesse estudo são adequados para reproduzir a geração de formas de leito por correntes de densidade, e para obter dados caracterizadores das correntes e do leito móvel, aperfeiçoamento do entendimento dos processos envolvidos nesse fenômeno.

ABSTRACT

Bedforms are sedimentary features generated by the interaction between flow and mobile beds and are observed in subaerial settings, rivers, lakes and in submarine environments. In most cases, bedforms found in submarine settings are generated by density currents, defined as gravitational flows whose movement is governed by the density difference between the current and the environment fluid. This study aimed to improve the knowledge on bedforms generated by density currents in comparison to the fluvial ones. Therefore, we report results from 29 experiments on saline density currents running over different mobile beds, in an 18-m long and 0.20-m wide acrylic flume submerged in a large fresh water tank. Discharge, velocity (velocity profiler) and concentration (siphons and hydrometer) of the currents were measured during the experiments, as well as image sequences of the bed modification. After each experiment, the flume was drained and top view pictures were also taken. Results have showed classical velocity and concentration profiles for density currents. In addition, some correlations were identified, such as the decrease of the velocity peak height and increase in the mean velocity (with consequent reduction of the current thickness), due to an increase of the concentration and/or flume slope. The occurrence of bedforms was more likely for high discharge and concentration rates of current density, which directly influence the densimetric Froude Number (Fr_d). The experiments generated 8 subcritical and 21 supercritical currents, with Fr_d between 0.5 and 2.2. The bedforms were classified according to the presence of sediments during its generation and in relation to the shear stresses values applied by the current to the bed, resulting in the generation of lower plane bed of ripples and dunes. Dunes and ripples were observed in supercritical flow conditions, which is a hydraulic scenario of bedform generation not provided by fluvial models. Thus, this study demonstrated the existence of differences in generation and, consequently, the classification approach of the background shapes for current density, compared to those generated by river flows. In conclusion, this study showed that the methodology and equipment used are suitable to reproduce the bedform generation by density currents, and to obtain density current and moving bed characterizing data, improving the understanding of the processes involved in this phenomenon.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. JUSTIFICATIVA	3
3. OBJETIVOS	4
3.1 OBJETIVO GERAL	4
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
4.1 CORRENTES DE DENSIDADE	5
4.2 FORMAS DE LEITO.....	7
4.2.1 Formas de leito fluviais	8
4.2.2 Formas de leito por correntes de densidade	17
4.3 PARÂMETROS DO LEITO E DA CORRENTE DE DENSIDADE	18
4.3.1 Perfil de velocidades e concentrações médias e espessura da corrente de densidade ¹⁹	
4.3.2 Número de Reynolds da corrente	19
4.3.3 Tensão e velocidade de cisalhamento	20
4.3.4 Tensão de cisalhamento adimensional (parâmetro de Shields) e número de Reynolds da partícula	22
4.3.5 Diâmetro médio do grão adimensionalizado	24
5. MATERIAIS E MÉTODOS	25
5.1 APARATO EXPERIMENTAL	25
5.1.1 Canal bidimensional longo.....	25
5.1.2 Canal bidimensional de acrílico e sistema de mudança de inclinação	26
5.1.3 Sistema de alimentação	27
5.1.4 Material sedimentar	28
5.2 AQUISIÇÃO DE DADOS	33
5.2.1 Dados de Vazão.....	33
5.2.2 Dados de Velocidade.....	33
5.2.3 Dados de Concentração.....	34
5.2.4 Registro fotográfico de imagens.....	38
5.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	38

5.4	ENSAIOS REALIZADOS	39
6.	RESULTADOS	42
6.1	VAZÃO DE INJEÇÃO DA CORRENTE DE DENSIDADE	42
6.2	VELOCIDADE, CONCENTRAÇÃO E ESPESSURA DA CORRENTE	44
6.2.1	Velocidade.....	44
6.2.2	Massa específica e concentração da corrente.	47
6.2.3	Espessura da Corrente	50
6.3	OUTROS PARÂMETROS DA CORRENTE DE DENSIDADE E DO LEITO	52
6.4	FORMAS DE LEITO.....	54
7.	ANÁLISE DOS RESULTADOS	59
7.1	CARACTERIZAÇÃO DA CORRENTE DE DENSIDADE.....	59
7.1.1	Perfis de Velocidade.....	59
7.1.2	Perfis de Concentração.....	64
7.1.3	Análise dos demais parâmetros da corrente.	66
7.1.4	Discussão parcial dos resultados	69
7.2	CARACTERIZAÇÃO DO LEITO MÓVEL E DE SUAS FORMAS.....	70
7.2.1	Classificação das formas de leito	71
7.2.3	Geometrias das formas (vista superior).....	77
7.2.4	Geometria da forma <i>versus</i> duração do ensaio.....	81
7.2.5	Discussão parcial dos resultados	83
7.3	COMPARAÇÃO COM A HIDRÁULICA FLUVIAL.....	84
7.3.1	Transporte de sedimentos.....	85
7.3.2	Comprimento e altura das formas de leito	89
7.3.3	Diagramas de previsão de formas de leito	91
7.3.4	Discussões parciais	95
8.	CONCLUSÕES	97
9.	CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	99
9.1	QUANTO À CONTINUIDADE DO ESTUDO	99
9.2	QUANTO À COLETA DE DADOS DE CONCENTRAÇÃO	99
9.3	QUANTO AO BALANÇO DE MASSA	99
9.4	QUANTO À DURAÇÃO DOS ENSAIOS.....	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
	ANEXO A – Visualização de topo das formas de fundo	106
	ANEXO B - Cálculo do parâmetro de mobilidade dos grãos	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Exemplos de diagramas de previsão de formas de fundo em escoamentos fluviais. ..	14
Tabela 2. Equações de previsão das dimensões características de formas de fundo.....	16
Tabela 3. Classificação do grau de seleção (Φ) dos sedimentos.....	29
Tabela 4. Caracterização dos sedimentos utilizados na composição do leito móvel.	32
Tabela 5. Valores de massa específica (ρ_{mis}) medidos e calculados e seus erros relativos.	36
Tabela 6. Ensaios realizados.	40
Tabela 7. Valores de vazões médias, desvio padrão e tempo de injeção da mistura salina no tanque experimental.....	43
Tabela 8. Velocidades média (U), máxima ($u_{\text{máx}}$) e adimensionalizada para cada ensaio.	46
Tabela 9. Concentrações médias da mistura (C_{mis}), da corrente de densidade (C_{CD}) e relação entre as mesmas.	48
Tabela 10. Massas específicas médias da mistura (ρ_{mis}), da corrente de densidade (ρ_{CD}) e relação entre as mesmas.	49
Tabela 11. Espessuras médias das correntes de densidade calculadas (H) e observadas (h_{obs}), variação entre essas espessuras e alturas da velocidade máxima da corrente (z_{vm}).	50
Tabela 12. Alguns parâmetros referentes ao escoamento e aos grãos.....	52
Tabela 13. Dimensões médias das formas de fundo obtidas experimentalmente.	57
Tabela 14. Dados utilizados no cálculo do parâmetro de mobilidade (Φ').....	120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Correntes de densidade conservativa (salina, azul) e não conservativa (carvão). Fonte: NECOD / UFRGS.	5
Figura 2. Esquema da corrente de densidade não conservativa (adaptado de Postma et al., 1988).	7
Figura 3. Classificação das formas de leito fluviais conforme seu regime de escoamento ou número de Froude (tranquilo ou torrencial). (Adaptado de Simons & Richardson, 1961).	9
Figura 4. Formas de leito típicas de escoamentos fluviais, por ordem de regime de escoamento (Adaptado de Simons, D. B. & Richardson, 1961).	10
Figura 5. Degraus cíclicos. Fonte: Kostic, et. al., 2010.	12
Figura 6. Geometria lateral de ondulações e dunas.	13
Figura 7. Representação da vista superior das cristas de ondulações e dunas (Lewis & McCconchie, 1994).	14
Figura 8. Diagrama de estabilidade das formas de leito fluvial (Southard and Boguchwal, 1990, modificado por Ashley, 1990).	15
Figura 9. Diagrama de estabilidade das formas de Van den Berg and Van Gelder (1993).	16
Figura 10. Diagrama modificado de Shields (1936).	23
Figura 11. Diagrama de Hjuström (1935 apud Graf, 1971).	24
Figura 12. Canal longo de alvenaria e janela de observação.	25
Figura 13. Croqui do canal de acrílico instalado dentro do canal longo de alvenaria.	26
Figura 14. Croqui (a) e foto (b) da seção transversal do tanque de alvenaria e canal de acrílico, ilustrando uma das oito estruturas de mudança de inclinação instaladas ao longo do canal (vista de jusante para montante).	27
Figura 15. Sistema de bombeamento utilizado nos experimentos.	27
Figura 16. Analisador de partículas a laser.	28
Figura 17. Classificação dos graus de arredondamento e esfericidade. Fonte: Graf (1971).	30
Figura 18. Material granular plástico utilizado na composição do leito móvel do canal.	30
Figura 19. Distribuição granulométrica dos sedimentos utilizados na composição do leito móvel e diâmetro médio das partículas, em μm	32
Figura 20. Medidor de vazão eletromagnético Siemens Sitrans Mag 5100 W.	33
Figura 21. Perfilador de velocidades ultrassônico.	34
Figura 22. Perfil vertical do sifões amostradores da corrente de densidade (a) e refratômetro portátil ATAGO S28E 2~28%	35
Figura 23. Calibração dos valores de excesso de densidade, lidos pelo refratômetro para valores de massa específica, lidos pelo densímetro.	37

Figura 24. Calibração dos valores de concentração de amostras salinas com sua massa específica (densímetro).....	37
Figura 25. Câmera fotográfica NIKON D5000 (a) e vista lateral de suporte da máquina, acoplado às paredes do canal de acrílico (b).....	38
Figura 26. Distribuição temporal da vazão para o ensaio 1,5Mq3	42
Figura 27. Distribuição temporal da componente horizontal da velocidade em cada sensor, para o experimento 1,5MQ3.....	44
Figura 28. Perfil de velocidades médias do ensaio 1,5MQ3.....	45
Figura 29. Perfil de concentrações do experimento 1,5MQ3	47
Figura 30. Correlação entre valores calculados e observados de espessura da corrente de densidade.	51
Figura 31. Relação entre o número de Froude densimétrico (Fr_d) com o diâmetro médio dos grãos (d_{50}) e com o diâmetro médio dos grãos adimensionalizado (d_{50}^*).	53
Figura 32. Montagem das fotografias de topo, referentes ao 1,5Mq3 e configuração desse ensaio com localização dos equipamentos.....	55
Figura 33. Evolução de geração das formas de leito do ensaio 1,5Mq3	56
Figura 34. Identificação das dimensões medidas nas formas de leito.....	57
Figura 35. Perfis de velocidade separados por tipo de leito e inclinação do canal.	60
Figura 36. Perfis de velocidade adimensionalizados em relação à espessura média (H) da corrente e à velocidade máxima ($u_{máx}$) do perfil de velocidades.	61
Figura 37. Perfis de velocidades adimensionalizados pela altura e velocidade médias para todos os experimentos realizados.	62
Figura 38. Elevação (z_{vm}) da velocidade máxima ($u_{máx}$) dos perfis de velocidade, em função da inclinação (I).	63
Figura 39. Perfis de concentração separados por tipo de leito e inclinação do canal.....	64
Figura 40. Perfis de concentração de topos os experimentos realizados.....	65
Figura 41. Correlação entre concentração da mistura e espessura da corrente de densidade, para altas e baixas vazões.	66
Figura 42. Relação entre as concentrações iniciais da corrente e suas espessuras.....	67
Figura 43. Relação entre as concentrações e velocidades médias da corrente.....	68
Figura 44. Relação entre a velocidade e a espessura da corrente.....	68
Figura 45. Influência da inclinação do canal.....	69
Figura 46. Ondulações geradas em alguns ensaios.	71
Figura 47. Dunas geradas no experimento 1,5Mq3.....	72
Figura 48. Imagem de topo do ensaio 0,5FQ2. Escala em cm.	73

Figura 49. Tensões de cisalhamento aplicadas pelo escoamento sobre o leito relacionado ao comprimento das formas de fundo.	76
Figura 50. Variação das dimensões das formas de fundo em relação ao tempo.	78
Figura 51. Cristas das formas de fundo da região de entrada da corrente de densidade.	80
Figura 52. Cristas retas a levemente sinuosas (a) e cristas sinuosas (b), dominantes em ensaios com areia e melamina, respectivamente.	81
Figura 53. Influência das sondas UVP e sifões na deformação das cristas das formas de fundo do ensaio 1,5PQ3.	81
Figura 54. Visão de topo da sobreposição das cristas das formas de leito dos ensaios 1,5Fq3 e 1,5Fq4, entre 8,3 e 9,9 m da entrada da corrente de densidade.	82
Figura 55. Diagrama de Hjulström.....	86
Figura 56. Plotagem de parâmetros dos ensaios no diagrama de Shields.	89
Figura 57. Comparação dos valores medidos de λ e η com os calculados a partir dos modelos (Tabela 2, pág. 17) de Baas (1993) e Raudikivi (1997), para ondulações.	89
Figura 58. Comparação dos valores medido de λ e η com os calculados, a partir do modelo de Julien and Klaassen (1995), para dunas.....	90
Figura 59. Valores de τU e d_{50} das correntes de densidade do presente estudo, aplicadas ao diagrama de previsão de formas de leito de Simons and Richardson (1961).	91
Figura 60. Dados experimentais plotados no diagrama de previsão de formas de leito (Simons & Richardson, 1961).	93
Figura 61. Diagrama de previsão de Van den Berg and Van Gelder (1993) com dados gerados por correntes de densidade.....	94
Figura 62. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5Pq3 ao longo do canal.	106
Figura 63. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5Pq4 ao longo do canal.	107
Figura 64. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5PQ2 ao longo do canal.	108
Figura 65. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5PQ3 ao longo do canal.	109
Figura 66. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5Fq3 ao longo do canal.	110
Figura 67. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5Fq4 ao longo do canal.	111
Figura 68. Vista superior das formas de fundo do ensaio 0,5Mq3 ao longo do canal.....	112
Figura 69. Vista superior das formas de fundo do ensaio 0,5MQ2 ao longo do canal.....	113
Figura 70. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5Mq1 ao longo do canal.....	114
Figura 71. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5Mq2 ao longo do canal.....	115
Figura 72. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5MQ1 ao longo do canal.....	116
Figura 73. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5MQ2 ao longo do canal.....	117
Figura 74. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5MQ3 ao longo do canal.....	118

LISTA DE SÍMBOLOS

- c: concentração da corrente na direção do escoamento na elevação z (g L^{-1});
- C_{CD} : concentração integrada na vertical ou concentração média da corrente de densidade (g L^{-1});
- C_{mis} : concentração da mistura ou inicial da corrente de densidade (g L^{-1});
- C' : coeficiente de Chèzy;
- CV: coeficiente de dispersão relativa (%);
- d_{10} : diâmetro característico dos grãos, no qual 10% das partículas apresentam diâmetros menores (m);
- d_{90} : diâmetro característico do grão, no qual 90% das partículas apresentam diâmetros menores (m);
- d_{50} : diâmetro médio das partículas (m);
- d_{50*} : diâmetro médio do grão adimensionalizado;
- d: diâmetro de uma partícula qualquer (mm);
- Fr: número de Froude (-);
- Fr_d : número de Froude densimétrico (-);
- g: aceleração gravitacional (m s^{-2});
- H_F : espessura média do escoamento fluvial (m);
- H: espessura integrada na vertical ou profundidade média da corrente de densidade (m);
- h_{obs} : espessura da corrente observada (m);
- Δh : diferença entre a espessura calculada e a observada (-);
- I: inclinação do canal experimental ($^\circ$);
- Re: número de Reynolds (-);
- Re_* : número de Reynolds do grão (-);
- T: Parâmetro de transporte (-);
- T_{inj} : tempo de injeção da corrente no canal experimental (s);
- T_{mis} : temperatura da mistura salina ($^\circ$);
- $T_{H_2O \text{ canal}}$: temperatura da água do tanque ($^\circ$);
- U_F : velocidade média do escoamento fluvial (m s^{-1});
- U: velocidade média da corrente de densidade (m s^{-1});
- u: velocidade da corrente de densidade na direção do escoamento na elevação z (m s^{-1});
- u_* : velocidade de cisalhamento (m s^{-1});
- $u_{m\acute{a}x}$: velocidade máxima do perfil (m s^{-1});

- u_q : velocidade de queda da partícula (cm s^{-1});
 z : elevação ao longo da vertical (m);
 z_0 : cota do fundo (m);
 z_{vm} : elevação da velocidade máxima (m);
 Φ : parâmetro da escala f_i , relacionado ao tamanho de grão;
 Φ' : parâmetro de mobilidade;
 η : altura da forma de leito (cm);
 κ : constraente de von Kàrman (-) (considerada igual a 0,41);
 λ : comprimento da formas de leito (cm);
 λ_M : comprimento da face da formas de fundo voltada à montante (cm);
 λ_J : comprimento da face da formas de fundo voltada à jusante (cm);
 θ : tensão de cisalhamento adimensionalizada ou parâmetro de Shields (-);
 ρ_{CD} : massa específica média da corrente de densidade (kg m^{-3});
 ρ_{mis} : massa específica média da mistura ou inicial da corrente de densidade (kg m^{-3});
 ρ_{amb} : massa específica do fluido ambiente (kg m^{-3});
 ρ_s : massa específica do sedimento (kg m^{-3});
 $\sigma(Q)$: desvio padrão (-);
 $\sigma(\Phi)$: grau de seleção dos sedimentos, em relação ao parâmetro f_i ;
 τ : tensão de cisalhamento (N m^{-2});
 τ' : tensão crítica de cisalhamento (-);
 ν : viscosidade cinemática da corrente de densidade (m s^{-2}) (considerada igual à da água a 20° C);
 ω : velocidade rotacional (cm s^{-1}).

1. INTRODUÇÃO

A interação proporcionada pela passagem de correntes fluidas sobre leitos móveis, por intermédio do arrancamento, transporte e deposição de sedimentos, resulta na gênese das formas de leito. A geometria dessas formas está relacionada com a sua resistência ao escoamento e com o transporte de sedimentos que, por sua vez, se alteram conforme a geometria do leito. As formas de leito podem ser encontradas em regiões costeiras, rios, lagos, reservatórios e também em ambientes marinhos podendo ser geradas ou não por correntes de densidade.

As correntes de densidade são fluxos gravitacionais cujo movimento é regido pela diferença de densidade entre o escoamento e o fluido ambiente que o cerca. Essa diferença de densidade pode ser provocada, em termos gerais, pela presença de sólidos dissolvidos (correntes conservativas) ou por sedimentos em suspensão (correntes de turbidez, ditas não-conservativas). As correntes de turbidez possuem alta capacidade de transportar sedimentos por longas distâncias tendo importância de destaque na formação e modificação do leito oceânico, gerando canais, cânions e formas de leito. Ao depositarem seus sedimentos em suspensão, podem formar importantes depósitos sedimentares (turbiditos) com boa capacidade de armazenamento de hidrocarbonetos, tendo suas atenções voltadas para grupos de pesquisa e indústria do petróleo.

Observar e monitorar a gênese das formas de leito pela passagem das correntes de densidade, em seu ambiente natural, é uma tarefa difícil, em virtude da magnitude da força dessas correntes, que pode causar desastres ambientais e econômicos. Por outro lado, o estudo das formas de leito é mais facilmente realizado a partir do seu registro em afloramentos, os quais podem amparar a interpretação e o estudo dos fluxos que as geraram, fornecendo características da gênese e da hidrodinâmica desses fluxos e, conseqüentemente, fornecendo informações sobre a formação dos depósitos turbidíticos. Além dos afloramentos, as formas de leito também são estudadas por meio de experimentos em modelos de escala reduzida. Desta forma, o controle dos parâmetros do fluxo e da conseqüente forma de leito gerada podem ser melhores avaliados.

Baseado nesse contexto de simulações em laboratório, este trabalho irá versar sobre o estudo experimental de correntes de densidade gerando formas de fundo. Para tal, o mesmo será desenvolvido no Núcleo de Estudos em Correntes de Densidade (NECOD) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o qual desenvolve pesquisas nessa área há mais de 15 anos, destacando os trabalhos pioneiros de Manica (2002), Chapon et al. (2004), Del Rey (2006) e Puhl (2012)

nesse tema. Desta forma esse trabalho buscará dar uma continuidade aos estudos anteriormente realizados agregando a influência dessas correntes na gênese das formas de leito e contribuindo para o melhor entendimento desse tipo de fenômeno natural.

2. JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas, muito tem sido estudado sobre a geração de formas de leito por escoamentos fluviais e também, as relações hidrodinâmicas e de composição do leito envolvidas nesse processo, seja em campo, como também em laboratório.

No entanto, as pesquisas e a compreensão que abrangem a geração das formas de leito pelas correntes de densidade, em ambientes marinhos profundos, não têm recebido igual atenção, devido basicamente à dificuldade de observação direta nos sistemas naturais, ao número limitado de estudos experimentais e à complexidade desses fluxos em relação aos que ocorrem em ambientes diferentes deste.

Com isso, muitos estudos (p.ex. Fedele et. al., 2009; Puhl, 2012) procuram comparar e reunir o conhecimento existente sobre as formas de leito de escoamentos em superfície livre com as formas de leito por correntes de densidade, supondo-se similar criação e desenvolvimento de ambas.

Apesar disso, estudos apontam maior diversidade nas geometrias das formas de leito por correntes de densidade e a sua possível ocorrência em diferentes regimes de escoamento (subcrítico, crítico ou supercrítico), indicando ser equivocada a incorporação dos conceitos de formação das formas de leito por escoamentos fluviais.

Com base no exposto acima, fica evidente que estudos que venham a complementar o entendimento da geração de formas de fundo por correntes de densidade ainda são necessários, especialmente no esclarecimento das principais diferenças entre ambientes fluviais e subaquáticos.

Destaca-se que as formas de leito encontradas em ambientes marinhos vêm recebendo especial atenção, pelo fato de sua formação estar relacionada às correntes de densidade (provocadas por aporte fluvial de sedimentos nos oceanos, terremotos, vulcanismos, por exemplo) e seus depósitos, potenciais reservatórios de grande relevância perante a indústria petrolífera (Talling et al., 2015).

Nesse sentido, a proposição desse estudo experimental busca gerar, reunir e relacionar características hidrodinâmicas, deposicionais e granulométricas das formas de leito geradas por correntes de densidade salinas sob diferentes regimes, por meio de ensaios em um canal de declividade variável, composto por leito móvel e procurará suprir essas lacunas no contexto apresentado.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Esse estudo tem como objetivo geral, simular e investigar a geração de formas de leito por ação de correntes de densidade salina, por meio de experimentos em canal acrílico de leito móvel e declividade variável. Esse estudo se propõe, também, a reunir e relacionar as características hidráulicas da corrente de densidade e granulométricas e morfológicas do leito móvel, comparando-os com estudos da esfera fluvial.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Elaborar uma metodologia experimental para esse tipo de fenômeno;
- Analisar as correntes de densidade salina e a morfologia das formas de leito por ela geradas, em função da alteração de parâmetros hidráulicos e sedimentológicos (granulometria do leito, declividade do canal e concentração e vazão da corrente de densidade) e do regime (subcrítico, crítico ou supercrítico) do escoamento;
- Relacionar os resultados obtidos com estudos sobre formas de leito fluviais, comparando-os com diagramas de previsão de início de movimento dos grãos, diagramas de previsão de formas de leito e modelos de previsão de dimensões de formas.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 CORRENTES DE DENSIDADE

As correntes de densidade se movimentam devido às forças gravitacionais e são geradas pela diferença de peso específico existente entre a corrente e o meio no qual ela escoa (Simpson, 1982).

A diferença no peso específico entre os fluidos poderá ocorrer pela presença de materiais suspensos ou dissolvidos, ou ainda pela diferença de temperatura entre os meios. Quando da presença de materiais em suspensão e, quando governadas principalmente pela turbulência, as correntes são chamadas de turbidez (Middleton e Hampton, 1973). Quando não há presença de material em suspensão elas são, normalmente chamadas correntes conservativas. A figura 1 apresenta esses tipos de correntes.

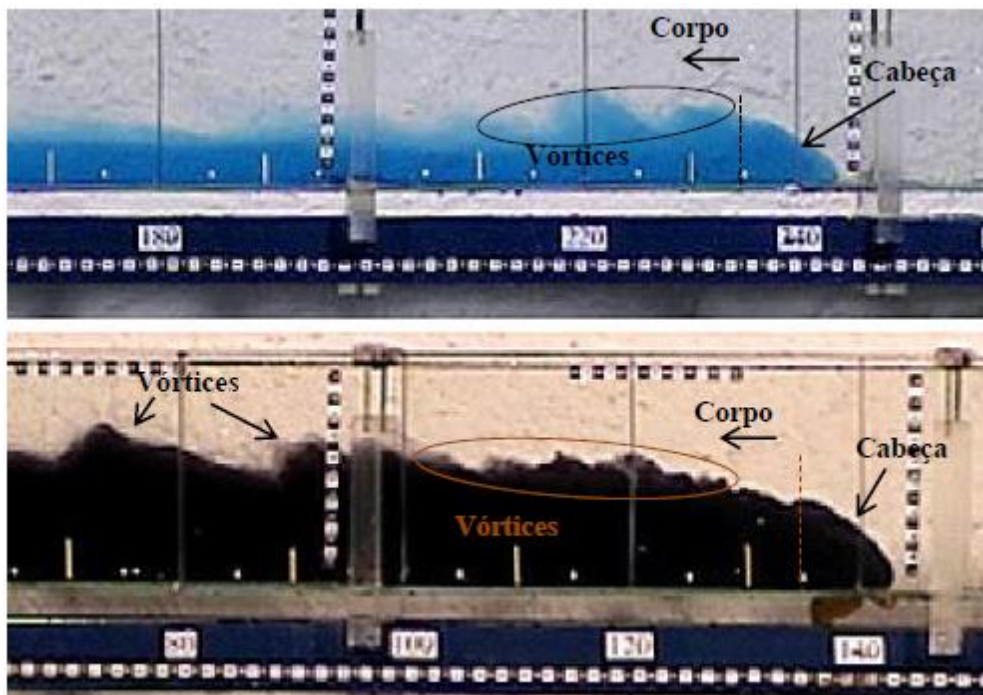


Figura 1. Correntes de densidade conservativa (salina, azul) e não conservativa (carvão).
Fonte: NECOD / UFRGS.

Nas correntes de densidade conservativas, a diferença de densidade que propulsiona seu movimento em relação ao fluido ambiente é proporcionada pela diferença de temperatura ou pela presença de substâncias dissolvidas, como o sal (Middleton, 1993). Durante a evolução dessas correntes, ocorre a tendência à diminuição da sua concentração por meio da incorporação do fluido ambiente (diluição) através das fendas e rachas presentes na cabeça da corrente e dos vórtices formados atrás da sua cabeça, não ocorrendo processos

de troca (erosão ou deposição) entre o material que causa a diferença de densidade na corrente e o leito acima do qual ela flui. Estudos de correntes de densidade com a utilização de misturas salinas têm mostrado valiosa compreensão da hidrodinâmica das correntes conservativas (Middleton, 1966; Simpson & Britter, 1979; Simpson, 1982; Middleton, 1993; Kneller & Buckee, 2000, Fabian, 2002).

Já as correntes de densidade não-conservativas (correntes de turbidez) são caracterizadas por transportarem sedimentos em suspensão e por serem capazes de trocar esses sedimentos com o leito sobre o qual elas fluem, gerando depósitos e erosões, além de poder alterar sua própria dinâmica (Parker et al., 1987). Sendo assim, essas correntes são mais complexas de serem estudadas em relação às conservativas (Kuenen & Migliorini, 1950; Middleton, 1966b; Manica, 2002, entre muitos outros). Além de incorporarem o fluido ambiente, através das suas fendas e rachas e dos vórtices do seu corpo (Allen, 1971; Simpson, 1982), essas correntes perdem massa específica pela deposição das partículas em suspensão, de tal forma que a desaceleração da corrente é mais intensa que no caso anterior (Dücker, 2007).

Salienta-se que, tanto as correntes conservativas quanto as não-conservativas possuem energia para erodir e transportar os sedimentos presentes no leito, podendo gerar diferentes formas de fundo. As tensões de cisalhamento aplicadas pelo fluido, junto ao leito, aumentam até atingirem um valor crítico, a partir do qual a movimentação dos grãos presentes no leito é iniciada. As partículas são arrastadas pela água e se movimentam como carga de arraste (contato contínuo com o leito), carga de saltação (contato intermitente) ou, ainda, por suspensão (sem contato).

O processo de geração das formas de fundo compõe apenas uma etapa do ciclo de existência da corrente de densidade, que é quando a mesma avança e interage com um ambiente (fluido e leito). Com relação a sua iniciação, três mecanismos são, em geral, considerados (Allen, 1971, Normark & Piper, 1991): (a) por meio de escorregamentos de taludes continentais; (b) por fluxos hiperpicnais gerados a partir do aporte sedimentar de rios para os oceanos e; (c) por fluxos gerados por tempestades próximas a borda da plataforma continental.

Quanto a sua geometria, as correntes de densidade são caracterizadas por possuírem uma cabeça, corpo e cauda (Simpson, 1982), com um perfil de velocidades e de concentração relacionados conforme sua dinâmica (Figura 2).

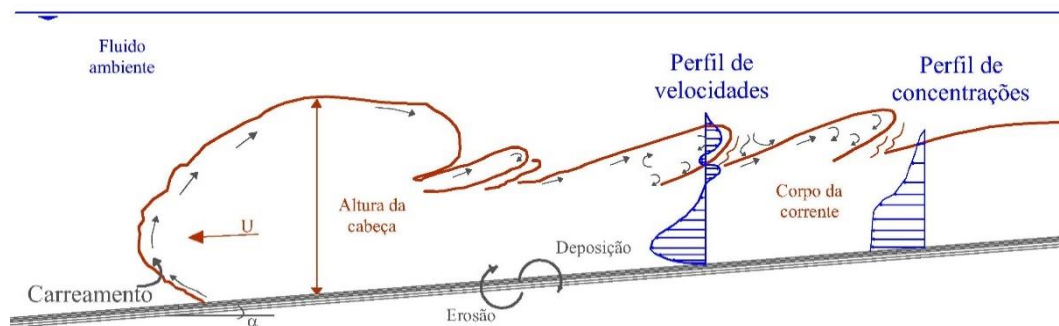


Figura 2. Esquema da corrente de densidade não conservativa (adaptado de Postma et. al., 1988).

Após seu início, as correntes de densidade podem viajar por grandes distâncias, sempre interagindo com o leito (incluindo as formas de leito) e também com o fluido ambiente, também conhecida como transformação de fluxo, sintetizados em Fischer (1983).

Em algum momento, a corrente perderá sua energia de avanço a capacidade de erodir, transportar e manter seus grãos em suspensão, acabando por gerar depósitos sedimentares característicos como, por exemplo, os turbiditos.

4.2 FORMAS DE LEITO

Na natureza, as formas de leito podem ser encontradas em ambientes sedimentares costeiros, fluviais, lacustres e oceânicos, como consequência do retrabalhamento (arrancamento, transporte e deposição) do material de leito, pela passagem de correntes (eólicas, de rios e de densidade, p.e.).

As formas de leito são configurações sedimentares geradas e moldadas pela interação existente na interface entre um escoamento e um leito móvel. Quando a velocidade de escoamento for maior do que a velocidade crítica de movimentação dos grãos que compõem o leito, os sedimentos iniciarão seu movimento (critério de Shields), dispondose seguindo diferentes geometrias, estabelecidas em função da sua resistência ao escoamento e do transporte de sedimentos (Simons & Richardson, 1961).

Com mais ênfase, a partir da década de sessenta, as formas de leito fluviais foram sendo estudadas e compreendidas por meio de diversos ensaios em canais experimentais e também por estudos de campo (Simons & Richardson, 1961; Kennedy, 1969; Middleton, 1977; Engelund & Fredsøe, 1982; Southard & Boguchal, 1990, entre outros). No entanto, as formas de leito presentes em ambientes marinhos, formadas por correntes de densidade, permanecem pouco conhecidas, devido à dificuldade de observação direta

no seu ambiente natural e a maior complexidade desses escoamentos (Hand, 1974; Fedele et. al., 2009).

A seguir, são reunidas informações sobre as formas de leito criadas em escoamentos fluviais, assim como àquelas formadas por correntes de densidade.

4.2.1 Formas de leito fluviais

4.2.1.1 Regimes de Escoamento

Em canais fluviais, os escoamentos são geralmente ditos de regime turbulento (devido aos elevados valores de número de Reynolds). O número adimensional de Froude (Fr), que relaciona forças inerciais com forças gravitacionais, classifica os regimes em três tipos: (a) subcríticos (fluviais), onde $Fr < 1$; (b) críticos, com $Fr = 1$ e; (c) supercríticos (torrenciais), quando $Fr > 1$. Sua definição é apresentada abaixo:

$$Fr = \frac{U_F}{\sqrt{gH_F}} \quad (1)$$

Onde:

U_F : velocidade média da corrente fluvial ($m\ s^{-1}$);

g : aceleração gravitacional ($m\ s^{-2}$);

H_F : espessura ou profundidade média do escoamento fluvial (m).

No âmbito das formas de leito fluviais, o número de Froude é utilizado na caracterização da ocorrência das mesmas. Simons and Richardson (1961), por exemplo, observaram em seus experimentos a ocorrência de dunas para valores de número de Froude entre 0,3 e 0,6.

Como ilustrado na figura 3 (3a e 3b), se o escoamento é subcrítico ($Fr < 1$), o fluxo se acelera sobre protuberâncias naturais ou artificiais existentes no leito e se desacelera quando chega a depressões ou vales. Também se observa uma zona de desprendimento do fluxo com o leito, na crista da forma, e forte circulação, nas zonas de depressão. A separação do escoamento e a turbulência gerada acabam por dissipar grande quantidade de energia, o que aumenta a resistência ao escoamento. Quando o escoamento ocorre como supercrítico ($Fr > 1$), o contrário ocorre: a água desacelera sobre as protuberâncias

e acelera nas depressões (Figuras 3c e 3d), estando em fase as superfícies da água e do leito.

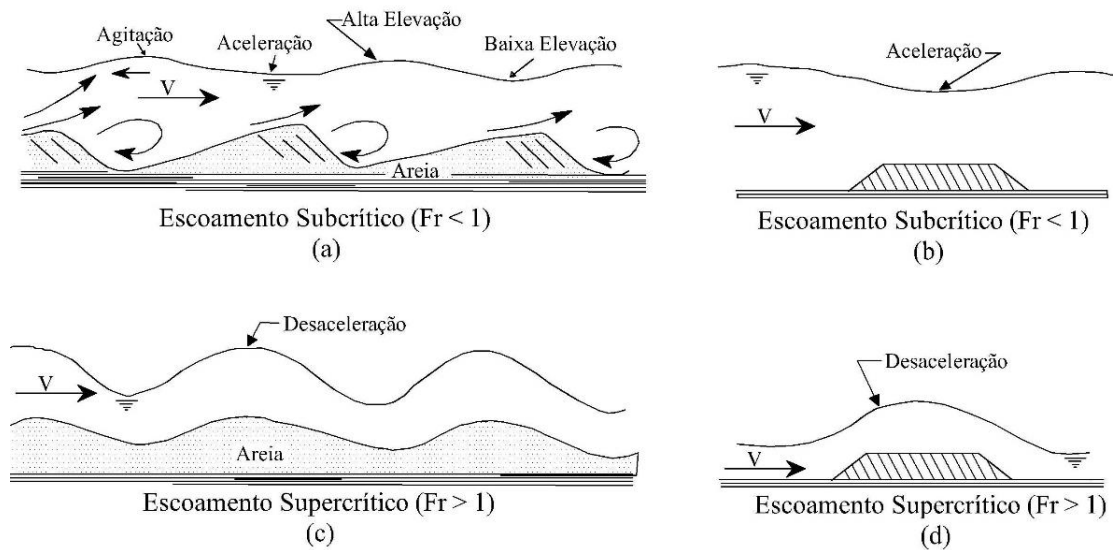


Figura 3. Classificação das formas de leito fluviiais conforme seu regime de escoamento ou número de Froude (tranquilo ou torrencial). (Adaptado de Simons & Richardson, 1961).

Na busca de uma melhor classificação da ocorrência das formas de fundo, as mesmas foram separadas em função dos regimes de escoamento nos quais foram geradas (subcrítico, crítico e supercrítico), das similaridades entre as formas, da sua resistência ao escoamento e do transporte de sedimentos (Figura 4). A resistência total oferecida pelo leito ao escoamento é função da rugosidade decorrente das características granulométricas dos seus grãos e também da geometria das formas de leito possivelmente presentes. O tamanho, a forma e a distribuição espacial desses dois tipos de rugosidade influenciam na distribuição vertical do perfil de velocidades e na resistência total do leito ao escoamento. Quanto menor a resistência oferecida pelo leito, maiores taxas de transporte e movimentação dos sedimentos são observadas.

No regime de escoamento subcrítico, ocorrem baixas movimentação e transporte dos grãos de sedimento, devido à elevada resistência do leito. As formas de leito geradas nesse regime são leito plano inferior, ondulações, dunas com ondulações superpostas e dunas, ocorrendo nessa sequência, conforme o aumento da energia do escoamento. Já em regimes de escoamento supercríticos, maiores valores de tensão de cisalhamento são aplicados junto ao leito e, por isso, o mesmo oferece baixa resistência e elevados transporte e movimentação das partículas. As formas geradas nesse regime são as de leito

plano superior, ondas estacionárias e antidunas. Entre esses dois regimes de escoamento, existe ainda o regime crítico, no qual as formas de fundo podem passar por um estágio de transição de dunas para leito plano ou ainda para ondas estacionárias.

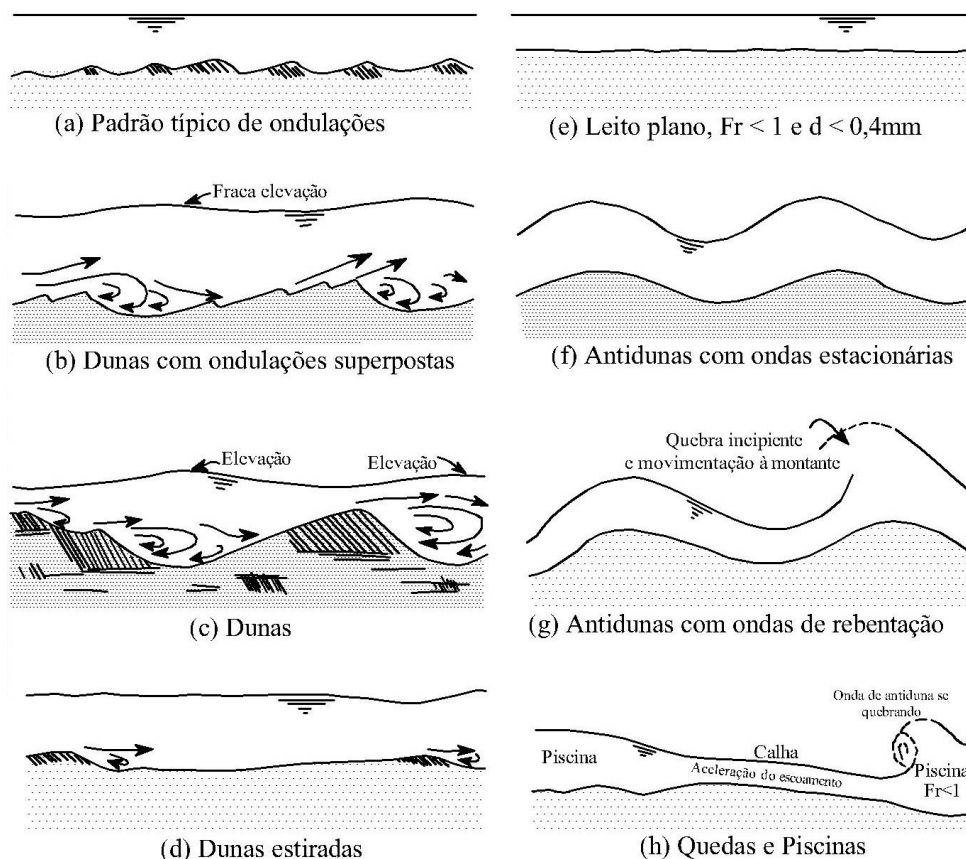


Figura 4. Formas de leito típicas de escoamentos fluviais, por ordem de regime de escoamento (Adaptado de Simons, D. B. & Richardson, 1961).

4.2.1.2 Configuração das formas de leito

Segundo Kennedy (1969), as formas de leito sedimentares se geram e se desenvolvem pela erosão do material sedimentar das regiões de depressão e da sua deposição nas cristas, sendo esse processo continuado até que a forma alcance sua altura de equilíbrio. Já a geometria das formas de leito varia, segundo Simons and Richardson (1961) conforme os seguintes fatores: declividade do leito (e da linha de energia), profundidade do escoamento, velocidade de queda do material de fundo (função do tamanho, forma e densidade de grão, assim como da densidade e viscosidade da mistura de água e sedimento) e o formato do canal.

Diversos autores (Simon & Richardson, 1961; Kennedy, 1969, Engelund & Fredsøe, 1982) observaram as características e as condições de escoamento nas quais as formas de leito ocorrem, resumidas conforme segue:

- Leito Plano (*Plane Bed*): leito liso, desprovido de forma.
- Ondulações (*Ripples*): são pequenas formas cujas dimensões não dependem das dimensões escoamento (Figura 4a), mas seu comprimento de onda tem relação com o diâmetro médio dos grãos presentes no leito. Seu perfil longitudinal possui formas aproximadamente triangulares, com face à montante de declividade suave e face à jusante com inclinação abrupta, aproximadamente constante e igual à tangente do ângulo de repouso do sedimento do leito. Sua migração ocorre na direção do escoamento, com velocidades bem menores do que as do fluxo. O transporte sedimentar é baixo, ocorrendo por arraste, junto ao fundo.

- Dunas (*Dunes*): são formas maiores em relação às ondulações e são, geralmente, geradas em altas velocidades subcríticas de escoamento, estando fora de fase com a superfície da água. A altura das formas mostra dependência da profundidade relativa do escoamento (Figura 4c). Seu perfil longitudinal se assemelha ao das ondulações, porém, por possuir maior dimensão e maiores velocidades, ocorre o desprendimento das linhas de fluxo na crista da forma e, por conseguinte, uma zona de baixa pressão e de grande dissipação turbulenta. Conforme as condições do escoamento podem ser observadas ondulações superpostas em dunas (Figura 4b).

Apesar das similaridades entre a geometria das ondulações e das dunas, as mesmas foram separadas pela inexistência de um intervalo de comprimentos de onda com o aumento da velocidade do escoamento. Isso é, o comprimento das menores dunas é muito maior do que o das maiores ondulações, não havendo comprimentos intermediários entre esses limites.

