



Tiago Jorge Marques Ferreira

Estudo Experimental da Erosão Localizada a Jusante da Descarga de Fundo de uma Barragem

Universidade do Minho
Escola de Engenharia





Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Tiago Jorge Marques Ferreira

Estudo Experimental da Erosão Localizada
a Jusante da Descarga de Fundo
de uma Barragem

Dissertação de Mestrado
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação da
Professora Doutora Maria Manuela Carvalho Lemos
Lima

AGRADECIMENTOS

Depois de um árduo e trabalhoso percurso consegui finalmente alcançar uma das etapas mais importantes da minha vida.

Agradeço em primeiro lugar à minha orientadora Professora Doutora Manuela Lima, pela liberdade da escolha do meu tema, assim como a autonomia para poder decidir e escolher os materiais a usar, e pelo acompanhamento dos meus trabalhos dando sugestões e críticas, pela disponibilidade demonstrada ao longo de todo o trabalho, assim como pela colaboração nesta reta final. Agradeço igualmente ao Grupo de Hidráulica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho pela inspiração do meu tema e motivação para olhar para o futuro com otimismo e confiança.

Aos meus pais, pelo apoio ao longo destes anos, pelo esforço necessário neste percurso académico, principalmente pela paciência ao longo deste último ano, quando os níveis de ansiedade foram sendo cada vez maiores.

À minha irmã pela paciência, compreensão, apoio e carinho demonstrado ao longo destes anos, uma vez que ela foi a minha mais fiel confidente, estando presente nos meus muitos bons e maus momentos.

Aos meus amigos que me acompanharam, apoiaram e me ajudaram ao longo desta minha experiência, alguns que a partilharam comigo quer a nível de estudo quer a nível de lazer e outros que esperavam ouvir as minhas aventuras por aqui passadas e que agora anseiam por novas histórias das novas etapas que se avizinham.

A todos o meu muito obrigado!

RESUMO

Os fenómenos de erosão localizada assumem um papel importante nas obras fluviais e marítimas. A compreensão deste fenómeno e a sua correta previsão é fundamental para um projeto bem-sucedido e pode ser alcançada recorrendo a uma abordagem experimental simplificada, essencial para a validação de modelos teóricos e numéricos.

A presente dissertação descreve um estudo tudo experimental sobre a evolução temporal das dimensões das cavidades de erosão, provocada pelo modelo simplificado de uma descarga de fundo de uma barragem, demonstrando a possibilidade de estudar estes fenómenos de forma rápida e económica.

Adotou-se uma barragem de paramento vertical à escala 1/500 e simulou-se a descarga de fundo recorrendo a um orifício de eixo horizontal. Utilizaram-se diâmetros dos orifícios iguais a 5, 3,6 e 2 mm, localizados a distâncias do fundo iguais a 0, 1 e 2 cm. Adotou-se para cada orifício um caudal máximo e repetiram-se os mesmos ensaios para um caudal reduzido em 20%. Avaliou-se a influência da granulometria dos sedimentos recorrendo a areias de diâmetros médios iguais a 1,425, 0,638 e 0,338 mm e estudou-se a influência da altura da água a jusante da descarga variando-a entre 0 e 2 cm.

Para caracterizar as cavidades de erosão, recorreu-se ao registo em vídeo dos ensaios utilizando uma máquina de filmar digital vulgar e à posterior análise das imagens recolhidas. Esta técnica revelou-se de simples utilização e adequada aos objetivos pretendidos. Foi possível determinar o perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo em diferentes instantes, e determinar a evolução temporal do fenómeno.

Palavras-chave: Erosão localizada, barragens, leito móvel, descarga de fundo, visualização de escoamentos, processamento de imagem

ABSTRACT

The phenomenon of localized erosion, i.e. scour, plays an important role in maritime and river works. The understanding of this phenomenon and its correct prediction is crucial for a successful design and can be achieved using a simplified experimental approach, essential for the validation of theoretical and numerical models.

The present dissertation describes an experimental study about the temporal evolution of the dimensions of erosion cavities caused by the simplified model of a dam's bottom discharge, showing the possibility of studying these phenomena quickly and inexpensively.

A vertical dam at a length scale equal to 1/500 was adopted, and to the bottom discharge was simulated by means of an horizontal axis orifice. The orifice diameters were equal to 5, 3.6 and 2 mm, and were located at distances from the bottom equal to 0, 1 and 2 cm. For each orifice diameter a maximum flow rate was adopted, and the same tests were repeated reducing the flow rate by 20%. The influence of particle size was evaluated using sand of mean diameters equal to 1.425, 0.638 and 0.340 mm and the influence of the water level downstream of the discharge varying it between 0 and 2 cm was studied.

It was possible to characterize the erosion cavities by means of recording the video images of the tests, using a camcorder and ordinary digital image analysis. This technique proved to be simple to use and appropriate to the intended objectives of this work. It was possible to determine the longitudinal profile of the sediment bed downstream of the bottom outlet at different times, and to determine the time evolution of the phenomenon.

Keywords: scour, dams, bed of sediments, bottom discharge flow, visualization, image processing

SIMBOLOGIA

B	largura da secção transversal
B_f	largura do fundo
B_x	função
B_y	função
C	constante
c_1	constante 1
c_2	constante 2
d	diâmetro característico dos sedimentos
D	diâmetro do orifício
D_a	diâmetro médio da areia
d_{50}	diâmetro para o qual 50% em peso passa na malha quadrada de dimensão d de um peneiro
F_r	número de Froude
F_d	força de arrastamento
F_1	força de suspensão
F_g	peso submerso
F_D	força de arrastamento
f	função
g	aceleração gravítica
i	indicador numérico
i_1	declive pequeno
h	altura do escoamento
h_b	profundidade da submersão
h_o	altura do colchão de água
h_m	altura do orifício
h_d	altura de deposição
H	altura do escoamento a montante
H_{b0}	profundidade do leito submerso

H_{up}	profundidade a montante
J	declive
K_s	rugosidade (coef. de Strickler)
K	coeficiente de Lane
L	comprimento
L_b	comprimento de submersão
m	coeficiente angular
P	altura do orifício
Q	caudal
Q_m	caudal do modelo
Q_p	caudal do protótipo
Re	número de Reynolds
s	secção
s_1	$\frac{\rho_s}{\rho}$
S	profundidade de erosão
S_i	ensaio
t	tempo
U	velocidade média
U_{cr}	velocidade de escoamento crítica
u_{*c}	velocidade de atrito
V	velocidade
V_{bo}	velocidade na secção da submersão
V_{up}	velocidade a montante
W	peso
W_s	velocidades de queda das partículas
X_s	distância da erosão
X_d	distância da deposição
X_c	tensão crítica de Shields
Y	tensão crítica de arrastamento
$z \left(\frac{H}{V}\right)$	inclinação das margens
Z	coordenada vertical original
ν	viscosidade cinemática

θ	ângulo
θ_r	ângulo de atrito interno
τ_0	tensão de arrastamento
γ_s	peso volúmico particulados sedimentos
γ	peso volúmico do fluido
τ_c	tensão crítica de arrastamento
σ_D	Coefficiente de graduação da distribuição granulométrica
ρ_s	massa volúmica dos sedimentos
ρ	massas volúmica da água
λ_l	escala de comprimentos
λ_Q	escala de caudais
φ	função

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vii
Simbologia	ix
ÍNDICE	xiii
ÍNDICE DE TABELAS	xxiii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xxv
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Organização da Dissertação	3
2 Revisão Bibliográfica.....	5
2.1 Erosão em escoamentos superfície livre	5
2.1.1 Escoamento com superfície livre	5
2.1.2 Escoamentos laminares e turbulentos	6
2.1.3 Escoamentos lentos e rápidos.....	6
2.2 Propriedades dos sedimentos	7
2.2.1 Propriedades físicas dos sedimentos	7
2.2.1.1 Propriedades dos grãos.....	8
2.2.1.2 Misturas granulométricas	8
2.2.2 Caracterização do processo erosivo	9
2.2.2.1 Tipos de erosão hídrica	9
2.3 Início do transporte de sólidos por arrastamento	9
2.3.1 Tensão crítica de arrastamento	10
2.3.2 Diagrama de Shields.....	14

2.3.3	Critério de velocidade média crítica.....	16
2.4	Configurações do fundo	18
2.4.1	Rugas e dunas.....	20
2.4.2	Leito superior	20
2.4.3	Antidunas	21
2.4.4	Considerações finais.....	21
2.5	Barragens.....	22
2.6	Erosão nas proximidades das estruturas hidráulicas	29
3	MÉTODO EXPERIMENTAL.....	35
3.1	Instalação experimental.....	35
3.1.1	Canal.....	35
3.1.2	Areia.....	36
3.1.3	Secção de Teste	37
3.2	Condições Experimentais	38
3.3	Metodologia Experimental.....	46
3.4	Processamento de Imagem.....	47
3.5	Processamento de resultados	52
4	Resultados e discussão.....	55
4.1	Introdução.....	55
4.2	Imagens dos Ensaios	55
4.3	Resultados Experimentais	58
4.3.1	Evolução temporal da geometria das cavidades de erosão, caudal máximo.....	58
4.3.2	Evolução temporal da geometria das cavidades de erosão, caudal reduzido em 20%	65
4.3.3	Erosão e deposição em função da granulometria da areia	71
4.3.3.1	Caudal máximo	71
4.3.3.2	Caudal reduzido em 20%	75

4.3.4	Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão	79
4.3.4.1	Evolução temporal para o caudal máximo	79
4.3.4.2	Evolução temporal para o caudal reduzido em 20%	81
4.4	Análise e Discussão de Resultados	82
5	Conclusão.....	91
5.1	Síntese de conclusões	91
5.2	Trabalhos Futuros.....	92
	Bibliografia	95
	Anexos	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Configuração do fundo (Cardoso, 1998).....	10
Figura 2.2 - Forças atuantes numa partícula colocada numa margem (adaptado de Cardoso 1998).....	12
Figura 2.3 - Tensão máxima do fundo de arrastamento $\tau_{m\acute{a}x}$ que ocorre para, $Bfh \approx 2$ (retirado de Sancho, 2002).....	14
Figura 2.4 - Diagrama de Shields para a caracterização do início do movimento, incluindo o parâmetro ASCE, $dv_{0,1s1} - 1gd$, (adaptado de Cardoso 1998)	15
Figura 2.5 - Diagrama de Hjulstrom (retirado de Sumamer 2005).....	17
Figura 2.6 - Formas do leito (adaptado de Cardoso, 1998)	19
Figura 2.7 - Configurações de fundo, coeficiente de Manning-Strickler em função do caudal ou da velocidade (Adaptado de Lencastre e Franco 1984).....	22
Figura 2.8 - Barragens de aterro (Novak et al., 1996)	23
Figura 2.9 – Barragens em betão (Novak et al., 1996)	24
Figura 2.10 – Descargas de fundo (Novak et al., 1996)	26
Figura 2.11 – Válvula de cone (Novak et al., 1996)	26
Figura 2.12 – Descarregadores de cheias (Novak et al., 1996).....	28
Figura 2.13 - Turbina Hidroelétrica (retirado de Ebah, 2014).....	29
Figura 2.14 – Secção de teste descarregador de soleira (retirado de Dargahi, 2010)	30
Figura 2.15 – Esquema a jusante de um descarregador de soleira (retirado de Oliveto e Conuniello 2009)	31
Figura 2.16 - Fluxo de ar e água (retirado de Toombes e Chanson 2007).....	31
Figura 2.17 – Contração Vertical (Hahn e Lyn, 2010)	32
Figura 2.18 – Principais processos físicos na envolvente de fundos rochosos (Manso et al., 2009)	34
Figura 3.1 – Bancada <i>Armfield</i> e canal de visualização.....	36
Figura 3.2 – Modelos da descarga de fundo, (a) orifícios com 5 mm de diâmetro, (b) orifícios com 3,6 mm de diâmetro, (c) orifícios com 2 mm de diâmetro	38
Figura 3.3 – Esquema dos ensaios realizados	38
Figura 3.4 – Estrutura do Tipo A, a) Esquema da estrutura, (b) Pormenor da erosão.....	39
Figura 3.5 – Estrutura do Tipo B, a) Esquema da estrutura, (b) Pormenor da erosão	40

Figura 3.6 – Estrutura do Tipo C, a) Esquema da estrutura, (b) Pormenor da erosão	41
Figura 3.7 – Vedação da peça	46
Figura 3.8 – Ferramenta de corte	48
Figura 3.9 – Escala do programa	48
Figura 3.10 – Opção “escalar imagem”	49
Figura 3.11 – Alteração da unidade de resolução de imagem	50
Figura 3.12 – resolução de imagem	50
Figura 3.13 – Mudança de padrão de cores	51
Figura 3.14 – Ferramenta de “ Caminho”	52
Figura 3.15 – Coordenadas Cartesianas	52
Figura 4.1 – Imagem antes do ensaio.....	55
Figura 4.2 – Imagem do Ensaio 4, Estrutura Tipo B, para t=70 s	56
Figura 4.3 – Ensaio do tipo A (Ensaio 3, para t=0 s (a) e t= 70 s (b)).....	57
Figura 4.4 – Ensaio do tipo B (Ensaio 2, para t=0 s (a) e t= 50 s (b))	57
Figura 4.5 – Ensaio do tipo C (Ensaio 5, para t=0 s (a) e t= 60 s (b))	57
Figura AI.1 – Ensaio 1, para t=0 s (a) e t= 60 s (b)	99
Figura AI.2 – Ensaio 2, para t=0 s (a) e t= 50 s (b)	99
Figura AI.3 – Ensaio 3, para t=0 s (a) e t= 70 s (b)	99
Figura AI.4 – Ensaio 4, para t=0 s (a) e t= 70 s (b)	100
Figura AI.5 – Ensaio 5, para t=0 s (a) e t= 60 s (b)	100
Figura AI.6 – Ensaio 6, para t=0 s (a) e t= 10 s (b)	100
Figura AI.7 – Ensaio 7, para t=0 s (a) e t= 40 s (b)	101
Figura AI.8 – Ensaio 8, para t=0 s (a) e t= 60 s (b)	101
Figura AI.9 – Ensaio 9, para t=0 s (a) e t= 60 s (b)	101
Figura AI.10 – Ensaio 10, para t=0 s (a) e t= 40 s (b)	102
Figura AI.11 – Ensaio 11, para t=0 s (a) e t= 10 s (b)	102
Figura AI.12 – Ensaio 5, para t=0 s (a) e t= 60 s (b)	102
Figura AI.13 – Ensaio 13, para t=0 s (a) e t= 10 s (b)	103
Figura AI.14 – Ensaio 14, para t=0 s (a) e t= 20 s (b)	103
Figura AI.15 – Ensaio 15, para t=0 s (a) e t= 20 s (b)	103
Figura AI.16 – Ensaio 16, para t=0 s (a) e t= 60 s (b)	104
Figura AI.17 – Ensaio 17, para t=0 s (a) e t= 60 s (b)	104
Figura AI.18 – Ensaio 18, para t=0 s (a) e t=70 s (b)	104
Figura AI.19 – Ensaio 19, para t=0 s (a) e t=60 s (b)	105