- Leito de transição (*Plane Bed Transition*): essa configuração ocorre com o crescente aumento da energia do escoamento, ocasionando a supressão das dunas e ondulações (Figura 4e) e gerando um leito plano com transporte sedimentar (Figura 4e). Para algumas combinações de profundidade, temperatura da água e tamanho do grão, esse regime pode deixar de ocorrer.

- Antidunas (*Antidunes ou Standing Waves*): são formas bastante simétricas, de característica senoidal, pequena altura e reduzido ângulo das suas faces. O escoamento que as geram são supercríticos e sua linha d'água permanece praticamente em fase com

a superfície da água (Figuras 4f e 4g). Em geral, essas formas migram no sentido contrário ao escoamento da corrente, ocorrendo alto transporte de sedimentos, tanto por arraste junto ao fundo, quanto por suspensão. Com o aumento da velocidade do escoamento e do número de Froude, a altura das antidunas aumenta até que, eventualmente, a deformação da superfície livre é grande o suficiente para formar ondas de arrebenção (quebra da linha d'água) na direção do escoamento (Figura 4g).

- **Quedas e Piscinas (*Chutes and Pools*):** ocorre em declividades de canal e descarga de sedimentos relativamente elevados. Consiste em regiões alongadas de sedimentos (quedas) nas quais o escoamento é supercrítico, seguido por regiões de desaceleração do escoamento (piscinas), nas quais o escoamento pode ser sub ou supercrítico (Figura 4h).

- **Degraus cíclicos (*Cyclic Steps*):** formas de leito identificadas mais recentemente (Winterwerp et. al., 1992; Sun & Parker 2005; Taki & Parker, 2005; Kostic et al, 2010) que, em aparência, se assemelham às antidunas, com suave inclinação à montante e forte inclinação à jusante das mesmas, porém, com maiores valores de número de Froude. Além disso, diferentemente das antidunas, cada uma dessas formas é marcada por um processo de alteração no regime de escoamento (de supercrítico para subcrítico), além de possuírem caráter de maior estabilidade e comprimento de onda (Figura 5).

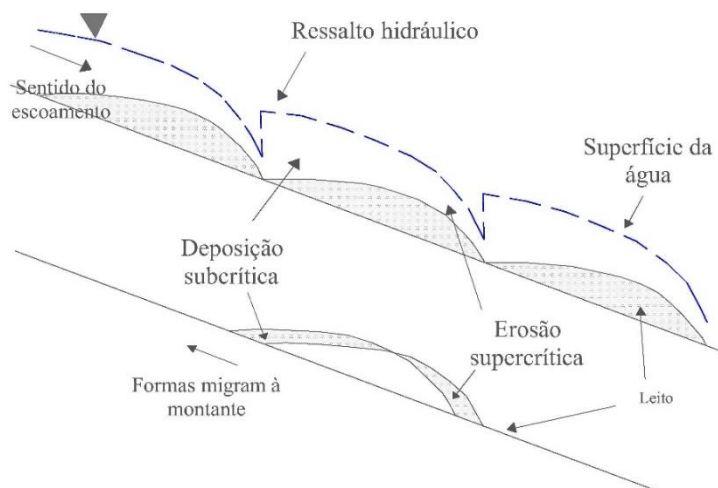


Figura 5. Degraus cíclicos. Fonte: Kostic, et. al., 2010.

O escoamento chega à região montante de cada forma em estado supercrítico e, subitamente, ocorre um ressalto hidráulico, que altera o escoamento para crítico na região da crista e subcrítico na maior parte da região à jusante da mesma. A formação do

primeiro degrau implica em uma sucessão de degraus, que migram na direção contrária ao escoamento, preservando sempre sua forma.

4.2.1.3 Geometria das formas de fundo

A geometria das formas de fundo, em geral, é descrita por meio de visualizações lateral e superior, como descritas a seguir:

- Vista lateral (Cardoso, 1998)

Essa geometria nos fornece informações sobre a largura (λ) e altura (η) das formas de fundo (Figura 6). A largura é definida como a distância horizontal entre duas cavas ou entre duas cristas e, a altura, a distância vertical entre a cava e o topo da crista. Além disso, pode-se também analisar os comprimentos horizontais das faces montante, e jusante, nomeado nesse trabalho como λ_M e λ_J .

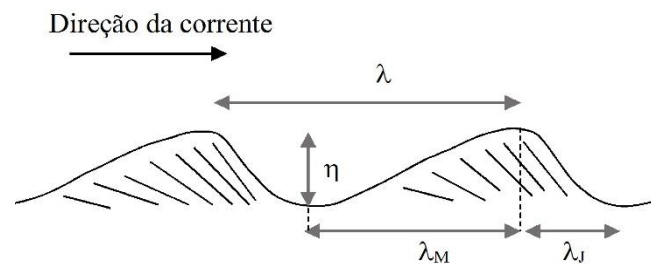


Figura 6. Geometria lateral de ondulações e dunas.

- Vista Superior (cristas de ondulações e dunas) (Lewis & McConchie, 1994)

Outra possibilidade de classificação das formas de fundo se baseia nos padrões gerados pelas marcas de suas cristas, se observadas de vista superior. A análise se baseia na separação em grupos (formas de crista reta e linguoide, por exemplo), dependendo se as formas estão em fase ou fora de fase, se são contínuas ou descontínuas e se são, ou não, bifurcadas (Figura 7).

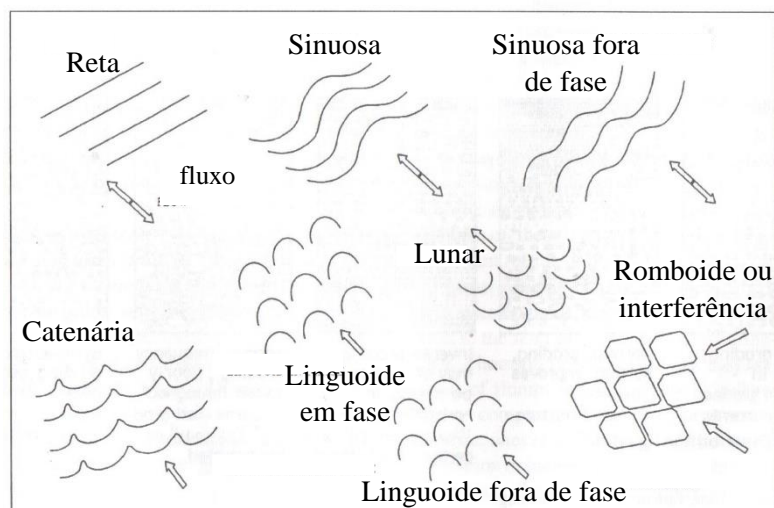


Figura 7. Representação da vista superior das cristas de ondulações e dunas (Lewis & McConchie, 1994).

4.2.1.4 Previsão das formas de leito em escoamentos fluviais e caracterização de suas dimensões

Algumas configurações de diagramas buscaram traçar condições que levassem à previsão das formas de leito em sistemas fluviais, a partir de quaisquer conjuntos de variáveis independentes, por meio dos chamados diagramas de estabilidade (Raudikivi, 1990 e Chang, 1988).

Lançando-se mão de informações obtidas em canais experimentais e, também, da literatura, muitos autores desenvolveram seus diagramas de estabilidade (Tabela 1).

Tabela 1. Exemplos de diagramas de previsão de formas de fundo em escoamentos fluviais.

Autores	Variáveis
Liu (1957)	Relação entre velocidade de cisalhamento e velocidade de queda (u^*/ω) versus número de Reynolds do grão (Re^*)
Simons and Richardson (1961)	Potência do escoamento (τU_F) versus tamanho médio dos grãos do leito (d_{50})
Athallah (1968)	Número de Froude (Fr) versus rugosidade relativa (R/d)
Van Rijn (1984)	Parâmetro de estágio do transporte ($T: \tau - \tau_c / \tau_c$) versus diâmetro adimensional (d_{50}^*)
Southard and Boguchwal (1990)	Velocidade média (U_F) versus tamanho do grão (d_{10})
Van den Berg and Van Gelder (1993)	Parâmetro de mobilidade (Φ') versus diâmetro médio dos grãos adimensionalizado (d_{50}^*)

Os autores Southard and Boguchwal (1990) desenvolveram um dos diagramas mais utilizados na previsão de formas de fundo, provavelmente devido a sua simplicidade de utilização e interpretação, que envolve a plotagem direta da velocidade média da corrente e do tamanho médio dos sedimentos presentes no leito (Figura 8).

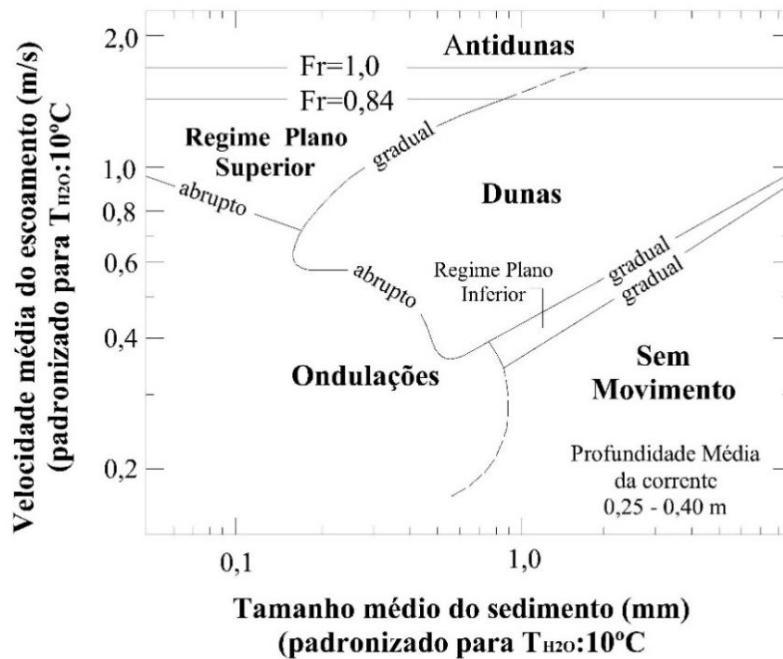


Figura 8. Diagrama de estabilidade das formas de leito fluvial (Southard and Boguchwal, 1990, modificado por Ashley, 1990).

No entanto, se reconhece a importância da utilização de parâmetros adimensionalizados na comparação de estudos, para que os efeitos de escala sejam considerados, levados em consideração no diagrama de Van den Berg and Van Gelder (1993). Esses autores relacionam os parâmetros adimensionais de mobilidade (Φ') e do diâmetro médio dos grãos (d_{50}^*), estabelecendo zonas de ocorrência de leito plano (inferior e superior), ondulações, dunas e antidunas (Figura 9).

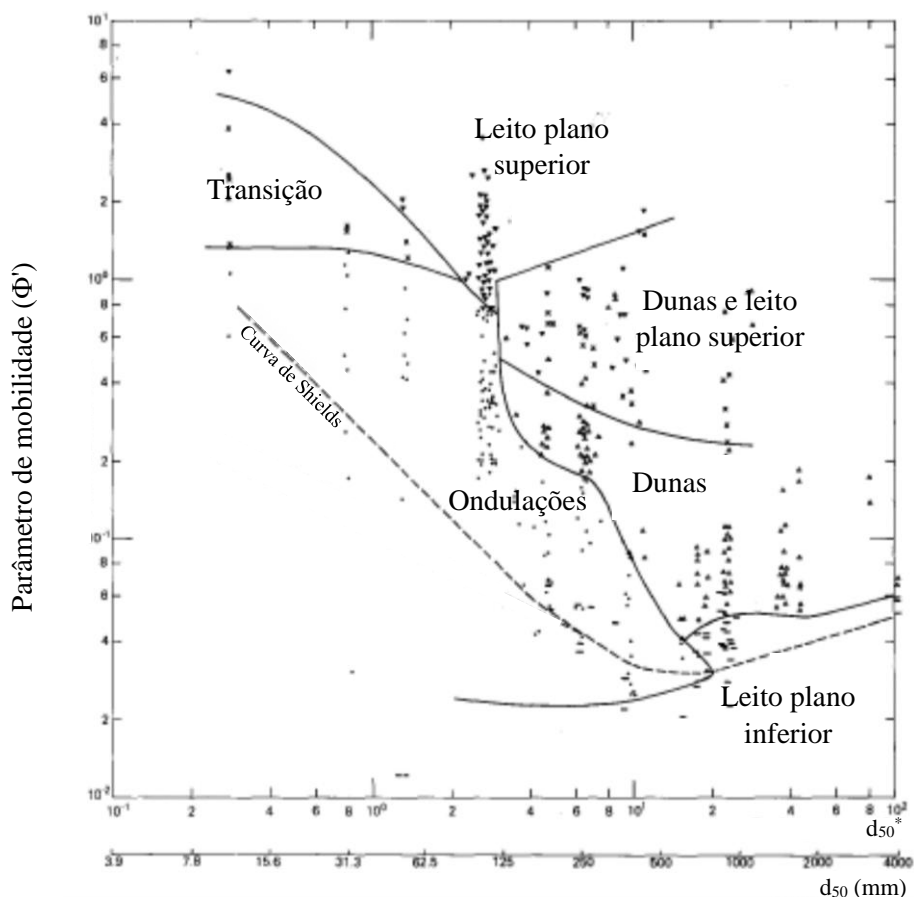


Figura 9. Diagrama de estabilidade das formas de Van den Berg and Van Gelder (1993).

Além da previsão do tipo de forma de leito, pela utilização de diagramas, a previsão das dimensões características das formas também pode ser realizada por meio de equações definidas por diversos autores. Nesse estudo, a previsão das dimensões de comprimento (λ) e de altura (η) das ondulações e dunas será realizada pelas equações de Baas (1993 apud Baas, 2001), Julien and Klaassen (1995) e Raudikivi (1997) e, conforme também verificado por Puhl (2012), de acordo com a tabela 2.

Tabela 2. Equações de previsão das dimensões características de formas de fundo.

Ondulações	Dunas
Baas (1993, apud Baas, 2001)	Julien e Klaassen (1995)
$\lambda = 75,4 \log(d_{50}) + 197$	$\lambda = 2,5 \eta \left(\frac{H_F}{d_{50}} \right)^{0,3}$
$\eta = 3,4 \log(d_{50}) + 18$	$\eta = 2,5 H_F \left(\frac{d_{50}}{H_F} \right)^{0,3}$
Raudikivi (1997)	
$\lambda = 245 d_{50}^{0,35}$	
$\eta = 18 d_{50}^{0,1}$	

Sendo: λ , η , d_{50} e H em mm para todas as equações.

4.2.2 Formas de leito por correntes de densidade

Os mecanismos que governam a geração e a migração das formas de fundo por correntes de densidade, em ambientes marinhos, são pouco conhecidos em virtude, basicamente, da dificuldade de observação direta nos seus sistemas naturais, do número limitado de estudos experimentais e da complexidade desses fluxos em relação aos fluviais (Fedele et. al., 2009). Por causa disso, alguns estudos (Parker et. al., 1987; Raudikivi, 1997; Puhl, 2012; Cartigny & Postma, 2016 entre muitos outros) podem incorporar ou, ainda, adaptar os conhecimentos existentes sobre as formas de leito geradas por escoamentos em superfície livre, supondo-se criação e desenvolvimento similares entre ambas.

Analogamente às formas de leito de escoamentos em superfície livre, aquelas providas de correntes de densidade também são divididas pelo regime de escoamento no qual ocorrem (subcrítico, crítico e supercrítico). No caso das correntes de densidade, o regime de escoamento é caracterizado pelo número adimensional de Froude densimétrico (Fr_d), que relaciona as forças de inércia e gravitacionais e cuja definição é apresentada a seguir.

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{\frac{\rho_{CD} - \rho_{amb}}{\rho_{amb}} gH}} \quad (2)$$

Onde:

U: velocidade integrada na vertical ou velocidade média da corrente de densidade (m/s);

ρ_{CD} : massa específica da corrente de densidade (kg m^{-3});

ρ_{amb} : massa específica do fluido ambiente (kg m^{-3});

g: a aceleração gravitacional (m s^{-2});

H: espessura integrada na vertical ou profundidade média da corrente de densidade (m).

Alguns experimentos em escala reduzida, já realizados com correntes de densidade salinas (conservativas) ou compostas por sedimentos em suspensão (de turbidez, não conservativas), analisaram a morfologia do leito móvel para todos os regimes de escoamentos (subcrítico, crítico e supercrítico). Em geral, observa-se que as formas de ondulações e de dunas ocorrem em escoamentos subcríticos (Kneller et. al., 1997), enquanto que antidunas e *Cycled Steps* se formam espontaneamente em leitos móveis quando da passagem de escoamentos supercríticos (Hand, 1974; Winterwerp et. al., 1992; Spinewine et. al., 2009; Fedele et. al., 2011).

Hand (1974) identificou que, em certas condições de escoamento de correntes de densidade, formas de leito do regime superior podem coexistir com formas do regime inferior, apontando equívocos na classificação usualmente utilizada, baseada nas formas de leito de escoamentos fluviais. Em seus experimentos, foi registrada a coexistência de ondulações migrando à montante (com comprimento de onda (λ) variando entre 4,5 e 5,5 cm e altura da forma (η) menor que 1 mm), e de antidunas, migrando à jusante, em condições supercríticas de escoamento. Mais recentemente, Spinewine et. al. (2009) chegou a conclusões similares.

Além disso, Fedele et. al. (2009) descobriram um novo tipo de forma de leito, geradas por correntes de densidade, cuja gênese se assemelha a antidunas e cujo desenvolvimento se mostra similar a antidunas de pequeno comprimento de onda com migração no sentido do escoamento (ao contrário do que usualmente ocorre em escoamentos de superfície livres), devido à interação na interface entre a forma e o escoamento.

Em geral, a previsão das formas de leito por correntes de densidade acaba sendo feita com base nos diagramas de estabilidade desenvolvidos para formas de leito fluviais, anteriormente citados, apesar das diferenças entre os processos hidráulicos e sedimentológicos presentes em cada caso. Dessa forma, alguns autores desenvolveram seus diagramas de estabilidade, como Perillo et. al. (2014) e Cartigny e Postma (2016). Perillo et. al. (2014) realizaram experimentos com escoamentos unidirecionais e escoamentos oscilatórios induzidos por ondas para produzir seu diagrama. Cartigny e Postma (2016), por sua vez, criaram um diagrama em três dimensões, relacionando os parâmetros de mobilidade, diâmetro médio dos grãos e se concentração da corrente de densidade. Entretanto, esses diagramas se mostram em menor número e não são amplamente utilizados e reconhecidos na previsão das formas de leito.

4.3 PARÂMETROS DO LEITO E DA CORRENTE DE DENSIDADE

A compreensão do processo de geração das formas de fundo envolve a investigação dos processos hidrodinâmicos e sedimentológicos da corrente de densidade. Portanto, é importante caracterizar o fenômeno em termos de seus parâmetros adimensionais e perfis característicos. Da mesma forma, as características do leito serão fundamentais para o entendimento da interação e geração das formas de fundo. Sendo assim, serão apresentados a metodologia de cálculo dos perfis de velocidade e os demais parâmetros necessários na avaliação desse trabalho.

4.3.1 Perfil de velocidades e concentrações médias e espessura da corrente de densidade

Durante o seu avanço, a corrente desenvolve um perfil de velocidades e de concentrações característicos (ver figuras 1 e 2, item 4.1), cujos valores variam na vertical (u), conforme a distância ao leito (z), e também ao longo do tempo.

No entanto, o cálculo de diversos parâmetros hidráulicos utiliza como dados de entrada os valores médios de velocidade (U) e concentração (C) desses perfis, além da espessura média da corrente (H).

Nesse estudo, a velocidade média do perfil de velocidades, na direção do escoamento, foi obtida pelos somatórios de Ellison e Turner (1959), que relacionam o produto da velocidade média e da espessura média da corrente com o produto das diferenças de velocidade e espessura entre as sondas. Essas três equações foram utilizadas para determinar as incógnitas U , C_{CD} e H das correntes de densidade, como apresentado a seguir.

$$UH = \int_0^{\infty} u dz = \sum_{k=1}^{m-1} \frac{u_k + u_{k+1}}{2} (z_{k+1} - z_k) \quad (3)$$

$$U^2 H = \int_0^{\infty} u^2 dz = \sum_{k=1}^{m-1} \frac{u_k^2 + u_{k+1}^2}{2} (z_{k+1} - z_k) \quad (4)$$

$$UC_{CD}H = \int_0^{\infty} u c dz = \sum_{k=1}^{m-1} \frac{u_k c_k + u_{k+1} c_{k+1}}{2} (z_{k+1} - z_k) \quad (5)$$

Onde:

U : velocidade integrada na vertical ou velocidade média da corrente (m/s);

u : velocidade da corrente na direção do escoamento ($m s^{-1}$);

H : espessura integrada na vertical ou profundidade média da corrente (m);

z : elevação ao longo da vertical (m);

C_{CD} : concentração integrada na vertical ou concentração média da corrente ($g L^{-1}$);

c : concentração da corrente no ponto de amostragem ($g L^{-1}$).

4.3.2 Número de Reynolds da corrente

Assim como em qualquer outro fluxo, as correntes de densidade podem exibir escoamentos laminares ou turbulentos. Esse número adimensional relaciona a grandeza

das forças inerciais da corrente de densidade perante suas forças viscosas e é calculado pela expressão a seguir.

$$\text{Re} = \frac{UH}{\nu} \quad (6)$$

Onde,

U: velocidade integrada na vertical ou velocidade média da corrente (m s^{-1});

H: espessura integrada na vertical ou profundidade média da corrente (m);

ν : viscosidade cinemática da corrente de densidade (m s^{-2})

4.3.3 Tensão e velocidade de cisalhamento

Sempre que a velocidade da corrente sobre um leito móvel excede determinado valor limite, formas de fundo começam a se desenvolver (Raudikivi, 1990). A tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento sobre o fundo é um dos parâmetros que define o limite de início de movimento dos grãos, sendo relevante no estudo da deformação de leitos móveis.

Associado a essa tensão está velocidade de cisalhamento, que representa uma medida de intensidade das flutuações turbulentas (Graff, 1971). Para se conhecer o valor da tensão de cisalhamento provocada no leito, pelo escoamento, é necessário se conhecer as velocidades de cisalhamento junto ao fundo, comumente estimadas a partir de dados de velocidade coletados próximo à interface sedimento-corrente de densidade.

Nesse trabalho, foi utilizado o método do perfil logaritmo de velocidades, aplicado apenas na região da camada limite (região da corrente onde o perfil de velocidades está fortemente influenciado pela presença do leito móvel). Dentro da camada limite, a velocidade média do escoamento é relacionada com a distância ao leito, como apresentado em Raudikivi (1990):

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (7)$$

Onde:

u: velocidade da corrente na direção do escoamento (m s^{-1});

z: cota de elevação (m);

z_0 : cota de fundo (m);

u_* : velocidade de cisalhamento (m s^{-1});

κ : constante de von Kârman, considerada como 0,41.

Rearranjando a equação 7, temos:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln z - \frac{u_*}{\kappa} \ln z_0 \quad (8)$$

Para cada ensaio, os valores da distribuição de velocidades (menores que a velocidade máxima do perfil) e o cálculo do logaritmo dos valores da elevação dessas velocidades em relação ao leito foram plotados e, a esses dados, foi ajustada uma regressão linear. Conhecendo-se, então, a inclinação da reta ajustada aos dados e também o valor do coeficiente de Von Kàrman (κ , considerado constante e igual a 0,41), a velocidade de cisalhamento (u_*) pode ser calculada por meio da relação:

$$u_* = \frac{\kappa}{\text{inclinação}} \quad (9)$$

A velocidade de cisalhamento representa uma medida da intensidade das flutuações turbulentas (Graf, 1971) e é utilizada no cálculo da tensão de cisalhamento (τ). No presente estudo, o cálculo da velocidade de cisalhamento das correntes de densidade utilizara esse conceito provindo de escoamentos fluviais, considerando apenas a massa específica da corrente de densidade (ρ_{CD}), desprezando as eventuais tensões provindas do fluido ambiente, como a seguir:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_{CD}}} \quad (10)$$

Onde:

u_* : velocidade de cisalhamento (m s^{-1});

τ : tensão de cisalhamento (N m^{-2});

ρ_{CD} : massa específica da corrente de densidade (kg m^{-3});

Os valores de tensão de cisalhamento têm destaque no estudo da capacidade do escoamento em transportar, erodir e depositar sedimentos, estando diretamente relacionados à geração de formas de fundo.

4.3.4 Tensão de cisalhamento adimensional (parâmetro de Shields) e número de Reynolds da partícula

Em seu clássico estudo teórico-experimental, Shields (1936) testou o comportamento de diferentes composições de leito perante o escoamento fluvial e adicionou a esses resultados, dados de outros diversos autores, chegando à conclusão de que os dois parâmetros mais importantes no controle dos limites de movimentação do grão são a tensão de cisalhamento adimensional (θ) e o número de Reynolds do grão (Re_*) definidos nas equações 11 e 12, respectivamente.

Com o intuito de comparar os resultados do presente estudo com o de Shields, seu número adimensional foi utilizado com a substituição da massa específica do escoamento fluvial (ρ_{amb}) pela massa específica da corrente de densidade (ρ_{CD}).

$$\theta = \tau_* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho_{amb})d_{50}} \quad (11)$$

Onde:

τ : tensão de cisalhamento ($N\ m^{-2}$);

ρ_{amb} : massa específica da corrente ($kg\ m^{-3}$);

ρ_s : massa específica do sedimento presente no leito móvel ($kg\ m^{-3}$),

g : aceleração gravitacional ($m\ s^{-2}$);

d_{50} : diâmetro médio dos grãos (m).

$$Re_* = \frac{u_* d_{50}}{\nu} \quad (12)$$

Onde:

Re_* : número de Reynolds da partícula (-);

u_* : velocidade de cisalhamento ($m\ s^{-1}$);

d_{50} : diâmetro médio dos grãos (m);

ν : viscosidade cinemática da corrente de densidade ($m\ s^{-2}$).

Com os resultados do seu estudo, cálculo e correlação dos parâmetros anteriormente citados, Shields mapeou em um diagrama (Figura 10) uma faixa de pontos, representada na figura por uma linha mais espessa. Essa linha define os valores críticos da tensão de cisalhamento adimensional de Shields, a partir (acima) dos quais o início do movimento

dos grãos é definido. Por outro lado, a região inferior desse gráfico é caracterizada pela ausência de movimento dos grãos presentes no escoamento. A linha pontilhada define duas condições de movimentação dos grãos, umas de ocorrência significativa de transporte de sedimentos em suspensão e também junto ao fundo (região superior esquerda) e outra com menor tendência de transporte em suspensão, onde o transporte de fundo é mais provável de ocorrer.

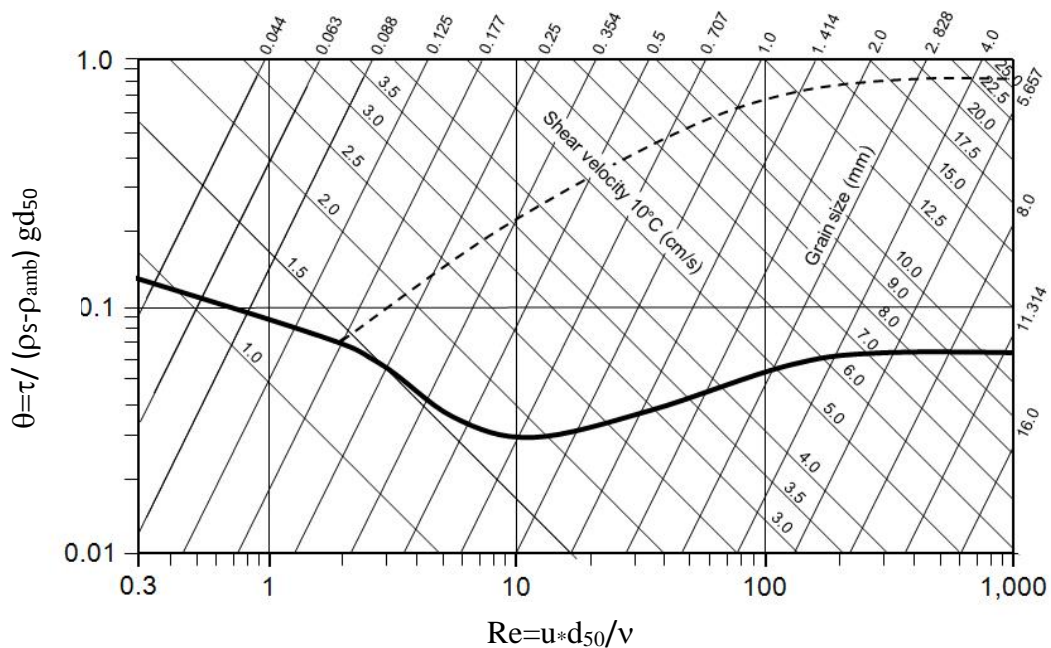


Figura 10. Diagrama modificado de Shields (1936).

Outro diagrama muito utilizado na previsão do início de movimento é o de Hjulström (1935 apud Graf, 1971), que relaciona a velocidade média do escoamento (U) com o diâmetro médio dos grãos do leito (d_{50}) (Figura 11). Ao invés de definir áreas com ausência e presença de movimento dos sedimentos, Hjulström procurou definir critérios de erosão, deposição e transporte dos sedimentos. O diagrama apresenta uma região delimitada inferiormente por velocidades críticas a partir das quais os grãos de quartzo presentes em um leito seriam potencialmente erodidos.

Abaixo da faixa que delimitam as velocidades críticas, se encontram duas áreas, uma de transporte e outra de deposição, sendo que a região de transporte se caracteriza por prever a ocorrência de erosão e deposição durante a passagem do escoamento sobre o leito, mas sem influenciar o balanço de massa do sistema.

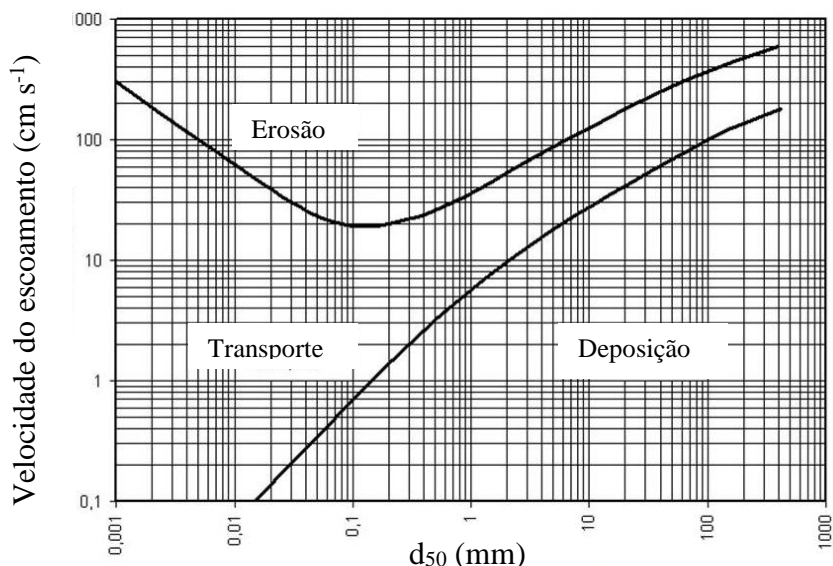


Figura 11. Diagrama de Hjulström (1935 apud Graf, 1971).

4.3.5 Diâmetro médio do grão adimensionalizado

Esse número adimensional é muito utilizado em algumas classificações de formas de fundo, auxiliando na comparação de sedimentos com diferentes valores de massa específica (ρ_s) e diâmetro médio. van Rijn (1984) define esse parâmetro como a seguir.

$$d_{50}^* = \left[\frac{\left(\frac{\rho_s}{\rho_{amb}} - 1 \right) g d_{50}^3}{\nu^2} \right]^{1/3} \quad (13)$$

Onde:

d_{50}^* : diâmetro médio dos grãos adimensionalizado (m);

ρ_{amb} : massa específica do escoamento (kg m^{-3});

ρ_s : massa específica do sedimento (kg m^{-3});

g : aceleração gravitacional (m s^{-2});

d_{50} : diâmetro médio dos grãos (m);

ν : viscosidade cinemática da corrente de densidade ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$).

Esse parâmetro será utilizado, no presente estudo, com a substituição da massa específica do escoamento sobre os grãos, referido por van Rijn (1984), pela massa específica das correntes de densidade experimentais.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A investigação experimental da geração de formas de leito por correntes de densidade se procedeu com a utilização de três tipos de leito móvel acomodados em um canal de acrílico com inclinação ajustável que, por sua vez, foi inserido em um canal longo bidimensional preenchido com água em cada ensaio. Nesse capítulo serão detalhados o aparato experimental, a obtenção de dados e a descrição dos experimentos realizados nesse estudo.

5.1 APARATO EXPERIMENTAL

5.1.1 Canal bidimensional longo

O canal bidimensional longo possui comprimento interno de 24,8 m e seção transversal retangular de 0,72 m x 1,49 m, com reboco e pintura nas paredes internas e externas (Figura 12). Além disso, suas paredes internas foram impermeabilizadas com o produto cimentício Lwart 2000.

Em uma das paredes do tanque de alvenaria, a 12,11 m do seu início, localiza-se uma janela de observação de vidro com dimensões 4,10 x 1,10 m. Junto ao final do canal de acrílico, existe um espaço destinado à chegada da corrente de densidade e deposição de possíveis sedimentos por ela carreados. Junto ao fundo dessa área foi instalado um compartimento de coleta de sedimentos de, aproximadamente 1 m², assim como um registro de saída de 85 mm diâmetro, o qual garante a manutenção do nível de água no canal longo durante a entrada da corrente de densidade e permite realizar a drenagem após cada ensaio. Nesse tanque está inserido o canal de acrílico, que receberá o fundo móvel, como descrito a seguir.



Figura 12. Canal longo de alvenaria e janela de observação.

5.1.2 Canal bidimensional de acrílico e sistema de mudança de inclinação

No interior do canal longo foi construído um canal de acrílico (material termoplástico rígido, transparente e incolor) com comprimento de 18 m e seção retangular de 0,20 x 0,50 m (Figura 13). O canal é composto por nove trechos de dois metros, unidos por placas externas parafusadas, sendo a estrutura inteira suportada por dois perfis retangulares de ferro de 18 m. As uniões internas das placas de acrílico do canal foram vedadas com borracha de silicone transparente.

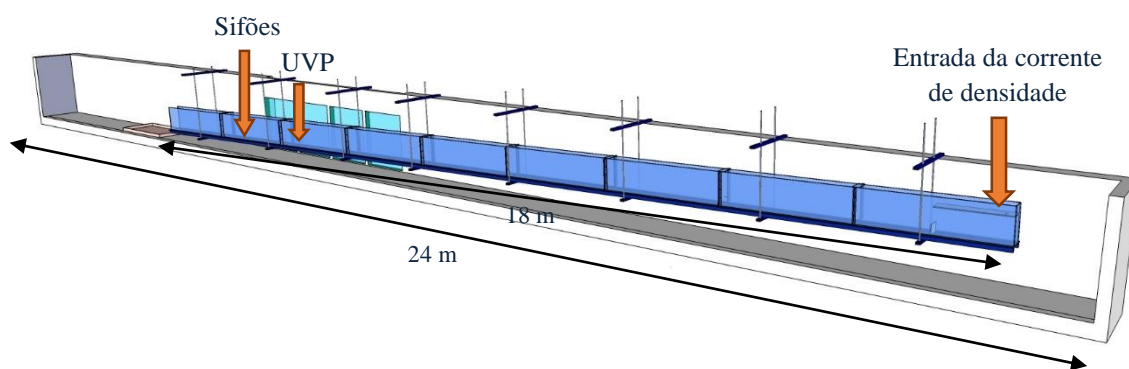


Figura 13. Croqui do canal de acrílico instalado dentro do canal longo de alvenaria.

Na entrada do canal de acrílico se localiza um vertedor, que procura direcionar a entrada do escoamento no canal. Ao fundo do canal foi adicionado o material a compor seu leito móvel (areia ou melamina) que será deformado pela passagem da corrente de densidade.

Ao final do canal se localiza uma pequena bacia de contenção, forrada por manta geotêxtil (bidim), que coletará o material sedimentar transportado pela corrente de densidade para fora do canal de experimento.

Ao longo do canal de acrílico foram instaladas, transversalmente, oito estruturas metálicas compostas por duas barras roscadas (uma em cada lateral do canal de acrílico) e dois perfis metálicos (um inferior, na base do canal de acrílico e outro superior, apoiado ao canal de alvenaria), envolvendo o canal de acrílico (Figura 14a e 14b). O perfil superior é unido às barras roscadas por porcas, as quais permitem o ajuste vertical dessas estruturas, para cada ponto do canal de acrílico, conforme a inclinação desejada.

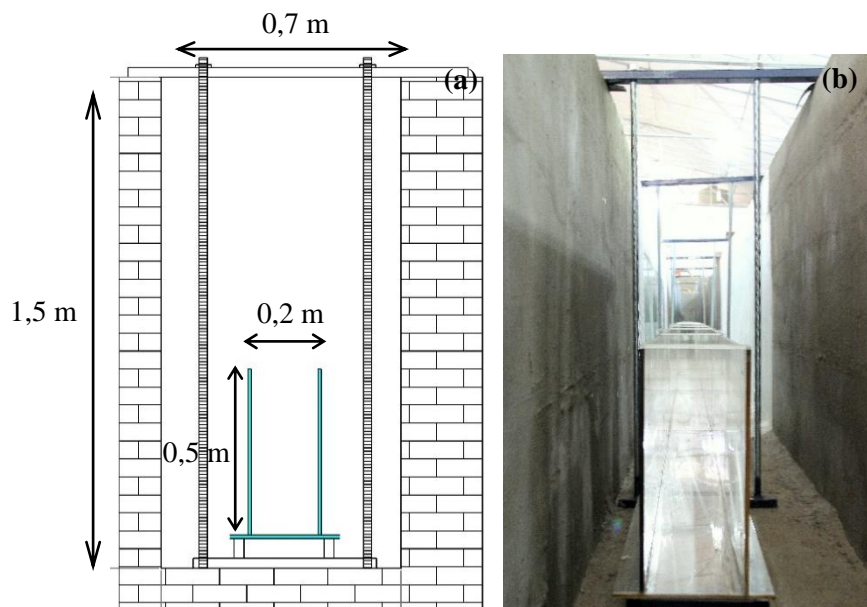


Figura 14. Croqui (a) e foto (b) da seção transversal do tanque de alvenaria e canal de acrílico, ilustrando uma das oito estruturas de mudança de inclinação instaladas ao longo do canal (vista de jusante para montante).

5.1.3 Sistema de alimentação

A corrente de densidade foi formada por uma mistura salina, preparada em um reservatório com capacidade de 5000 L. A partir desse reservatório, instalou-se uma canalização adutora de diâmetro de 75 mm que, após a bomba, foi reduzida para 50 mm. Para recalcar a mistura salina do reservatório para o tanque experimental foi utilizada um bomba centrífuga KSB Megabloc, modelo 32-160, 7,5 CV, com rotor de 165 mm (Figura 15), que trabalha com uma vazão de até $20 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

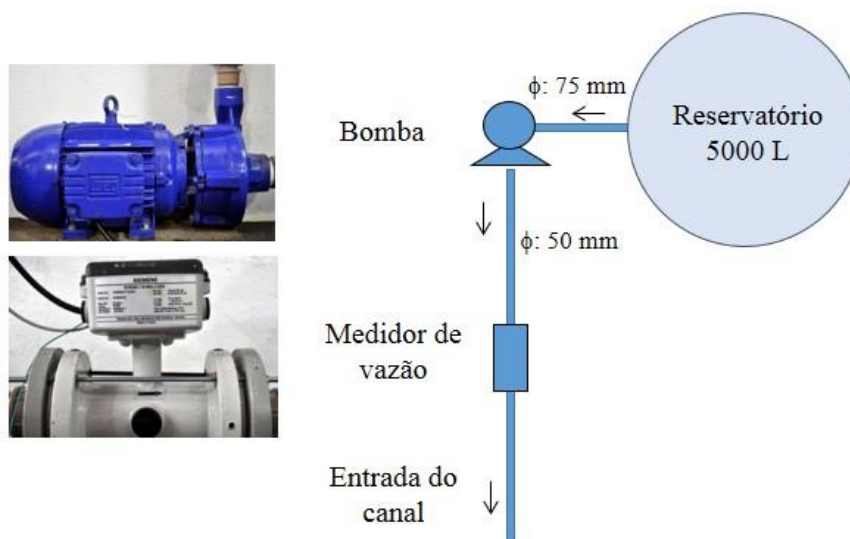


Figura 15. Sistema de bombeamento utilizado nos experimentos.

O volume de água utilizada em cada ensaio totalizou em torno de $30,5 \text{ m}^3$, sendo que $26,5 \text{ m}^3$ foram utilizados para encher o canal longo e 4 m^3 para produzir a corrente de densidade. A água de todos os ensaios foi retirada de um reservatório subterrâneo, construídos para armazenar água da chuva, com capacidade de, aproximadamente, de 700 m^3 .

Após cada ensaio realizado, a bomba era desacoplada pelas uniões presentes na canalização e passava por limpeza com água, a fim diminuir os efeitos de oxidação e desgastes provocados pelo sal presente na mistura, que acabam por danificar o funcionamento da bomba. Por fim, anteriormente a cada ensaio, se verificava o rotor da bomba, para garantir que o mesmo não pudesse estar trancado.

5.1.4 Material sedimentar

A geração de formas de fundo por correntes de densidade foi estudada em três composições de leito móvel, chamadas nesse trabalho de areia da praia, areia fluvial e melamina. Esses sedimentos foram caracterizados quanto ao tamanho médio de seus grãos (d_{50}), grau de seleção, esfericidade e grau de arredondamento, assim como quanto ao seu comportamento hidrodinâmico, por meio da velocidade de queda das partículas.

Para análise granulométrica do material de leito, utilizou-se um granulômetro a laser modelo Cilas 1180 (Figura 16), o qual permite avaliar a distribuição granulométrica dos grãos na faixa de tamanhos entre $0,04$ e $2500 \mu\text{m}$.



Figura 16. Analisador de partículas a laser.

O grau de seleção dos sedimentos ($\sigma(\Phi)$) representa o desvio padrão dos valores granulométricos em relação ao tamanho médio dos grãos (d_{50}) e seu cálculo foi desenvolvido conforme Folk and Ward (1957), utilizando diferentes percentis da distribuição granulométrica. O grau de seleção é calculado a partir da unidade Φ (Φ), que equivale ao valor negativo do logaritmo na base dois do diâmetro de uma partícula qualquer (d , mm), conforme a equação 14 e tabela 3, apresentadas a seguir.

$$\sigma(\Phi) : \left(\frac{\%84 - \%16}{4} \right) \times \left(\frac{\%95 - \%5}{6,6} \right), \text{ sendo } \Phi : -\log_2(d) \quad (14)$$

Onde:

$\sigma(\Phi)$: grau de seleção dos sedimentos, em relação ao parâmetro Φ ;

Φ : parâmetro da escala Φ ;

% 84: percentil 84 da amostra;

% 16: percentil 16 da amostra;

% 95: percentil 95 da amostra;

% 5: percentil 5 da amostra;

d : diâmetro de uma partícula qualquer (mm);

A nomenclatura adotada para valores encontrados por esta fórmula é a apresentada na tabela 3, a seguir.