Figura AI.20 – Ensaio 20, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	105
Figura AI.21 – Ensaio 21, para t=0 s (a) e t=20 s (b)	105
Figura AI.22 – Ensaio 22, para t=0 s (a) e t=50 s (b)	106
Figura AI.23 – Ensaio 23, para t=0 s (a) e t=20 s (b)	106
Figura AI.24 – Ensaio 24, para t=0 s (a) e t=50 s (b)	106
Figura AI.25 – Ensaio 25, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	107
Figura AI.26 – Ensaio 26, para t=0 s (a) e t=10 s (b)	107
Figura AI.27 – Ensaio 27, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	107
Figura AI.28 – Ensaio 28, para t=0 s (a) e t= 10 s (b)	108
Figura AI.29 – Ensaio 29, para t=0 s (a) e t= 20 s (b)	108
Figura AI.30 – Ensaio 30, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	108
Figura AI.31 – Ensaio 31, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	109
Figura AI.32 – Ensaio 32, para t=0 s (a) e t=70 s (b)	109
Figura AI.33 – Ensaio 33, para t=0 s (a) e t=60 s (b)	109
Figura AI.34 – Ensaio 34, para t=0 s (a) e t= 70 s (b)	110
Figura AI.35 – Ensaio 35, para t=0 s (a) e t=50 s (b)	110
Figura AI.36 – Ensaio 36, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	110
Figura AI.37 – Ensaio 37, para t=0 s (a) e t=40 s (b)	111
Figura AI.38 – Ensaio 38, para t=0 s (a) e t=40 s (b)	111
Figura AI.39 – Ensaio 39, para t=0 s (a) e t=40 s (b)	111
Figura AI.40 – Ensaio 40, para t=0 s (a) e t=40 s (b)	112
Figura AI.41 – Ensaio 41, para t=0 s (a) e t=10 s (b)	112
Figura AI.42 – Ensaio 42, para t=0 s (a) e t=20 s (b)	112
Figura AI.43 – Ensaio 43, para t=0 s (a) e t=10 s (b)	113
Figura AI.44 – Ensaio 44, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	113
Figura AI.45 – Ensaio 45, para t=0 s (a) e t=40 s (b)	113
Figura AI.46 – Ensaio 46, para t=0 s (a) e t=40 s (b)	114
Figura AI.47 – Ensaio 47, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	114
Figura AI.48 – Ensaio 48, para t=0 s (a) e t=50 s (b)	114
Figura AI.49 – Ensaio 49, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	115
Figura AI.50 – Ensaio 50, para t=0 s (a) e t=50 s (b)	115
Figura AI.51 – Ensaio 51, para t=0 s (a) e t=10 s (b)	115
Figura AI.52 – Ensaio 52, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	116
Figura AI.53 – Ensaio 53, para t=0 s (a) e t=10 s (b)	116

Figura AI.54 – Ensaio 54, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	116
Figura AI.55 – Ensaio 55, para t=0 s (a) e t=40 s (b)	117
Figura AI.56 – Ensaio 56, para t=0 s (a) e t=10 s (b)	117
Figura AI.57 – Ensaio 57, para t=0 s (a) e t=20 s (b)	117
Figura AI.58 – Ensaio 58, para t=0 s (a) e t=10 s (b)	118
Figura AI.59 – Ensaio 59, para t=0 s (a) e t=10 s (b)	118
Figura AI.60 – Ensaio 60, para t=0 s (a) e t=20 s (b)	118
Figura AI.61 – Ensaio 61, para t=0 s (a) e t=50 s (b)	119
Figura AI. 62 – Ensaio 62, para t=0 s (a) e t=40 s (b)	119
Figura AI.63 – Ensaio 63, para t=0 s (a) e t=50 s (b)	119
Figura AI.64 – Ensaio 64, para t=0 s (a) e t=40 s (b)	120
Figura AI.65 – Ensaio 65, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	120
Figura AI.66 – Ensaio 66, para t=0 s (a) e t=10 s (b)	120
Figura AI.67 – Ensaio 67, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	121
Figura AI.68 – Ensaio 68, para t=0 s (a) e t= 40 s (b)	121
Figura AI.69 – Ensaio 69, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	121
Figura AI.70 – Ensaio 70, para t=0 s (a) e t=40 s (b)	122
Figura AI.71 – Ensaio 71, para t=0 s (a) e t=10 s (b)	122
Figura AI.72 – Ensaio 72, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	122
Figura AI.73 – Ensaio 73, para t=0 s (a) e t=10 s (b)	123
Figura AI.74 – Ensaio 74, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	123
Figura AI.75 – Ensaio 75, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	123
Figura AI.76 – Ensaio 76, para t=0 s (a) e t=50 s (b)	124
Figura AI.77 – Ensaio 77, para t=0 s (a) e t=40 s (b)	124
Figura AI.78 – Ensaio 78, para t=0 s (a) e t=40 s (b)	124
Figura AI.79 – Ensaio 79, para t=0 s (a) e t=60 s (b)	125
Figura AI.80 – Ensaio 80, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	125
Figura AI.81 – Ensaio 81, para t=0 s (a) e t=10 s (b)	125
Figura AI.82 – Ensaio 82, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	126
Figura AI.83 – Ensaio 83, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	126
Figura AI.84 – Ensaio 84, para t=0 s (a) e t=40 s (b)	126
Figura AI.85 – Ensaio 85, para t=0 s (a) e t=20 s (b)	127
Figura AI.86 – Ensaio 86, para t=0 s (a) e t=10 s (b)	127
Figura AI.87 – Ensaio 87, para t=0 s (a) e t=30 s (b)	127

Figura AI.88 – Ensaio 88, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)	128
Figura AI.89 – Ensaio 89, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)	128
Figura AI.90 – Ensaio 90, para $t=0$ s (a) e $t=20$ s (b)	128

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Configuração do fundo (Cardoso, 1998)	21
Tabela 3.1 – Velocidades Críticas	37
Tabela 3.2 – Caudais no modelo e no protótipo, caudais máximos.....	42
Tabela 3.3 – Caudais no modelo e no protótipo, caudais reduzidos em 20%.....	42
Tabela 3.4- Condições experimentais para o caudal máximo e diâmetro da areia igual a 1,425 mm	43
Tabela 3.5 - Condições experimentais para o caudal máximo e diâmetro da areia igual a 0,638 mm	43
Tabela 3.6 - Condições experimentais para o caudal máximo e diâmetro da areia igual a 0,338 mm	44
Tabela 3.7 - Condições experimentais para o caudal reduzido em 20% e diâmetro da areia igual a 1,425 mm.....	44
Tabela 3.8 - Condições experimentais para o caudal reduzido em 20%, e diâmetro da areia igual a 0,638 mm.....	45
Tabela 3.9 - Condições experimentais para o caudal reduzido em 20%, e diâmetro da areia igual a 0,338 mm.....	45
Tabela 4.1 – Dados recolhidos dos ensaios 1, 16 e 31	59
Tabela 4.2 – Dados recolhidos dos ensaios 3, 28 e 33.....	60
Tabela 4.3 – Dados recolhidos dos ensaios 2, 17 e 32.....	61
Tabela 4.4 – Dados recolhidos dos ensaios 4, 19 e 34.....	62
Tabela 4.5 – Dados recolhidos dos ensaios 5, 20 e 35.....	63
Tabela 4.6 – Dados recolhidos dos ensaios 10, 25 e 40.....	64
Tabela 4.7 - Dados recolhidos dos ensaios 46, 61 e 76	65
Tabela 4.8 - Dados recolhidos dos ensaios 48, 63 e 78	66
Tabela 4.9 - Dados recolhidos dos ensaios 47, 62 e 77	67
Tabela 4.10 - Dados recolhidos dos ensaios 49, 64 e 79	68
Tabela 4.11 - Dados recolhidos dos ensaios 50, 65, 80	69
Tabela 4.12 - Dados recolhidos dos ensaios 55, 70 e 85	70
Tabela 4.13 – Percentagens de redução da erosão no orifício 5 mm	85
Tabela 4.14 – Percentagens de redução da erosão no orifício de 3,6 mm	85
Tabela 4.15 – Percentagens de redução da erosão no orifício de 2 mm	86

Tabela AII.1 – Dados recolhidos dos ensaios 2,21 e 36	129
Tabela AII.2 – Dados recolhidos dos ensaios 8, 23 e 38	130
Tabela AII.3 – Dados recolhidos dos ensaios 7, 22 e 37	131
Tabela AII.4 – Dados recolhidos dos ensaios 9,24 e 39	132
Tabela AII.5 – Dados recolhidos dos ensaios 12, 27 e 42	133
Tabela AII.6 – Dados recolhidos dos ensaios 14, 29 e 44	134
Tabela AII.7 – Dados recolhidos dos ensaios 15, 30 e 45	135
Tabela AII.8 – Dados recolhidos dos ensaios 53, 58 e 83	136
Tabela AII.9 – Dados recolhidos dos ensaios 52, 67 e 82	137
Tabela AII.10 – Dados recolhidos dos ensaios 54, 69 e 84	138
Tabela AII.11 – Dados recolhidos dos ensaios 57, 72 e 87	139
Tabela AII.12 – Dados recolhidos dos ensaios 59, 74 e 89	140
Tabela AII.13 – Dados recolhidos dos ensaios 60, 75 e 90	141

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 1, 16 e 31.....	59
Gráfico 4.2 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 3, 18 e 33.....	60
Gráfico 4.3 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 2, 17 e 32.....	61
Gráfico 4.4 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 4, 19 e 34.....	62
Gráfico 4.5 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 5, 20 e 35.....	63
Gráfico 4.6 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 10, 25 e 40.....	64
Gráfico 4.7 - Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 46, 61 e 76.....	65
Gráfico 4.8 - Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 48, 63 e 78.....	66
Gráfico 4.9 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 47, 62 e 77.....	67
Gráfico 4.10 - Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 49, 64 e 79.....	68
Gráfico 4.11 - Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 50, 65, 80	69
Gráfico 4.12 - Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 55, 70 e 85.....	70
Gráfico 4.13 – Variação de s (a) e x_s (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo A.....	71
Gráfico 4.14 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo A	72
Gráfico 4.15 – Variação de s (a) e x_s (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo B	73
Gráfico 4.16 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo B	73

Gráfico 4.17 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo C	74
Gráfico 4.18 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo C	74
Gráfico 4.19 – Variação de s (a) e x_s (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo A, caudal reduzido.....	75
Gráfico 4.20 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo A, caudal reduzido.....	76
Gráfico 4.21 – Variação de s (a) e x_s (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo C, caudal reduzido.....	76
Gráfico 4.22 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo B, caudal reduzido	77
Gráfico 4.23 – Variação de s (a) e x_s (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo C, caudal reduzido.....	78
Gráfico 4.24 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo C, caudal reduzido	78
Gráfico 4.25 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 1, 3, 6 e 8.....	79
Gráfico 4.26 - Variação de $(h+s)/D$ com $(t\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os 2, 4, 7, 9, 12 e 14.....	80
Gráfico 4.27 - Variação de $(h+s)/D$ com $(t\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 5, 10 e 15	80
Gráfico 4.28 - Variação de $(h+s)/D$ com $(t\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 46, 48 e 53, redução em 20% do caudal.....	81
Gráfico 4.29 - Variação de $(h+s)/D$ com $(t\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os 47, 49, 52, 54, 57 e 59, redução em 20% do caudal.....	81
Gráfico 4.30 - Variação de $(h+s)/H$ com $(t\sqrt{g}/\sqrt{H})$ para os ensaios 50, 55 e 60, redução em 20% do caudal.....	82
Gráfico AII.1 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 2, 21 e 36.....	129
Gráfico AII.2 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 8, 23 e 38.....	130
Gráfico AII.3 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 7, 22 e 37.....	131
Gráfico AII.4 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 9, 24 e 39.....	132

Gráfico AII.5 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 12, 27 e 42.....	133
Gráfico AII.6 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 14, 29 e 44.....	134
Gráfico AII.7 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 15, 30 e 45.....	135
Gráfico AII. 8 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 53, 68 e 83.....	136
Gráfico AII.9 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 52, 67 e 82.....	137
Gráfico AII. 10 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 54, 69 e 84	138
Gráfico AII.11 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 57, 72 e 87.....	139
Gráfico AII. 12 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 59, 74 e 89	140
Gráfico AII.13 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 60, 75 e 90.....	141
Gráfico III.1 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 16, 18, 21 e 23.....	143
Gráfico III.2 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 17, 19, 22, 24, 27 e 29	143
Gráfico III.3 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 20, 25 e 30.....	143
Gráfico III.4 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 31, 33, 36 e 38.....	144
Gráfico III.5 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 32, 34, 37, 39, 42 e 44	144
Gráfico III.6 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 35, 40 e 45.....	144
Gráfico III.7 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 61, 63 e 68, caudal reduzido.....	145
Gráfico III.8 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 62, 64, 67, 69, 72 e 74, caudal reduzido	145
Gráfico III.9 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 65, 70 e 75, caudal reduzido.....	145
Gráfico III.10 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 76, 78 e 83.....	146

Gráfico III.11 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 77, 79, 82, 87 e 89, caudal reduzido	146
Gráfico III.12 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios, caudal reduzido ..	146

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do tema

A erosão hídrica é um problema que ocorre em todo o planeta Terra (Cardoso, 1998), originando sedimentos que são arrastados para os cursos de água e posteriormente transportados para jusante por estes. Se se analisar a capacidade de transporte desses cursos de água, facilmente se constata que esta diminui para jusante originando-se trechos de fundos aluvionares. Desta forma pode-se concluir que, num rio, os escoamentos com superfície livre são fenómenos muito complexos devido ao transporte de sedimentos e movimento de partículas associado.

Um escoamento sobre leito móvel tem uma resistência ao movimento bastante considerável, devido à rugosidade do leito, que se encontra associada às forças de atrito (Aleixo, 2006). De acordo com o critério de Shields, um dos critérios baseados na tensão crítica de arrastamento, as principais variáveis de que depende o início do movimento podem ser agrupadas em dois parâmetros adimensionais inter-relacionados: o parâmetro de Shields e o número de Reynolds de atrito (Carvalho et al., 2007).

Nos rios, o nível da água é normalmente controlado por barragens ou açudes e o caudal que passa pelas estruturas tem uma importância significativa na erosão localizada provocada a jusante. Num descarregador de uma barragem existe o risco elevado de erosão junto da barragem e de desestabilização da encosta do vale. Neste caso são utilizadas bacias de dissipação para proteger o leito do rio.