Tabela 3. Classificação do grau de seleção (Φ) dos sedimentos.

Φ	Classificação
< 0,35	muito bem selecionado
0,5 a 0,50	bem selecionado
0,5 a 1,0	moderadamente selecionado
1,0 a 2,0	pobremente selecionado
2,0 a 4,0	muito pobremente selecionado
> 4,0	extremamente selecionado

A esfericidade ou forma dos grãos corresponde a uma medida comparativa entre a partícula sedimentar e uma esfera e, o grau de arredondamento é observado pela presença de angularidades na superfície externa do grão. Essas análises foram realizadas em laboratório, com a utilização de um microscópio, e comparação com o esquema da figura 17 (Krumbein, W.C., and Sloss, L.L, 1956 apud Graf, 1971).

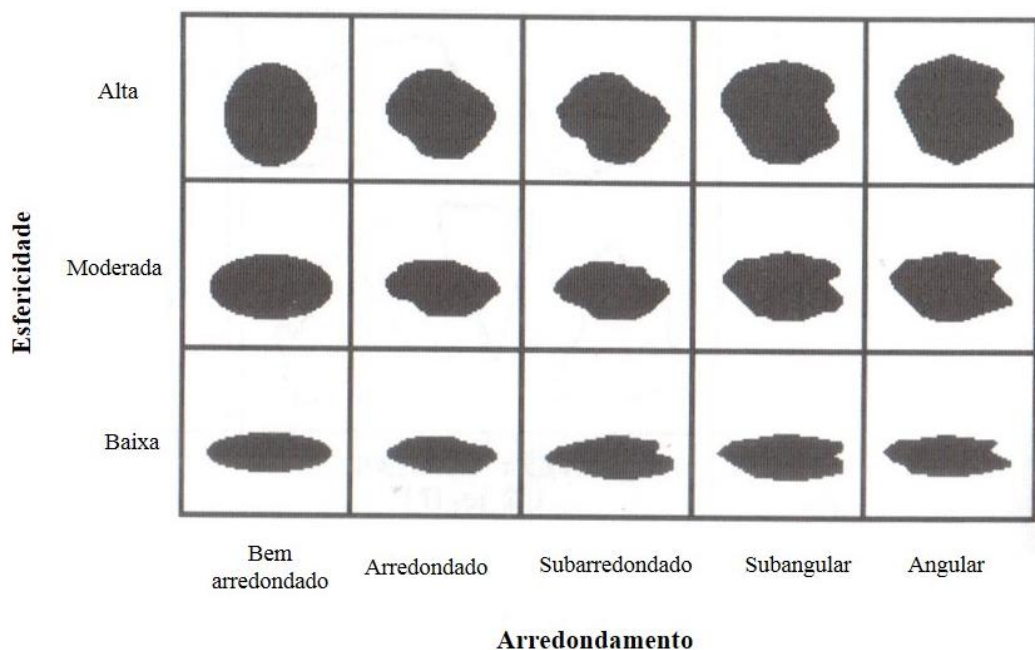


Figura 17. Classificação dos graus de arredondamento e esfericidade. Fonte: Graf (1971).

5.1.4.1 Melamina

A melamina (Figura 18) é um material granular plástico, de baixa densidade que, em geral, é utilizado na indústria como abrasivo. A melamina utilizada no presente estudo foi adquirida da empresa Kramer Industries, Inc., situada em Nova Jersey, Estados Unidos da América e, segundo o fornecedor, possui tamanho 60-80 Mesh (177-250 μm) e densidade de 1,5.



Figura 18. Material granular plástico utilizado na composição do leito móvel do canal.

A velocidade de queda média (u_q) da melamina foi realizada por meio de ensaios em um tubo de Griffith, resultando em u_q : 1,8 cm s^{-1} .

Em relação ao desvio padrão da distribuição granulométrica, os grãos de melamina foram classificados como moderadamente selecionados. Esse material se mostrou com grãos bastante irregulares, de baixa esfericidade e arredondamento anguloso a subanguloso.

A figura 19 apresenta os dados referentes à distribuição granulométrica de amostras de melamina, areia da praia e areia fluvial, assim como seus tamanhos médios dos grãos (d_{50} , μm). Segundo a escala Wentworth (1922 apud Lewis & McCconchie, 1994), a melamina é classificada com tamanho médio de grãos semelhante à areia fina, de d_{50} : 245 μm .

Após alguns ensaios com esse sedimento, identificou-se que uma parte da sua fração mais fina do leito de melamina havia sido transportada para a região de saída do canal de acrílico, ainda dentro do tanque longo. Entende-se que, o tamanho do grão influencia na sua mobilidade dentro de um escoamento e, conseqüentemente na geração das formas de fundo. Por esse motivo, resolveu-se realizar nova amostragem e análise granulométrica da melamina após a verificação desse transporte de materiais finos para fora da região do leito móvel. Constatou-se, então, um valor de diâmetro médio dos grãos (d_{50} : 310 μm) maior em relação à amostragem da melamina, feita anteriormente aos experimentos. Por causa disso, essa diferença de tamanho dos grãos será analisada e considerada na análise dos resultados, para os experimentos 0,5Mq1*, 0,5Mq2* e 0,5MQ4* (ver item 5.4) realizados após a segunda análise granulométrica da melamina, nomeando-se esse leito como “melamina 2”.

5.1.4.2 Areia

Além da melamina, dois tipos de areia foram utilizados na composição do leito móvel, nomeadas aqui de: (a) areia de praia, apresentando d_{50} : 206 μm e; (b) areia fluvial, apresentando d_{50} : 480 μm .

Segundo a escala Wentworth (1922 apud Lewis & McCconchie, 1994), a areia de praia é classificada como fina e, a fluvial, como média. Para fins de cálculo, ambos os tipos de areia foram admitidos como tendo densidade de 2,65 por serem formados, basicamente, de quartzo.

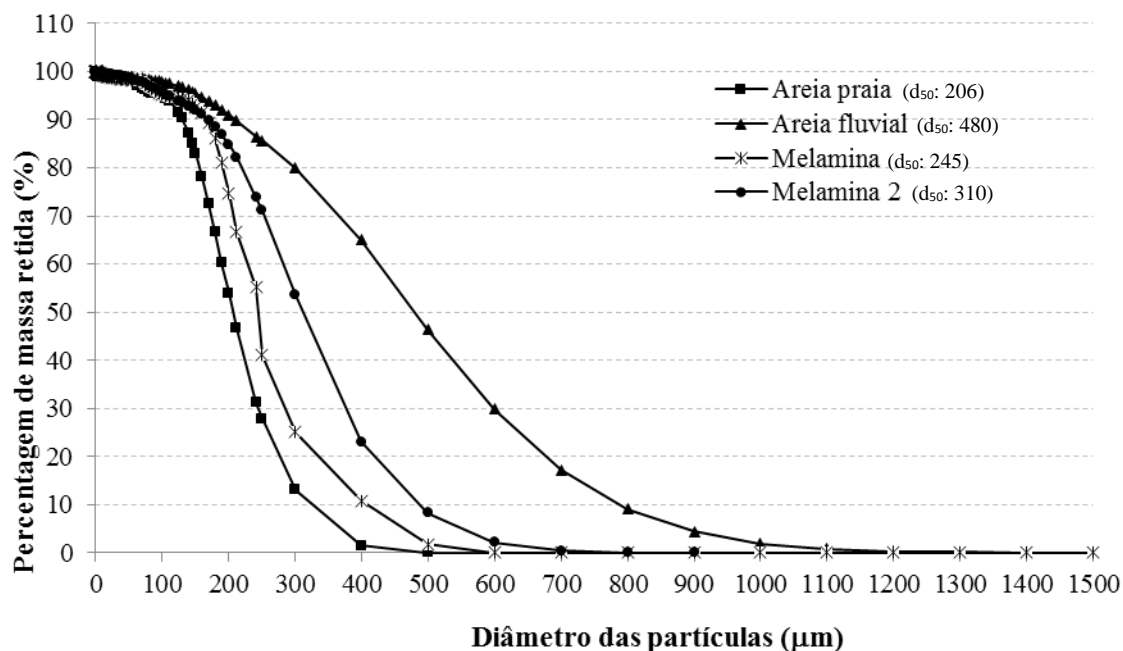


Figura 19. Distribuição granulométrica dos sedimentos utilizados na composição do leito móvel e diâmetro médio das partículas, em μm .

Os grãos de areia da praia e de areia fluvial foram classificados como moderadamente selecionados (Folk & Ward, 1957), com graus de seleção entre 0,53 e 0,73. Quanto à análise das suas propriedades morfoscópicas, ambas as areias se mostraram subarredondadas e com grau de esfericidade entre moderado e alto (Krumbein & Sloss, 1956 apud Graf, 1971).

O resumo das caracterização dos sedimentos utilizados nesse estudo são apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Caracterização dos sedimentos utilizados na composição do leito móvel.

Leito	ρ_s (kg m^{-3})	d_{10}	d_{90}	d_{50}	d^*_{50}	u_q (cm s^{-1})	Grau de seleção σ (ϕ)	Arredondamento	Esfericidade
		(µm)							
Areia praia	2600	131	324	206	4,8	2,8	0,53 (moderadamente selecionado)	subarredondado	moderada a boa
Melamina	1500	165	410	245	3,9	1,8	0,56 (moderadamente selecionado)	angular	baixa
Areia fluvial	2600	208	790	480	11,3	6,5	0,73 (moderadamente selecionado)	subarredondado	moderada a boa
Melamina 2	1500	169	487	310	4,9	1,8	0,64 (moderadamente selecionado)	angular	baixa

5.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

A obtenção dos dados experimentais foi realizada com uma série de equipamentos, os quais buscaram avaliar as propriedades hidrodinâmicas das correntes, tais como medição de vazão, velocidade e concentração, bem como registrar e caracterizar a deformação do leito durante e após a passagem da corrente em cada ensaio

5.2.1 Dados de Vazão

A vazão de entrada da mistura foi registrada por um medidor de vazão eletromagnético Siemens Sitrans Mag 5100 W (Figura 20), localizado à jusante da bomba, a uma frequência de obtenção de dados de 4 Hz, cujo funcionamento se baseia na alteração do campo eletromagnético, devido à passagem do escoamento. A obtenção dos dados gerados foi realizada com uma placa de aquisição (*datalogger*) MyPCLab®.



Figura 20. Medidor de vazão eletromagnético Siemens Sitrans Mag 5100 W.

5.2.2 Dados de Velocidade

Os perfis de velocidade média das correntes de densidade foram obtidos a partir de dados medidos por um Perfilador de Velocidade Ultrassônico (Ultrasonic Velocity Profiler – UVP) Duo MetFlow AS (Figura 21a), cujo funcionamento se baseia na emissão de ondas sonoras pelas suas sondas (Figura 21b) e na leitura do retorno dessas ondas. A velocidade de fluxo é, então, estimada a partir do efeito Doppler, com a utilização do aplicativo MetFlow®.

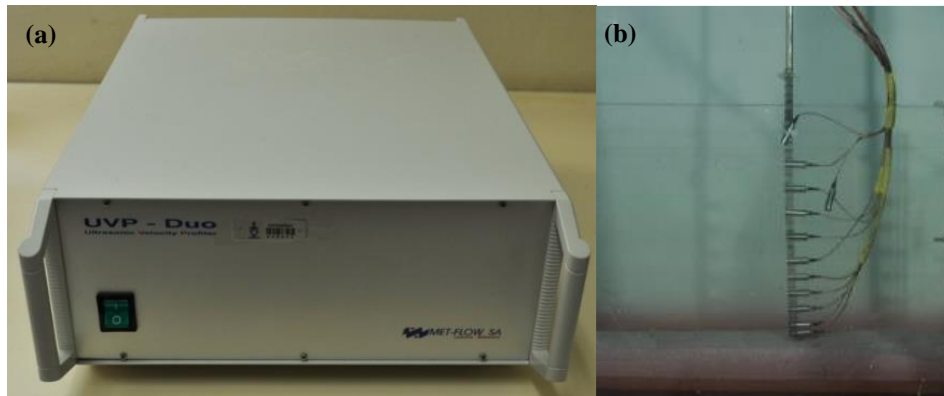


Figura 21. Perfilador de velocidades ultrassônico.

As dez sondas foram posicionadas verticalmente, no sentido do escoamento, a 0,8; 2,15; 4,95; 7,85; 10,75; 13,65; 18; 22,35; 26,7 e 31,1 cm a partir do leito móvel. O registro de dados foi realizado a uma frequência de 2 hz, durante a passagem de toda a corrente de densidade, em seção posicionada a, aproximadamente, 14 m da injeção da corrente de salina no canal experimental.

5.2.3 Dados de Concentração

Para a obtenção de um perfil de valores médios de concentração, utilizou-se um instrumento constituído por tubos de captação que, por sifonagem, amostram a mistura (Figura 22a), de 3,5 e 6 mm de diâmetro interno e externo, respectivamente. O perfil constituiu-se de seis sifões distribuídos na vertical, a 2, 5, 10, 13, 18 e 21 cm do leito móvel e posicionados paralelamente ao sentido de escoamento da corrente de densidade, a 15,5 m da entrada da corrente de densidade no canal experimental. Quando da passagem da corrente pelo instrumento, os sifões eram abertos, permitindo a entrada da corrente salina por eles e o seu encaminhamento, através de mangueiras, a recipientes de amostragem limpos e secos. Com o intuito de obter amostras mais representativas da corrente salina no instante da amostragem, o volume inicial succionado pelos sifões era descartado.

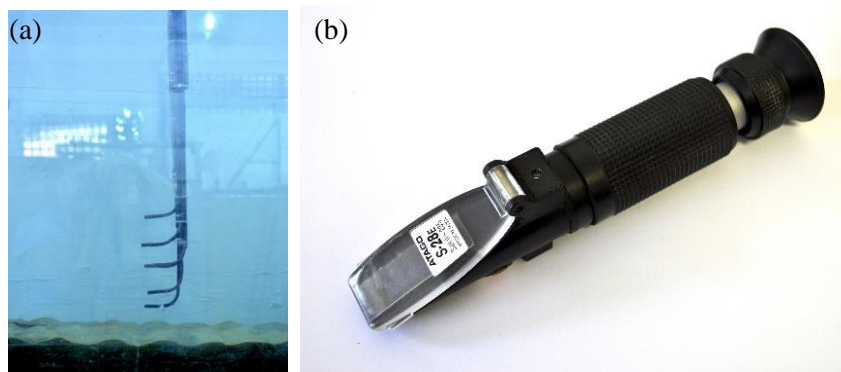


Figura 22. Perfil vertical do sifões amostradores da corrente de densidade (a) e refratômetro portátil ATAGO S28E 2~28%.

Após alguns experimentos, optou-se por se desenvolver um sistema mais eficiente de coleta, no qual foi possível realizar sete amostragens por ensaio. Definiu-se a primeira amostragem após transcorridos 1 min e 30 s da passagem da cabeça da corrente e as outras seis, a cada 30 s. Essa alteração buscou o melhor registro da variação temporal da concentração da corrente salina, conseqüentemente, a geração de dados mais representativos dos processos hidráulicos do experimento.

O volume amostrado teve, então, seu excesso de massa específica ($\Delta\rho/\rho$) lido, em porcentagem, por um refratômetro portátil ATAGO S28E 2 ~ 28% (Figura 22b). Os refratômetros, em geral, são utilizados na determinação da quantidade de substâncias dissolvidas em uma amostra, da concentração de álcoois ou de sais, sendo esse último tipo o utilizado no presente estudo. Seu funcionamento se baseia na medição do índice refrativo, definido como a taxa da velocidade da luz em um espaço vazio pela velocidade da luz em uma substância escolhida.

A calibração desse instrumento é feita antes de cada leitura, por meio do ajuste de um pequeno parafuso, de tal maneira que a escala indique zero para a água pura (da torneira), a mesma utilizada no enchimento do tanque longo. Segundo o fabricante, esse modelo ajusta automaticamente o valor lido em função da mudança de temperatura da amostra.

Após a calibração, é feita a secagem do refratômetro e algumas gotas da amostra a ser analisada são pingadas sobre seu prisma. Fecha-se, então, sua tampa e realiza-se a leitura, sempre apontando o refratômetro contra uma fonte de luz artificial (holofotes). A utilização dos refratômetros na medição de salinidade se mostra vantajosa por constituir como um método simples e rápido, com utilização de pequeno volume de amostra (apenas algumas gotas) e com baixo valor de compra.

No entanto, para fim de cálculos, se mostrou necessário o conhecimento dos valores de massa específica da amostra. Dessa forma, realizou-se uma correlação, em laboratório, através de leituras realizadas pelo refratômetro ($\Delta\rho/\rho$) e por um densímetro (kg m^{-3}) em amostras previamente preparadas, com concentrações salinas conhecidas.

A escolha da função de correlação entre o refratômetro e o densímetro foi feita com base na análise do melhor ajuste, sendo os valores estimados calculados com três tipos de aproximação: (1) polinomial de terceiro grau; (2) polinomial de segundo grau e; (3) linear (Tabela 5).

Tabela 5. Valores de massa específica (ρ_{mis}) medidos e calculados e seus erros relativos.

ρ_{mis} medido (kg m^{-3})	ρ_{mis} estimado (kg m^{-3})			Erro (%)		
	densímetro	Polinomial de grau 3	Polinomial de grau 2	Linear	Polinomial de grau 3	Polinomial de grau 2
998,2	998,2	998,2	998,2	0,00	0,00	0,00
1002	1002	1003	1004	0,04	0,12	0,23
1004	1004	1006	1008	0,03	0,22	0,36
1007	1007	1009	1011	0,01	0,19	0,36
1011	1011	1012	1014	0,00	0,14	0,33
1014	1014	1015	1017	0,04	0,14	0,33
1016	1019	1019	1021	0,29	0,31	0,50
1022	1023	1022	1024	0,07	0,04	0,21
1027	1026	1025	1026	0,12	0,20	0,05
1030	1027	1026	1028	0,25	0,35	0,21
1034	1034	1032	1033	0,03	0,15	0,08
1040	1041	1039	1039	0,08	0,11	0,14
1047	1048	1047	1045	0,10	0,03	0,16
1054	1054	1056	1052	0,03	0,21	0,19

Os valores calculados de massa específica (kg m^{-3}) que mais se aproximaram dos medidos, isso é, aqueles que apresentaram os menores erros relativos, foram àqueles estimados pelo polinômio de terceiro grau apresentado na figura 23 e na equação 15, a seguir.

$$y = -0,107x^3 + 1,406x^2 + 2,485x + 998,2$$

Eq. 15

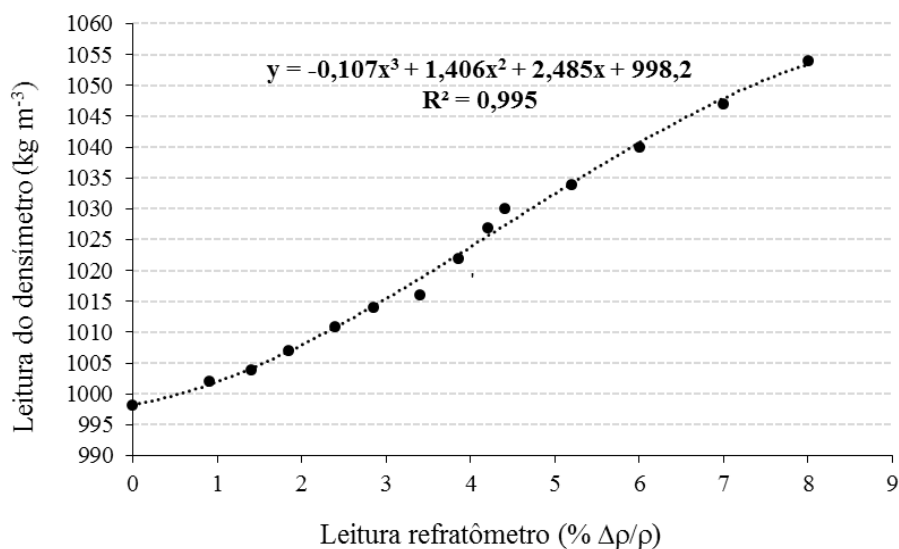


Figura 23. Calibração dos valores de excesso de densidade, lidos pelo refratômetro para valores de massa específica, lidos pelo densímetro.

Por fim, conhecendo-se a concentração das amostras preparadas (pelo processo de pesagem do volume de água e de sal) e realizando a medição das massa específica dessas amostras com o densímetro, gerou-se a correlação apresentação na figura 24 e expressa na equação 16.

$$y = 0,6425x + 998,2$$

Eq. 16

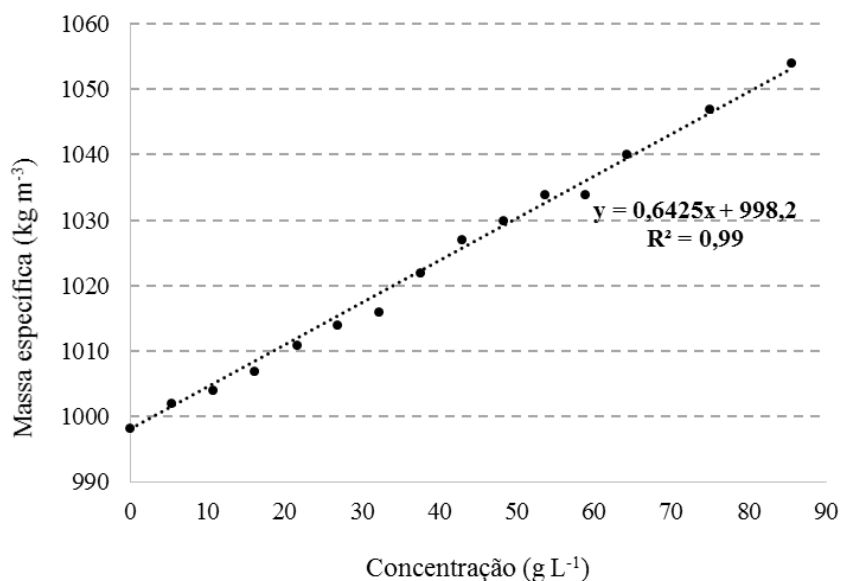


Figura 24. Calibração dos valores de concentração de amostras salinas com sua massa específica (densímetro).

5.2.4 Registro fotográfico de imagens

Os registros fotográficos da geração e desenvolvimentos das formas de leito foram realizados a, aproximadamente, 12,5 m a partir da entrada da corrente de densidade no canal, a 1,5m do início da janela de visualização. Para tanto, foram feitas fotografias sequenciais (a cada 2 s, em média), com câmera fotográfica Nikon D500018-55 mm (Figura 25a), que auxiliaram na análise visual da geração e desenvolvimentos das formas de leito, assim como das características da corrente de densidade.

Além disso, após cada ensaio foram retiradas fotografias de topo, com o intuito de analisar a geometria das cristas das formas de fundo. Para tanto, utilizou-se um suporte para a câmera (Figura 25b) acoplado ao canal de acrílico possibilitou a obtenção de imagens sempre a mesma distância do leito, ao longo de todo o canal. As imagens foram montadas em Corel Draw®, gerando um mapeamento sequencial das formas de fundo geradas.

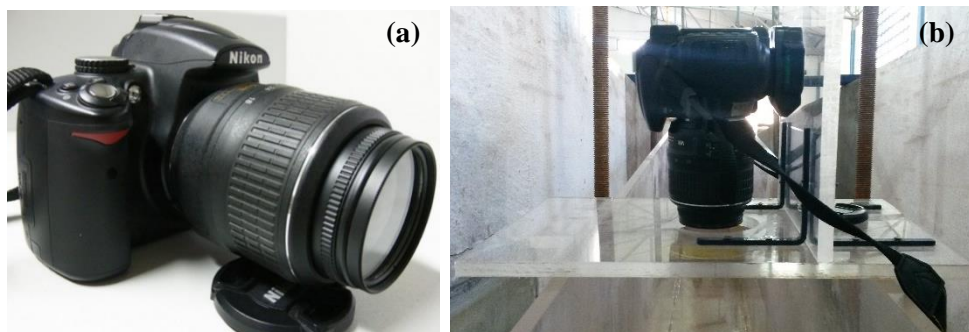


Figura 25. Câmera fotográfica NIKON D5000 (a) e vista lateral de suporte da máquina, acoplado às paredes do canal de acrílico (b).

5.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

A realização de cada experimento exigiu a execução de diversas etapas preparatórias, desde a preparação da mistura e instalação de equipamentos, até o registro dos dados da corrente e da deformação do leito móvel.

Em geral, iniciava-se com a preparação da corrente de densidade, em um reservatório de 5000 litros. Para tanto, conforme os parâmetros escolhidos para cada ensaio, prepararam-se misturas de água e sal extrafino não iodado, com diferentes concentrações. Sua homogeneização foi feita por meio do acionamento da bomba e do retorno da mistura ao reservatório, durante cerca de 20 min. Após homogeneização da mistura, foram medidas

a temperatura, com um termômetro, e a massa específica da mistura, com o densímetro e refratômetro.

Durante a homogeneização da mistura, foi realizada a instalação dos equipamentos UVP, sonda de sifões, sistema de iluminação e máquina fotográfica. Com os equipamentos instalados, procedeu-se ao enchimento do canal longo de alvenaria com água, inicialmente a baixas vazões, para que não houvesse perturbação do leito móvel. Anteriormente aos experimentos, ajustava-se uma espessura nivelada e alisada de leito móvel entre 5 e 7 cm. Após o nível d'água cobrir todo o leito, aumentava-se a vazão para acelerar o enchimento do canal longo. Com o canal preenchido, a temperatura da água era registrada com um termômetro e o experimento podia ser realizado. A mistura era bombeada na vazão desejada até a entrada do canal experimental, sendo registrada pelo medidor de vazão.

Ao entrar no canal de acrílico, a corrente de densidade passava por um vertedor para, então, seguir seu escoamento e interação com o leito móvel. Durante o escoamento foram feitos os registros da vazão de injeção, perfis de concentração e de velocidade e, finalmente, o registro de imagens. Para garantir a manutenção do nível de água do tanque longo, abria-se o registro de saída, localizado ao final do tanque longo, logo após a entrada da corrente de densidade.

Por fim, após o bombeamento de, em média, 4000 litros de mistura por ensaio, o canal era lentamente esvaziado, com o intuito de não perturbar as eventuais formas de fundo geradas pela corrente. Ainda, após a drenagem completa do canal longo, era realizado o registro das imagens de topo, ao longo de todo o canal de acrílico.

5.4 ENSAIOS REALIZADOS

Esse estudo atendeu ao plano de ensaios apresentado na tabela 6, de forma a contemplar o maior número de cenários de regime de escoamento possível, em função da variação de parâmetros inerentes à corrente salina e ao leito móvel, buscando verificar as suas influências na geração das formas de leito.

Ao total, quatro parâmetros foram alterados e combinados previamente ao estudo, sendo que para as três composições de sedimento de leito foram estabelecidas variações de inclinação ($0,5^\circ$ e $1,5^\circ$), vazão de injeção (baixa e alta) e concentração da mistura salina (alta, média e baixa), totalizando, dessa forma, 29 experimentos.

Os ensaios foram nomeados em sequência contendo informações de inclinação (0,5 ou 1,5°) e composição do leito (melamina - M, areia da praia - P e areia fluvial - F). A vazão utilizada foi identificada na nomenclatura como q (grupo de vazões baixas) e Q (grupo de vazões altas). Os três grupos de massa específica utilizados (baixa, média e alta) foram identificados, nessa sequência, com as numerações 1, 2, 3 e 4. Por exemplo, o ensaio “1,5Mq2” foi realizado com inclinação do canal de 1,5°, leito móvel composto por melamina, baixa vazão da corrente e média massa específica.

Tabela 6. Ensaio realizados.

Leito	I (°)	Ensaio	Q (L min ⁻¹)	ρ_{mis} (kg m ⁻³)
melamina	0,5	0,5Mq1*	380	1016
		0,5Mq2*	384	1026
		0,5Mq3	383	1042
		0,5MQ1*	506	1016
		0,5MQ2	517	1031
		0,5MQ3	479	1039
	1,5	0,5MQ4	474	1045
		1,5Mq1	381	1016
		1,5Mq2	383	1024
		1,5Mq3	383	1041
		1,5MQ1	519	1016
		1,5MQ2	520	1025
areia da praia	0,5	1,5MQ3	519	1043
		0,5PQ1	504	1010
		0,5PQ2	503	1024
	1,5	0,5PQ3	506	1041
		1,5Pq1	364	1015
		1,5Pq2	364	1026
		1,5Pq3	383	1045
		1,5Pq4	325	1041
		1,5PQ1	510	1015
		1,5PQ2	516	1025
		1,5PQ3	461	1042
		areia fluvial	0,5	0,5FQ1
0,5FQ2	504			1025
0,5FQ3	508			1041
1,5	1,5Fq1		381	1016
	1,5Fq2		381	1026
	1,5Fq3		379	1041
	1,5Fq4		377	1041

*Experimentos realizados com o sedimento “melamina 2”.

A repetição de cada grupo de vazão foi realizada, no mínimo, três vezes, possibilitando a elaboração e visualização de tendências entre a ocorrência dos parâmetros variados e os tipos de formas de fundo geradas.

Os grupo de vazões baixas de injeção da corrente apresenta valores entre 364 e 384 L min⁻¹, com um valor atípico, de 325 L min⁻¹, referente ao experimento 1,5Pq4. Os valores utilizados no grupo das vazões “altas” foram escolhidos com base na capacidade de funcionamento da bomba utilizada, procurando-se reunir valores de vazão entre 503 e 519 L min⁻¹. No entanto, nesse grupo também foram utilizados três valores de vazão particulares, de 461 (1,5PQ3), 474 (0,5MQ4) e 479 L min⁻¹ (0,5MQ3). Isso ocorreu devido ao interesse de se obter diferentes valores de número de Froude densimétrico (variáveis com a vazão), mais prováveis de gerarem de formas de fundo não planas e esses valores serão considerados na interpretação dos resultados, apresentado nos próximos tópicos desse trabalho.

Em relação aos valores de massa específica, escolheu-se utilizar três valores distintos (baixa – 1015 kg m⁻³, média - 1025 kg m⁻³ e alta - 1040 kg m⁻³) para cada grupo de vazão, por também se mostrarem como influenciadores da variação do número de Froude densimétrico, mesmo que em menor escala que a vazão (já que a massa específica está no denominador do Fr_d e dentro da raiz quadrada).

Por fim, o experimento 1,5Fq3 foi repetido novamente o e identificado como 1,5Fq4, a fim de apresentar a influência do acréscimo do tempo de ensaio na geração, evolução e migração das formas de leito (item 7.2.3), mostrando resultados a serem considerados em estudos futuros.

6. RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos experimentos e o seu tratamento, utilizados na caracterização das propriedades hidrodinâmicas das correntes de densidade (vazão, velocidade, concentração e espessura médias da corrente) e das formas de leito geradas (tipo e dimensões).

6.1 VAZÃO DE INJEÇÃO DA CORRENTE DE DENSIDADE

A distribuição dos valores da vazão de injeção da mistura salina no tanque experimental se comportou de maneira similar, ao longo do tempo, para todos os experimentos, conforme pode ser visualizado por meio de um resultado experimental, apresentado na figura 26, mostram o início do funcionamento da bomba e o ajuste da vazão desejada, assim como a região final do gráfico, mostra o final da injeção da mistura e o consequente decaimento da vazão. Percebe-se que, ao longo do tempo, a mistura injetada permanece aproximadamente constante, mas com uma suave inclinação negativa, indicando a influência do rebaixamento do nível de água no reservatório ao longo do bombeamento.

O cálculo da vazão média levou em conta apenas o intervalo de tempo no qual a vazão já havia sido estabilizada, desconsiderando-se os dados iniciais e finais variáveis, já mencionados.

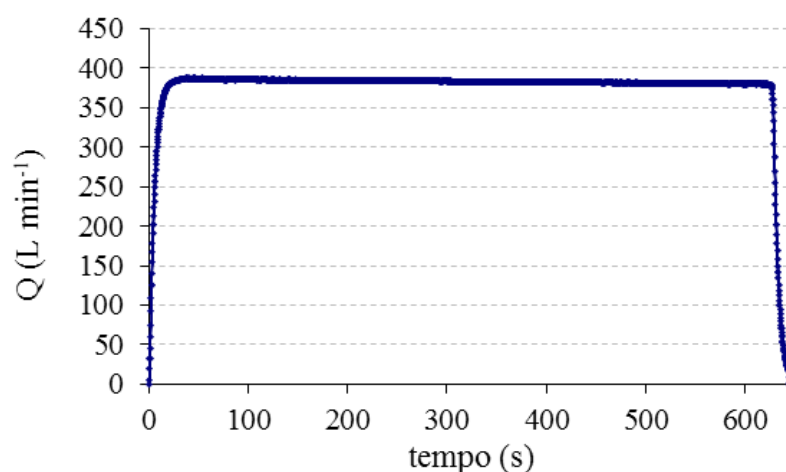


Figura 26. Distribuição temporal da vazão para o ensaio 1,5Mq3 ($Q= 383\text{L min}^{-1}$ e $\rho_{\text{mis}}= 1041\text{ kg m}^{-3}$).

A tabela 7 mostra os valores médios de vazão de injeção da corrente de densidade no tanque experimental, para todos os ensaios, e o tratamento estatístico desses dados. As vazões médias utilizadas nesse estudo variam entre 326 e 520 L min⁻¹, com baixos valores de desvio padrão ($\sigma(Q)$), entre 1,1 e 3,8, e de dispersão relativa (CV), entre 0,2 e 1,0, evidenciando amostras homogêneas de vazão para todos os experimentos. A tabela apresenta, também, os tempos de injeção da mistura, que variam conforme a vazão utilizada. Evidentemente, os tempos de injeção da mistura são menores para altas vazões e, maiores para baixas vazões, variando entre, aproximadamente, 420 e 738 s.

Tabela 7. Valores de vazões médias, desvio padrão e tempo de injeção da mistura salina no tanque experimental.

Ensaio	Q (L min ⁻¹)	σ (Q)	CV (%)	T _{inj} (s)	Ensaio	Q (L min ⁻¹)	σ (Q)	CV (%)	T _{inj} (s)
0,5Mq1*	380,1	2,8	0,7	650	0,5PQ3	505,6	1,8	0,4	480
0,5Mq2*	384,1	3,8	1,0	640	1,5Pq1	364,4	1,8	0,5	670
0,5Mq3	383,2	2,2	0,6	646	1,5Pq2	364,4	1,2	0,3	674
0,5MQ1*	505,6	1,7	0,3	480	1,5Pq3	383,4	2,3	0,6	618
0,5MQ2	516,9	2,0	0,4	420	1,5Pq4	325,8	3,3	1,0	738
0,5MQ3	479,2	1,7	0,4	510	1,5PQ1	508,6	1,0	0,2	500
0,5MQ4	473,7	2,1	0,4	510	1,5PQ2	516,2	1,7	0,3	482
1,5Mq1	381,8	2,4	0,6	607	1,5PQ3	460,6	1,7	0,4	540
1,5Mq2	382,6	2,3	0,6	642	0,5FQ1	508,2	1,1	0,2	490
1,5Mq3	383,1	2,0	0,5	645	0,5FQ2	503,8	1,7	0,3	494
1,5MQ1	517,2	1,9	0,4	487	0,5FQ3	507,8	2,0	0,4	420
1,5MQ2	519,8	2,1	0,4	471	1,5Fq1	380,7	2,6	0,7	645
1,5MQ3	518,8	2,1	0,4	438	1,5Fq2	380,4	2,0	0,5	650
0,5PQ1	504,3	1,8	0,4	495	1,5Fq3	379,1	2,1	0,6	662
0,5PQ2	503,0	1,6	0,3	492	1,5Fq4	376,9	2,3	0,6	654

*Experimentos realizados com o sedimento “melamina 2”.

6.2 VELOCIDADE, CONCENTRAÇÃO E ESPESSURA DA CORRENTE

6.2.1 Velocidade

Os valores da componente horizontal da velocidade, captados pelos sensores do UVP, a uma taxa de 2 Hz, permitiram criar séries temporais da variação da velocidade durante todo o ensaio, analisadas em um volume de controle definido entre 42,4 e 97,9 mm de distância do sensor (equivalente aos valores registrados entre os canais 38 e 95).

A figura 27 apresenta a série temporal para cada um dos dez sensores que compuseram o perfil vertical do ensaio 1,5MQ3, identificados com suas distâncias (de 0,08 a 31,1 cm) em relação ao leito móvel. Assim como o ensaio 1,5MQ3, todos os ensaios apresentaram regiões evidentes de chegada da cabeça da corrente de densidade (picos de velocidade iniciais), da passagem do seu corpo e, por fim, do término da mesma.

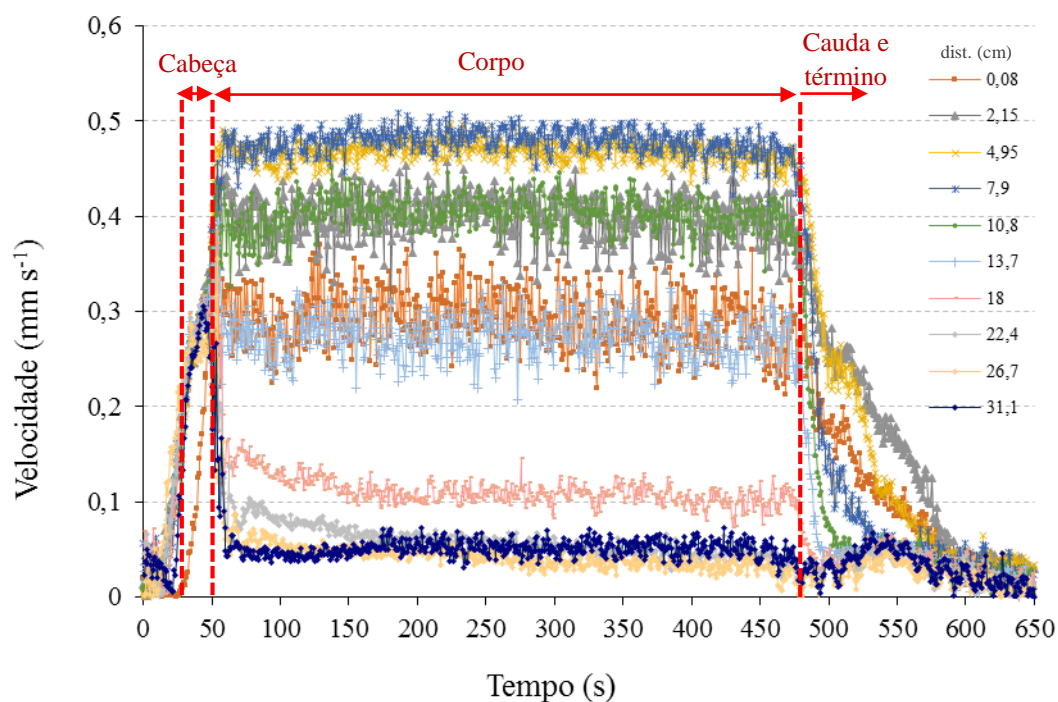


Figura 27. Distribuição temporal da componente horizontal da velocidade em cada sensor, para o experimento 1,5MQ3 ($Q= 519 \text{ L min}^{-1}$; $\rho_{\text{mis}}= 1043 \text{ kg m}^{-3}$).

A análise da figura 27 é uma etapa importante no entendimento da dinâmica da corrente de densidade, pois, a partir dela, consegue-se analisar o grau de variação das velocidades ao longo do tempo em cada sensor, isoladamente.

Posteriormente, essa análise permitiu o cálculo da velocidade média do perfil, parâmetro obtido por meio do procedimento realizado pelas seguintes etapas: (a) construção da série temporal das velocidades para cada uma das dez sondas; (b) identificação do espaço de tempo durante o qual não houve grandes variações de velocidades; (c) comparação das distribuições temporais de velocidade de cada sonda e sobreposição das regiões com velocidade aproximadamente constante e; (d) utilização dos valores de velocidade do intervalo de tempo identificado como comum aos dez sensores (identificados como região do corpo da corrente, figura 27), para o cálculo da velocidade média de cada sensor. Esse processo foi realizado para todos os ensaios desse estudo sendo que, em geral, a identificação das velocidades constantes no corpo se deu a partir de 300 s de ensaio e o intervalo de tempo utilizado de, no mínimo, 60 s de duração.

Após o cálculo das médias das velocidades na direção do escoamento, para cada sensor do perfil, pode-se construir o perfil de velocidades médias para a vertical da seção de medição de cada ensaio, como apresentado na figura 28. Esse perfil fornece informações básicas sobre a corrente de densidade, como: (a) baixos valores de velocidade próximo ao leito, devido à interação entre escoamento e leito móvel; (b) aumento das velocidades até um valor máximo; (c) redução das velocidades até a região de interação entre a corrente de densidade e o fluido ambiente.

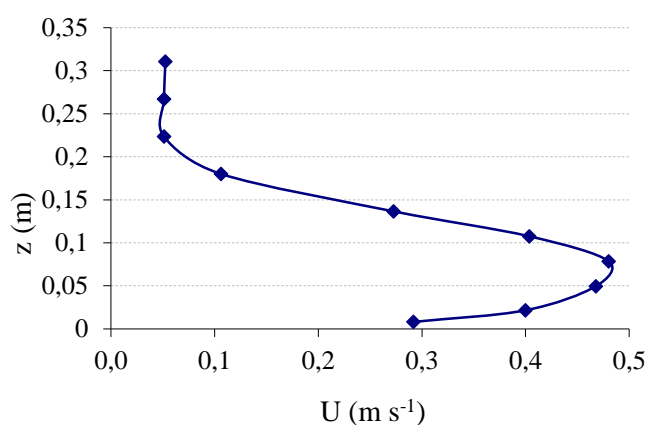


Figura 28. Perfil de velocidades médias do ensaio 1,5MQ3
($Q= 519 \text{ L min}^{-1}$; $\rho_{\text{mis}}= 1043 \text{ kg m}^{-3}$).

Para fins de cálculo, os valores de velocidade foram considerados nulos junto ao leito e no ponto da região superior do perfil, onde os valores de velocidade começam a se comportar de maneira constante (aproximadamente a 0,22 m do leito, no exemplo da

figura 28) e que é aproximadamente igual à espessura da corrente, identificada no perfil de concentrações.

Por fim, o valor médio da velocidade de cada corrente de densidade (U) foi calculado a partir da resolução conjunta das equações 3 e 4, apresentadas no item 4.3.1, que utilizam os valores médios de velocidade para cada sensor e a distância destes pontos ao leito. As velocidades médias (U) e máximas ($u_{\text{máx}}$) do perfil de cada ensaio, assim como a relação entre essas velocidades, são apresentados na tabela 8.

Tabela 8. Velocidades média (U), máxima ($u_{\text{máx}}$) e adimensionalizada para cada ensaio.

Ensaio	U (m s^{-1})	$u_{\text{máx}}$ (m s^{-1})	$U / u_{\text{máx}}$	Ensaio	U (m s^{-1})	$u_{\text{máx}}$ (m s^{-1})	$U / u_{\text{máx}}$
0,5Mq1*	0,14	0,16	0,85	0,5PQ3	0,26	0,31	0,84
0,5Mq2*	0,15	0,19	0,77	1,5Pq1	0,16	0,25	0,66
0,5Mq3	0,18	0,25	0,74	1,5Pq2	0,21	0,35	0,62
0,5MQ1*	0,20	0,28	0,72	1,5Pq3	0,25	0,39	0,65
0,5MQ2	0,20	0,23	0,86	1,5Pq4	0,25	0,32	0,77
0,5MQ3	0,19	0,23	0,80	1,5PQ1	0,23	0,29	0,77
0,5MQ4	0,13	0,16	0,79	1,5PQ2	0,25	0,35	0,71
1,5Mq1	0,10	0,14	0,75	1,5PQ3	0,30	0,41	0,73
1,5Mq2	0,22	0,29	0,74	0,5FQ1	0,16	0,19	0,83
1,5Mq3	0,28	0,41	0,69	0,5FQ2	0,20	0,23	0,85
1,5MQ1	0,21	0,27	0,78	0,5FQ3	0,25	0,29	0,84
1,5MQ2	0,26	0,34	0,77	1,5Fq1	0,15	0,22	0,70
1,5MQ3	0,36	0,48	0,75	1,5Fq2	0,24	0,34	0,71
0,5PQ1	0,13	0,15	0,86	1,5Fq3	0,29	0,39	0,74
0,5PQ2	0,20	0,23	0,86	1,5Fq4	0,28	0,36	0,78

*Experimentos realizados com o sedimento “melamina 2”.

As velocidades médias dos perfis de velocidades variaram entre 0,10 e 0,36 m s^{-1} , enquanto as velocidades máximas, entre 0,14 e 0,48 m s^{-1} , independente das características dos ensaios.

Com o intuito de se realizar a comparação da velocidade adimensionalizada com outros parâmetros, calculou-se, também a relação entre a velocidade média da corrente e sua velocidade máxima, que mostrou valores entre 0,62 e 0,86.

6.2.2 Massa específica e concentração da corrente.

Esse estudo analisou correntes de densidade salina compostas por três valores aproximados de massa específica inicial, (medida no tanque de preparação da mistura): 1015, 1025 e 1040 kg m⁻³, separando as correntes de densidade em subgrupos, aqui chamados, de baixa, média e alta concentração de sal. Em termos de concentração, esses valores equivalem a 26, 42 e 67 g L⁻¹, respectivamente.

Primeiramente, obteve-se os valores de massa específica da corrente de densidade, a partir da amostragem e análise das amostras obtidas ao longo do perfil vertical de cada ensaio, a 17,5 m da entrada da corrente de densidade.

A partir dos valores de massa específica, medidos ao longo do perfil vertical de amostragem, e da equação 16 (item 5.2), foram calculados as respectivas concentrações. A partir do perfil vertical de concentrações (Figura 29), foi possível realizar o cálculo concomitante das equações 3, 4 e 5, descritas no item 4.3, para a obtenção das concentrações médias da corrente de densidade (Tabela 9), no ponto de amostragem.

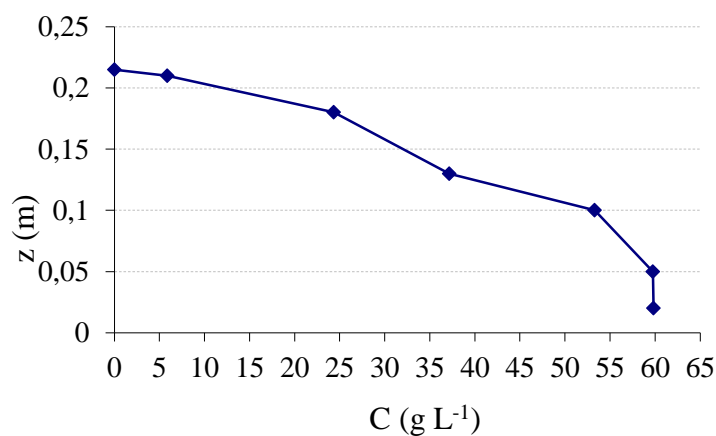


Figura 29. Perfil de concentrações do experimento 1,5MQ3
($Q= 519 \text{ L min}^{-1}$; $\rho_{\text{mis}}= 1043 \text{ kg m}^{-3}$).

Em geral, a espessura da corrente foi obtida pela análise desse perfil, pela elevação da amostragem na qual a concentração medida é igual a zero. No entanto, quando da ocorrência de correntes de densidade com altura maior que o ponto de amostragem mais superior (a 31,1 cm do leito), a espessura considerada, para fins de cálculo, foi aquela observada nas fotografias obtidas durante o ensaio.

Percebe-se que o perfil de concentrações apresentado na figura 29 é fortemente influenciado pela concentração inicial da mistura salina (C_{mis}), sempre apresentando maiores valores junto ao leito. Conforme se distancia do leito, o valor da concentração da corrente vai diminuindo até atingir a região da interface corrente de densidade e fluido ambiente (valores aproximadamente nulos).

A tabela 9 apresenta as concentrações tanto da mistura salina (ainda no tanque de preparação - C_{mis}) quanto da média vertical do perfil de concentrações (C_{CD}) amostrado a, aproximadamente, 17,5 m da injeção da corrente de densidade dentro do canal experimental.

Tabela 9. Concentrações médias da mistura (C_{mis}), da corrente de densidade (C_{CD}) e relação entre as mesmas.

Ensaio	C_{mis} (g L ⁻¹)	T_{mis} (°)	C_{CD} (g L ⁻¹)	T_{H2O} canal (°)	$C_{\text{CD}} /$ C_{mis} (%)	Ensaio	C_{mis} (g L ⁻¹)	T_{mis} (°)	C_{CD} (g L ⁻¹)	T_{H2O} canal (°)	$C_{\text{CD}} /$ C_{mis} (%)
0,5Mq1*	26,9	20,7	11,3	20,5	42,0	0,5PQ3	66,6	21,0	39,3	19,0	59,0
0,5Mq2*	43,3	26,0	17,6	24,0	40,7	1,5Pq1	26,1	26,0	7,3	24,0	27,9
0,5Mq3	68,2	20,0	40,7	20,0	59,7	1,5Pq2	43,6	17,2	16,4	17,0	37,7
0,5MQ1*	27,7	21,2	12,7	21,0	45,9	1,5Pq3	72,8	17,8	30,9	17,9	42,4
0,5MQ2	51,1	19,0	30,8	20,0	60,3	1,5Pq4	66,9	20,0	29,7	20,0	44,4
0,5MQ3	63,5	23,0	27,1	23,0	42,6	1,5PQ1	26,3	24,0	8,3	24,0	31,6
0,5MQ4	72,8	22,0	41,5	-	56,9	1,5PQ2	41,7	17,1	15,0	17,5	35,9
1,5Mq1	27,7	19,0	10,9	18,5	39,4	1,5PQ3	68,2	17,4	35,1	17,2	51,5
1,5Mq2	39,4	17,5	18,0	17,8	45,7	0,5FQ1	26,9	25,0	10,2	23,5	37,9
1,5Mq3	65,8	18,3	32,7	17,7	49,7	0,5FQ2	41,7	18,0	16,2	18,0	38,9
1,5MQ1	27,7	16,9	11,1	16,8	39,9	0,5FQ3	66,6	18,3	41,5	18,5	62,3
1,5MQ2	41,7	17,0	20,8	18,0	49,9	1,5Fq1	26,9	17,0	9,0	17,5	33,3
1,5MQ3	69,7	17,0	45,8	18,0	65,6	1,5Fq2	42,5	18,1	16,3	18,2	38,5
0,5PQ1	18,4	21,2	6,4	19,8	34,8	1,5Fq3	66,1	18,5	30,6	18,6	46,3
0,5PQ2	40,2	20,0	25,3	20,5	63,1	1,5Fq4	66,0	18,8	27,9	18,9	42,2

*Experimentos realizados com o sedimento “melamina 2”.

Nos valores descritos nas tabelas 9, pode-se perceber a atenuação da concentração medida no ponto de amostragem, dentro do canal, em relação àquela do reservatório de mistura. Isso se deve à dissolução da mistura promovida pela interação entre a corrente de densidade e a água ambiente (carreamento de fluido ambiente ao interior da corrente), variando de 27,9% (1,5Pq1) a 65,6% (1,5MQ3). Note a ocorrência de altas dissoluções em experimentos de alta vazão (0,5MQ2, 1,5MQ3 e 0,5FQ3, por exemplo), e baixas dissoluções para experimentos de baixa vazão (0,5Pq2, 1,5Mq1, 1,5Fq1), evidenciando o

papel da vazão e energia da corrente na promoção da turbulência e mistura na camada superior da corrente de densidade.

Também foram apresentadas, na tabela 9, as temperaturas da mistura ($16,9 < T_{\text{mis}} \text{ (}^\circ\text{C)} < 26,0$) e da água utilizada no enchimento do tanque experimental ($16,8 < T_{\text{H}_2\text{O}_{\text{canal}}} \text{ (}^\circ\text{C)} < 24,0$). Autores apontam a diferença da temperatura entre dois fluidos como motivadora das variações densidade entre correntes de densidade e fluido ambiente (Simpson & Britter, 1979; Middleton, 1993). No entanto, esse estudo não levou em consideração as diferenças de temperatura entre a mistura e a água ambiente, utilizada no preenchimento do canal longo.

Por fim, a partir das concentrações apresentadas na tabela 9 e da equação 16 (item 5.2), foram calculadas as massas específicas da mistura e média da corrente (Tabela 10).

Tabela 10. Massas específicas médias da mistura (ρ_{mis}), da corrente de densidade (ρ_{CD}) e relação entre as mesmas.

Ensaio	ρ_{mist} (kg m^{-3})	ρ_{CD} (kg m^{-3})	Ensaio	ρ_{mist} (kg m^{-3})	ρ_{CD} (kg m^{-3})
0,5Mq1*	1015,5	1005,5	0,5PQ3	1041,0	1023,5
0,5Mq2*	1026,0	1009,5	1,5Pq1	1015,0	1002,9
0,5Mq3	1042,0	1024,3	1,5Pq2	1026,2	1008,8
0,5MQ1*	1016,0	1006,4	1,5Pq3	1045,0	1018,1
0,5MQ2	1031,0	1018,0	1,5Pq4	1041,2	1017,3
0,5MQ3	1039,0	1015,6	1,5PQ1	1015,1	1003,5
0,5MQ4	1045,0	1024,9	1,5PQ2	1025,0	1007,8
1,5Mq1	1016,0	1005,2	1,5PQ3	1042,0	1020,8
1,5Mq2	1023,5	1009,8	0,5FQ1	1015,5	1004,8
1,5Mq3	1040,5	1019,2	0,5FQ2	1025,0	1008,6
1,5MQ1	1016,0	1005,3	0,5FQ3	1041,0	1024,9
1,5MQ2	1025,0	1011,6	1,5Fq1	1015,5	1004,0
1,5MQ3	1043,0	1027,6	1,5Fq2	1025,5	1008,7
0,5PQ1	1010,0	1002,3	1,5Fq3	1040,7	1017,9
0,5PQ2	1024,0	1014,5	1,5Fq4	1040,6	1016,1

*Experimentos realizados com o sedimento “melamina 2”.

6.2.3 Espessura da Corrente

A resolução simultânea das equações 3, 4 e 5 (item 4.3), de Ellison e Turner (1959), foram utilizadas como ferramenta de cálculo para a velocidade (U) e concentração (C_{CD}) médias da corrente, para cada ensaio, assim como para a sua espessura média (H).

Além do referido método de cálculo, a aproximação da medida de espessura da corrente de densidade também pode ser verificada por meio da análise das imagens registradas durante os ensaios. Para cada ensaio foram separadas quatro imagens (obtidas na janela de observação, lateralmente ao canal), distribuídas ao longo do mesmo, das quais a espessura da corrente foi medida e sua média obtida (h_{obs}). Os valores de espessura média (H), calculados pelas equações de Ellison e Turner (1959), e as espessuras médias, visualizadas nas imagens, são apresentados na tabela 11.

Tabela 11. Espessuras médias das correntes de densidade calculadas (H) e observadas (h_{obs}), variação entre essas espessuras e alturas da velocidade máxima da corrente (z_{vm}).

Ensaio	H (m)	h_{obs} (m)	Δh	z_{vm} (m)	Ensaio	H (m)	h_{obs} (m)	Δh	z_{vm} (m)
0,5Mq1*	0,26	0,24	0,03	0,14	0,5PQ3	0,24	0,19	0,06	0,08
0,5Mq2*	0,23	0,22	0,01	0,18	1,5Pq1	0,20	0,16	0,04	0,11
0,5Mq3	0,23	0,17	0,06	0,14	1,5Pq2	0,17	0,13	0,04	0,08
0,5MQ1*	0,20	0,29	0,09	0,08	1,5Pq3	0,14	0,13	0,01	0,08
0,5MQ2	0,25	0,21	0,04	0,18	1,5Pq4	0,16	0,13	0,03	0,08
0,5MQ3	0,25	-	-	0,14	1,5PQ1	0,20	0,23	0,03	0,08
0,5MQ4	0,25	0,21	0,04	0,14	1,5PQ2	0,23	0,19	0,03	0,11
1,5Mq1	0,24	0,18	0,05	0,11	1,5PQ3	0,17	0,15	0,01	0,08
1,5Mq2	0,20	0,16	0,04	0,11	0,5FQ1	0,27	0,30	0,04	0,18
1,5Mq3	0,19	0,16	0,03	0,08	0,5FQ2	0,25	0,27	0,02	0,18
1,5MQ1	0,25	0,21	0,04	0,14	0,5FQ3	0,25	0,27	0,02	0,11
1,5MQ2	0,23	0,18	0,05	0,14	1,5Fq1	0,24	0,15	0,08	0,08
1,5MQ3	0,19	0,13	0,06	0,08	1,5Fq2	0,17	0,14	0,03	0,08
0,5PQ1	0,29	0,30	0,01	0,18	1,5Fq3	0,16	0,11	0,05	0,08
0,5PQ2	0,29	0,25	0,04	0,11	1,5Fq4	0,16	0,12	0,04	0,05

*Experimentos realizados com o sedimento “melamina 2”.

Os ensaios tiveram correntes de espessura média calculada variando entre 0,14 e 0,29 m e, espessuras médias observadas entre 0,11 e 0,30 m. A fim de verificar a similaridade entre os valores de espessura calculados e observados, gerou-se uma correlação linear entre os mesmos, apresentada na figura 30.

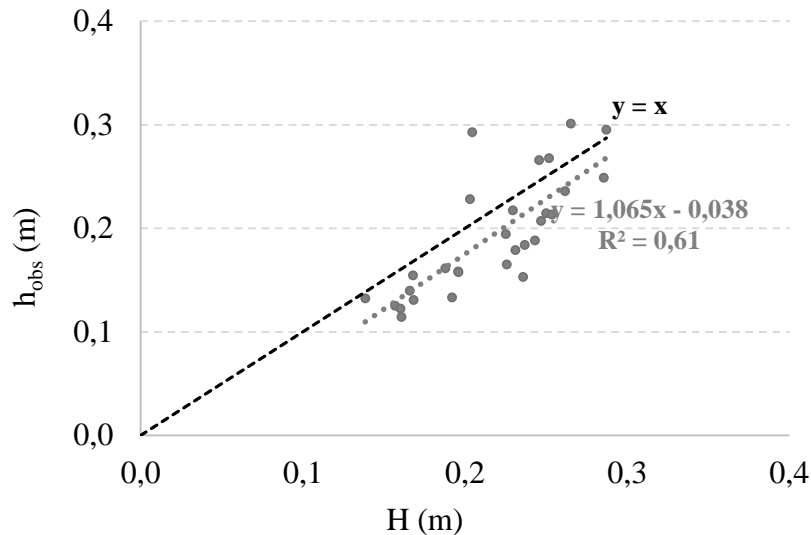


Figura 30. Correlação entre valores calculados e observados de espessura da corrente de densidade.

Esta mostrou que, em geral, os valores de espessura calculados são superiores àqueles observados nos registros fotográficos, excetuando-se seis ensaios: 0,5FQ3 ($Q= 508 \text{ L min}^{-1}$, $\rho_{\text{mis}}= 1041 \text{ kg m}^{-3}$), 0,5FQ2 ($Q= 504 \text{ L min}^{-1}$, $\rho_{\text{mis}}= 1025 \text{ kg m}^{-3}$), 0,5FQ1 ($Q= 509 \text{ L min}^{-1}$, $\rho_{\text{mis}}= 1016 \text{ kg m}^{-3}$), 0,5PQ1 ($Q= 504 \text{ L min}^{-1}$, $\rho_{\text{mis}}= 1010 \text{ kg m}^{-3}$), 0,5MQ1 ($Q= 506 \text{ L min}^{-1}$, $\rho_{\text{mis}}= 1016 \text{ kg m}^{-3}$) e 1,5PQ1 ($Q = 510 \text{ L min}^{-1}$, $\rho_{\text{mis}} = 1015 \text{ kg m}^{-3}$). Destaca-se que, todos os experimentos referidos foram realizados com altas vazões, indicando sua influência na superestimava em relação aos valores de espessura calculados, devido à maior mistura verificada visualmente na camada superior da corrente.

Sugere-se que a diferença dos valores calculados e observados pode ser explicada por: (a) equação utilizada no cálculo da espessura é uma média de um somatório que relaciona velocidades e alturas em um perfil vertical e pode conter erros; (b) imprecisão na visualização e definição da camada de mistura pelas imagens, devido aos vórtices ali presentes; (c) dificuldades no registro das imagens, como alinhamento da lente da câmera com o leito, posicionamento da escala (colada na parede do canal de acrílico para a maior parte dos ensaios, mas na janela, nos primeiros ensaios) e; (d) paralaxe.

Para fins de cálculo, optou-se por utilizar os valores de espessura da corrente calculados (equações 3, 4 e 5).

6.3 OUTROS PARÂMETROS DA CORRENTE DE DENSIDADE E DO LEITO

A tabela 12 apresenta um resumo de diversos parâmetros hidráulicos calculados com os dados obtidos nos experimentos e a partir das análises descritas anteriormente, por meio das equações 2, 6, 9, 10, 11 e 12 do item 4.3 desse trabalho.

Tabela 12. Alguns parâmetros referentes ao escoamento e aos grãos.

Ensaio	Fr_d (-)	u* (m s⁻¹)	τ (N m⁻²)	τ* (-)	Re (-)	Re* (-)
0,5Mq1*	1,02	0,014	0,21	0,14	32615	4,0
0,5Mq2*	0,92	0,021	0,44	0,29	30271	5,8
0,5Mq3	0,79	0,026	0,69	0,61	36962	5,7
0,5MQ1*	1,55	0,041	1,70	1,13	36170	11,4
0,5MQ2	0,91	0,016	0,25	0,22	44849	3,5
0,5MQ3	0,91	0,021	0,43	0,37	40606	4,5
0,5MQ4	0,51	0,018	0,32	0,28	28725	3,9
1,5Mq1	0,81	0,013	0,18	0,15	21903	2,9
1,5Mq2	1,45	0,033	1,08	0,92	37828	7,1
1,5Mq3	1,35	0,053	2,90	2,51	47159	11,7
1,5MQ1	1,59	0,022	0,49	0,42	47792	4,9
1,5MQ2	1,50	0,038	1,50	1,27	53901	8,4
1,5MQ3	1,53	0,040	1,62	1,43	61882	8,7
0,5PQ1	1,20	0,018	0,32	0,10	32978	3,3
0,5PQ2	0,93	0,025	0,64	0,19	50567	4,6
0,5PQ3	1,04	0,040	1,60	0,49	55431	7,3
1,5Pq1	1,71	0,016	0,26	0,08	28481	3,0
1,5Pq2	1,62	0,032	1,06	0,32	32266	6,0
1,5Pq3	1,54	0,025	0,66	0,20	31251	4,7
1,5Pq4	1,44	0,027	0,73	0,22	34682	4,9
1,5PQ1	2,18	0,041	1,66	0,50	41027	7,5
1,5PQ2	1,70	0,028	0,78	0,23	49925	5,1
1,5PQ3	1,56	0,038	1,46	0,44	45267	7,0
0,5FQ1	1,22	0,041	1,69	0,22	37754	17,6
0,5FQ2	1,23	0,027	0,71	0,09	44444	11,4
0,5FQ3	0,97	0,027	0,74	0,10	53801	11,5
1,5Fq1	1,32	0,030	0,88	0,11	32130	12,7
1,5Fq2	1,84	0,057	3,25	0,42	35692	24,3
1,5Fq3	1,66	0,046	2,18	0,28	41932	19,9
1,5Fq4	1,64	0,050	2,55	0,33	39316	21,5
Máx	2,18	0,06	3,25	2,51	61882	24,3
Mín	0,51	0,01	0,18	0,08	21903	2,9
Desvio	0,37	0,01	0,81	0,51	9241	5,6

*Experimentos realizados com o sedimento “melamina 2”.

Como pode ser observado na tabela 12, os valores de número de Reynolds da corrente de densidade estão entre, aproximadamente, 22000 e 62000, demonstrando que as forças turbulentas são preponderantes perante as forças viscosas. Esse resultado é importante, pois garante uma similaridade hidráulica entre modelo e protótipo, no caso de possível extrapolação de dados.

Já os valores de velocidade de cisalhamento variaram entre $0,013$ e $0,057 \text{ ms}^{-1}$ e, os de tensão de cisalhamento, entre $0,2$ e $3,3 \text{ N m}^{-2}$. Esses últimos foram utilizados no cálculo da tensão de cisalhamento adimensional, que variou entre $0,08$ e $2,51$.

Os valores de Reynolds da partícula variaram entre 3 e $7,5$ para areia da praia, entre $2,9$ e $11,7$ para melamina e entre $11,4$ e $24,3$ para areia fluvial.

O número de Froude densimétrico contemplou uma considerável faixa de valores (entre $0,5$ e $2,2$), com a ocorrência de 8 experimentos com escoamento no regime subcrítico e 21 no regime supercrítico. A figura 31a mostra esses valores, em relação ao diâmetro médio dos grãos presentes em cada leito utilizado.

Uma vez que a melamina apresenta menor densidade em relação à areia, mostrou-se interessante a adimensionalização do diâmetro médio dos grãos utilizados nesse estudo (areia da praia, melamina e areia fluvial), a fim de poder comparar a ocorrência das formas de fundo em todos os tipos de leito testados, conforme a variação dos valores de Fr_d (Figura 31b).

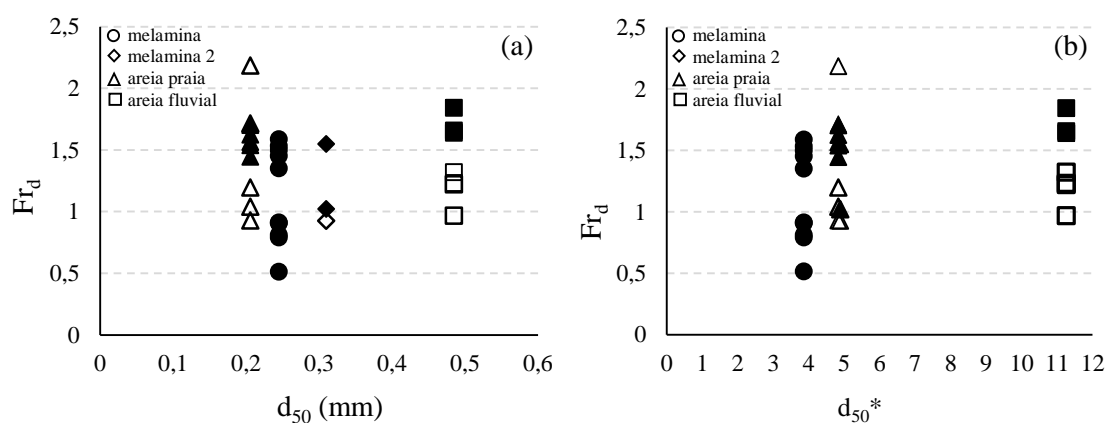


Figura 31. Relação entre o número de Froude densimétrico (Fr_d) com o diâmetro médio dos grãos (d_{50}) e com o diâmetro médio dos grãos adimensionalizado (d_{50}^*).

○ Símbolo vazado: leito plano inferior ● Símbolo preenchido: leito não plano

6.4 FORMAS DE LEITO

A análise da formação e geometria das formas de leito foi feita para todos os ensaios, de duas maneiras, em momentos distintos: (a) por meio da análise de fotografias obtidas durante o ensaio, do lado de fora da janela de observação e, (b) por meio de fotografias de topo obtidas perpendicularmente ao leito ao longo de todo o canal, após o término do ensaio e do lento esvaziamento do tanque longo.

As imagens de topo foram realizadas com o auxílio de um suporte acoplável no canal de acrílico, no qual a máquina fotográfica era fixada. Essa configuração garantiu a produção de imagens sempre a uma mesma distância do leito ao longo de todo o canal.

Além disso, tomou-se o cuidado de manter, em cada fotografia obtida, em torno de 20 % da imagem final da fotografia anterior. Isso auxiliou na obtenção de um ordenamento de imagens com baixa distorção lateral, uma vez que as mesmas foram recortadas. As imagens foram editadas e montadas em sequência com auxílio do programa CorelDraw®, a partir da região de entrada da corrente de densidade até o final do canal de acrílico, resultando na composição da figura 32.

A análise dessas imagens possibilitou a medição dos comprimentos de onda das formas de leito geradas após cada ensaio, ao longo de todo o canal. No cálculo do comprimento de onda médio (λ) foram considerados os comprimentos de onda das formas gerados entre 5 e 12,5 m da entrada do canal, com o intuito de evitar influências da entrada da corrente de densidade no leito móvel e, também, a influência dos instrumentos de medição (UVP e sifões), posicionados a partir dos 14 m da entrada da corrente.

O comportamento da geometria das formas de fundo ao longo do canal também pode ser avaliado por meio da consulta a essas imagens. A figura 32 mostra um exemplo de resultado, indicando tanto ondulações retilíneas (com suas cristas aproximadamente perpendiculares às paredes do canal), quanto sinuosas (região central da crista mais adiantada em relação às suas laterais). A análise geral das cristas obtidas é apresentada no item 7.2.3 desse trabalho e, o restante das visualizações e montagens de topo são apresentadas no Anexo A desse estudo.

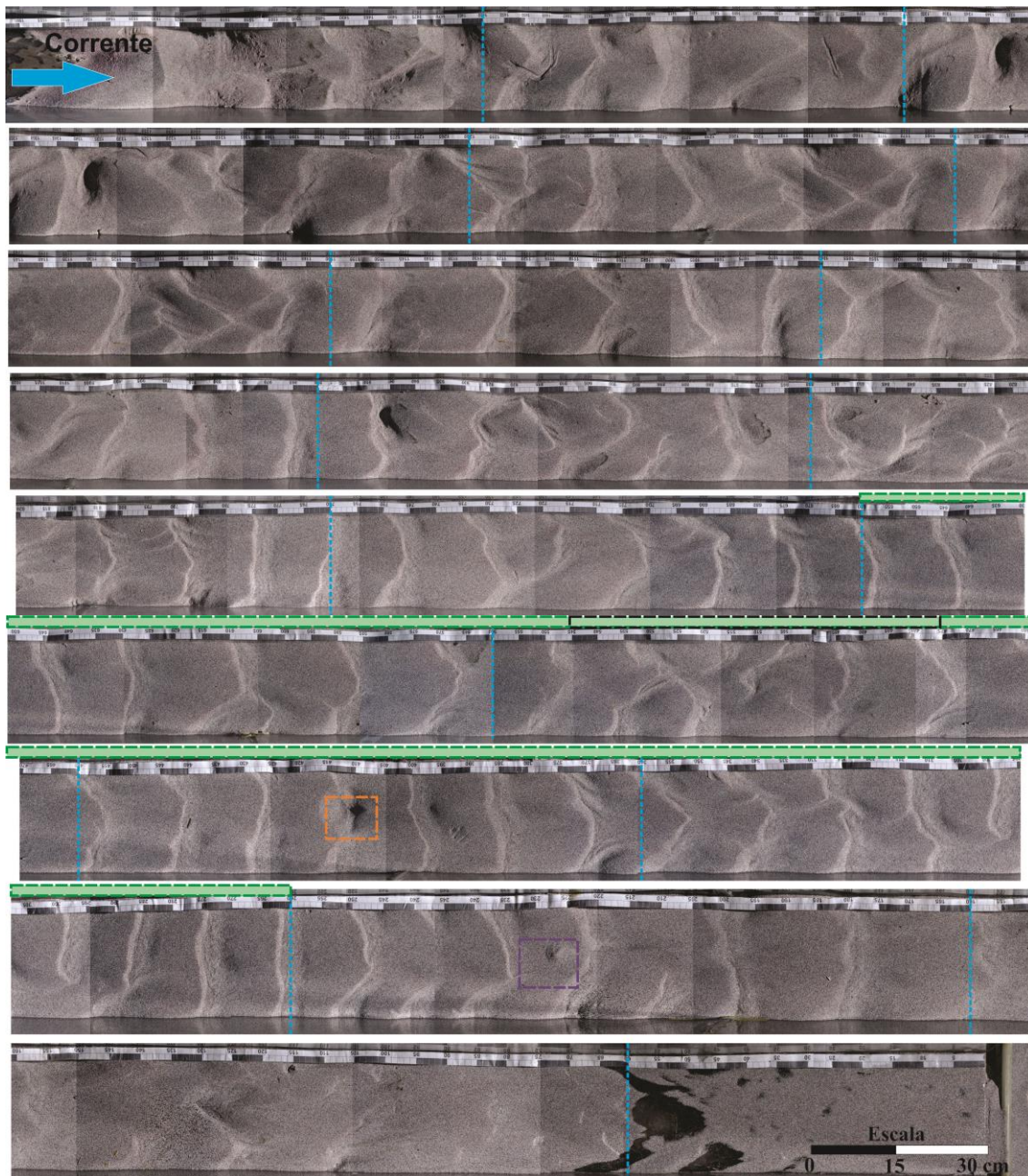


Figura 32. Montagem das fotografias de topo, referentes ao 1,5Mq3 ($Q= 383 \text{ L min}^{-1}$, $\rho_{\text{mis}}= 1041 \text{ kg}$) e configuração desse ensaio com localização dos equipamentos.

- | | | | | | |
|-----|---------------------------------|---|----------------------|---|-----------------|
| --- | marcação de cada metro do canal | □ | sonda UVP | □ | sonda de sifões |
| --- | janela de observação | □ | fotografias laterais | | |

A verificação da altura das formas de fundo (η) foi realizada mediante as imagens sequenciais obtidas no lado de fora do canal (Figura 33), perpendicularmente à janela de observação, a 12,5 m da entrada da corrente de densidade (antes dos instrumentos de medição – UVP e sifões).

A figura 33 apresenta a montagem de algumas imagens retiradas durante o ensaio 1,5Mq3, indicando o comportamento geral das interações entre a corrente e o leito, isso

é, da geometria da região da corrente de densidade (cabeça, corpo, cauda, vórtices, etc.), da movimentação dos grãos presentes no leito móvel e também da formação e evolução das formas de leito, desde o momento anterior à passagem da corrente ($t=0$, condição de leito plano), até a passagem completa da mesma ($t > 11$ min).

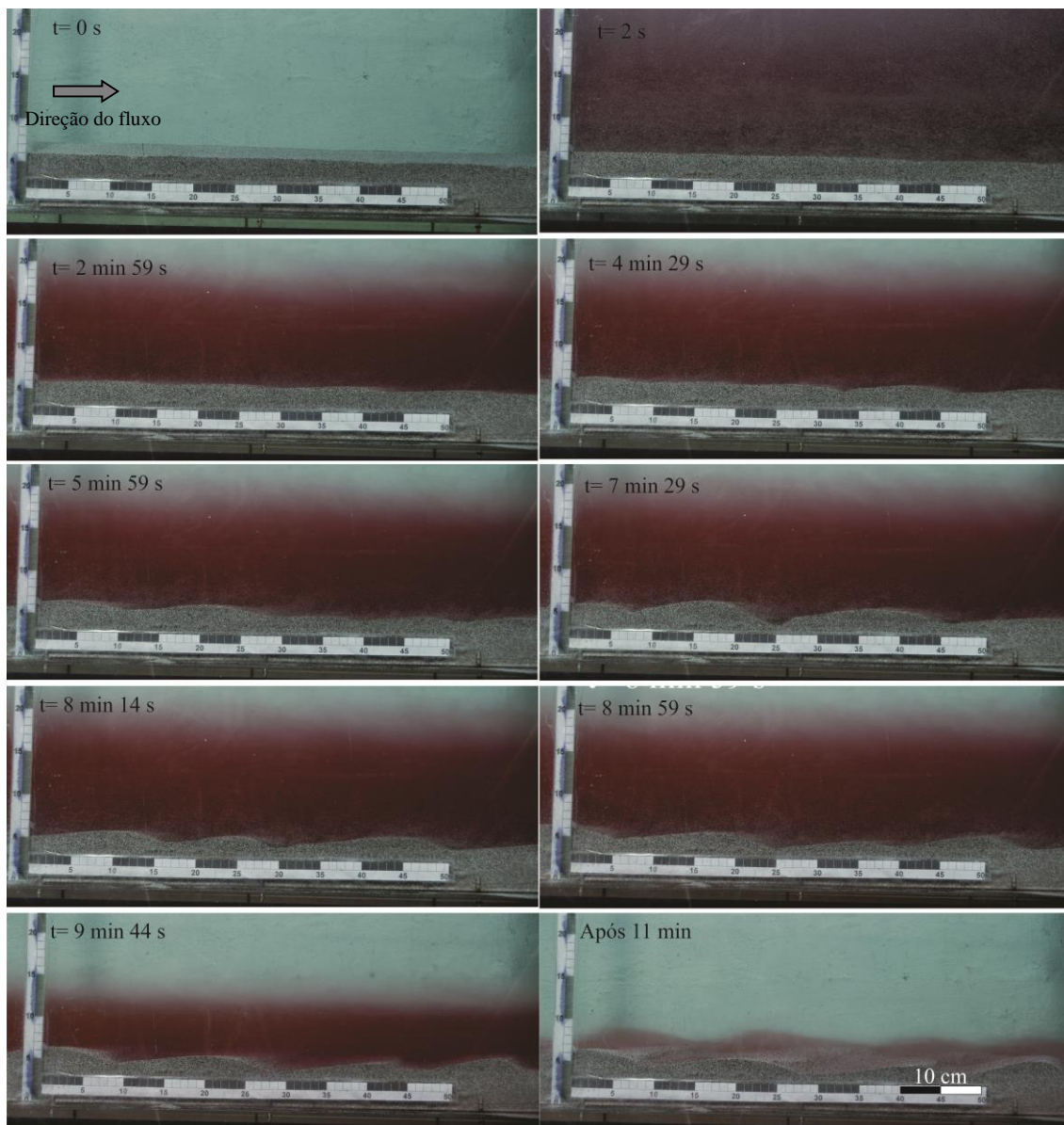


Figura 33. Evolução de geração das formas de leito do ensaio 1,5Mq3 ($Q= 383 \text{ L min}^{-1}$, $\rho_{\text{mis}}= 1041 \text{ kg m}^{-3}$).

Sendo assim, a medição do valor de η foi realizada na geometria final do leito móvel, registrada na última fotografia retirada em cada ensaio, após transcorridos alguns minutos da passagem da corrente de densidade, como exemplificado na figura 34.

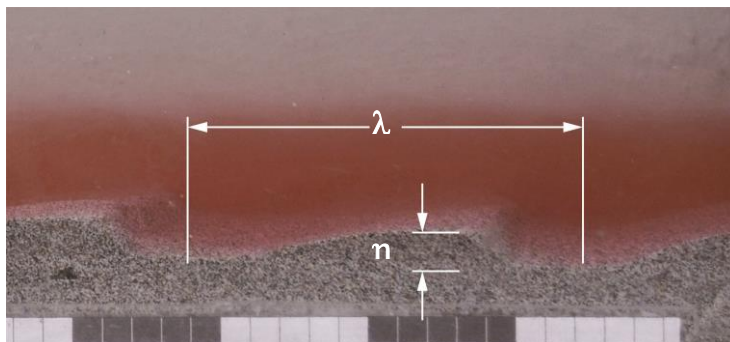


Figura 34. Identificação das dimensões medidas nas formas de leito.

O resultado da análise das dimensões das formas de fundo é apresentado na tabela 13, que mostra a variação da altura das formas entre $<0,5$ e $1,50$ cm e do comprimento de onda entre $5,3$ e $17,5$ cm.

Tabela 13. Dimensões médias das formas de fundo obtidas experimentalmente.

Ensaio	Q ($m^3 min^{-1}$)	ρ_{mis} ($kg m^{-3}$)	λ (cm)	η (cm)	Ensaio	Q ($m^3 min^{-1}$)	ρ_{mis} ($kg m^{-3}$)	λ (cm)	η (cm)
0,5Mq1*	380	1016	NO	NO	0,5PQ3	506	1041	NO	NO
0,5Mq2*	384	1026	NO	NO	1,5Pq1	364	1015	NO	NO
0,5Mq3	383	1042	9,4	0,73	1,5Pq2	364	1026	6,0	$<0,5$
0,5MQ1*	506	1016	8,9	$<0,5$	1,5Pq3	383	1045	5,9	$<0,5$
0,5MQ2	517	1031	8,9	$<0,5$	1,5Pq4	326	1041	5,6	0,7
0,5MQ3	479	1039	NR	NR	1,5PQ1	509	1015	NO	NO
0,5MQ4	474	1045	8,1	$<0,5$	1,5PQ2	516	1025	6,5	$<0,5$
1,5Mq1	382	1016	9,5	1,02	1,5PQ3	461	1042	5,4	0,5
1,5Mq2	383	1024	11,0	1,02	0,5FQ1	508	1016	NO	NO
1,5Mq3	383	1041	17,5	1,42	0,5FQ2	504	1025	NO	NO
1,5MQ1	517	1016	9,3	0,62	0,5FQ3	508	1041	NO	NO
1,5MQ2	520	1025	13,0	1,50	1,5Fq1	381	1016	NO	NO
1,5MQ3	519	1043	8,2	1,50	1,5Fq2	380	1026	NO	NO
0,5PqQ1	504	1010	5,3	NO	1,5Fq3	379	1041	8,5	$<0,5$
0,5PQ2	503	1024	NO	NO	1,5Fq4	377	1041	9,6	$<0,5$

NR: não registrado por fotografia

NO: não ocorreu

Quando da composição do leito por areia da praia, nota-se que as formas geradas apresentaram baixos comprimentos e altura de onda, variando em $5,3 < \lambda < 6,5$ cm e $<0,5 < \eta < 0,70$ cm, respectivamente. Em relação à ocorrência das formas, dos 10 ensaios realizados com a areia da praia, 5 apresentaram formas de leito (leito não plano).

Os leitos móveis compostos por areia fluvial permaneceram planos em cinco ensaios, dos seis realizados. No ensaio 1,5Fq3, o leito apresentou algumas regiões, ao longo do canal, com ondulações de $\lambda = 8,5$ cm e cujas alturas não foram possíveis de serem medidas com precisão abaixo dos 5 cm, devido à definição da fotografia.

As formas que apresentaram os maiores comprimento e altura foram aquelas geradas em leitos compostos por melamina, variando entre $8,2 < \lambda < 17,5$ cm e $0,6 < \eta < 1,5$ cm, respectivamente. Além disso, essa composição de leito apresentou a maior frequência de formas geradas sendo que, de 13 ensaios, em apenas 2 (0,5Mq1* e 0,5Mq2*) não se desenvolveram formas. Note que esses dois experimentos foram realizados com uma a “melamina 2” (d_{50} : 310 μm) de maior diâmetro médio dos grãos em relação ao leito melamina (d_{50} : 245 μm). Uma vez que foram observadas formas de fundo em leitos de melamina, nessas mesmas condições de inclinação do canal e vazão da corrente, sugere-se que os grãos da “melamina 2” são mais difíceis de serem movimentados, devido ao seu maior tamanho médio.

No item 7.2 será apresentada a análise da influência das propriedades dos grãos presentes no leito, como o diâmetro médio dos grãos e sua massa específica, na definição da geometria das formas de leito.

7. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esse capítulo tem a intenção de explorar os resultados gerados nos experimentos desse estudo, procurando descrever a influência da variação de determinados parâmetros das correntes de densidade sob diferentes composições de leito móvel.

Por fim, procurará comparar os resultados com estudos realizados em ambientes fluviais, por meio de diagramas de previsão de início de movimento dos grãos e formas de leito e modelos de previsão de dimensões de formas.

7.1 CARACTERIZAÇÃO DA CORRENTE DE DENSIDADE

A geração das formas de leito está diretamente relacionada com as características da corrente de densidade, que acabam por alterar o regime de escoamento e as tensões aplicadas sobre o leito móvel. Logo, a análise da distribuição vertical das suas velocidades e concentrações, assim como da sua espessura são importantes no processo de entendimento da modificação dos leitos móveis.

7.1.1 Perfis de Velocidade

A seguir, são apresentados os perfis de velocidade de todos os ensaios realizados (Figura 35), separados por composição do leito (melamina, areia fluvial e areia da praia) e por inclinação do canal de acrílico (0,5 e 1,5°).

Todos os perfis seguem uma tendência clássica de perfis de velocidade de correntes de densidade, já documentada por outros autores (Fabian, 2002; Sequeiros et al., 2012; Puhl, 2012). Os valores de velocidade são reduzidos junto ao fundo devido à interação entre o escoamento e o leito móvel e vão aumentando até um ponto máximo (gradiente positivo de velocidades), definindo a região inferior (*inner region*) do perfil, dita similar a uma camada limite turbulenta. Acima do máximo valor de velocidade, as mesmas seguem diminuindo até atingirem a região de mistura da corrente (camada externa ou de cisalhamento) (Stacey & Brown, 1988), onde há maior incorporação da água ambiente presente no tanque e conseqüente diminuição da sua concentração da corrente de densidade.

De um modo geral, a mudança na inclinação do canal experimental altera o formato dos perfis de velocidade, para os três tipos de leito. Para maiores inclinações, os valores de velocidade máxima se elevam e a sua aproximação do leito aumenta (ponto de velocidade máxima mais próximo do leito). Isso acaba por refletir na diminuição da espessura da corrente de densidade (considerando a vazão de injeção da corrente como

aproximadamente constante). Esses resultados corroboram com Fabian (2000), o qual indicou o aumento da espessura da cabeça da corrente acompanhado da diminuição da espessura do corpo, devido ao aumento da inclinação do canal.

Percebe-se que, com exceção do primeiro grupo (melamina, I: 0,5°), as maiores velocidades máximas das correntes de densidade ocorrem para as maiores concentrações, refletindo também na diminuição da altura da corrente de densidade.