Para poder conservar os rios, que atualmente estão sujeitos a várias intervenções e construções, é essencial estudar, entender e prever estes fenómenos. O facto é que muitos destes fenómenos apresentam um carácter tridimensional, e o seu estudo exige a utilização de técnicas avançadas e dispendiosas como a velocimetria por imagem de partículas (*PIV-Particle Image Velocimetry*) (Hill e Youkin, 2006). Nestes casos, a simplificação de processos de análise do fenómeno de transporte turbulento de partículas na vizinhança das

estruturas hidráulicas, torna-se fundamental para uma rápida compreensão e análise de parâmetros característicos do escoamento, tais como o caudal, as velocidades, a granulometria dos sedimentos e a altura de água do escoamento. Perante estas simplificações destacam-se ainda e preferencialmente os escoamentos bidimensionais, tais como os que ocorrem na vizinhança de descarregadores e comportas; assim como a utilização de técnicas experimentais mais simples, como o registo em imagem vídeo do fenómeno para a sua posterior análise (Aleixo e Proença (2007), Lima e Ferreira (2012)). De facto a visualização de escoamentos permite o seu estudo de forma simples, definindo leis simples que podem descrever o movimento (Villermaux et al., 2010).

Assim nesta dissertação de carácter experimental, opta-se por analisar as cavidades de erosão localizadas na vizinhança de descargas de fundo de barragens. O estudo incidirá sobre este tipo de estruturas, porque apesar da produção de energia hidroelétrica ser uma fonte renovável e portanto sustentável a nível ambiental, ao estar associada a uma albufeira criada por uma barragem, está intimamente ligada a grandes períodos de retenção da água e de sedimentos. Esta retenção pode trazer malefícios ao ambiente, porque os sedimentos depositados nas albufeiras de barragens dão origem a emissões de gases de efeito de estufa. A produção de gás metano produzido pela matéria orgânica dos sedimentos contribui para o agravamento do efeito de estufa, o que leva a uma alteração climática mais grave do que se pensava anteriormente. Um estudo de seis pequenas barragens na Alemanha permitiu identificar zonas de emissão de gases de efeito de estufa mais eficazes na retenção de calor do que o dióxido de carbono (Barboza, 2013). Devido a estes fatores, este tipo de estrutura despertou a curiosidade e motivou a escolha, para este tipo de estudo do fenómeno da erosão localizada a jusante da descarga de fundo, de forma simples.

1.2. Objetivos

Com a elaboração desta dissertação pretende-se efetuar a visualização do escoamento através de registo em vídeo e posteriormente o processamento de imagem, de modo a desenvolver um método experimental que possibilite a rápida caracterização das cavidades de erosão bidimensionais.

Pretende-se igualmente aplicar esse método experimental no estudo do fenómeno de erosão localizada na vizinhança de uma descarga de fundo de uma barragem.

Para se concretizar os objetivos foi necessário construir um modelo reduzido de uma descarga de fundo de uma barragem, de maneira a recriar as condições reais e descrever a evolução temporal da cavidade de erosão.

1.3. Organização da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos.

No presente capítulo, apresenta-se uma breve introdução ao tema, refere-se os fatores de motivação, escolha de temáticas referentes ao mesmo, e os seus objetivos.

No segundo capítulo apresenta-se uma descrição mais detalhada de conceitos necessários para uma melhor compreensão do presente documento, como o conhecimento sobre leitos móveis e erosões a eles associadas. Insere-se igualmente uma pequena sùmula de trabalhos relevantes anteriormente realizados e algumas conclusões que levaram à motivação do desenvolvimento do presente trabalho experimental.

No terceiro capítulo descreve-se o método experimental aplicado, incluindo uma pequena descrição do equipamento utilizado, assim como os sedimentos e estruturas hidráulicas. Apresenta-se ainda a metodologia experimental utilizada.

No quarto capítulo apresentam-se os resultados dos ensaios experimentais de erosão na proximidade de uma descarga de fundo de uma barragem, a sua análise e discussão.

No quinto e último capítulo, sumarizam-se as conclusões do estudo realizado e propõem-se sugestões para trabalhos futuro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Erosão em escoamentos superfície livre

Nesta secção apresentam-se alguns conceitos simples de hidráulica fluvial, analisando as características dos escoamentos e a sua influência no transporte de sedimentos.

2.1.1. Escoamento com superfície livre

Um escoamento com superfície livre consiste num escoamento sujeito à pressão atmosférica, ou em contacto com um gás, em pelo menos um ponto da sua secção ou contorno da veia líquida (Lencastre, 1996).

Estes tipos de escoamentos estão classificados como não permanentes ou permanentes. Esta classificação é efetuada atendendo à variação ou persistência das suas características em relação ao tempo, ou seja, num escoamento não permanente a velocidade e a pressão variam em instantes distintos num determinado ponto, enquanto que no escoamento permanente mantêm as mesmas características no tempo. No caso destes se manterem permanentes é, ainda, possível classificar o escoamento em relação à estabilidade da velocidade média de escoamento ao longo do eixo do canal que, a verificar-se ou não, dará origem, respetivamente, ao movimento uniforme ou variado.

Nos escoamentos permanentes variados faz-se ainda uma subdivisão em escoamento gradualmente e escoamento rapidamente variado, de acordo com a repercussão que uma variação localizada das características do movimento poderá ter no restante escoamento.

Assim, o escoamento será rapidamente variado quando essa influência puder ser estudada isoladamente num determinado local supondo que, embora tendo em atenção uma zona de transição, o restante escoamento permanece inalterado. O regime será gradualmente variado se, pelo contrário, a influência da referida variação localizada se fizer sentir no

andamento da piezométrica, produzindo-se uma variação da secção do escoamento com o percurso, sendo este regime, conseqüentemente, semelhante ao que se verifica num canal de secção geométrica variável. A secção do escoamento, também designada por secção molhada, refere-se à área de secção ocupada pelo líquido que se escoia (Proença, 2011).

2.1.2. Escoamentos laminares e turbulentos

No estudo dos escoamentos em canais, é necessário considerar forças de inércia, forças gravíticas e as forças viscosas. O número de Reynolds (equação (1)) representa o quociente entre as forças de inércia e as forças viscosas num escoamento,

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (1)$$

em que U é uma velocidade característica (geralmente a velocidade média do escoamento na secção), L é um comprimento característico e ν é a viscosidade cinemática do fluido. Este número adimensional permite avaliar se os escoamentos são laminares ou turbulentos. Os escoamentos laminares são caracterizados por valores pequenos de Re e apresentam trajetórias bem definidas, enquanto para valores elevados de Re as trajetórias deixam de ser bem definidas e passa-se a ter escoamentos turbulentos.

Existe uma fase de transição de escoamentos laminares para escoamentos turbulentos com valores de Re compreendidos entre 500 a 1000 (Cardoso, 1998), quando o raio hidráulico é utilizado como comprimento característico em escoamentos com superfície livre.

2.1.3. Escoamentos lentos e rápidos

O estudo da importância relativa das forças de inércia e das forças de gravíticas baseia-se no número de Froude (equação (2)):

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gh_m}} \quad (2)$$

em que g é a aceleração da gravidade, U é uma velocidade característica (geralmente a velocidade média do escoamento na secção), e h_m é um comprimento característico do escoamento característico, ou seja, a altura média do escoamento, igual à razão entre a área de secção transversal do escoamento e a sua largura superficial. O escoamento é classificado quanto ao número de Froude; sendo lento para $Fr < 1$ e rápido quando $Fr > 1$. Como $\sqrt{gh_m}$ caracteriza a velocidade das pequenas perturbações, o número de Froude, para além de ser uma relação entre forças, também pode ser entendido, no sentido cinemático, como a razão entre a velocidade do escoamento e a velocidade de propagação de uma pequena perturbação. Por isso, num escoamento lento ($Fr < 1$), uma pequena perturbação pode propagar-se para montante e para jusante, enquanto em escoamentos rápidos ($Fr > 1$) só se pode propagar para jusante (Cardoso, 1998).