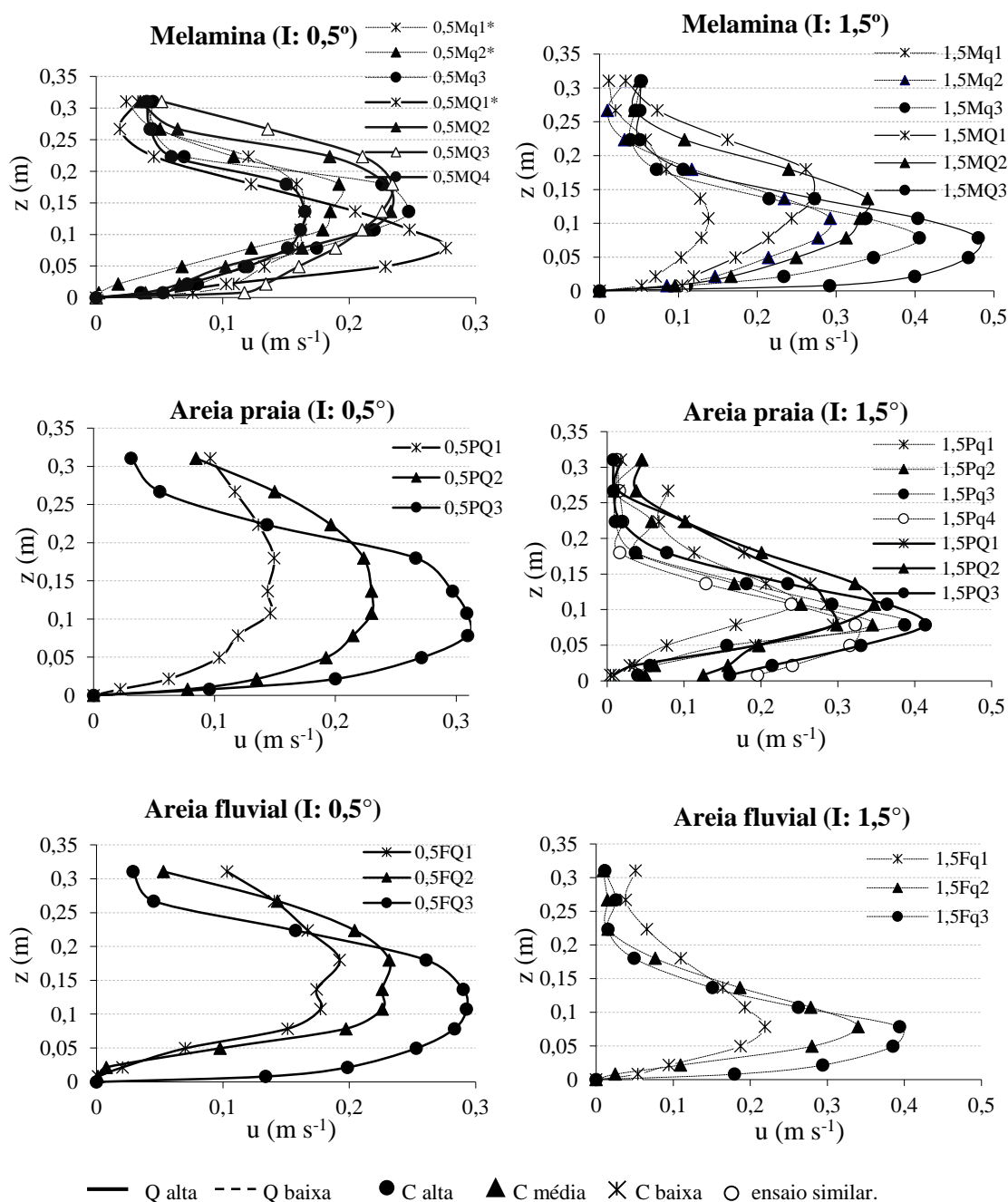


Figura 35. Perfis de velocidade separados por tipo de leito e inclinação do canal.

Os valores já determinados de velocidade máxima ($u_{\text{máx}}$) e de espessura média (H) da corrente foram utilizados para normalizar os perfis de velocidade, em relação à espessura (z/H) e à velocidade ($u/u_{\text{máx}}$). A adimensionalização dos perfis característicos auxilia na investigação da evolução do escoamento pela análise de possíveis alterações internas na corrente.

Os dados foram plotados nos gráficos da figura 36, que estão agrupados por composição de leito e inclinação do canal.

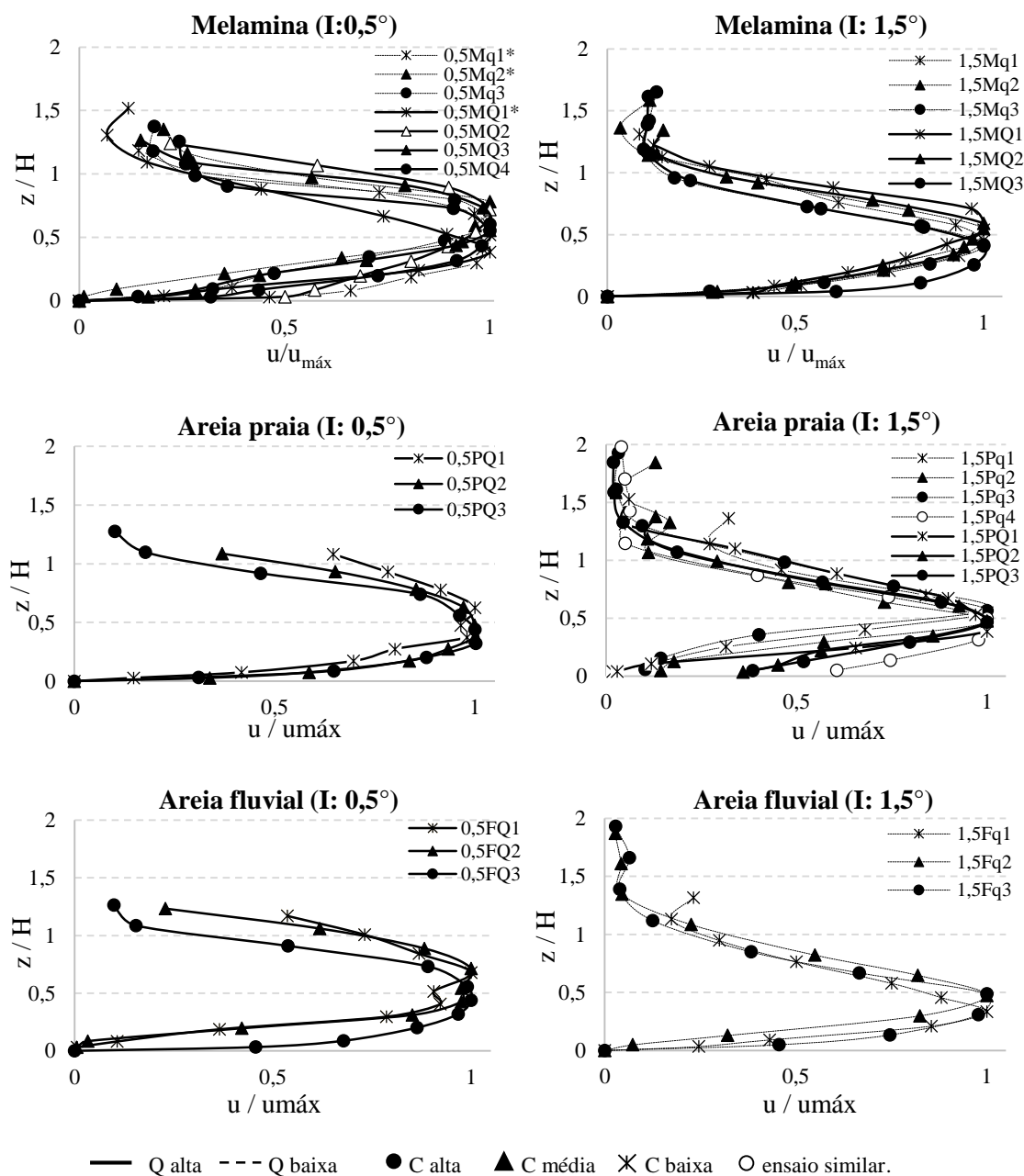


Figura 36. Perfis de velocidade adimensionalizados em relação à espessura média (H) da corrente e à velocidade máxima ($u_{\text{máx}}$) do perfil de velocidades.

Os perfis não adimensionalizados mostram tênues variações das espessuras relativas das correntes com as mudanças dos parâmetros (I , Q , ρ_{mis} e tipo de leito), demonstrando a tendência da diminuição das variações temporais do perfil, também relatada por Puhl (2012).

Percebe-se também que, tanto para as altas, quanto para as baixas vazões, o aumento da vazão de injeção da corrente influencia diretamente o aumento das velocidades médias da corrente, assim como promove o alargamento da espessura da corrente. A homogeneidade dos valores verticais de velocidade também se mostra influenciada pela mudança da inclinação do canal.

Com o intuito de melhor explorar os resultados apresentado acima, os perfis de velocidade adimensionalizados pelas médias de sua espessura e velocidade foram reunidos todos em um só gráfico (Figura 37). Os perfis cujos pontos estão preenchidos se referem aos ensaios que geraram formas de leito (ondulações ou dunas). A cor preta e rosa se referem aos ensaios com inclinação de $0,5^\circ$ e $1,5^\circ$, respectivamente.

O gráfico mostra uma maior concentração de pontos da cor rosa na região esquerda e superior do gráfico, indicando que os ensaios de $I: 1,5^\circ$ possuem menores valores de espessura média da corrente (e maiores valores de z/H).

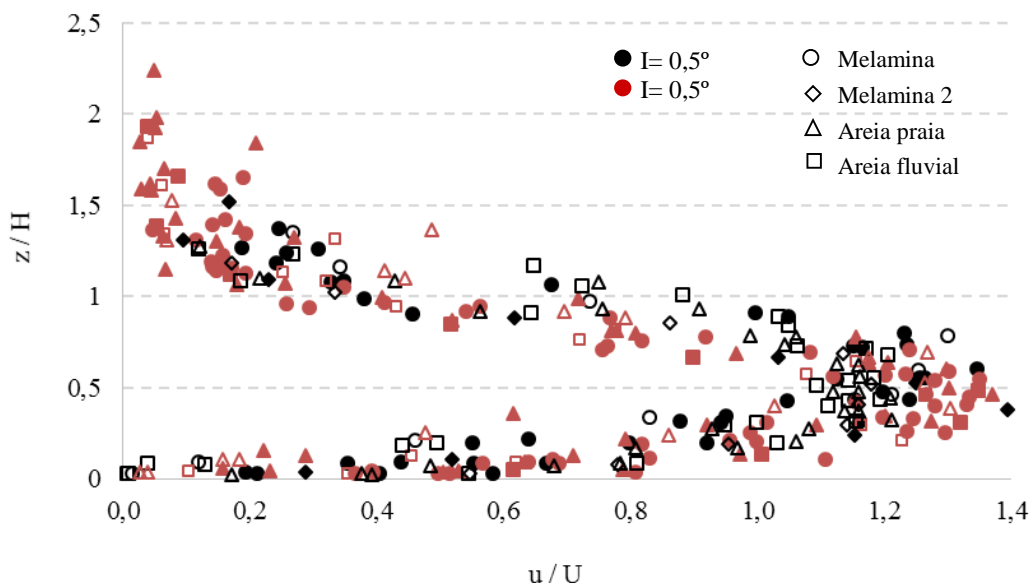


Figura 37. Perfis de velocidades adimensionalizados pela altura e velocidade médias para todos os experimentos realizados.

- \circ Símbolo vazado: leito plano
- \bullet Símbolo preenchido: leito não plano

Também se percebe uma maior concentração de pontos cor de rosa na região direita do gráfico, indicando maiores valores médios de velocidade máxima (adimensionalizados em relação à velocidade média, U) para os ensaios de maior inclinação ($I: 1,5^\circ$). Além disso, nota-se que a maior parte desses pontos preenchidos, ligando a geração de formas de fundo com correntes que possuem maiores velocidades máximas.

Percebe-se uma maior incidência de pontos preenchidos na cor rosa, em relação aos pretos, o que sugere maior ocorrência de geração das formas de fundo para os ensaios com maior inclinação. Dos dezesseis ensaios com $I: 1,5^\circ$, doze (75%) desenvolveram formas de fundo e, para os treze ensaios com $I: 0,5^\circ$, seis (46 %) desenvolveram formas de fundo.

Por fim, a análise da região do perfil localizada abaixo das velocidades máximas mostra que os pontos preenchidos em cor de rosa tendem a estar localizados mais próximo ao leito móvel, influenciando também a diminuição da espessura da corrente. Isso é, os ensaios com maiores inclinações ($I: 1,5^\circ$), já destacados com potenciais influenciadores da geração de formas de leito, possuem maiores velocidades máximas mais elevadas e mais próximas ao leito, como pode ser observado mais claramente na figura 38. Velocidades mais próximas ao leito móvel implicam em maiores interações entre o escoamento e os sedimentos presentes no leito. Em outras palavras, altas velocidades e tensões de cisalhamento junto ao fundo tendem a provocar deformações no leito, que podem evoluir para formas de leito sendo que, uma vez geradas, as formas respondem ao escoamento com sua resistência.

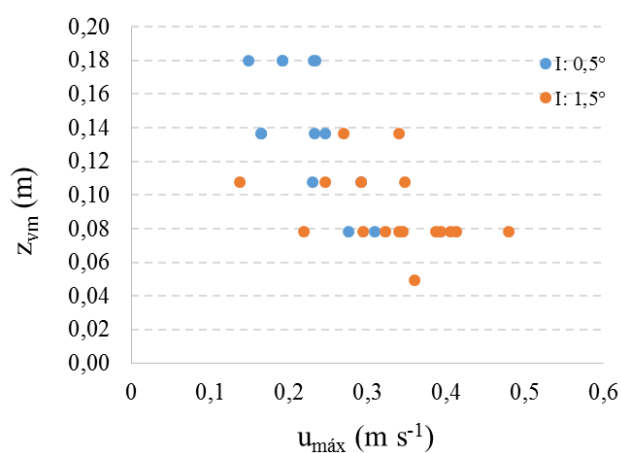


Figura 38. Elevação (z_{vm}) da velocidade máxima ($u_{m\acute{a}x}$) dos perfis de velocidade, em função da inclinação (I).

7.1.2 Perfis de Concentração

Os perfis da variação vertical da concentração da corrente de densidade, medidos no ponto de amostragem, situado a 15,5 m da entrada da corrente de densidade no canal, são apresentados na Figura 39. Os perfis medidos apresentam comportamento similar aos perfis típicos de concentração para correntes de densidade, conforme Fabian (2002), Puhl (2012) e Sequeiros (2012).

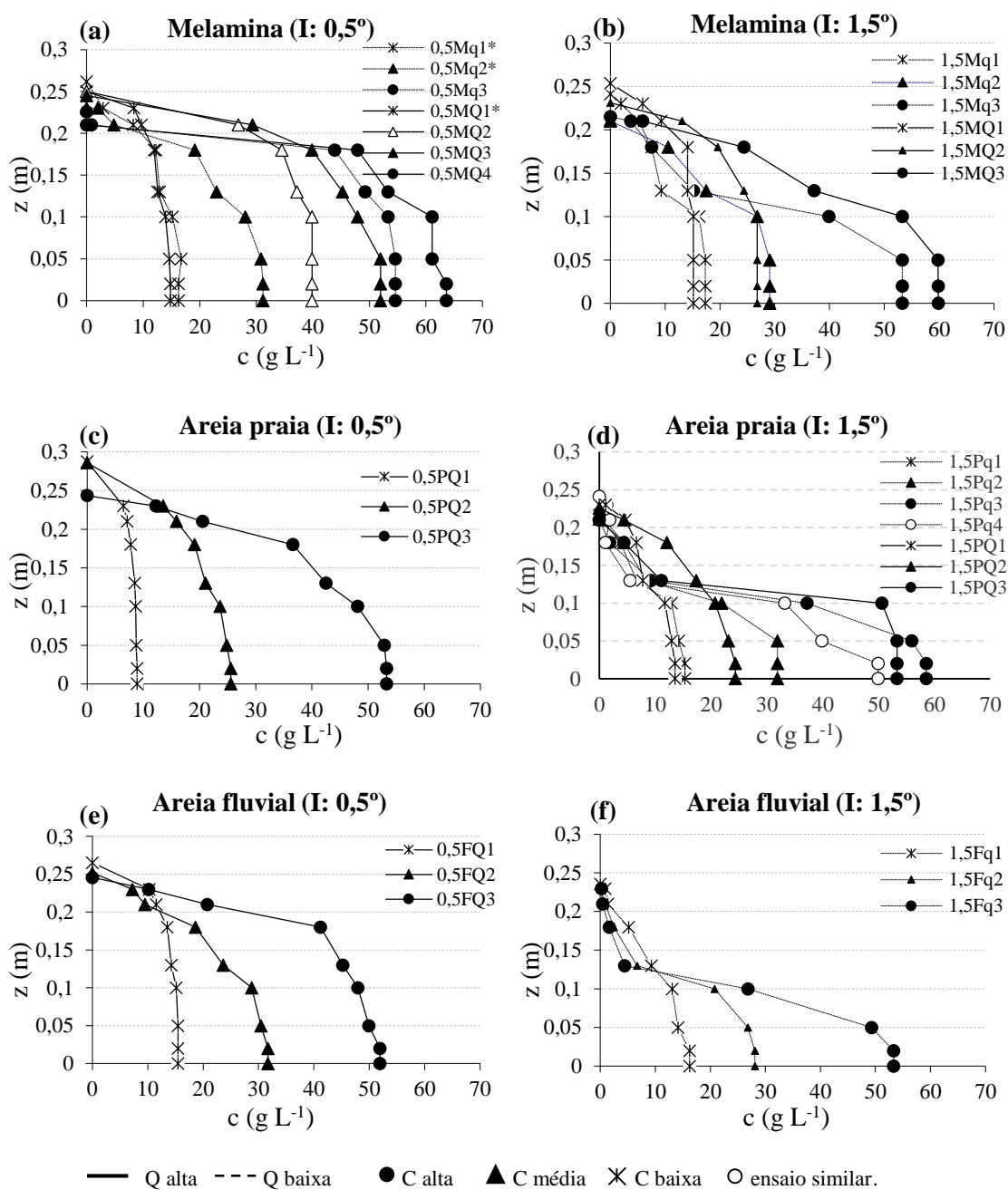


Figura 39. Perfis de concentração separados por tipo de leito e inclinação do canal

Imediatamente junto ao leito são encontradas as maiores concentrações da corrente sendo que, ao longo da vertical, ocorre sua atenuação, até atingir a interface, onde existe uma maior incorporação da água ambiente e, conseqüentemente, maior diluição.

Os experimentos realizados com inclinação de $0,5^\circ$ desenvolveram correntes de densidade salinas com valores de concentração aproximadamente constantes (Figura 39 a, c, e), em boa parte (entre 60 e 80 %) da espessura do seu perfil (região inferior). Com maior inclinação ($1,5^\circ$) e, conseqüentemente, maior turbulência, a camada de mistura do perfil (região superior) se mostrou mais espessa (Figura 39 b, d, f). Esse fato, no entanto, não influenciou no aumento da espessura da corrente e sim, na diminuição da região de concentrações aproximadamente constantes, mais próxima ao leito. A tendência de obtenção de perfis de concentrações com comportamento aproximadamente constante ao longo da vertical, para as corrente salinas observadas, se difere das correntes não conservativas, as quais apresentam variações mais significativas ao longo da vertical (Kneller & Buckee, 2000, Manica, 2009, entre outros).

Com o intuito de realizar uma melhor análise da relação entre as formas de fundo e as concentrações, plotou-se a variação da concentração (c) ao longo da vertical (z) (Figura 40). Os perfis cujos pontos estão preenchidos se referem aos ensaios que geraram formas de leito (ondulações ou dunas). A cor preta e rosa se referem aos ensaios com inclinação de $0,5^\circ$ e $1,5^\circ$, respectivamente.

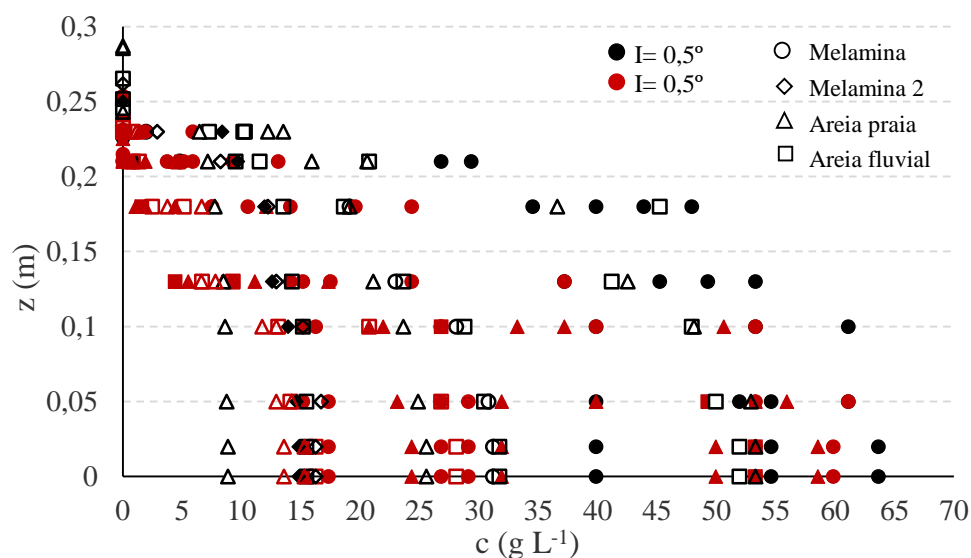


Figura 40. Perfis de concentração de topos os experimentos realizados.

○ Símbolo vazado: leito plano ● Símbolo preenchido: leito não plano

A Figura 40 mostra elevada incidência do desenvolvimento de formas de fundo nos ensaios de alta concentração. De fato, dos onze ensaios de alta concentração, oito (73%) geraram ondulações e, apenas dois, não modificaram o leito. Destaca-se que o único ensaio gerador de dunas (1,5Mq3) foi realizado com alta concentração ($C_{mis} = 65,8 \text{ g L}^{-1}$).

Uma vez que os ensaios de maior concentração são os mais propensos a gerarem formas de fundo, as espessuras dos perfis de concentração com pontos preenchidos será menor. Em termos do número adimensional de Froude densimétrico, elevadas concentrações contribuem na diminuição dos valores de Fr_d , ao passo que baixas espessuras de correntes contribuem no aumento desse número adimensional.

Os ensaios de baixa concentração foram aqueles que resultaram em um menor número de formas de leito. Dos nove ensaios realizados, apenas três geraram ondulações (0,5MQ1*, 1,5Mq1 e 1,5MQ1) e, por outro lado, seis apresentaram leito plano.

7.1.3 Análise dos demais parâmetros da corrente.

Procurou-se relacionar a influência da alteração da concentração da mistura com a espessura da corrente de densidade. Primeiramente, comparou-se esses valores, separando-os em grupos, anteriormente classificados (item 5.4, pág. 40), de ensaios de alta e baixa vazões. A figura 41 mostra uma leve tendência da influência do aumento da concentração na diminuição da espessura da corrente para vazões baixas. No entanto, essa tendência praticamente não é seguida para os dados de altas vazões.

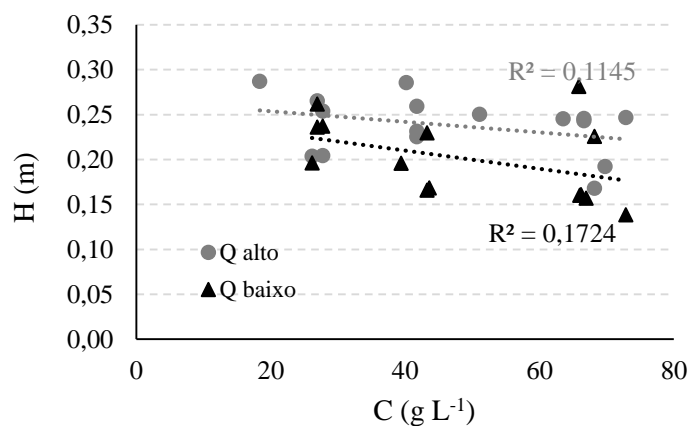


Figura 41. Correlação entre concentração da mistura e espessura da corrente de densidade, para altas e baixas vazões.

Com o intuito de melhor visualizar essas possíveis tendências, a análise foi separada não somente em tipos de vazão (alta e baixa), mas também em tipo de leito e inclinação do canal, como segue na figura 42.

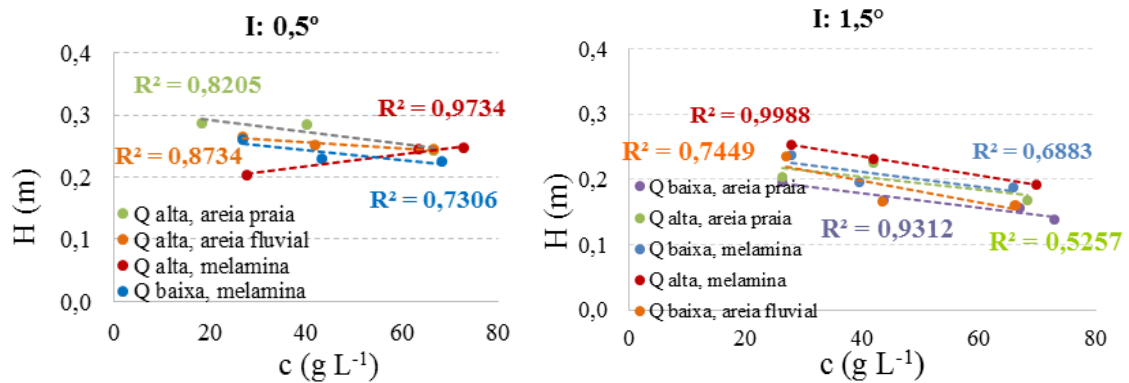


Figura 42. Relação entre as concentrações iniciais da corrente e suas espessuras.

Dessa maneira foi evidenciado o acompanhamento do aumento da espessura das correntes de densidade salina ensaiadas com a diminuição da concentração inicial das mesmas, com coeficientes de determinação variando entre 0,53 a, aproximadamente, 1. Isso se deve ao fato de que correntes com maiores concentrações oferecem maior resistência à incorporação de fluido ambiente, acabando por não expandirem sua espessura.

Resultados similares foram identificados por Boffo (2010), com estudos de correntes de turbidez em ambientes salinos, no qual as correntes com menores concentrações de sedimentos expandiram-se, enquanto que as correntes com maiores concentrações mantiveram suas espessuras menores por maiores distâncias.

A tendência mencionada acima não foi identificada para o ensaio a altas vazões, com o leito composto por melamina e inclinação de 0,5°. Sugere-se que esse fato se deve à utilização de três vazões altas não muito similares àquelas pertencentes a esse grupo, como já explicado no item 5.4 (pág. 40) desse trabalho, influenciando negativamente na correlação dos dados.

Com relação à velocidade média da corrente de densidade, a figura 43 mostra o seu aumento como resultado do acréscimo da concentração.

Fabian (2002) também observou essa ocorrência, identificando que o acréscimo de 1% na massa específica provocaria um aumento da ordem de 25% na velocidade média.

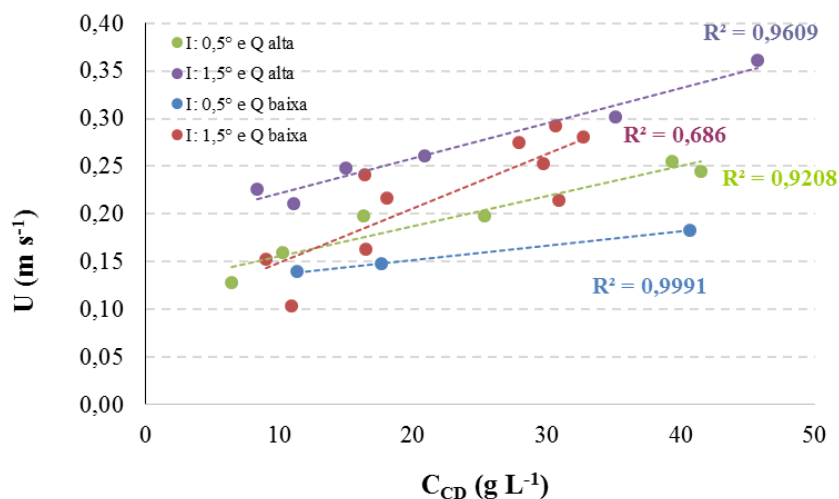


Figura 43. Relação entre as concentrações e velocidades médias da corrente.

Por fim, a figura 44 mostra a influência do aumento da inclinação do canal (dos pontos verdes para os roxos e dos pontos azuis para os vermelhos) no aumento das velocidades médias da corrente e, conseqüentemente, na diminuição da sua espessura, como também observado para os perfis de velocidade das figuras 35 e 36 do item 7.1.1.

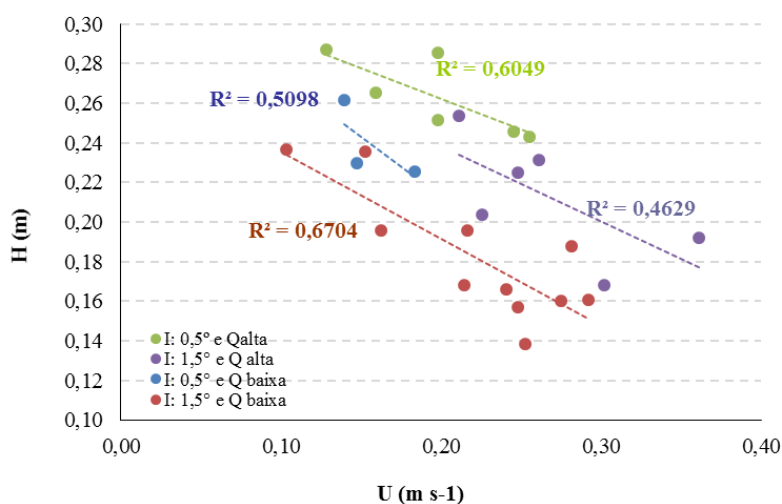


Figura 44. Relação entre a velocidade e a espessura da corrente.

A figura 44 mostra, ainda, a ocorrência, para todos os ensaios realizados, da diminuição na espessura da corrente de densidade quando do aumento da sua vazão de injeção no canal experimental.

Finalmente, a figura 45 procura resumir a influência de todos os parâmetros apresentados na geração das formas de leito, relacionando valores adimensionalizados da velocidade média da corrente pela velocidade máxima com valores de concentração, identificando a inclinação do canal testada.

As formas de leito têm maior ocorrência de geração, conforme a ocorrência das seguintes condições: (a) valores elevados de concentrações de corrente de densidade e; (b) valores elevados da velocidade máxima da corrente ($u_{\text{máx}}$) em relação à velocidade média do perfil (U), como já sugerido anteriormente, na figura 37 do item 7.1.2; (c) inclinações elevadas (que influenciam no aumento da velocidade).

Além disso, de forma indireta e pela análise dos itens apresentados no parágrafo anterior (a,b e c), a figura 45 mostra baixos valores de espessura da corrente, em função das altas inclinações, velocidades e concentrações da corrente, indicadas na região à direita do gráfico (velocidades adimensionalizadas em torno de 0,65 e 0,78 e concentrações de corrente entre 30 e 47 g L^{-1}).

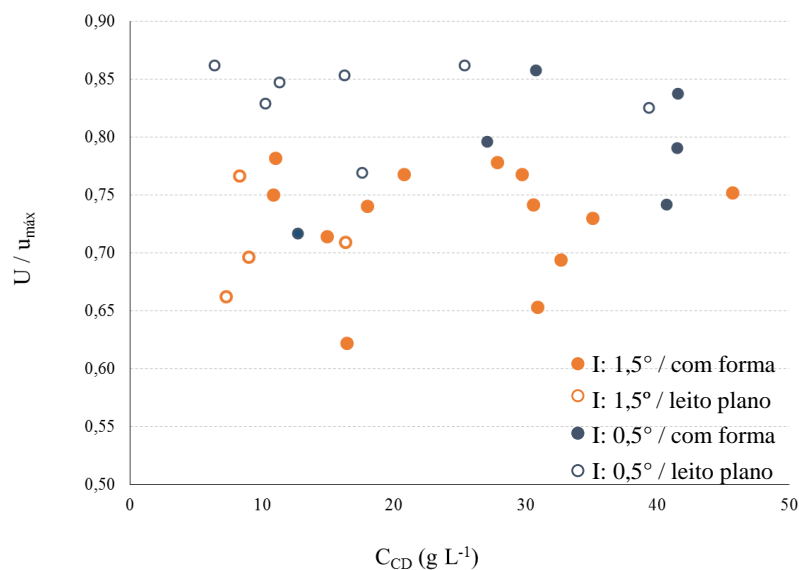


Figura 45. Influência da inclinação do canal.

7.1.4 Discussão parcial dos resultados

Essa etapa da análise de resultados mostrou a comparação dos valores obtidos de velocidade, concentração, espessura da corrente e inclinação do canal e suas influências na geração de formas de fundo por correntes de densidade, apresentadas no item 7.2 desse trabalho.

Em termos gerais, os perfis de velocidade e concentração dos experimentos realizados nesse estudo se mostraram similares aos perfis de correntes de densidade. Os perfis de velocidade, juntamente com os resultados de número de Froude densimétrico (Fr_d) mostraram que, em geral, maiores inclinações de canal levam para maiores valores de velocidade média e, conseqüentemente, números de Fr_d mais elevados. escoamentos em regime supercrítico exibem alta mistura com o fluido ambiente sobre ele, estando a velocidade máxima, nesses casos, usualmente posicionada mais próxima ao leito do que à interface superior (como foi observado na figura 37). Por outro lado, Sequeiros et. al. (2010) identificou que os escoamentos subcríticos geram uma camada de mistura com processos de carreamento insignificantes e menor presença de vórtices, acabando por refletir no uma menor distância do pico de velocidade máxima da interface superior do que do leito móvel.

Em resumo, a correlação dos resultados mostrou que o aumento da inclinação do canal, assim como da concentração da corrente de densidade, influencia no aumento da velocidade média e no rebaixamento da altura da velocidade máxima, o que acaba refletindo na diminuição da espessura da corrente. A combinação desses fatores favoreceu as condições hidráulicas ideais para uma maior frequência de ocorrência das formas de leito.

7.2 CARACTERIZAÇÃO DO LEITO MÓVEL E DE SUAS FORMAS

A evolução das formas de fundo varia conforme a movimentação dos grãos durante sua geração e suas geometrias (altura e comprimento), sendo esses processos influenciados tanto pelas características da corrente (velocidade e concentração), quanto pelo tipo de leito (d_{50} e ρ).

As formas de fundo foram classificadas com base nos valores de tensão de cisalhamento junto ao leito, aplicados pela corrente de densidade, e também pela análise visual da presença de sedimentos em suspensão.

Diferente das formas de fundo fluviais, as formas geradas nesse estudo não utilizaram o número de Froude densimétrico como parâmetro de classificação, por saber-se de antemão que as formas por correntes de densidade são geradas em condições diferentes de energia do escoamento.

7.2.1 Classificação das formas de leito

A seguir, será apresentada a classificação das formas geradas nesse estudo e suas relações com a composição do leito.

7.2.1.1 Ondulações

As ondulações foram assim classificadas conforme a sua geometria e à ausência de sedimentos em suspensão. Sua geometria apresentou uma face suave à montante da forma e outra face, de inclinação mais abrupta, na sua face à jusante. O início da geração dessas formas se deu de maneira lenta e tênue, onde a interação entre o escoamento e o leito não proporcionou a suspensão de grandes quantidades de sedimento, perceptíveis pela análise das fotografias, principalmente nos experimentos realizados com as areias.

As ondulações (Figura 46) foram observadas em 13, do total de 29 experimentos, sendo que, em cinco ensaios (0,5MQ2, 0,5MQ3, 0,5MQ4, 0,5Mq3 e 1,5Mq1) as mesmas ocorreram sob regime subcrítico de escoamento ($0,51 < Fr_d < 0,91$) e, nos oito ensaios restantes, em regime supercrítico ($1,44 < Fr_d < 1,70$).

O avanço dessas formas ocorreu sempre no sentido do escoamento, gerando formas com comprimentos de onda (λ) entre 5,4 e 13 cm e altura (η) de $< 0,5$ a 1,5 cm.

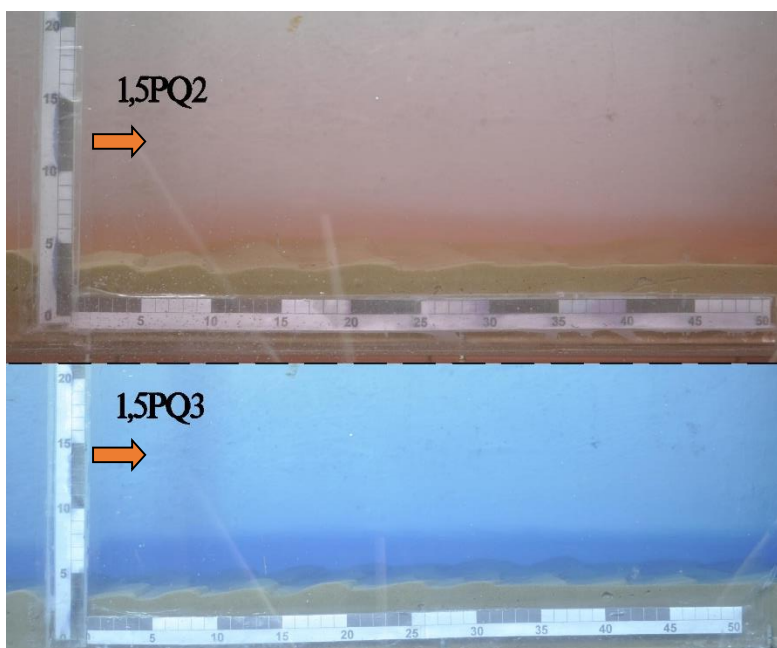


Figura 46. Ondulações geradas em alguns ensaios.

7.2.1.2 Dunas

Dentre todos os ensaios realizados nesse estudo, os ensaios 1,5Mq2, 1,5Mq3, 1,5MQ2 e 1,5MQ3 foram identificados como geradores de formas de fundo do tipo dunas.

As dunas se diferenciam das ondulações pelos seus altos valores de tensão de cisalhamento junto ao fundo ($1,08 < \tau \text{ (N m}^{-2}\text{)} < 2,90$) e também pelo visível transporte de material sedimentar junto ao leito e também em suspensão.

A figura 47 apresenta a formação e a evolução das dunas geradas no ensaio 1,5Mq3 onde é possível notar o referido transporte de sedimentos e, também, o descolamento do escoamento a partir da crista das formas e o seu acoplamento ao leito na região de início da próxima forma (linha amarela). Nessa região onde o escoamento se une ao leito verificou-se um visível arrancamento dos grãos do leito, sendo esses lançados até as proximidades da crista da próxima duna. Na região da face à jusante da forma, o movimento dos grãos se mostrou mais desordenado (flechas).

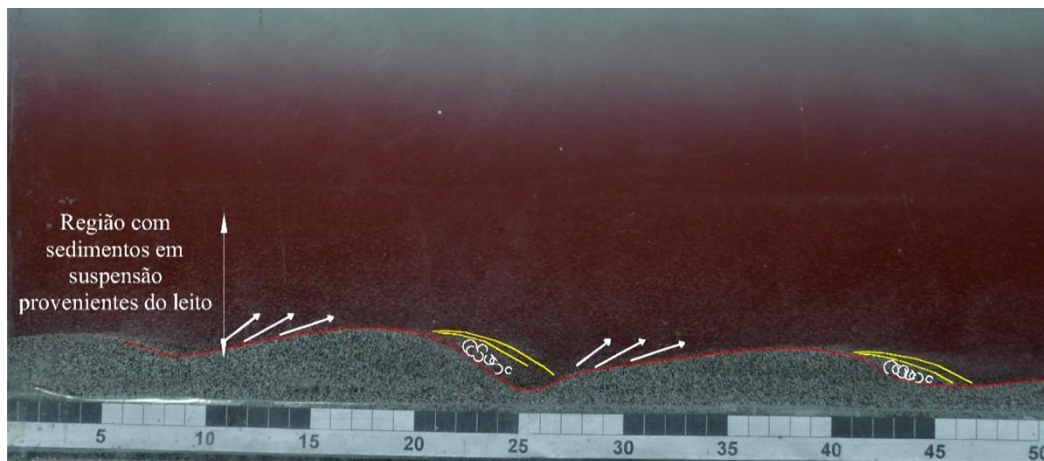


Figura 47. Dunas geradas no experimento 1,5Mq3 ($Q: 383 \text{ L min}^{-1}$, $\rho_{\text{mis}}: 1041 \text{ kg m}^{-3}$, $Fr_d: 1,35$).

Os mecanismos de movimentação dos grãos (erosão, saltação e suspensão), durante o desenvolvimento da forma, acima relatados, são similares àqueles citados pela bibliografia para dunas, em condições de escoamentos com superfície livre (Simons & Richardson, 1961; Kennedy, 1963 e 1969). Outra característica típica da formação das dunas, citada por esses autores, é a existência de deformações (ondulações) na superfície do escoamento, em geral, fora de fase em relação às formas de fundo. No entanto, essa característica não foi identificada na superfície das correntes de densidade de nenhum dos experimentos realizados nesse estudo.

Alguns valores característicos de altura e comprimento de dunas são indicados por diferentes autores, para estudos realizados com escoamentos de superfície livre. O estudo de Simons and Richardson (1961), anteriormente citado, classifica as dimensões das dunas em $\lambda > 61$ cm e $\eta > 3$ cm. Outro estudo que definiu a altura das dunas foi o de Engelund and Fredsøe (1982), limitando as mesmas em $3 < \eta$ (cm) < 600 . Diferente desses estudos, as dunas formadas nesse estudo apresentaram dimensões de $8,2 < \lambda$ (cm) $< 17,5$ e $1,02 < \eta$ (cm) $< 1,42$.

Outra característica que diferencia as dunas encontradas nesse estudo daquelas geradas por escoamentos em superfície livre, é a condição hidráulica na qual elas são formadas. As formas de leito fluviais são amplamente conhecidas por se formarem em condições subcríticas de escoamento (Simons & Richardson, 1961; van Rijn, L. C., 1984). No entanto, as correntes de densidade geradoras das dunas desse estudo apresentaram números de Froude densimétrico entre 1,35 e 1,53, isso é, as dunas desse experimento foram geradas sob regime supercrítico de escoamento.

Entende-se que as diferenças apontadas acima são coerentes, uma vez que os processos hidrodinâmicos e sedimentológicos são diferentes entre escoamentos de superfície livre e correntes de densidade.

7.2.1.3 Leito plano inferior

Assim como as formas de ondulações, o leito plano inferior também ocorreu com elevada frequência, 12 dos 29 ensaios. Em três desses 12 ensaios (0,5Mq2*, 0,5FQ3 e 0,5PQ2) os escoamentos foram calculados como regimes subcríticos, mas muito próximos do crítico ($0,92 < Fr_d < 0,97$). Os outros nove experimentos (0,5Mq1*, 0,5FQ1, 0,5FQ2, 1,5Fq1, 1,5Fq2, 0,5PQ1, 0,5PQ3, 1,5Pq1 e 1,5PQ1) resultaram em leitos planos de transição por correntes em regime supercrítico ($1,02 < Fr_d < 2,18$), como na figura 48.