2.2. Propriedades dos sedimentos

As partículas transportadas pelos escoamentos, que se encontram sujeitas a fenómenos de erosão e deposição, podem ter diversas origens e propriedades que influenciam os escoamentos e a forma como se moldam ao longo dos leitos.

2.2.1. Propriedades físicas dos sedimentos

As propriedades dos sedimentos desempenham um papel decisivo nos processos de transporte sólido. É possível seleccionar vários conjuntos de variáveis independentes suscetíveis de caracterizar os escoamentos fluviais (Cardoso, 1998). De entre estas destacam-se as variáveis características do material do fundo:

- Massa volúmica dos sedimentos, ρ_s ;
- Diâmetro característico d
- Coeficiente de graduação da distribuição granulométrica, σ_D ;
- Velocidade de queda das partículas, W_s ;

Interessam também as características do fluido onde os sedimentos se encontram submersos, destacando-se as seguintes variáveis:

- Massa volúmica, ρ ;
- Viscosidade cinemática, ν

Por seu lado, as características do escoamento irão influenciar como os sedimentos se comportam, pelo que não podem ser ignorados. Assim destacam-se:

- Aceleração da gravidade, g ;
- Velocidade média do escoamento, U ;
- Altura do escoamento, h ;
- Largura da secção transversal, B .

2.2.1.1. Propriedades dos grãos

Convém distinguir entre as propriedades das partículas, consideradas individualmente, e as propriedades dos grãos: as dimensões dos que se encontram nos leitos de cursos de água apresentam uma grande irregularidade de formas, o que leva a algumas dificuldades na definição das respetivas dimensões. A sua forma influencia a sua velocidade de transporte nos leitos fluviais, e a densidade, que varia muito com a sua composição mineralógica, influencia a velocidade de queda ou sedimentação (Cardoso, 1998).

2.2.1.2. Misturas granulométricas

O fundo dos leitos dos cursos de água é constituído por partículas de dimensões muito diferentes, sendo necessário proceder à análise dos diversos diâmetros que os constituem. Isto pode ser efetuado recorrendo às distribuições granulométricas, determinadas após peneiração mecânica. Os resultados podem ser apresentados sob a forma de curvas de frequência acumuladas em função da sua dimensão.

A porosidade influencia o peso das partículas originando diferentes formas de mistura e define-se como a percentagem de vazios num dado volume de sedimentos secos, influenciada pela distribuição de granulométrica, pela forma das partículas e a sua arrumação. A porosidade total refere-se a todos os vazios (incluindo os que se situam no interior dos grãos) e a porosidade efetiva só considera os vazios interligados de forma a

promover a passagem do fluido. Há ainda a considerar o peso volúmico aparente seco, o ângulo de atrito e o ângulo de suporte para caracterizar convenientemente uma mistura granulométrica (Cardoso, 1998).

2.2.2. Caracterização do processo erosivo

2.2.2.1. Tipos de erosão hídrica

O primeiro fenómeno que ocorre no processo erosivo por via hídrica é o deslocamento das partículas do solo, essencialmente pela ação da precipitação e do escoamento superficial, e que envolve:

- o impacto das gotas da chuva
- a água ao escoar sobre as encostas
- as zonas inclinadas principalmente com o solo saturado

2.3. Início do transporte de sólidos por arrastamento

Inicialmente poderá verificar-se que o escoamento não origina a movimentação do material, isto é, comporta-se como se o fundo fosse fixo, sobre a ação de sucessivos escoamentos permanentes. No entanto quando o caudal atinge um certo valor, observa-se o movimento aleatório de partículas isoladas e as condições de escoamento são tais que as partículas começam a ser destacadas e arrastadas. Estas condições são denominadas como condições críticas de início de transporte sólido ou condições de movimento incipiente. Na prática, surgem dificuldades na determinação destas condições, podendo dar origem a um deslocamento de uma só partícula, várias partículas ou até o movimento generalizado.

Até ao presente, foram analisadas três vias de resolução para condições de início de movimento:

- tensão crítica de arrastamento;
- velocidade média crítica;
- elevação hidrodinâmica.

O conceito de tensão crítica de arrastamento parece ser o método mais racional de previsão do movimento incipiente, de grande importância para a Hidráulica Fluvial, nomeadamente para canais estáveis sem movimento de material sólido, caudal sólido e estudo da deposição em reservatórios (albufeiras, erosões localizadas e erosão localizada). Os métodos que se baseiam no conceito de velocidade média crítica são mais simples e, por isso, utilizados no dimensionamento de enrocamentos e na modelação matemática (Sancho, 2002).

2.3.1. Tensão crítica de arrastamento

De acordo com Cardoso (1998) todas as partículas da superfície de fundo de um canal estão sujeitas à ação das forças hidrodinâmicas do escoamento (forças solicitadoras) e do peso submerso (forças resistentes), que entram em movimento quando as forças ou os respetivos momentos ultrapassam as forças ou momentos resistentes.

As partículas submersas estão sujeitas à ação de forças tais como: força de arrastamento (F_D), força de sustentação (F_L) e peso submerso (F_G). Uma vez que as forças, na generalidade, não são aplicadas em condições perpendiculares, também estão sujeitas à influência de ângulo de aplicação: ângulo formado com a horizontal (θ), e o ângulo de atrito interno (θ_r) (Figura 2.1).

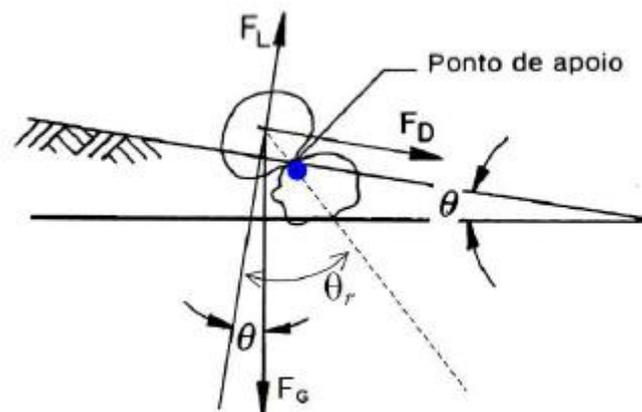


Figura 2.1 Configuração do fundo (Cardoso, 1998)

As forças de sustentação hidrodinâmicas são difíceis de quantificar, por isso não são analisadas nos tratamentos analíticos, sendo a sua influência considerada indiretamente no coeficiente empírico, c_1 , presente na expressão da força de arrastamento (equação (3)).

$$F_D = c_1 \tau_0 d \quad (3)$$

em que c_1 é uma constante, τ_0 é a tensão de arrastamento, D é o diâmetro e $c_1 D^2$ é área efetiva submetida à tensão.

No caso do peso da partícula submersa, adota-se a equação (4):

$$W = c_2 d^3 (\gamma_s - \gamma) \quad (4)$$

em que c_2 é uma constante e γ_s e γ são, respetivamente, o peso volúmico da partícula e do fluido (água).

Sendo θ o ângulo do fundo ou das margens com a horizontal e θ_r o ângulo interno, o equilíbrio destas forças em situação de movimento incipiente conduz à equação (5):

$$W \cos \theta \operatorname{tg} \theta_r = F_D + W \sin \theta \quad (5)$$

substituindo as expressões para W e F_D obtém-se a tensão crítica de arrastamento, τ_c dada pela equação (6):

$$\tau_c = \frac{c_2}{c_1} (\gamma_s - \gamma) d \cos \theta_r (\operatorname{tg} \theta_r - \operatorname{tg} \theta) \quad (6)$$

Para um fundo horizontal, $c = \frac{c_2}{c_1}$, obtém-se a equação (7):

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma) d} = c \operatorname{tg} \theta_r \propto \frac{\text{Forças Hidrodinâmicas}}{\text{Peso sumerso}} \quad (7)$$

As partículas colocadas sobre as margens inclinadas de um canal estão sujeitas à ação do peso $W \sin(\theta)$ que tende a deslizar perpendicularmente à direção do escoamento (Figura 2.2).

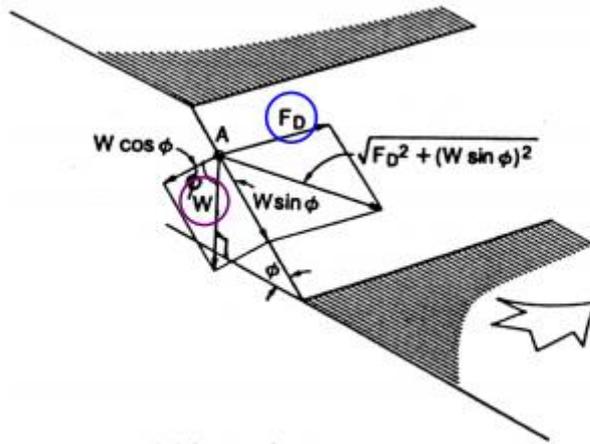


Figura 2.2 - Forças atuantes numa partícula colocada numa margem (adaptado de Cardoso 1998)

Para as condições de início do movimento, a resultante da sollicitação (tangencial) paralela à margem é dada pela equação (8):

$$\sqrt{F_D^2 + (w \sin \phi)^2} \quad (8)$$

A força de resistência é a força de atrito dada pela componente normal vezes o coeficiente de atrito equação (9):

$$W \cos \phi \, tg \theta_r \quad (9)$$

em que θ_r é o ângulo de atrito interno ou talude natural.

Em situação de movimento resulta:

$$W \cos \phi \, tg \theta_r = \sqrt{F_D^2 + (w \sin \phi)^2} \quad (10)$$

$$(F_D) m = W \cos \phi \, tg \theta_r \sqrt{1 - \frac{tg^2 \phi}{tg^2 \theta_r}} \quad (11)$$

em que $(F_D)m = F_D$ na margem.

Para as superfícies horizontais ($\phi = 0$) resulta:

$$(F_D)b = Wtg\theta r \quad (12)$$

Permitindo assim definir o coeficiente de Lane, K:

$$K = \frac{(F_D)m}{(F_D)m} = \cos\phi \sqrt{1 - \frac{tg^2\phi}{tg^2\theta r}} \quad (13)$$

$$K = \sqrt{1 - \frac{\text{sen}^2\phi}{\text{sen}^2\theta r}} \quad (14)$$

que relaciona a tensão de arrastamento de partículas nas margens com a tensão de arrastamento no fundo.

Para canais trapezoidais a equação $\tau_0 = \gamma hJ = \gamma h i_1$ foi concebida para escoamentos bidimensionais (canais retangulares largos), distribuição uniforme de τ_0 na fronteira e para declives (i_1) pequenos.

Mas na verdade os escoamentos são tridimensionais e a distribuição de τ_0 não é uniforme na fronteira (sobre o perímetro molhado), e a tensão de arrastamento no fundo e nas margens depende da relação entre a largura do fundo, B_f , e a altura do escoamento, h (equação (15)),

$$\frac{B_f}{h} = \frac{\text{Largura do fundo}}{\text{Altura do escoamento}} \quad (15)$$

e da inclinação das margens, z (H/V), como se observa na (Figura 2.3). A tensão máxima nas margens aumenta continuamente com a diminuição de $\frac{B_f}{h}$ criando o “efeito de parede” (Sancho, 2002).

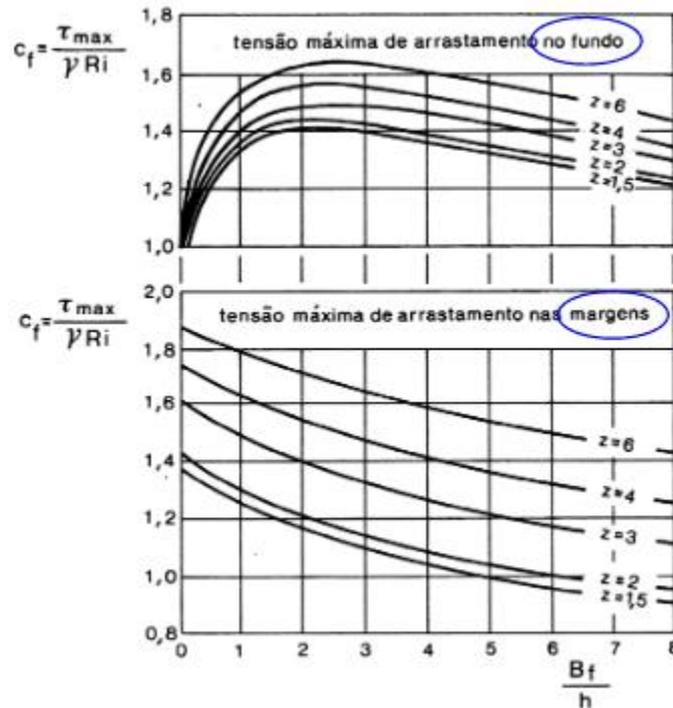


Figura 2.3 - Tensão máxima do fundo de arrastamento $\tau_{m\acute{a}x}$ que ocorre para, $\frac{B_f}{h} \approx 2$ (retirado de Sancho, 2002)

2.3.2. Diagrama de Shields

O diagrama de Shields é fundamental para a utilização das condições críticas de arrastamento, a sua aplicação é extensa e válida em várias áreas. Com os parâmetros da tensão média de atrito sobre o fundo e o peso dos sedimentos por unidade de área do escoamento, em função do número de Reynolds do grão obtém-se a equação (16) (Aleixo, 2006),

$$\frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gd} = f\left(\frac{u_{*c}d}{\nu}\right) \quad (16)$$

$$Y_c = f\left(\frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gd}\right) \quad (17)$$

em que $\frac{u_{*c}d}{\nu}$, também designado por X_c representa o número de Reynolds de atrito. Assim é possível retirar velocidade de atrito crítica através da equação (18),

$$u_{*c} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} \quad (18)$$

em que τ_c é a tensão de arrastamento crítica, $(\rho_s - \rho)$ representa a diferença entre a massa volúmica dos sedimentos e da água, g é a aceleração da gravidade e d é o diâmetro característico dos sedimentos (Figura 2.4).