Figura 48. Imagem de topo do ensaio 0,5FQ2.
Escala em cm.

No que se refere à energia de escoamento, se diferenciam das formas planas superiores por ocorrerem em condições de escoamento próximas à crítica, mas sem a presença de sedimentos em suspensão. Isso é, a movimentação dos grãos junto ao leito não foi notada visualmente durante a passagem da corrente de densidade.

Apesar de terem permanecido planos, os leitos resultantes dos experimentos 0,5FQ1, 1,5FQ2, 0,5PQ3 e 1,5PQ1 apresentaram tensões de cisalhamento aplicadas junto ao leito bastante elevadas, de 1,7, 3,3, 1,6 e 1,7 N m⁻², respectivamente. Essas tensões são similares àquelas provocadas pelos escoamentos geradores de dunas, em leitos compostos por melamina (1,5Mq2: 1,1 N m⁻²; 1,5Mq3: 2,9 N m⁻²; 1,5MQ2: 1,5 N m⁻² e 1,5MQ3: 1,6 N m⁻²). Dessa forma, esperava-se que, caso o escoamento pudesse interagir por mais tempo com o leito (ensaios com maior duração), o leito poderia vir a desenvolver ondulações e/ou dunas.

7.2.2 Geometria da forma versus composição do leito

A análise das imagens obtidas durante e após cada experimento revelou que o tipo de forma de leito e a sua dimensão são fortemente influenciados pelo tamanho médio (d_{50}) e pela massa específica (ρ_s) dos grãos presentes no leito móvel, o que se traduz no diâmetro médio adimensionalizado (d_{50}^*), assim como para as formas de fundo fluviais (Baas, 1993; Raudikivi, 1997). Além disso, a velocidade de queda também tem um papel na modificação do leito, uma vez que está relacionada com a suspensão e sedimentação dos grãos.

A seguir será apresentada uma análise mais voltada à classificação das formas e suas dimensões, conforme as três composições de leito testadas nesse estudo.

7.2.2.1 Areia da praia

No total, foram realizados dez ensaios com o leito composto por areia da praia. Em metade desses ensaios, identificaram-se ondulações (1,5Pq2, 1,5Pq3, 1,5Pq4, 1,5PQ2 e 1,5PQ3) e, na outra metade, leitos planos inferiores (0,5PQ1, 0,5PQ2, 0,5PQ3, 1,5Pq1 e 1,5PQ1).

O leito permaneceu plano para cinco ensaios, sendo os experimentos 0,5PQ1, 0,5PQ2 e 0,5PQ3 realizados a altas vazões, porém, com baixa inclinação de canal (0,5°). Os ensaios 1,5Pq1 e 1,5PQ1, apesar de estarem a 1,5° de inclinação, foram realizados com baixa

massa específica da mistura ($\rho_{\text{mis}} = 1015 \text{ kg m}^{-3}$). Esses resultados podem indicar a influência de baixas inclinações e das baixas concentrações das correntes na ausência de formas de leito, juntamente com o fato de a areia possuir alto valor de densidade (2,65).

Em comparação às formas geradas em leito de melamina, essas formas possuem menores comprimentos de onda ($5,3 < \lambda < 6,5 \text{ cm}$) e altura ($0,5 < \eta < 0,7 \text{ cm}$), mostrando uma relação entre o tamanho de grão e a dimensão das formas, já referenciada para situações de escoamentos de superfície livre (Baas, 1993; Julien & Klaassen, 1995 e Raudikivi, 1997). Sendo assim, percebeu-se que as dimensões das formas presentes nesse tipo de leito talvez não sejam tão sensíveis às alterações dos parâmetros hidráulicos, se comparadas às formas geradas em leito de melamina.

7.2.2.2 Melamina

A melamina apresenta os menores valores de diâmetro médio adimensionalizado (d_{50}^* : 3,9) e baixa velocidade média de queda das suas partículas ($u_q = 1,8 \text{ cm s}^{-1}$), em relação à areia da praia ($u_q = 2,8 \text{ cm s}^{-1}$) e fluvial ($u_q = 6,5 \text{ cm s}^{-1}$). Além disso, apesar de a melamina apresentar maior d_{50} em relação à areia fina, sua massa específica é consideravelmente menor.

Essas características atribuíram aos grãos desse leito a característica de alta mobilidade e, portanto, a maior probabilidade do desenvolvimento de formas de leito. Todos os ensaios realizados com melamina resultaram na geração de formas de fundo não planas, o que não foi observado para os dois ensaios ($0,5Mq1^*$ e $0,5Mq2^*$) com “melamina 2”, devido ao maior diâmetro médio dos seus grãos. O ensaio $0,5Mq2^*$ foi de baixa vazão e média concentração e, o ensaio $0,5Mq1^*$, de baixa vazão e baixa concentração, mostrando, mais uma vez, a ocorrência de leito plano para baixas vazões e baixas concentrações.

Destaca-se, também que, além da maior ocorrência de formas, a melamina possibilitou a geração de maiores dimensões de forma de leito ($8,2 < \lambda < 17,5 \text{ cm}$ e $0,6 < \eta < 1,5 \text{ cm}$), em relação aos experimentos realizados com areia da praia e fluvial.

Os comprimentos de onda das formas geradas em leito composto por melamina foram correlacionadas com o intuito de perceber a influência das tensões aplicadas pelo escoamento sobre o leito (Figura 49). Percebe-se que tensões de cisalhamento maiores tendem a gerar formas de leito com comprimentos maiores.

A figura 49 também mostra que a tensão de cisalhamento aplicada sobre as dunas é bastante superior que aquelas aplicadas às ondulações, mostrando a influência do aumento da tensão de cisalhamento sobre o tipo de forma gerado e, também a influência da geometria da forma sobre as tensões do escoamento.

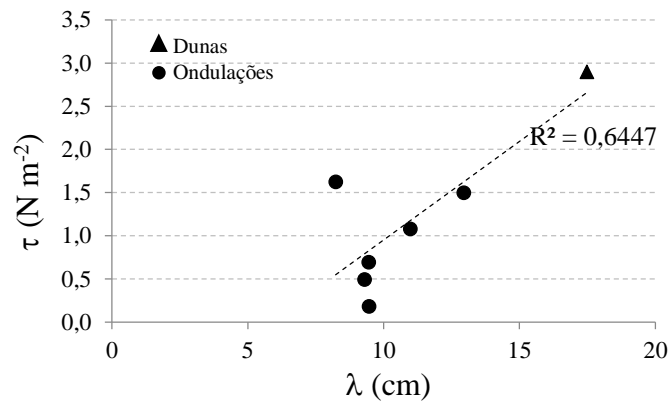


Figura 49. Tensões de cisalhamento aplicadas pelo escoamento sobre o leito relacionado ao comprimento da formas de fundo.

7.2.2.3 Areia fluvial

Esse sedimento possui os maiores valores de diâmetro médio adimensionalizado ($d_{50}^* = 11,3$) e velocidade de queda média ($u_q = 6,5 \text{ cm s}^{-1}$) dos grãos. Devido a essas características, o leito composto por esse sedimento permaneceu plano em cinco ensaios, dos seis realizados. O experimento 1,5Fq3 foi o único que apresentou formas de leito ($\lambda = 8,5 \text{ cm}$ e $\eta < 0,5$) para essa composição de leito, apesar de intercaladas com intervalos de leito plano, ao longo do canal. O λ gerado nesse tipo de leito é ligeiramente maior daqueles observados na areia da praia o que, apesar de ter sido notado apenas em um ensaio, evidencia a relação do comprimento de onda das formas com o d_{50} do leito (ambas as areias possuem mesma massa específica).

De forma bem moderada, o experimento também 1,5Fq2 apresentou indícios de uma transição entre o leito plano inferior e o início de formas de leito supercríticas, devido à presença de ranhuras longitudinais ao escoamento e também de pequenas marcas de cristas.

De forma geral, a areia fluvial mostrou-se como um sedimento de pouca mobilidade, apresentando pouca modificação do seu leito, frente à energia e competência das correntes de densidade ensaiadas.

7.2.3 Geometrias das formas (vista superior)

7.2.3.1 Ao longo do tempo

As formas de fundo estão em constante movimento e alteração de sua forma durante o desenvolvimento de seus perfis dinâmicos de velocidade e concentração. Quando esses perfis atingem seu equilíbrio, as formas de fundo também podem alcançar sua geometria de equilíbrio, sendo a mesma preservada, em geral, apenas com a ocorrência de uma queda contínua de sedimentos ao longo do evento ou de uma rápida desaceleração do fluxo.

Com o intuito de analisar a evolução da geometria de cada forma, foram feitas medições dos comprimentos (λ , λ_M , λ_J) e altura (η) das formas, ao longo do tempo (Figura 50). A análise foi feita a partir das imagens laterais, obtidas durante os ensaios, por meio da escolha de uma forma posicionada no início da imagem e da sua análise ao longo do ensaio ou até a mesma sair do enquadramento (no caso da velocidade de migração ser alta).

Os ensaios nos quais as formas geradas puderam ser medidas ao longo do ensaio foram: 0,5Mq3, 1,5Mq1*, 1,5Mq2, 1,5Mq3, 1,5MQ2, 1,5Pq4, 1,5PQ2 e 1,5PQ3, apresentados na figura 50.

Em todos os ensaios notou-se uma tendência de acompanhamento dos valores de comprimento total (λ) com os comprimentos da face à montante (λ_M) da forma, assim como a proximidade entre os valores da face jusante (λ_J) e da altura (η) da forma.

Os ensaios 1,5Pq4, 1,5PQ2 e 1,5PQ3, realizados com areia da praia, apresentaram formas com dimensões de λ_M , λ_J , λ e η aproximadamente constantes ao longo do tempo. Sugere-se que, mesmo com dimensões de ondulações maiores, essa tendência seria mantida, devido à baixa mobilidade desse sedimento e às lentas alterações na sua geometria.

O experimento 1,5Mq3 (formas com maiores dimensões do estudo) foi possível de ser investigado durante um intervalo de apenas 330 s, devido à alta velocidade de migração das formas. Além disso, as formas começaram a aparecer após um maior intervalo de tempo de interação (300s a partir do início do ensaio) entre a corrente de densidade e o leito, se comparado aos outros experimentos. Ao longo dos 330 s de análise, as dimensões se mostraram bastante variáveis, com um pico positivo dos valores de λ_M (5 mm) em conjunto com um pico negativo de λ_J (t: 550 s), mas com concomitante acréscimo do

comprimento total da forma (λ). Sugere-se que as formas de fundo com maiores dimensões necessitam uma maior duração da interação entre fluido e leito móvel, para alcançar dimensões de valores constantes. Também não se descarta a influência da diminuição das velocidades com a chegada da cauda da corrente e do seu término.

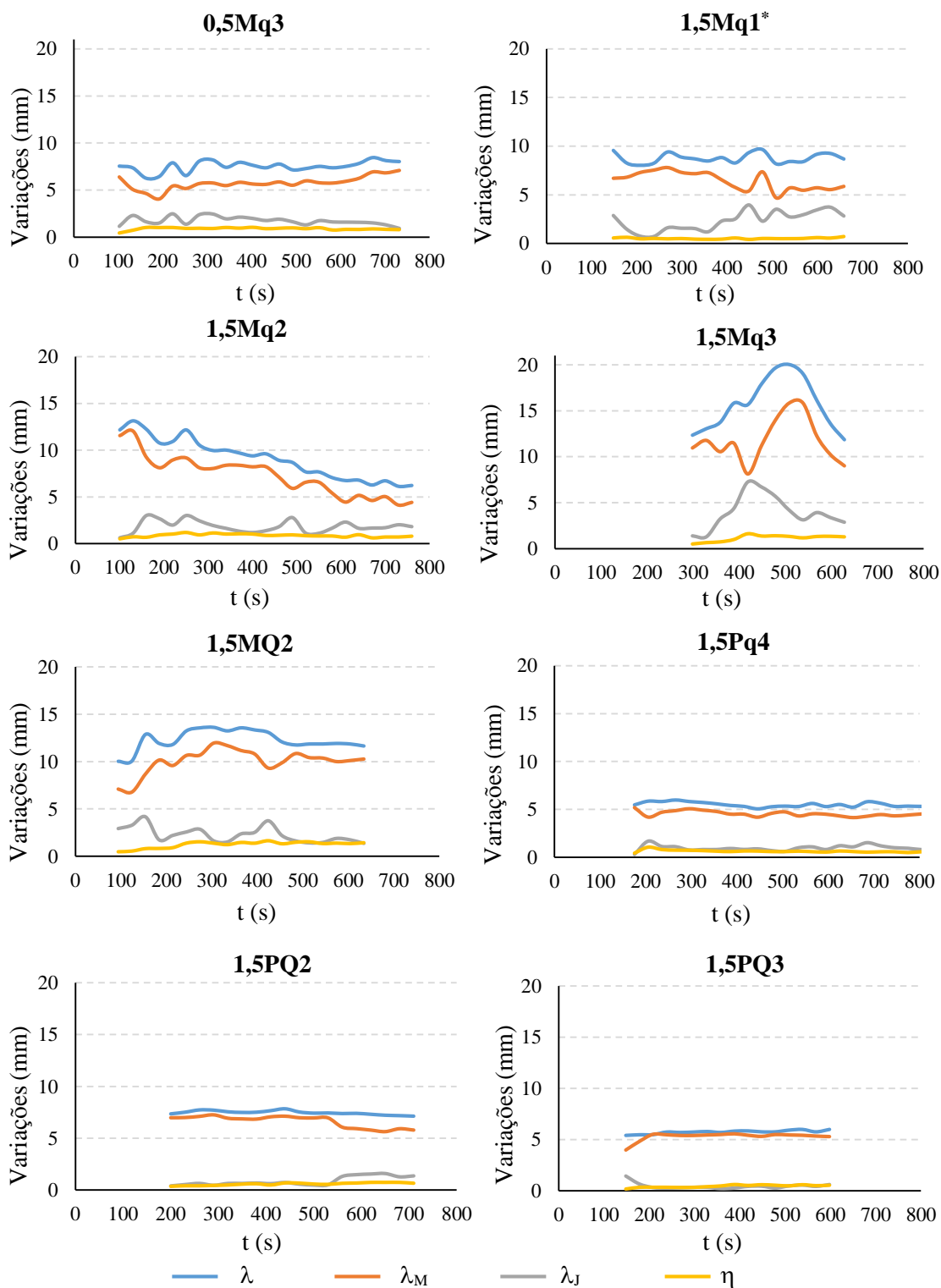


Figura 50. Variação das dimensões das formas de fundo em relação ao tempo.

Como já esperado, as ondulações e as dunas apresentam geometrias similares e assimétricas, com face à montante de inclinação mais suave e mais extensa que àquela à jusante da forma. Observou-se que as formas geradas em leitos de melamina apresentaram dimensões de λ_M entre 73 e 82 % e dimensões de λ_J entre 18 e 27 % em relação ao comprimento total da forma (λ). Diferentemente, para leitos compostos por areia da praia, as formas de leito apresentaram maior assimetria, com dimensões de λ_M entre 83 e 92 % e dimensões de λ_J entre 8 e 17 % em relação ao comprimento total da forma (λ). Isso se deve às características específicas dos dois tipos de sedimento, como granulometria e massa específica, que acabam por influenciar na sua mobilidade e também no ângulo de repouso dos grãos.

7.2.3.2 Ao longo do canal

Além da duração da passagem da corrente influenciar na geometria das formas, percebeu-se também pequenas variações na geometria das cristas das formas, ao longo do canal, isso é, ao longo da distância percorrida pela corrente. As montagens das fotos de topo (Figura 32 - pág. 55 - e Anexo A) feitas para todos os ensaios geradores de formas não planas, mostram essa evolução citada.

Em geral, as formas geradas ao longo do canal seguem padrões similares. A fim de aprofundamento dessa análise, o canal foi dividido em três regiões, ao longo do seu comprimento: região inicial, região de desenvolvimento e região final (de influência dos equipamentos).

Devido à entrada da corrente de densidade no canal e, por conseguinte, a sua alta turbulência, a região inicial do leito é marcada pela presença dois tipos de cristas, como linguoides e sinuosas, em fase ou não (Figura 51), que são características de escoamentos com maior energia.

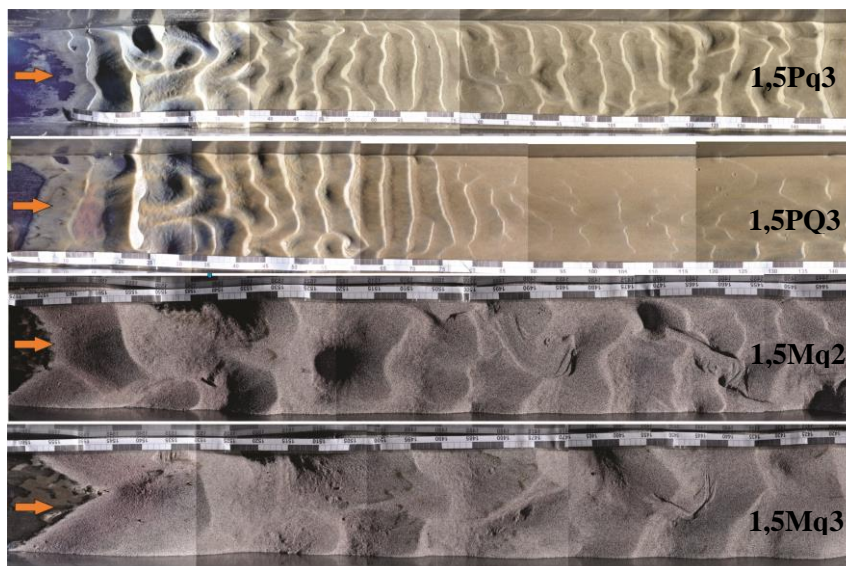


Figura 51. Cristas das formas de fundo da região de entrada da corrente de densidade.

Na região de desenvolvimento das formas, onde a corrente de densidade pode escoar por mais tempo sem interferências (como presença de obstáculos), as cristas das formas se mostraram seguindo o mesmo padrão ao longo da região, variando apenas com o tipo de sedimento presente no leito.

As formas geradas na região de desenvolvimento dos leitos compostos por areia fina, apresentaram de cristas retas a levemente sinuosas (Figura 52a), com deformação no sentido de montante, próximo às paredes do canal de acrílico. Sabe-se que próximo à parede a velocidade do escoamento é menor, o que acaba influenciando na interação entre corrente e leito móvel e, por conseguinte, nas formas geradas. Mesmo com a variação da vazão de injeção e da concentração da corrente (influenciadores diretos do Fr_d), não foram identificadas alterações nos padrões das cristas das formas.

Para leitos compostos por melamina, as cristas das formas de fundo se mostraram mais suscetíveis às variações do escoamento, apresentando maior mudança de configuração ao longo do canal, mas sem um padrão que pudesse ser definido. Em geral, notaram-se cristas retas e sinuosas (em fase ou não) e, apenas em algumas regiões do ensaio 1,5Mq2, cristas do tipo linguoide e também lunares (Figura 52b), que são características de escoamentos de maior energia. 1,5Mq2.

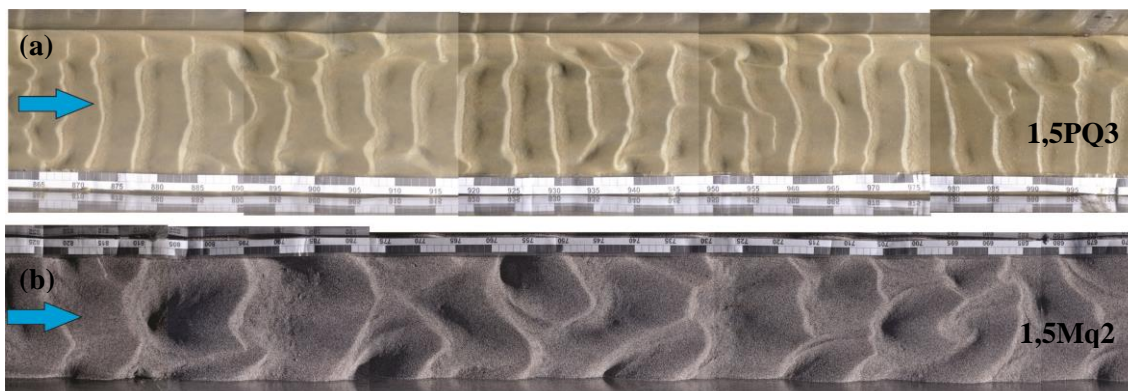


Figura 52. Cristas retas a levemente sinuosas (a) e cristas sinuosas (b), dominantes em ensaios com areia e melamina, respectivamente.

Finalmente, destaca-se a influência dos equipamentos (UVP e sondas) que precisaram ser posicionados dentro do canal para leitura dos parâmetros de velocidade e concentração. Alguns ensaios mostraram claramente, por meio da alteração no padrão do formato das cristas ou, ainda, pela sua ausência próximo (antes e depois) aos equipamentos, como pode ser observado na figura 53.



Figura 53. Influência das sondas UVP e sifões na deformação das cristas das formas de fundo do ensaio 1,5PQ3.

7.2.4 Geometria da forma *versus* duração do ensaio

Em geral, nos ensaios onde ocorreram ondulações e dunas, percebeu-se a migração e a mudança de dimensões dessas formas, desde o início da sua formação até o término da corrente de densidade. Sugere-se, dessa forma, que caso a corrente continuasse escoando, as formas também continuariam se movimentando, até atingir uma configuração de equilíbrio, já documentada por outros autores (Baas, 1993; Puhl, 2012; Perillo, 2012).

Salienta-se que esse estudo não teve como foco a análise da obtenção de formas de fundo em sua configuração de equilíbrio, em função do volume de mistura injetado estar condicionado ao volume do tanque de preparação da mesma. Além disso, não são todas as formas de fundo geradas na natureza que apresentam sua geometria de equilíbrio, já que nem todas as correntes de densidade mantêm-se escoando durante o tempo necessário para tal.

Na procura da visualização da influência da duração da corrente de densidade na geração das formas de fundo, optou-se pela realização de um mesmo experimento em duas etapas, o 1,5Fq3 e o 1,5Fq4, rodados com idênticos valores de vazão, concentração, inclinação, composição do leito, sem o nivelamento do leito entre os ensaios. Procurou-se, dessa forma, simular em apenas um ensaio, porém de maior duração, na tentativa de obter formas de leito mais desenvolvidas e distribuídas ao longo de todo o canal.

Como resultado, verificou-se o desenvolvimento de formas em algumas regiões do leito que após o 1,5Fq3 haviam permanecido planas e, também, o acréscimo dos comprimentos médios de onda das formas de leito já existentes antes do 1,5Fq4.

A figura 54 mostra a sobreposição das formas geradas em ambos os ensaios citados, para a região do leito a partir de 8,3 m da entrada da corrente de densidade, até quase 10 m. Nota-se que, no início da seção apresentada, as formas de fundo foram se desenvolver apenas com a realização do 1,5Fq4. Além disso, percebe-se que as cristas das formas se deslocaram de um ensaio para outro mostrando que as formas, ainda não haviam atingido seu equilíbrio.

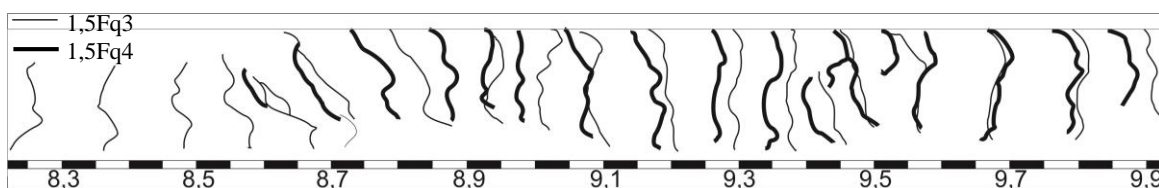


Figura 54. Visão de topo da sobreposição das cristas das formas de leito dos ensaios 1,5Fq3 e 1,5Fq4, entre 8,3 e 9,9 m da entrada da corrente de densidade.

Por fim, a análise das fotos de topo ao longo de todo o canal, mostrou a evolução do comprimento de onda dessas formas, que aumentaram de uma média de 8,5 para 9,6 cm. Junto com o aumento do tamanho da forma, identificou-se, também, o aumento da tensão de cisalhamento do escoamento sobre o leito, de 2,18 para 2,55 N m^{-2} , apresentado na

tabela 13 (pág. 56). Dessa forma, sugere-se que, caso o ensaio persistisse por um intervalo de tempo maior e o escoamento pudesse interagir com as formas de leito por mais tempo, as ondulações poderiam atingir o equilíbrio ou poderiam, ainda, evoluir para dunas.

Essa análise mostrou a duração da corrente de densidade como mais uma variante no processo de geração e desenvolvimento das formas de fundo que, em ambientes naturais, pode variar conforme sua fonte de origem (aporte de rios para dentro do oceano e desestabilização de taludes, por exemplo) e competência. Dessa forma, os resultados motivam a continuidade desse estudo, com o desenvolvimento de experimentos de maior duração.

7.2.5 Discussão parcial dos resultados

Mediante as variadas correntes de densidade ensaiadas e tipos de leito utilizados nesse estudo, foi possível obter três tipos de formas de leito: ondulações, dunas e leito plano inferior.

O experimento 1,5Mq3 mostra evidências da geração de dunas supercríticas ($Fr_d: 1,35$) e, os experimentos 0,5MQ1, 1,5Mq2, 1,5MQ2, 1,5MQ3, 1,5Pq2, 1,5Pq3, 1,5Pq4, 1,5PQ2 e o 1,5PQ3, de ondulações supercríticas. Esse resultado se mostra muito significativo, uma vez que evidencia a geração de formas de fundo em condições hidráulicas não previstas pela hidráulica fluvial, onde as ondulações e as dunas são classificadas como formas de leito típicas de escoamentos subcríticos (Simon & Richardson, 1961; Kennedy, 1963; Engelund & Fredsøe, 1982). Ambas essas formas também foram identificadas por Fedele et. al (2009 e 2011), por meio de experimentos de correntes de densidade em regime supercrítico, em leito móvel composto por melamina, amparando os resultados aqui apresentados.

As formas de leito plano inferior ocorreram, nesse estudo, para correntes de densidade em regime subcrítico e supercrítico ($0,9 < Fr_d < 2,2$). As formas planas supercríticas foram classificadas como planas inferiores por não terem sido observados transporte de sedimentos durante o ensaio ou pelas fotografias obtidas na região da janela de observação).

Outras formas de leito, típicas de escoamentos fluviais supercríticos, como antidunas, calhas e piscinas e degraus cíclicos não foram identificadas no presente estudo. Acredita-se que, para a geração e desenvolvimento dessas formas, seja necessário aumentar a

energia do escoamento, por meio da variação da declividade, por exemplo. Foi dessa forma que Hand (1974), utilizando altas inclinações de canal (4,6 e 5,7°) conseguiu simular em laboratório a gênese de antidunas por correntes de densidade salina em um canal de leito móvel composto por carvão.

Notou-se também a influência das características sedimentológicas dos grãos (densidade, velocidade de queda e d_{50}) na obtenção de diferentes formas de fundo. Dos três materiais testados nesse estudo (areia da praia, melamina e areia fluvial), a melamina se mostrou como o sedimento com maior mobilidade e mais propenso a entrar e permanecer em suspensão, seja pela sua baixa densidade, pelo d_{50} não muito distante do da areia da praia, quanto pela sua velocidade de queda (u_q) menor em relação às areias. Esse fato resultou em maior frequência de ocorrência (%) de formas de fundo para esse material. Já areia fluvial praticamente não se deformou perante as tensões transmitidas pelos escoamentos nela ensaiados, gerando ondulações em algumas regiões do canal e em apenas um ensaio (1,5Fq3).

Por fim, identificou-se a influência do tempo de realização de um determinado ensaio no desenvolvimento das formas. O ensaio 1,5Fq3 (Q : 379 L min⁻¹, ρ_{mis} : 1041 kg m⁻³, Fr_d : 1,66) foi repetido por meio do 1,5Fq4, mostrando como resultado a geração de ondulações em regiões antes planas e também o aumento do comprimento de onda das ondulações já existentes do 1,5Fq3. Isso é, esses resultados mostram a necessidade de desenvolvimentos de ensaios com maior duração, caso o intuito do estudo seja a obtenção de escoamentos plenamente desenvolvidos e de formas de leito em equilíbrio.

7.3 COMPARAÇÃO COM A HIDRÁULICA FLUVIAL

Os processos hidráulicos e hidrodinâmicos de transporte fluvial de sedimentos são bastante conhecidos e difundidos por diversos autores, destacando, por exemplo, Graf (1971), Chang (1988) e Raudikivi (1990). Numerosos modelos de previsão de transporte de sedimentos e de classificação e dimensionamento de formas de fundo já foram elaborados e são amplamente utilizados.

Por esse motivo, parece natural realizar a utilização desses modelos fluviais na realidade das correntes de densidade, seja na tentativa da correlação direta de dados de ambos os processos ou na busca de adaptações nos modelos para o mundo das correntes de densidade.

Nesse sentido, será apresentada a aplicação de alguns resultados do presente estudo em diagramas e equações de previsão provindas do contexto fluvial, na busca de similaridades entre os processos fluviais e de correntes de densidade e na busca de auxílio na interpretação de resultados.

7.3.1 Transporte de sedimentos

O estudo do transporte, erosão e deposição dos sedimentos está diretamente ligado aos mecanismos de geração das formas de fundo e pode ser realizado pela consulta de diagramas de previsão do transporte dos grãos. A seguir, serão apresentados os diagramas de dois autores (Hjuström, 1935 e Shields, 1936), que utilizam parâmetros das correntes e do leito móvel nas suas previsões, com a aplicação dos parâmetros obtidos nas correntes do presente estudo.

7.3.1.1 Diagrama de Hjuström (1935)

No contexto de escoamentos fluviais, Hjuström procurou prever condições de escoamento que indicassem possibilidades de deposição, transporte de material em suspensão e também erosão do leito móvel, relacionando a velocidade média do escoamento com o tamanho médio dos grãos presentes no leito móvel (ver item 4.3.4).

Os valores de velocidade média da corrente (U , cm s^{-1}) e de tamanho médio dos grãos (d_{50} , mm), obtidos no presente estudo, foram plotados no diagrama de Hjuström, como podem ser observados na figura 55, e se distribuem na área do gráfico que prevê tanto o transporte quanto a erosão dos sedimentos utilizados.

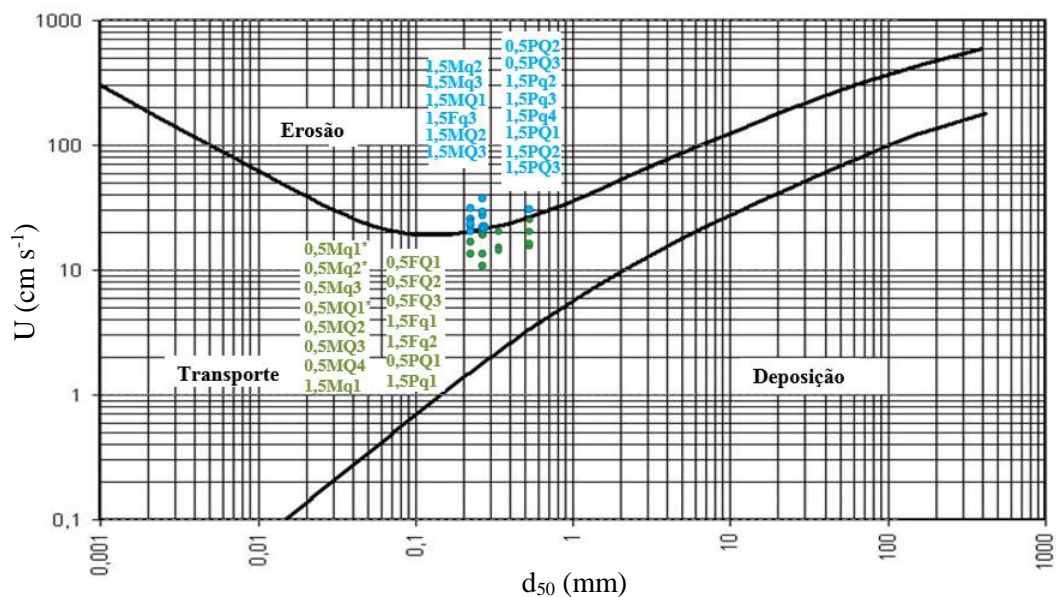


Figura 55. Diagrama de Hjulström

Segundo esse diagrama, os 14 experimentos identificados com pontos azuis deveriam desenvolver processos de erosão do leito móvel. No entanto, apenas os ensaios com melamina apresentaram presença de material na parte de fora do canal de acrílico (ao fim do canal de alvenaria, indicando erosão do leito).

Dos 14 experimentos classificados nessa região, apenas três (0,5Pq2, 0,5Pq3 e 1,5PQ1) não apresentaram alteração na forma do leito (composto por areia da praia nos três casos). Esses três experimentos classificados como leito plano inferior no quais, durante os experimentos, não foi identificada a erosão do leito de forma visual e/ou a presença de material proveniente do material de leito, na saída do canal. Dessa forma, conclui-se que não houve a erosão de leito para esses ensaios, mesmo que tenha sido previsto pelo diagrama.

A condição de transporte foi prevista pelo diagrama para um pouco mais da metade dos experimentos realizados. O transporte dos sedimentos pode ocorrer concomitantemente com processos de erosão e de deposição do leito, desde que o balanço de massa do sistema permaneça inalterado. Isso é, considerando o canal de acrílico um sistema fechado, o balanço de massa permaneceu inalterado pela inexistência de sedimento proveniente do leito no seu exterior. Nessa região de previsão do diagrama são encontrados seis ensaios com formas de fundo desenvolvidas (0,5Mq3, 0,5MQ2, 0,5MQ3, 0,5MQ4, 1,5Mq1 e

0,5MQ1^{*}) e nove ensaios com o leito plano inferior (0,5Mq1^{*}, 0,5Mq2^{*}, 0,5FQ1, 0,5FQ2, 0,5FQ3, 1,5Fq1, 1,5Fq2 e 1,5Pq1).

Identificou-se visualmente a erosão do leito (pelas fotografias e na presença de sedimentos nas bacias coletoras ao final do canal) para os ensaios geradores de formas de leito citadas. Portanto, além do transporte previsto pelo diagrama, nesses experimentos também ocorreram processos de erosão, sugerindo uma diferença desses resultados com o diagrama. Para os ensaios de leito plano inferior não foram identificados volumes de areia da praia e melamina nas bacias coletoras ao final do canal de acrílico. No entanto, não se pode descartar a presença de transporte de sedimento junto ao leito, o qual pode ter sido imperceptível visualmente durante a realização do experimento.

Finalmente, destaca-se que a erosão do leito móvel foi identificada para todos os ensaios realizados com melamina (excetuando-se melamina 2) pois, após o término dos mesmos, determinados volumes desse material haviam sido depositados em bacias coletoras localizadas na saída do canal de acrílico (ainda dentro do canal longo). A quantidade de material depositado nas bacias foi maior para ensaios com velocidades médias da corrente mais elevadas sendo que, no 1,5MQ3, por exemplo, o volume de material coletado chegou a aproximadamente 2,3 kg. Apesar disso, a erosão identificada visualmente para os leitos compostos por melamina, não foi prevista pelo diagrama de Hjustrom para os ensaios 0,5Mq2^{*}, 0,5Mq3, 0,5MQ2, 0,5MQ3 e 0,5MQ4.

Vale lembrar que alguns experimentos geraram resultados de U e d_{50} plotados praticamente sobre (ou muito próximo) à linha entre as regiões de previsão de erosão e transporte de sedimentos, no diagrama de Hjustrom. Essas linhas representam a transição dos referidos processos, conforme os parâmetros relacionados, podendo representar comportamentos comuns às duas regiões.

Apesar de o diagrama se mostrar útil para alguns ensaios compostos por melamina, onde a erosão foi identificada tanto visualmente (pelo material depositado nas bacias), quanto pela sua previsão, muitos experimentos tiveram resultados divergentes daqueles previstos. A diferença dos processos previstos (erosão e transporte) citados com aqueles experimentalmente observados reforça a existência de diferenças entre os escoamentos à superfície livre e por correntes de densidade. Salienta-se que o diagrama apresentado foi elaborado empiricamente com materiais sedimentares diferentes (no caso quartzo) daqueles utilizados nesse estudo (areia e melamina) e com escoamento à superfície livre.

7.3.1.2 Diagrama de Shields (1936)

O diagrama de Shields é amplamente utilizado no contexto fluvial, para prever o início do movimento dos grãos presentes em leitos móveis, relacionando a tensão de cisalhamento adimensionalizada ($\tau_* = \theta$) e o número de Reynolds do grão (Re_*).

Os valores desses parâmetros, calculados a partir dos resultados desse estudo, foram plotados no diagrama de Shields, como podem ser observados na figura 56, e se distribuem na área do gráfico que prevê a movimentação dos sedimentos utilizados.

Diferente de Hjuström, que estabeleceu condições de transporte, erosão e deposição dos sedimentos, Shields definiu seu diagrama em duas áreas, uma de ausência e outra da presença de movimentação dos grãos. A partir desse diagrama, os valores de tensão crítica de cisalhamento podem ser calculados implicitamente, com os quais podem-se determinar outros parâmetros do escoamento, contribuintes para o avanço desse estudo, como a taxa de transporte de fundo de escoamentos turbulentos.

Para todos os experimentos desenvolvidos, os valores de tensão de cisalhamento do escoamento sobre o leito móvel excederam os valores críticos (linha preta de maior espessura). Isso é, segundo esses valores, em todos os experimentos houve mobilização de grãos presentes no leito móvel, mesmo que os mesmos tenham mostrado a ausência de formas para 12 experimentos (0,5Mq1*, 0,5Mq2*, 0,5FQ1, 0,5FQ2, 0,5FQ3, 1,5Fq1, 1,5Fq2, 0,5Pq1, 0,5Pq2, 0,5Pq3, 1,5Pq1 e 1,5PQ1). Atribui-se a esse fato, as diferenças de capacidade de transporte, para as condições hidráulicas utilizadas na geração do diagrama de Shields, em relação às correntes de densidade e sedimentos utilizados.

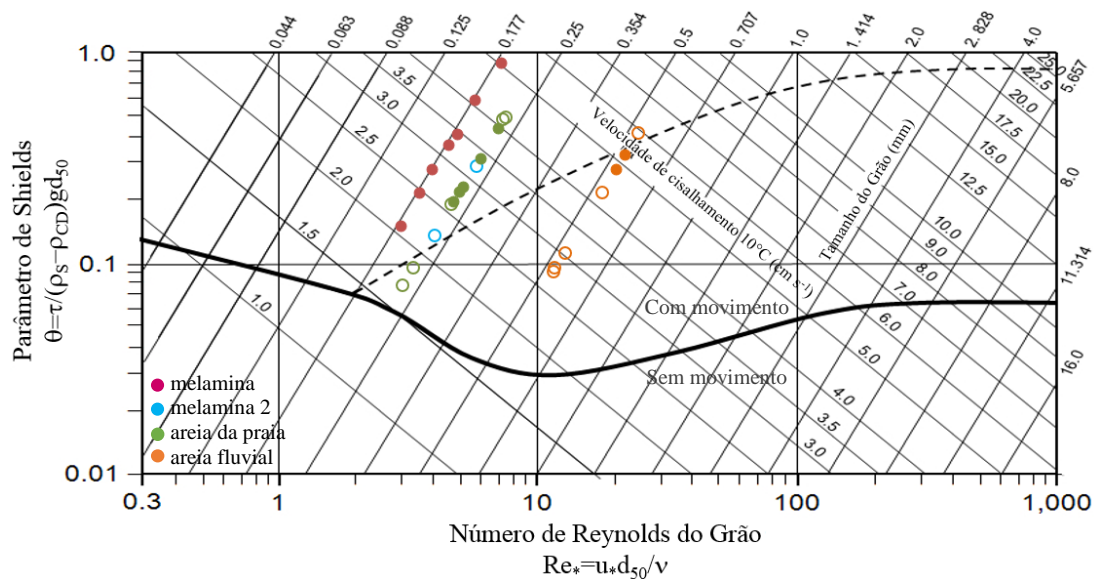


Figura 56. Plotagem de parâmetros dos ensaios no diagrama de Shields.

- Símbolo vazado: leito plano
- Símbolo preenchido: leito não plano

7.3.2 Comprimento e altura das formas de leito

Alguns autores procuraram relacionar dimensões de correntes à superfície livre com parâmetros do leito móvel (Tabela 2, pág. 17), na predição das dimensões (λ e η) das formas de fundo (Baas, 1993; Julien & Klaassen, 1995 e Raudikivi, 1997).

Os resultados dessa análise são apresentados na figura 57 e mostram a relação entre os pontos calculados pelas equações de previsão de comprimento de onda para ondulações, sugeridas pelos referidos autores. Nota-se que a maior parte dos valores de comprimentos de onda calculados é notavelmente inferior àqueles sugeridos pelos autores por meio de suas equações.

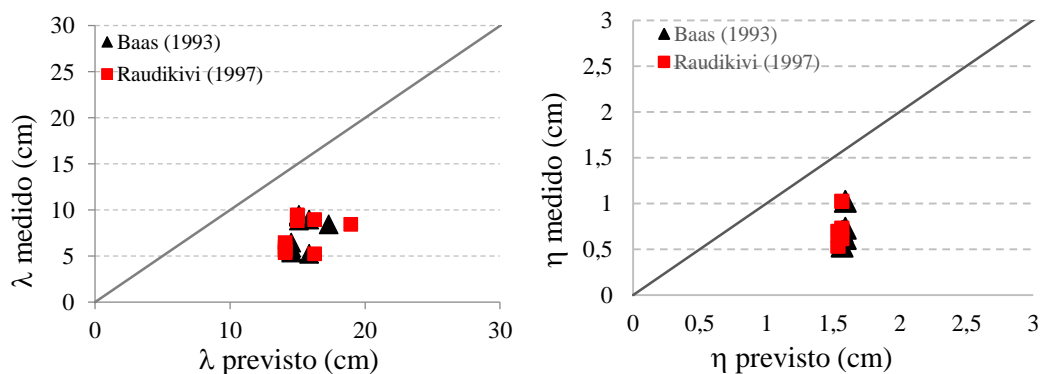


Figura 57. Comparação dos valores medidos de λ e η com os calculados a partir dos modelos (Tabela 2, pág. 17) de Baas (1993) e Raudikivi (1997), para ondulações.

O comprimento das ondulações (λ) foi superestimado pelas equações de previsão, para a todas as formas geradas, cujas dimensões foram possíveis de serem medidas. As formas de leito dos ensaios 1,5MQ2 e 1,5MQ1 apresentaram comprimentos médios (λ) calculados de 63 e 62 %, respectivamente, do comprimento observado após esses experimentos.

Da mesma forma, os valores de altura das formas de fundo (η) previstos mostram resultados inferiores àqueles registrados após os experimentos sendo que, o experimento 1,5Mq1 resultou em um comprimento de leito calculado de 66% daquele observado.

Os experimentos 1,5Mq2, 1,5Mq3, 1,5MQ2 e 1,5MQ3, geradores de dunas, também tiveram suas dimensões comparadas com uma equação de previsão (Tabela 2, pág. 17), próprias para essas formas de fundo (Figura 58). A previsão de Julien and Klaassen (1995) mostrou dimensões de forma previstas bastante diferentes daquelas observadas, superestimando entre 5 e 6 vezes a altura (η) e, entre 7 e 15 vezes o comprimento de onda (λ) das dunas geradas nesse estudo.

Os resultados apresentados indicam que as previsões de dimensões dos autores citados, não se adapta para as formas de fundo por correntes de densidade.

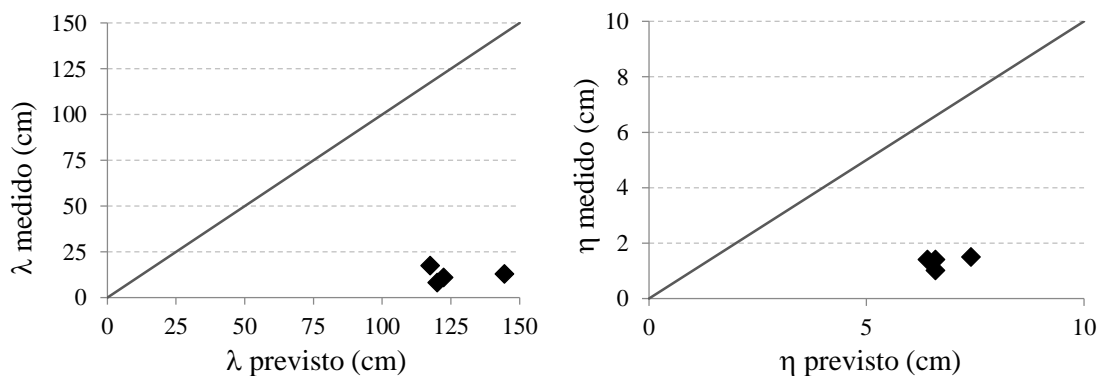


Figura 58. Comparação dos valores medido de λ e η com os calculados, a partir do modelo de Julien and Klaassen (1995), para dunas.

Aconselha-se a realização de um maior número de experimentos geradores de ondulações e dunas para reforçar a análise das dimensões das formas de fundo geradas por correntes de densidade realizada.

7.3.3 Diagramas de previsão de formas de leito

Abaixo são apresentados alguns diagramas utilizados na previsão de formas de leito por escoamentos fluviais, os quais relacionam diferentes parâmetros hidráulicos e sedimentológicos.

A esses diagramas foram acrescentados parâmetros calculados com dados do presente estudo, com o intuito de observar as similaridades e discordâncias entre a previsão de formas de fundo fluviais e por correntes de densidade.

7.3.3.1 Simons and Richardson (1961)

Esse diagrama foi pioneiro na tentativa de prever os tipos de forma de fundo, buscando relacionar dados de diâmetro médio dos grãos com a energia ($U\tau$) fornecida pelo escoamento.

A figura 59 mostra a plotagem desses parâmetros, referentes às correntes de densidade ensaiadas, no diagrama de Simons and Richardson, indicando a incidência da maior parte dos pontos na região de previsão das ondulações.

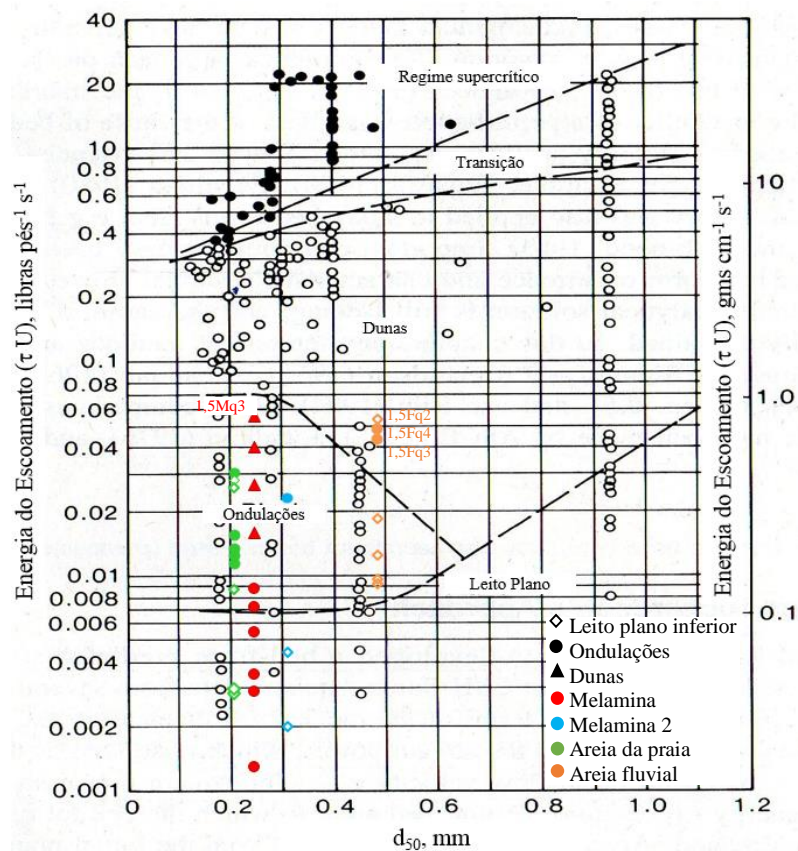


Figura 59. Valores de τU e d_{50} das correntes de densidade do presente estudo, aplicadas ao diagrama de previsão de formas de leito de Simons and Richardson (1961).

Apenas três pontos se encontram na previsão de dunas, referentes aos ensaios 1,5Fq2, 1,5Fq3 e sua repetição, realizados em leito de areia fluvial ($d_{50} = 485 \mu\text{m}$). O experimento 1,5Fq2 desenvolveu leito plano de transição, no entanto, o 1,5Fq3 (e sua repetição, o 1,5Fq4) mostrou ondulações com comprimentos de onda elevando, sugerindo a possibilidade do desenvolvimento de dunas, caso o escoamento persistisse ou sua velocidade fosse levemente elevada.

Além de ondulações, na região prevista para essas formas percebe-se a ocorrência de dunas (1,5Mq2, 1,5Mq3, 1,5MQ2 e 1,5MQ3) e sete leitos planos inferiores (1,5Fq1, 0,5FQ3, 0,5FQ2 e 0,5FQ1, de areia fluvial, e 0,5Pq2, 0,5Pq3 e 1,5PQ1, de areia da praia). Mesmo que localizado na região de ondulações, salienta-se a proximidade do experimento 1,5Mq3 (com maiores dimensões), da região de previsão das mesmas, mostrando coerência na energia do escoamento e diâmetro médio de grãos requeridos para a geração dessa forma.

Os experimentos cujos pontos estão localizados na região prevista para formação de leito plano tiveram como resultado ondulações (0,5MQ2, 0,5MQ3, 0,5MQ4 e 1,5Mq1) e leitos planos inferiores (0,5Mq1*, 0,5Mq2*, 0,5Pq1 e 1,5Pq1). A ocorrência de ondulações nessa região pode ser explicada pela composição do leito utilizada nesses ensaios (melamina) que, como já apresentado, se mostrou como um material mais fácil de ser remobilizado, devido a sua baixa densidade e velocidade de queda.

Ainda, o diagrama mostrou boas previsões para as ondulações geradas em leitos compostos por areia da praia.

7.3.3.2 Southard and Boguchwal (1990)

A figura 60 apresenta os valores de velocidade média (U , m s^{-1}) das correntes de densidade desse estudo, juntamente com o diâmetro médio dos grãos dos leitos testados (d_{50} , mm), plotados no diagrama de Southard and Boguchwal (1990).

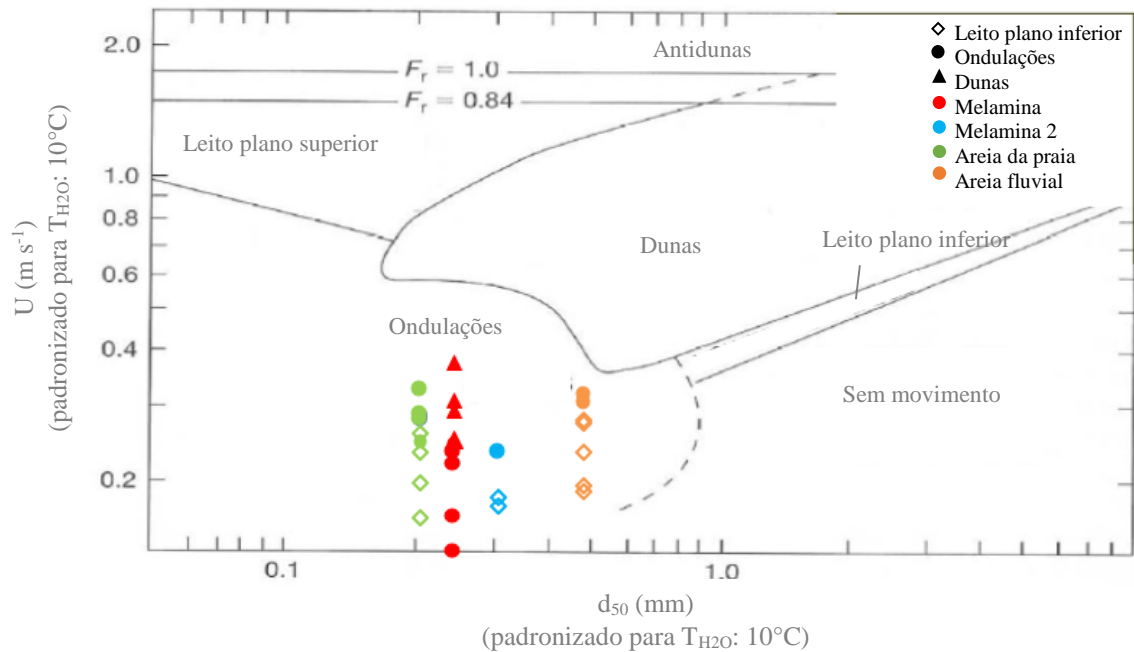


Figura 60. Dados experimentais plotados no diagrama de previsão de formas de leito (Simons & Richardson, 1961).

Apesar de terem sido observados três tipos de formas de leito no presente estudo (leito plano inferior, ondulações e dunas), o diagrama indica a geração de ondulações para todos os experimentos realizados, partir dos valores de velocidade média da corrente e diâmetro médio dos grãos obtidos.

Como causador das diferenças entre as formas observadas e àquelas previstas pelo diagrama, enfatiza-se a diferença entre o perfil de velocidades das correntes de densidade e dos escoamentos em superfície livre, que influenciam na velocidade média do escoamento. Além disso, por ser um parâmetro dimensional, o diâmetro médio dos grãos não leva em consideração a massa específica dos mesmos, o que acaba por influenciar na sua velocidade de queda e mobilização perante a passagem da corrente.

7.3.3.3 Van den Berg and Van Gelder (1993).

Esse diagrama é uma revisão do diagrama de van Rijn (1984), e levando em conta como elemento básico dessa abordagem a influência das tensões de cisalhamento na ocorrência e nas dimensões das formas de leito. Baseia-se no fato de que o transporte junto ao leito e a migração das formas de fundo podem prever razoavelmente a influência do arraste

por forma e relaciona o diâmetro médio dos grãos adimensionalizado com o parâmetro de mobilidade (Φ'), cujos cálculos são apresentados no anexo B desse trabalho.

A figura 61 mostra os valores de parâmetro de mobilidade e do diâmetro adimensionalizado das correntes de densidade e dos leitos desse estudo plotados no diagrama de previsão de Van den Berg and Van Gelder (1993).

Analisando a plotagem dos resultados desse estudo no referido diagrama, percebe-se que todos os experimentos que geraram ondulações (indicadas pelos círculos) estão localizados na região prevista para esse tipo de forma de leito, independentemente do tipo de sedimento utilizado no leito móvel.

Dentre os quatro experimentos classificados como dunas, apenas um (1,5MQ3) está localizado na região de previsão para essas formas, pela influência da sua alta velocidade no cálculo do parâmetro de mobilidade. Os outros três experimentos (1,5Mq2, 1,5Mq3 e 1,5MQ2) estão localizados na região de previsão das ondulações, mas bastante próximos da estabelecida para dunas pelo autor.

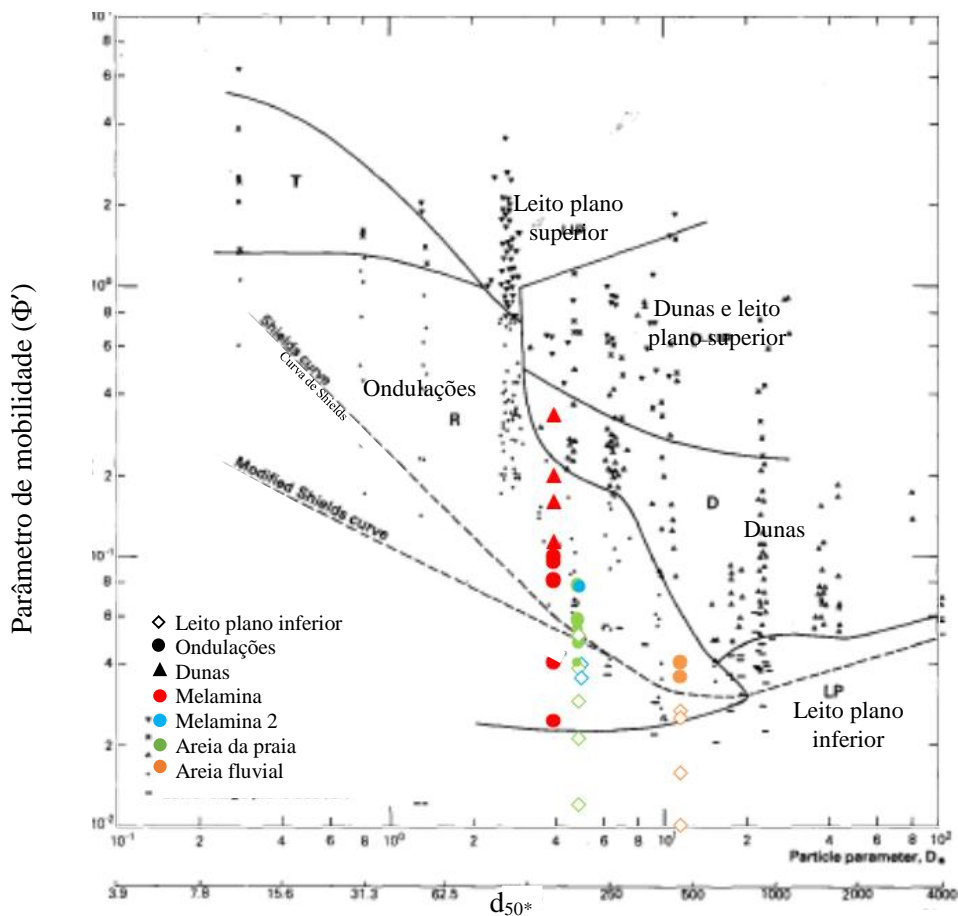


Figura 61. Diagrama de previsão de Van den Berg and Van Gelder (1993) com dados gerados por correntes de densidade.

Perceba que a região inferior do diagrama prevê a ocorrência de leito plano inferior, onde são encontrados quatro experimentos do doze que apresentaram essa configuração. O restante das formas de leito plano inferiores (indicadas pelos losangos) são região inferior da previsão de ondulações, mas ainda abaixo da curva de Shields.

Dessa forma, os resultados obtidos no presente estudo se adaptam bem àqueles previstos pelo diagrama de Van den Berg and Van Gelder (1993). Isso se deve aos fatos de esses autores terem correlacionado parâmetros adimensionais na sua previsão, possibilitando a comparação de resultados obtidos com diferentes escalas e composições de sedimentos.

7.3.4 Discussões parciais

A previsão da presença ou ausência da movimentação dos grãos presentes no leito foi realizada por meio da utilização de dois diagramas, o de Shields e o de Hjüstrom. A previsão gerada por ambos os diagramas indicou que, em todos os ensaios realizados, o escoamento teria a capacidade de movimentar os grãos presentes no leito móvel. Além disso, o gráfico de Hjüstrom previu ainda que, em alguns experimentos, esse transporte dos grãos estaria ocorrendo em conjunto com a erosão do leito.

Salienta-se que esse estudo não realizou o estudo quantitativo da erosão do leito, sendo essa análise feita qualitativamente (visualmente), durante o ensaio, e a partir das imagens registradas, que mostram a movimentação dos grãos em uma região bastante restrita (em torno de 80 cm de imagem, ~ 5% do comprimento total do leito).

Apesar de os referidos diagramas terem sido construídos a partir de sedimentos diferentes dos utilizados no presente estudo, de uma maneira geral, a previsão de ambos os diagramas se mostrou como razoável, uma vez que a ocorrência das dunas e das ondulações prevê a movimentação de grãos juntos ao leito (mesmo que mínima, no caso das ondulações). Por outro lado, os parâmetros referentes às formas de leito plano inferior, geradas nesse estudo, se localizam em uma área de previsão do gráfico de Shields (1936) onde há movimentação dos grãos, evidenciando diferenças entre os experimentos realizados e a previsão do autor (desenvolvida com escoamentos fluviais e sedimentos diferentes dos utilizados no presente estudo).

Em relação à previsão das dimensões das formas de fundo, o comprimento (λ) das formas de fundo foi superestimado pelas equações de previsão das formas de fundo, com acentuada diferença para as dunas, com η entre 7 e 15 vezes. Da mesma forma, os valores de altura das formas de fundo (η) previstos pelas equações mostram resultados superiores

àqueles registrados nos experimentos. Sendo assim, os resultados apresentados parecem indicar que as previsões das dimensões das formas de fundo, por meio dos autores citados, não se adapta para as formas de fundo geradas por correntes de densidade.

A classificação das formas de fundo do presente estudo apresentou algumas discordâncias em relação à previsão de formas de fundo por correntes fluvial. Essas diferenças podem ser atribuídas às condições de escoamento (fluvial) e tipo de sedimento utilizados na construção desses diagramas de previsão de formas de fundo. Dentre os diagramas de abordados, o de Van den Berg and Van Gelder (1993) se mostrou o melhor na previsão de formas de fundo obtidos no presente estudo.

8. CONCLUSÕES

Esse estudo realizou 29 experimentos com o objetivo de simular e investigar a geração de formas de leito por correntes de densidade salina, correlacionando as informações hidráulicas da corrente e as informações granulométricas e morfológicas do leito móvel.

A metodologia experimental desenvolvida se mostrou eficiente, uma vez que reproduziu, em laboratório, o fenômeno de geração de formas de fundo por correntes de densidade. Além disso, os equipamentos utilizados na coleta de dados forneceram dados suficientes para caracterização da dinâmica da corrente de densidade e dos sedimentos utilizados e sobre as formas de leito geradas.

Os resultados indicaram influências dos parâmetros de velocidade, concentração e inclinação na geração das formas de fundo, que ocorrem com maior frequência conforme as seguintes condições: (a) valores elevados de concentrações de corrente de densidade; (b) valores elevados da velocidade máxima da corrente ($u_{m\acute{a}x}$), em relação à velocidade média do perfil (U) e; (c) valores elevados de inclinação do canal, que acaba por influenciar na elevação da velocidade média da corrente.

A combinação dos parâmetros hidráulicos e sedimentológicos apresentados promoveu a geração de regimes subcríticos e supercríticos e de três tipos de forma de leito, aqui classificados com leito plano inferior, ondulações e dunas. A classificação das formas de leito por correntes de densidade manteve-se similar à fluvial, com o intuito de se evitar a criação de novas definições e nomenclaturas. Isso é, apesar de o presente estudo ter identificado a ocorrência de dunas em regime supercrítico e com dimensões consideravelmente menores do que aquelas encontradas em escoamentos fluviais, seu processo de geração é claro e definido pela ocorrência visível do transporte e suspensão dos sedimentos presentes no leito. Além disso, assim como nos processos fluviais, os leitos planos inferiores e as ondulações geradas nesse estudo não apresentaram quantidades visíveis de sedimentos em suspensão.

Sendo assim, em relação aos processos sedimentológicos, a geração das formas de leito por correntes de densidade se mostra similar àquelas geradas por escoamentos fluviais. No entanto, o presente estudo evidenciou a necessidade de se atingir energias de escoamento maiores (regimes supercríticos) na geração de dunas e ondulações, que são formas de fundo subcríticas para escoamentos fluviais.

A composição do leito móvel mostrou ter grande influência no tipo de forma gerada, devido suas densidade, velocidade de queda e diâmetro médio dos grãos que, por sua vez, acabam influenciando os processos de erosão, suspensão e sedimentação dos grãos durante a passagem da corrente. Dos três materiais testados nesse estudo (areia da praia, melamina e areia fluvial), a melamina se mostrou como o sedimento de maior mobilidade e mais propenso a entrar e permanecer em suspensão, seja pela sua baixa densidade, pelo d_{50} não muito distante do da areia da praia, quanto pela sua velocidade de queda menor em relação às areias.

A influência do tempo de realização dos ensaios também foi abordada pela repetição de um ensaio em sequência, sem o nivelamento do leito, mostrando como resultado a geração de ondulações em regiões antes planas e também o aumento do comprimento de onda das ondulações geradas no primeiro ensaio. Isso indica que, para alguns experimentos, as formas de fundo obtidas não atingiram suas dimensões de equilíbrio, devido ao volume de mistura atuar como um limitante da duração do ensaio. Logo, novos estudos poderão focar na maior interação entre o escoamento e o leito móvel, favorecendo na estabilização da corrente de densidade e da evolução dos parâmetros característicos das formas de fundo.

Por fim, em termos gerais, a comparação dos resultados obtidos por correntes de densidade com modelos fluviais de previsão mostrou ocorrências distintas, para condições hidráulicas similares. Sendo assim, destaca-se que as formas de fundo por correntes de densidade não podem ser classificadas e interpretadas com a abordagem fluvial, sem antes levar em consideração as diferenças entre os processos sedimentológicos e, principalmente, hidráulicos de formação das mesmas.

9. CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

9.1 QUANTO À CONTINUIDADE DO ESTUDO

Como continuidade desse estudo, sugere-se a concepção de experimentos que forneçam condições para a geração formas de fundo diferentes daquelas verificadas, de forma a permitir a associação das condições de escoamento com estruturas observadas em ambientes naturais. Para tanto, indica-se a realização de ensaios que contemplem uma maior variedade de parâmetros relativos ao escoamento e ao leito móvel, como a inclinação do canal, que poderão motivar a geração de formas supercríticas (antidunas e degraus cíclicos).

A obtenção de um número mais elevado de tipos de formas em laboratório, a partir de parâmetros hidráulicos e sedimentológicos variados, auxiliará na criação de um diagrama de previsão de formas de fundo característico para o escoamento de correntes de densidade.

Além disso, novos estudos também poderão investigar o início de movimentos dos grãos pelas correntes de densidade, a partir da variação de condições hidráulicas e sedimentológicas, a fim de se desenvolver um diagrama próprio para esse tipo de escoamento.

9.2 QUANTO À COLETA DE DADOS DE CONCENTRAÇÃO

Apesar da baixa frequência de amostragem das concentrações, a mesma era realizada durante a passagem do corpo da corrente (região permanente), minimizando a variabilidade temporal desse parâmetro. Sugerem-se, posteriormente, outras coletas ao longo de mais pontos da corrente para que essa variabilidade e demais parâmetros caracterizadores da corrente e do leito sejam avaliados.

Em relação à determinação da concentração, recomenda-se a busca por equipamentos mais precisos de medição, como sondas de salinidade.

9.3 QUANTO AO BALANÇO DE MASSA

Esse estudo procurou realizar o balanço de massa do sistema, por meio da pesagem do volume de sedimento colocado dentro do canal de acrílico e do material arrastado pela corrente para fora do canal de acrílico, em bacias coletoras, dispostas no final do canal. No entanto, o balanço não pode ser realizado pois a melamina acabou se espalhando para a região entre as paredes do canal de acrílico e do canal longo, não permanecendo nas bacias de contenção e impossibilitando o cálculo correto do balanço de massa do processo. Esse impasse foi solucionado, bloqueando a passagem da melamina para aquela

região pela instalação de telas entre as paredes dos canais, e provocando sua deposição nas bacias de contenção.

A sistema das telas e bacias foi concebido e instalado após o término dos ensaios com melamina. Além disso, foi identificado que os leitos de areia da praia e areia fluvial não eram móveis o suficiente para serem carregados para fora do canal de acrílico, a partir dos parâmetros de ensaio utilizados (inclinação do canal, por exemplo).

Desse forma, se sugere a realização do balanço de massa em novos ensaios cujo leito seja móvel o suficiente para ser carregado para fora do canal de acrílico pela corrente. Assim, será possível conhecer a capacidade de erosão e transporte das correntes de densidade.

9.4 QUANTO À DURAÇÃO DOS ENSAIOS

A duplicação do ensaio 1,5F3 pelo 1,5F4, mostrou a ocorrência da evolução das formas de fundo geradas, evidenciando a influência da duração do ensaio na obtenção de formas de fundo em equilíbrio. Novos ensaios, que tenham por objetivo a obtenção e o estudo das formas de fundo em equilíbrio, deverão ter a sua duração estendida, por meio da instalação de um edutor (efeito venturi) na tubulação e dosagem do sal diretamente nesse sistema. Além disso, caso queira-se estudar a geração e o comportamento das formas de fundo por correntes de turbidez, esse sistema de alimentação também poderá ser utilizado, podendo-se adicionar a ele algum tipo de sedimento (areia, melamina ou carvão, por exemplo).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEXANDER, J. 2008. Bedforms in Froude-supercritical flow. Marine and River Dune Dynamics. Leeds, United Kingdom.
- ALLEN, J. R. L. Mixing at Turbidity Currents Heads, and its Geological Implications. *Journal of Sedimentary Petrology*, Oklahoma, v. 41, p. 97-113, 1971.
- ASHLEY, G. M. Classification of large scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 60, p. 160-172, 1990.
- ATHAULLAH, M. Prediction of bedforms in erodible channels. PhD. Thesis, Colorado State University. 1968.
- BAAS, J. H. 1993. Dimensional Analysis of current ripples in recent and ancient depositional environments. *Geol. Ultraiectina* 106, apud Baas, J. H., 2011.
- BOFFO, C. H. *Caracterização Física de Correntes de Densidade em Ambientes Salinos sob Diferentes Contrastes de Densidades*. 2010. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) –Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- CARDOSO, A. H. *Hidráulica Fluvial*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1998. 314p.
- CARTIGNY, M. J. B.; POSTMA, G. Turbidity current bedforms. In: GUILLEN, J. et al. *Atlas of bedforms in the Western Mediterranean*. New York: Springer. 2016.
- CHANG, H. H. *Fluvial processes in river engineering*. New York: John Wiley, 1988. p. 432.
- CHAPON, J.; MANICA, R.; MAESTRI, R. D. Inferência das Características Hidrodinâmicas de Fluxos de Densidade a Partir de Análise de Formas de Leito. In: Salão de Iniciação Científica, 16, 2004, Porto Alegre. *Anais...* Porto Alegre: UFRGS: 2004. p. 289.
- DEL REY, A. C. *Simulação Física de Processos Gravitacionais Subaquosos: uma aproximação para o Entendimento da Sedimentação Marinha Profunda*. 2006. 243 p. Tese (Doutorado em Geociências) Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.
- DÜCKER, R. E. *Avaliação da Capacidade Portante de Frações Finas nas Correntes de Turbidez*. 2007. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- ELLISON, T. H.; TURNER. J. S. Turbulent entrainment in stratified flows. *Journal of Fluid Mechanics*, v.6, p.423-448, 1959.
- ENGELUND, F.; FREDSOE, J. Sediment ripples and Dunes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Palo Alto, v. 14, p. 13-37, 1982.

FABIAN, S. *Modelagem Física de Correntes de Densidade Conservativas em Canal de Declividade Variável*. 2002. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

FEDELE, J. J., GUENTZEL, K., HOYAL, D. C. Experiments on Bedforms Created by Density Currents. In: *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics Symposium*, 9., 2009. Boca Raton, Fla. Florida: CRC Press: 2009, p. 833-840.

FEDELE, J. J.; HOYAL, D. C.; DRAPER J. M. Supercritical Bedforms Under Density Currents. In: *River Coastal and Estuarine Morphodynamics*. Proceedings of RCEM, Beijing, China, 2011. p. 1–9.

FISCHER, R. V. Flow transformations in sediment gravity flows. *Geology*, Boulder, v. 11, p. 273-274, 1983.

FOLK, R. L.; WARD, W. C. Brazos River bar: a study in the significance of gran size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, Oklahoma, v. 27, p. 3-26. 1957.

GRAF, W. H. *Hydraulics of Sediment Transport*. New York: Mcgraw-Hill Book, 1971. 513 p.

HAND, B. M. Supercritical Flow in Density Currents. *Journal of Sedimentary Petrology*, Oklahoma, vol. 44, n. 3, p. 637-648, 1974.

HJÜSTROM, F. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. 1935. Tese submetida à Universidade de Uppsala, Suécia, apud GRAF, W. H. *Hydraulics of Sediment Transport*. New York: Mcgraw-Hill Book, 1971. 513 p. (Series in Water Resources and Environmental Engineering).

JULIEN, P. Y.; KLAASSEN, G. J. Sand-dune geometry of large rivers during floods. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York: ASCE, v. 121, p. 657-663, 1995.

KENNEDY, J. F., 1963. The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels. *Journal of Fluid Mechanics*. Cambridge, v. 16, n. 4, p.521-546, 1963.

KENNEDY, J. F. The Formation of Sediment Ripples, Dunes, and Antidunes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Palo Alto, v. 1, p. 147-168, 1969.

KNELLER, B. C., BENNETT, S. J., MCCAFFREY, W. D. Velocity and turbulence structure of density currents and internal solitary waves: potential sediment transport and the formation of wave ripples in deep water. *Sedimentary Geology*, Amsterdam, v. 112, p. 235, 1997.

KNELLER, B. C.; BUCKEE, C. The Structure and Fluid Mechanics of Turbidity Currents: a Review of Some Recent Studies and Their Geological Implications. *Sedimentology*, Oxford, v. 47, p. 62–94, 2000.

KOSTIC, S. et al. Cyclic Steps: A Phenomenon of Supercritical Shallow Flow from the High Mountains to the Bottom of the Ocean. *Journal of Hydro-environmental Research*, v. 3, p. 167-172, 2010.

KRUMBEIN, W. C.; SLOSS, L. L. 1963. *Stratigraphy and Sedimentation*. 2. ed. Freeman, San Francisco, apud LEWIS, Douglas W. MCCONCHIE, David. *Practical Sedimentology*. New York: Chapman & Hall, 1994. 213 p.

KUENEN, P.H.; MIGLIORINI, C. I. Turbidity currents as a cause of graded bedding. *Journal of Geology*, Chicago, v. 58, n.2, p. 91-127, 1950.

LEWIS, D. W. & MCCONCHIE, D. M. *Practical Sedimentology*. 2nd edition. Springer. New York, London: Chapman & Hall, 1994.

MANICA, R. *Modelagem física de correntes de densidade não conservativas em canal tridimensional de geometria simplificada*. 2002. 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

MANICA, R. *Geração das correntes de turbidez de alta densidade: condicionantes hidráulico e deposicionais*. Tese de Doutorado. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MIDDLETON, G. V. Experiments on density and turbidity currents I. Motion of the head. *Canadian Journal of Earth Science*, Ottawa, v. 3, p. 523-546, 1966.

MIDDLETON, G. V. Experiments on density and turbidity currents II. Uniform flow of density currents. *Canadian Journal of Earth Science*. Ottawa, v.3, p. 627-637, 1966.

MIDDLETON, G. V. Experimental studies related to problems of flysch sedimentation, 1970. In: LAJOIE, J. (ed.). *Flysch Sedimentology in North America*. Toronto: Business and Economic Service Ltd., 1970. p. 253-272. (Geological Association of Canada. Special paper no. 7).

MIDDLETON, G. V. 1977. Introduction – progress in hydraulic interpretation of sedimentary structures. In: *Sedimentary Processes, Hydraulic Interpretation of Primary Sedimentary Structures*, Soc. Econ. Paleontologists Mineralogists Repr. Ser. 3, 1-15.

MIDDLETON, G. V. Sediment Deposition from Turbidity Currents. *Annual review of earth and planetary sciences*, v. 21, p. 89-114, 1993.

MIDDLETON, G. V.; HAMPTON, M. A. Sediment gravity flows: mechanics of flow and deposition. In: MIDDLETON, G. V.; BOUMA, A. H. (ed.). *Turbidites and Deep Water Sedimentation*. California, 1973. 38p. (SEPM. Short Course Notes).

NORMARK, W.R.; PIPER, D.J.W. Initiation processes and flow evolution of turbidity currents: implications for the depositional record. In: OSBORNE, R.H. (ed.). *From Shoreline to Abyss: contributions in Marine Geology in honor of Francis Parker Shepard*. p. 207-230, 1991. (SEPM, Special Publication 46).

PERILLO, M. M. *Flow, Sediment Transport and Bedforms under combined flows*. 2012. PhD. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA. 2012.

PUHL, E. *Morfodinâmica e condição de equilíbrio do leito sob a ação de correntes de turbidez*. 2012. 155 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RAUDIKIVI, A. J. *Loose boundary hydraulics*. 3.ed. Oxford: Pergamon Press, 1990. 538p.

RAUDIKIVI, A. J. Ripples on stream bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, New York, v.123, n.1, p. 58-64, 1997.

PARKER, G. et al. Experiments on turbidity currents over an erodible bed. *Journal of hydraulic research*, Delft, v. 25, n. 1, p. 123-147, 1987.

POSTMA, G.; NEMEC, W.; KLEINSPHN, K. L. Large floating clasts in turbidites: a mechanism for their emplacement. *Sedimentary Geology*, Amsterdam, v. 58, p. 47-61, 1988.

SEQUEIROS, O. E. et al. Bedload transport and bed resistance associated with density and turbidity currents. *Sedimentology*, Oxford, v. 57, n. 6, p. 1463-1490, 2010.

SEQUEIROS, O. E. Estimating turbidity current conditions from channel morphology: a Froude number approach. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v. 117, n. C04003, 2012.

SHIELDS, A. 1936. Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbelens forschung auf die Geschiebebewegung. Berlin: Mitteilungen der Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau. apud CHANG, H.H. *Fluvial processes in river engineering*. New York: John Wiley, 1988. p. 432.

STACEY M. W.; BROWN, A. J. Vertical structure of density and turbidity currents: Theory and observations. *Journal Geophysical Research*, Washington, v.93, p.3528-3542, 1988.

SIMONS, D. B.; RICHARDSON, E. V. Forms of Bed Roughness in Alluvial Channels. *Journal of the Hydraulics Division*, New York, v. 87, n.3, p. 87-105, 1961.

SIMONS, D. B.; RICHARDSON, E. V. *Resistance to Flow in Alluvial Channels*. Washington: Government Printing Office, 1966. (Geological Survey professional paper 422-J).

SIMPSON, J. E. Gravity currents in the laboratory, atmosphere, and ocean. *Annual Review Fluid Mechanics*, Palo Alto, v. 14, n 2, p. 213-234, 1982.

SIMPSON, J. E.; BRITTER, R. E. The dynamics of the head of a gravity current advancing over a horizontal surface. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge, v. 94, n. 3, p. 477-495, 1979.

SOUTHARD J. B.; BOGUCHWAL, L. A. Bed Configurations in Steady Unidirectional Water Flows: Part 2. Synthesis of Flume Data. *Journal of Sedimentary Petrology*, Oklahoma, v. 60, n. 5, p. 658-679, 1990.

SPINEWINE, B. et al. Experiments on wedge-shaped deep sea sedimentary deposits in mini basins and/or on channel levees emplaced by turbidity currents. Part II. Morphodynamic evolution of the wedge and of the associated bedforms. *Journal of Sedimentary Research*, vol. 79, n. 8, p. 608-628, 2009.

SUN, T.; PARKER, G. Transportational cyclic steps created by flow over an erodible bed. Part 2. Theory and numerical simulation. *Journal of Hydraulic Research*, Delft, v. 43, n. 5, p. 502-514, 2005.

TAKI, K.; PARKER, G. Transportational cyclic steps created by flow over an erodible bed. Part 1. Experiments. *Journal of Hydraulic Research*, Delft, v. 43, n. 5, p. 488-501, 2005.

TALLING, P. J. et al. Key Future Directions for Research on Turbidity Currents and Their Deposits. *Journal of Sedimentary Research*, Oklahoma, v. 85, p. 153–169, 2015.

VAN DEN BERG, J. H., VAN GELDER, A. 1993. A new bedform stability diagram, with emphasis on the transition of ripples to plane bed in flows over fine sand and silt. In: MARZO, M.; PUIGDEFÁBREGAS, C. (ed.). *Alluvial Sedimentation*. Boston: Blackwell, 1993. p. 11-21. (Special publication number 17 of the International Association of Sedimentologists).

VAN RIJN, L. C., 1984. Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness. *J. Hydraulic. Eng.* 110 (12): 1733-1754.

WENTWORTH, C. K. A Scale of Grade and Class Terms for Clastic Sediments. *The Journal of Geology*. vol. 30, n 5, p. 377-392, 1922 apud LEWIS, D. W.; MCCONCHIE, D. *Practical Sedimentology*. Chapman & Hall, 1994. 213 p.

WINTERWERP, J.C. et. al. Hyperconcentrated sand-water mixture flows over erodible bed. *Journal Hydraulic engineering*, New York, v. 118, p. 1508–1525, 1992.

ANEXO A – Visualização de topo das formas de fundo

A seguir são apresentadas as visualizações de topo dos ensaios que geraram formas de fundo de fundo. Não são apresentadas as visualizações dos experimentos 0,5MQ3 e 0,5MQ4, por falta de dados. Em cada montagem, pode-se observar a geometria das cristas das formas de fundo ao longo do canal, desde a entrada da corrente (flecha azul), até o final do canal. Na montagem são identificadas a janela de observação (verde pontilhado), a região onde as fotografias laterais foram obtidas (preto pontilhado), o posicionamento da medição das velocidades - UVP (laranja) e das concentrações – sífões (roxo).

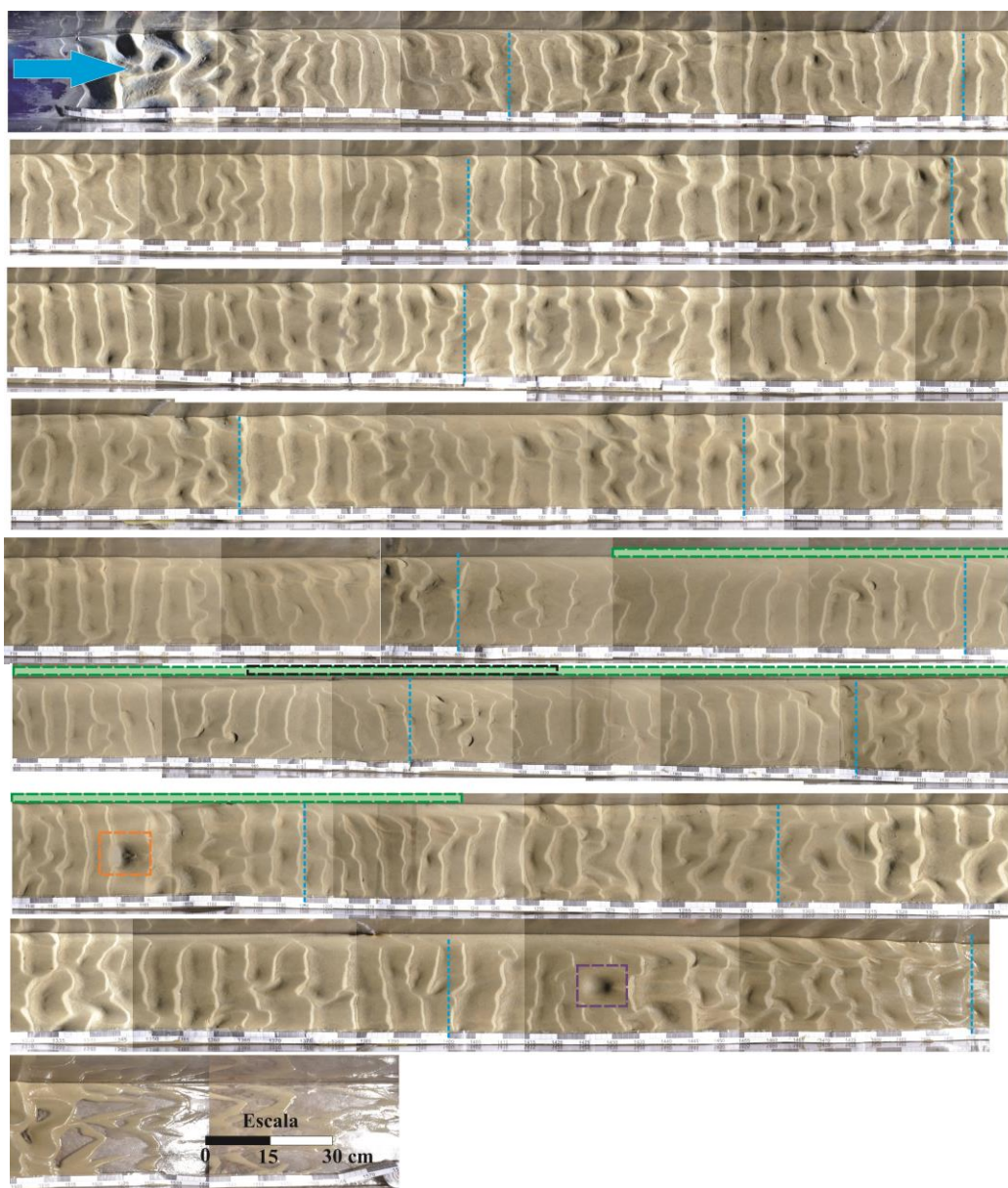


Figura 62. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5Pq3 ao longo do canal.

- - - - - marcação de cada metro do canal
- [] sonda UVP
- [] sonda de sífões
- [] janela de observação
- [] fotografias laterais

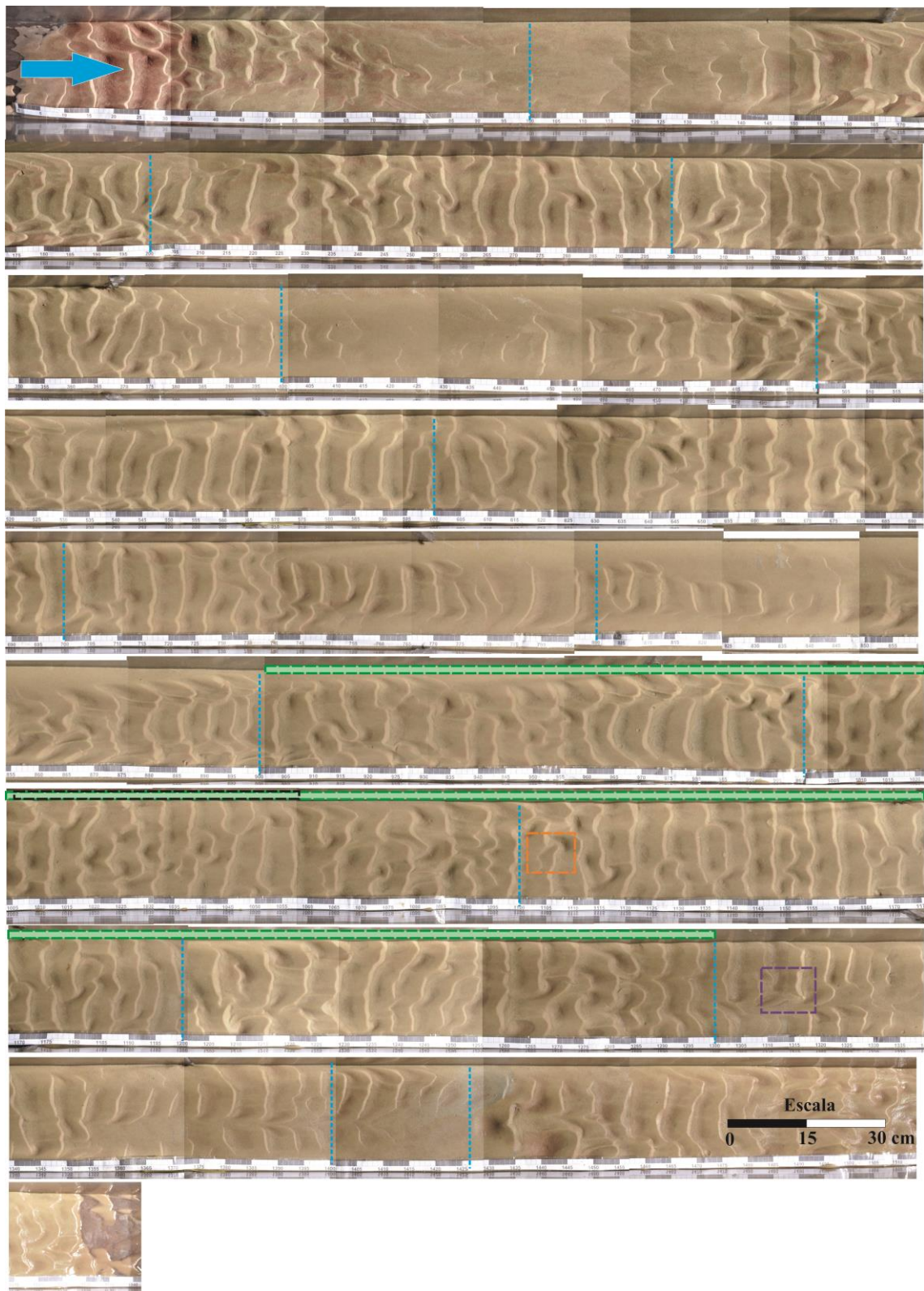


Figura 63. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5Pq4 ao longo do canal.

- marcação de cada metro do canal

--- janela de observação
- sonda UVP

--- sonda de sifões

--- fotografias laterais



Figura 64. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5PQ2 ao longo do canal.

- marcação de cada metro do canal

■■■■ janela de observação
- sonda UVP

□ sonda de sifões

□□□□ fotografias laterais

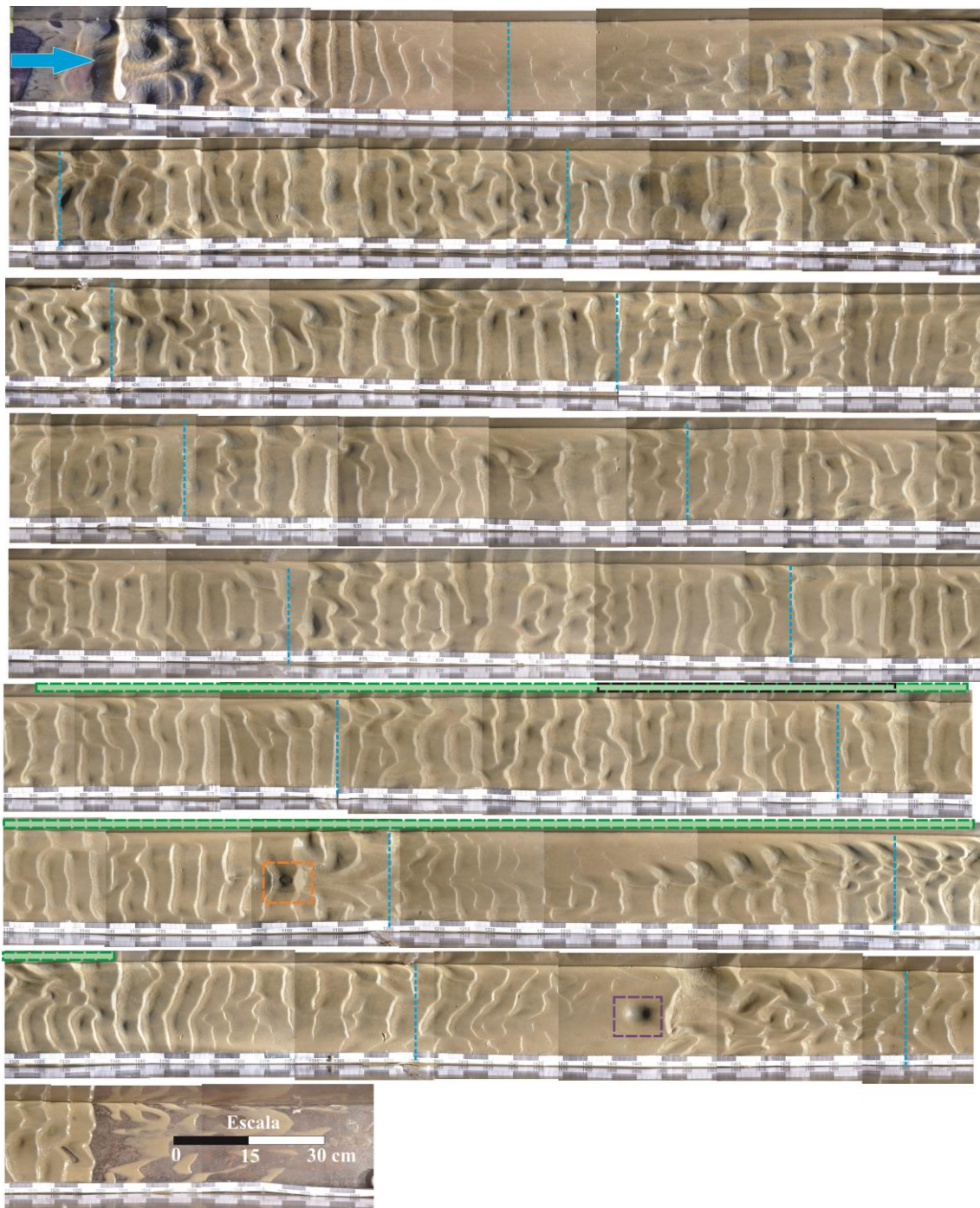


Figura 65. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5PQ3 ao longo do canal.

- - - - - marcação de cada metro do canal □ sonda UVP □ sonda de sifões
 - - - - - janela de observação □ fotografias laterais

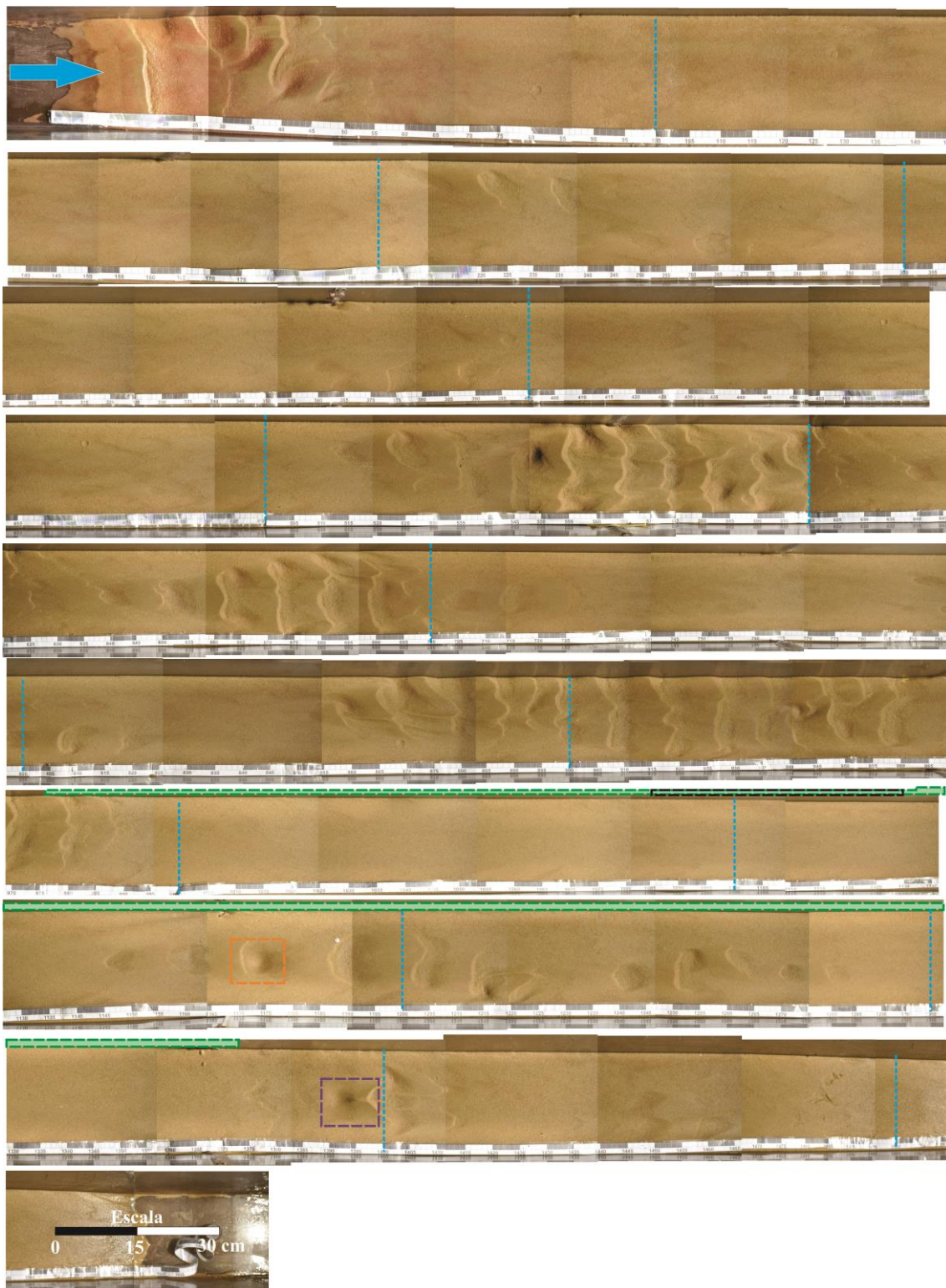


Figura 66. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5Fq3 ao longo do canal.

- - - - - marcação de cada metro do canal □ sonda UVP □ sonda de sifões
□ janela de observação □ □ □ □ fotografias laterais

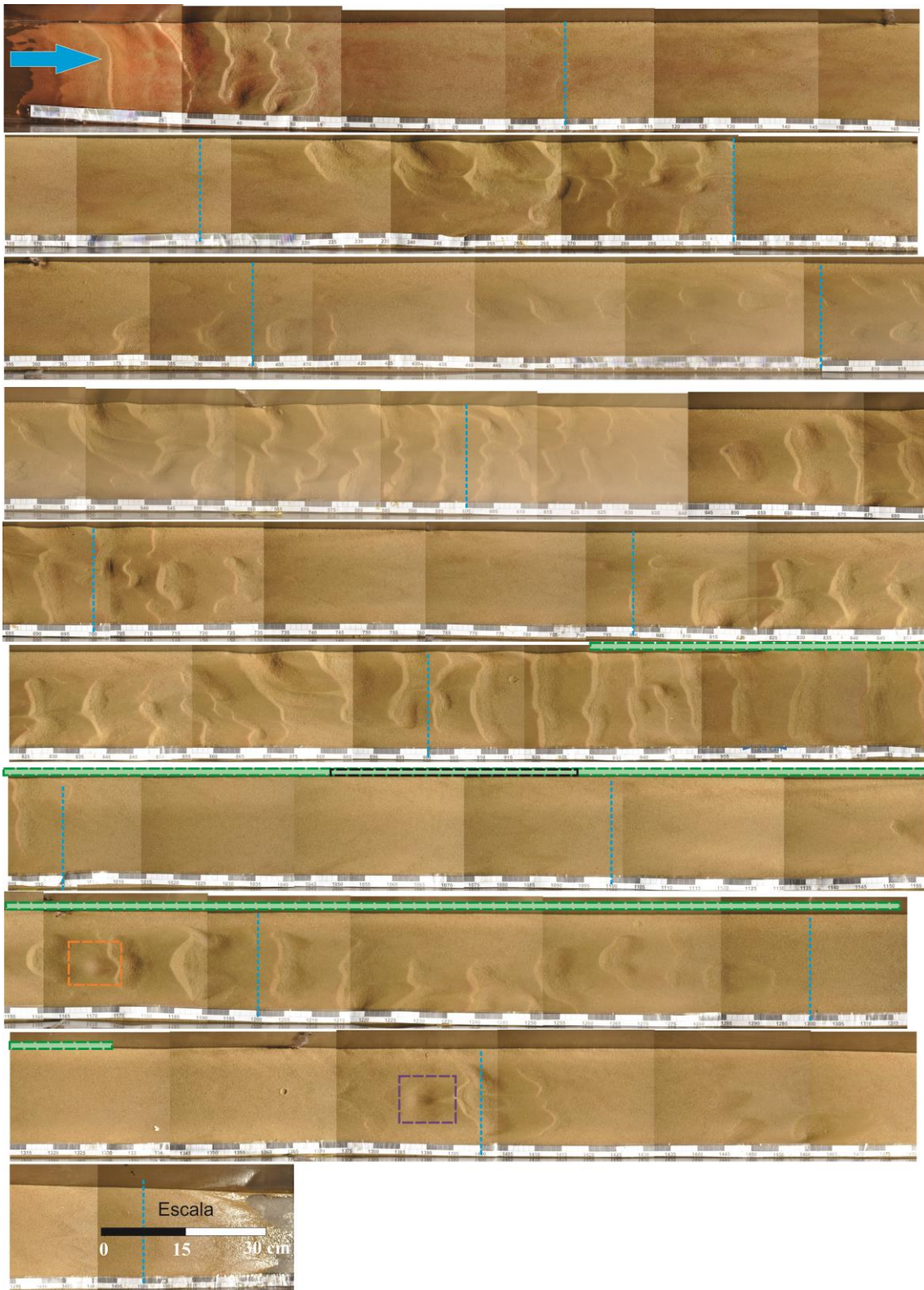


Figura 67. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5Fq4 ao longo do canal.

- - - - - marcação de cada metro do canal □ sonda UVP □ sonda de sifões
 - - - - - janela de observação □ □ □ □ fotografias laterais

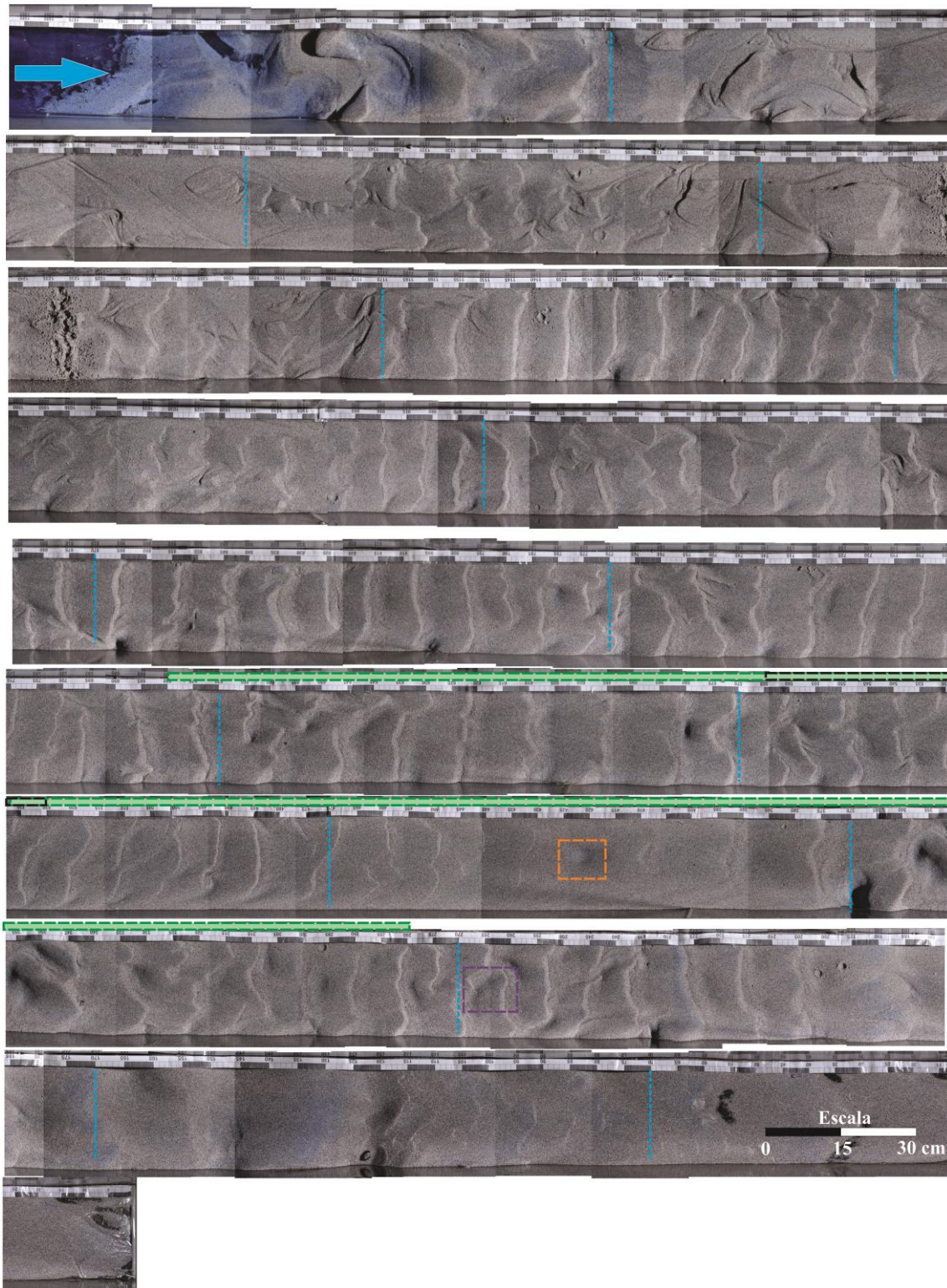


Figura 68. Vista superior das formas de fundo do ensaio 0,5Mq3 ao longo do canal.

- - - - - marcação de cada metro do canal □ sonda UVP □ sonda de sifões
 - - - - - janela de observação □ fotografias laterais

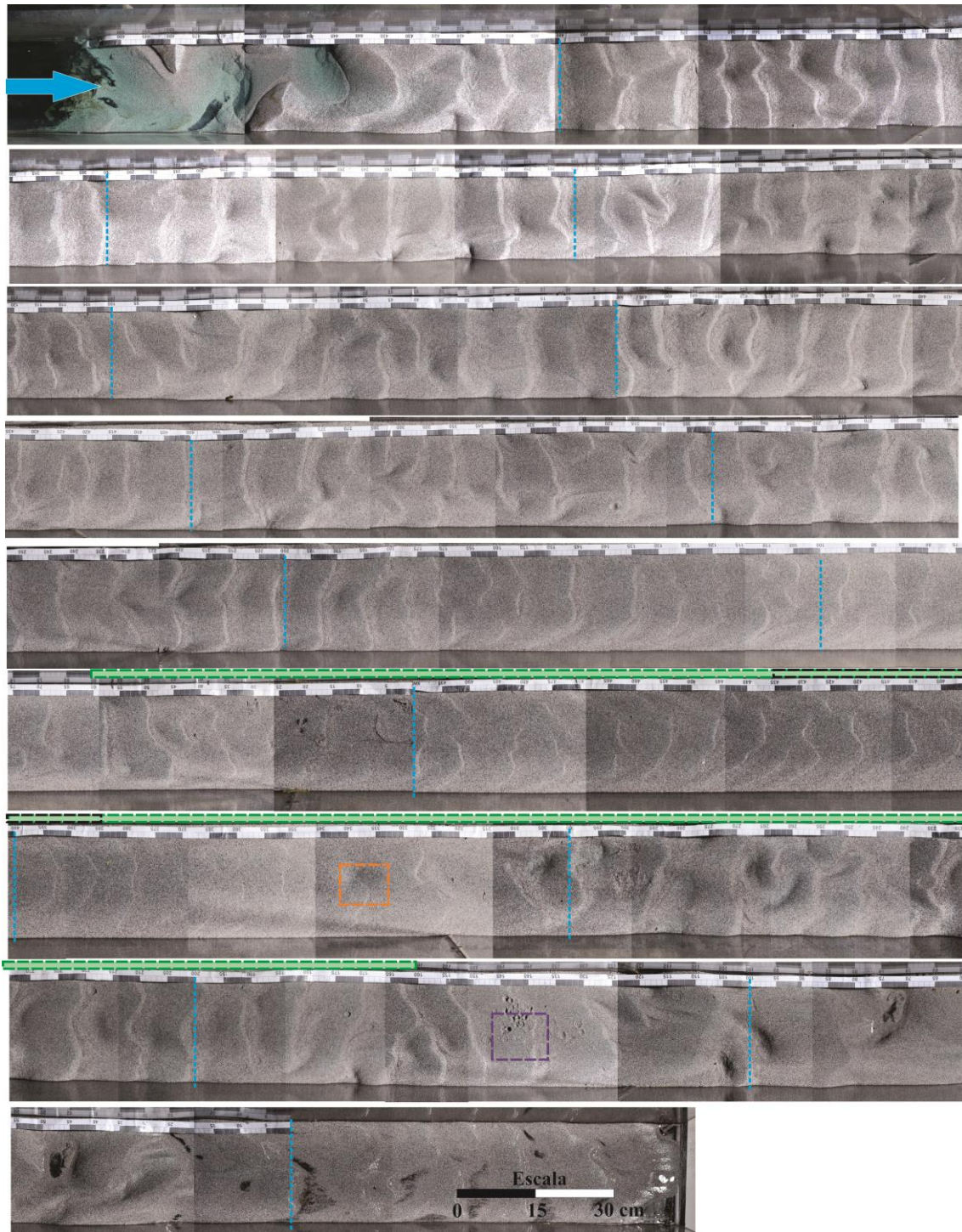


Figura 69. Vista superior das formas de fundo do ensaio 0,5MQ2 ao longo do canal.

- - - marcação de cada metro do canal
- □ □ □ sonda UVP
- □ □ □ sonda de sifões
- - - - janela de observação
- □ □ □ fotografias laterais



Figura 70. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5Mq1 ao longo do canal.

- - - - - marcação de cada metro do canal
- sonda UVP
- sonda de sifões
- - - - - janela de observação
- fotografias laterais

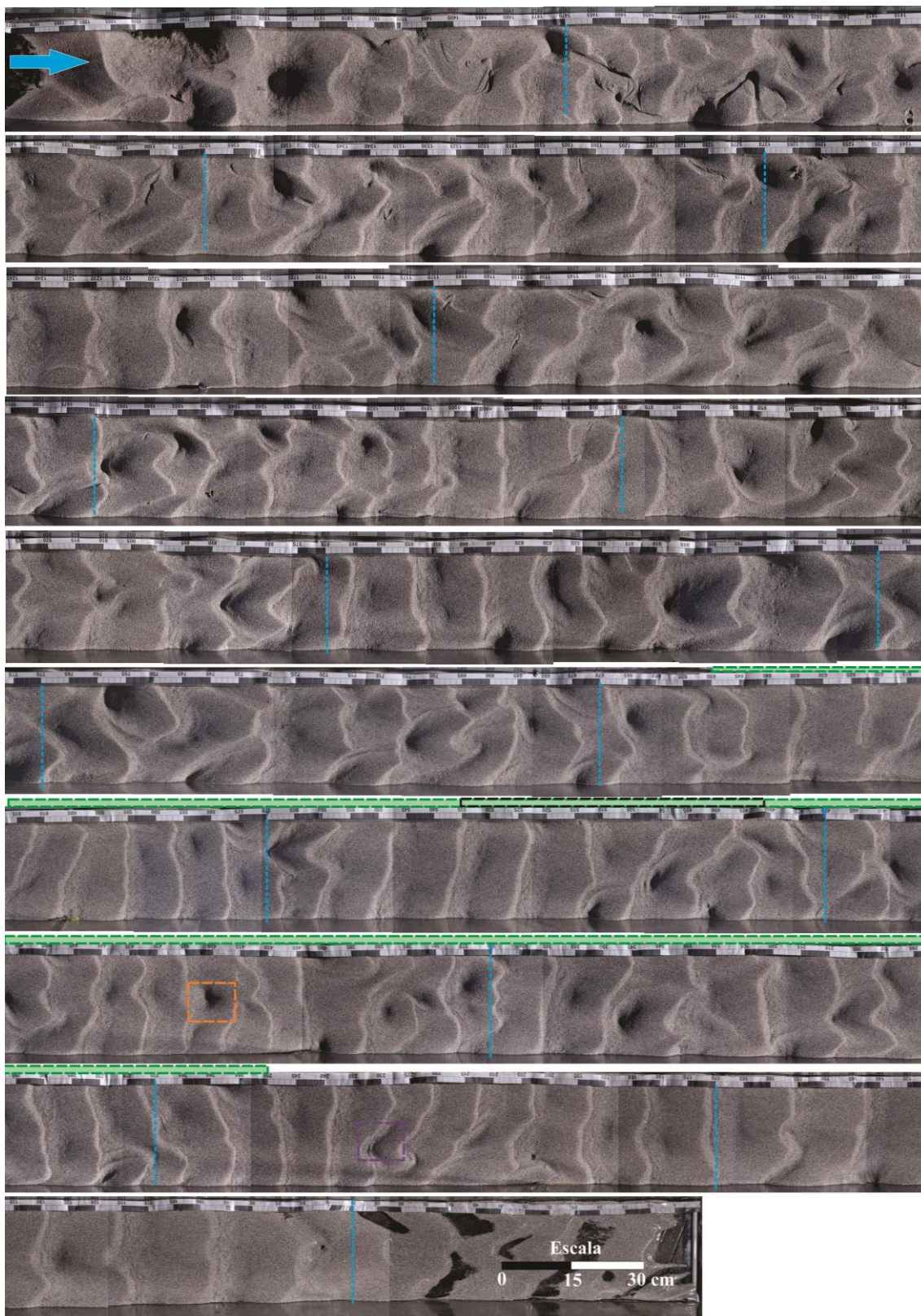


Figura 71. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5Mq2 ao longo do canal.

- marcação de cada metro do canal
- sonda UVP
- sonda de sifões
- janela de observação
- ⌌ fotografias laterais

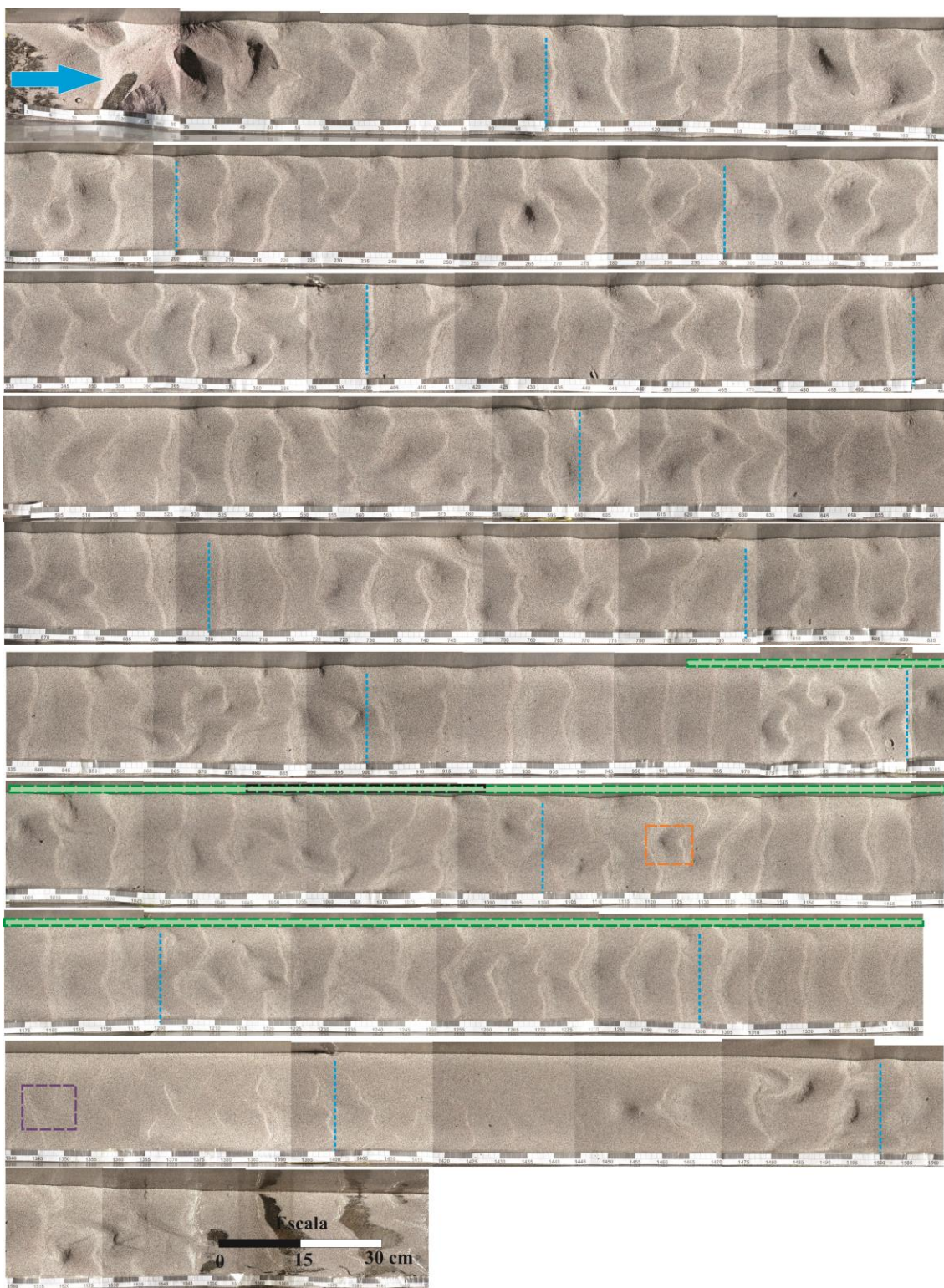


Figura 72. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5MQ1 ao longo do canal.

- - - - - marcação de cada metro do canal □ sonda UVP □ sonda de sifões
 ■■■■■ janela de observação □□□□□ fotografias laterais

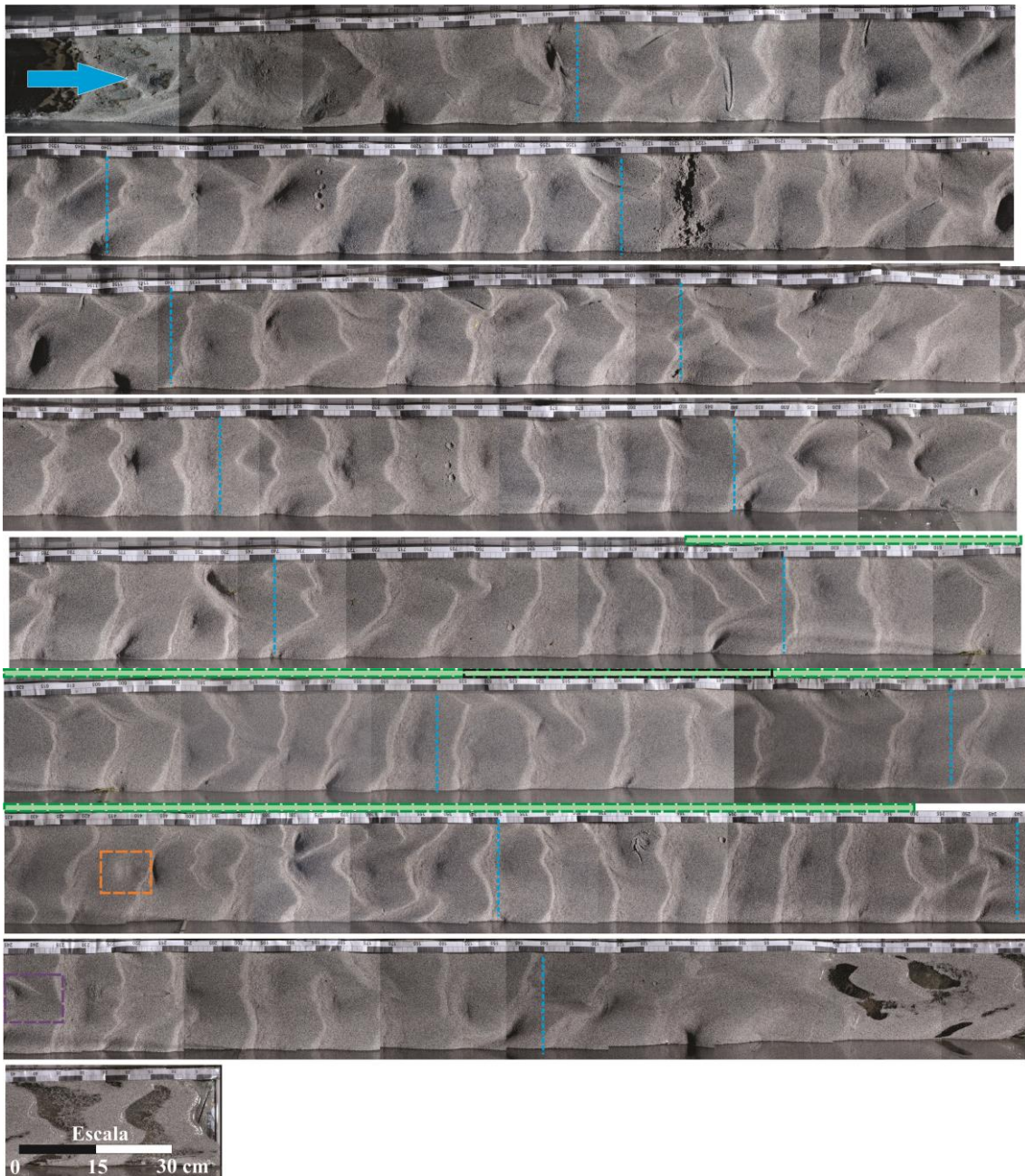


Figura 73. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5MQ2 ao longo do canal.

- - - - - marcação de cada metro do canal
- [] sonda UVP
- [] sonda de sifões
- - - - - janela de observação
- [] fotografias laterais

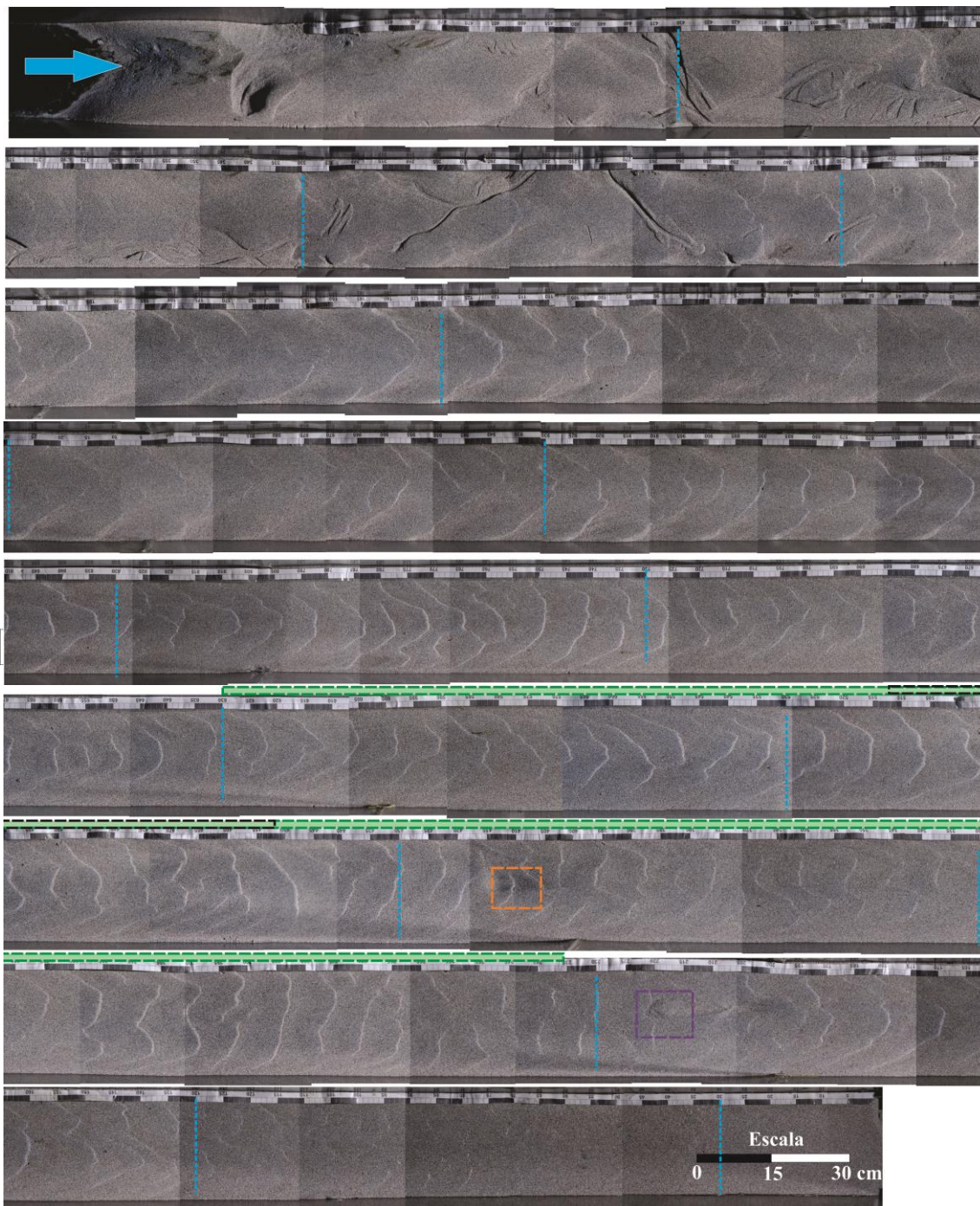


Figura 74. Vista superior das formas de fundo do ensaio 1,5MQ3 ao longo do canal.

- marcação de cada metro do canal

■■■■ janela de observação
- sonda UVP

□ sonda de sifões

□□□□ fotografias laterais

ANEXO B - Cálculo do parâmetro de mobilidade dos grãos

O cálculo e os resultados (Tabela 13) do parâmetro de mobilidade dos grãos (Φ'), utilizado como dado de entrada do diagrama de Van den Berg (1993), são apresentados como segue.

$$\Phi' = \frac{\rho_{CD} U^2}{(\rho_s - \rho_{CD}) C'^2 d_{50}}$$

Sendo,

$$C' = 18 \log \left(\frac{4H}{d_{90}} \right)$$

Onde:

Φ' : parâmetro de mobilidade;

ρ_{CD} : massa específica da corrente de densidade (kg m^{-3});

ρ_s : massa específica do sedimento do leito (kg m^{-3});

U : velocidade média da corrente de densidade (m s^{-1});

H : espessura média da corrente de densidade (m);

C' : coeficiente de Chèzy;

d_{50} : diâmetro médio dos grãos (m).

d_{90} : diâmetro característico dos grãos, no qual 90% das partículas apresentam diâmetros menores (m).

Tabela 14. Dados utilizados no cálculo do parâmetro de mobilidade (Φ').

d_{90} (mm)	H (m)	C'	d_{50} (mm)	U ($m s^{-1}$)	ρ_s ($kg m^{-3}$)	ρ_{CD} ($kg m^{-3}$)	Φ'	d_{50}^*
0,041	0,25	60,8	0,245	0,185477	1500	1016	0,08	3,9
0,041	0,25	60,9	0,245	0,13035	1500	1025	0,04	3,9
0,041	0,25	61,0	0,245	0,200868	1500	1018	0,09	3,9
0,041	0,23	60,3	0,245	0,147664	1500	1010	0,05	4,9
0,041	0,23	60,2	0,245	0,183363	1500	1024	0,08	3,9
0,041	0,23	60,4	0,245	0,261152	1500	1012	0,16	3,9
0,041	0,19	58,9	0,245	0,36089	1500	1028	0,33	3,9
0,041	0,19	58,7	0,245	0,281255	1500	1019	0,20	3,9
0,041	0,20	59,1	0,245	0,216437	1500	1010	0,11	3,9
0,033	0,23	62,0	0,206	0,248265	2650	1008	0,05	4,8
0,033	0,17	59,7	0,206	0,301762	2650	1021	0,08	4,8
0,033	0,17	59,7	0,206	0,214598	2650	1009	0,04	4,8
0,033	0,14	58,2	0,206	0,252743	2650	1018	0,06	4,8
0,033	0,16	59,1	0,206	0,247759	2650	1017	0,05	4,8
0,041	0,24	60,5	0,245	0,103558	1500	1005	0,02	3,9
0,041	0,25	61,1	0,245	0,211065	1500	1005	0,10	3,9
0,079	0,24	55,4	0,485	0,152599	2650	1004	0,01	11,3
0,079	0,17	52,6	0,485	0,241029	2650	1009	0,03	11,3
0,079	0,16	52,4	0,485	0,292041	2650	1018	0,04	11,3
0,079	0,16	52,4	0,485	0,275011	2650	1016	0,04	11,3
0,079	0,25	55,7	0,485	0,24521	2650	1025	0,03	11,3
0,079	0,26	56,1	0,485	0,197724	2650	1009	0,02	11,3
0,079	0,27	56,3	0,485	0,159423	2650	1005	0,01	11,3
0,0325	0,29	63,9	0,206	0,128659	2650	1002	0,01	4,8
0,0325	0,29	63,8	0,206	0,198318	2650	1014	0,03	4,8
0,0325	0,24	62,6	0,206	0,255249	2650	1023	0,05	4,8
0,0487	0,26	60,0	0,31	0,139575	1500	1005	0,04	4,9
0,0487	0,20	58,0	0,31	0,198247	1500	1006	0,08	4,9
0,0325	0,20	61,2	0,206	0,22575	2650	1004	0,04	4,8
0,0325	0,20	60,9	0,206	0,162823	2650	1003	0,02	4,8