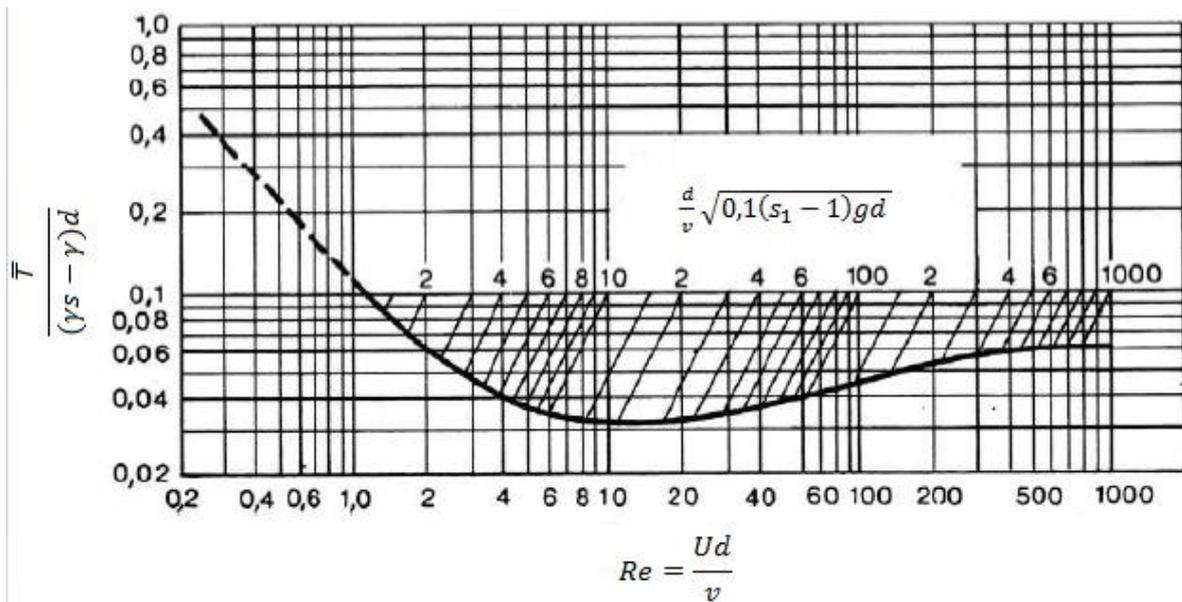


Figura 2.4 - Diagrama de Shields para a caracterização do início do movimento, incluindo o parâmetro ASCE, $\frac{d}{v} \sqrt{0,1(s_1 - 1)gd}$, (adaptado de Cardoso 1998)

Conhecidos todos os parâmetros é então possível determinar a tensão de arrastamento, determinando os valores para o material do fundo inicia o movimento. Pode-se afirmar que ocorre transporte de material do fundo quando a tensão de Shields é superior à tensão crítica de Shields, ou seja, $Y_c > Y_{cr}$.

A curva de Shields pode ser subdividida em três regiões diferentes, nomeadamente, menor do que 2 para escoamentos laminares, entre 2 e 70 em escoamentos de transição e por fim maior do que 70 em escoamentos turbulentos.

Derivado às diversas incógnitas como o número de Reynolds crítico, X_c , tensão crítica de Shields, Y_{cr} , e a tensão crítica de arrastamento, τ_c , existe uma maneira mais simplificada

para efetuar esse cálculo como demonstra a equação (19), que permite a utilização direta do diagrama de Shields. (Figura 2.4).

$$\frac{d}{v} = \sqrt{0,1(s_1 - 1)gd} \quad (19)$$

em que $s_1 = \frac{\rho_s}{\rho}$, ρ_s é o peso específico dos sedimentos, ρ é o peso específico da água, d é o diâmetro dos sedimentos, v é a viscosidade cinemática do fluido e g aceleração gravítica.

2.3.3. Critério de velocidade média crítica

A velocidade média crítica (U_{cr}) é a velocidade necessária para o início do movimento dos sedimentos de um escoamento. No entanto existem diferentes critérios para determinar a sua grandeza (Aleixo, 2006), nomeadamente: critério de Hjulstrom, critério de Goncharov, critério de Neil, critério de Zanke, critério de Garde e critério de Yang, que se passam a apresentar sucintamente.

- **Critério de Hjulstrom**

Este critério é baseado na velocidade média crítica (Cardoso, 1998) direcionado para grãos uniformes de areia, que representa a velocidade média crítica em função dos sedimentos. No diagrama (Figura 2.5) existem três zonas distintas: erosão, transporte e deposição.

Considerando o exemplo das partículas de 1 mm de diâmetro, de acordo com o diagrama abaixo representado, nos escoamentos com velocidades médias entre 7 cm/s e 30 cm/s, os sedimentos seriam transportados na corrente do escoamento, enquanto que para velocidades superiores haveria erosão e para velocidades inferiores deposição.

A principal desvantagem comparativamente às fórmulas é a dificuldade de determinar a velocidade de fundo dos leitos móveis (Aleixo, 2006).

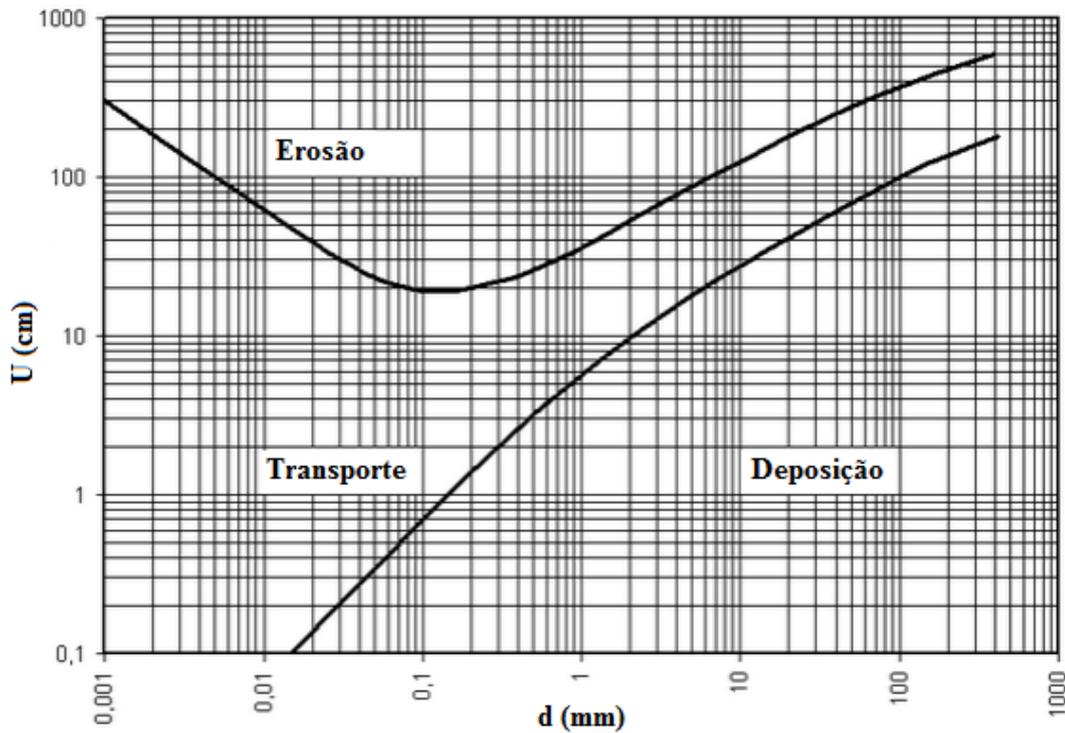


Figura 2.5 - Diagrama de Hjulstrom (retirado de Sumamer 2005)

- **Critério de Goncharov**

$$U_{cr} = \log \left(8,8 \frac{h}{D} \right) \sqrt{\frac{2g(\gamma_s - \gamma)d}{3,5\gamma}} \quad (20)$$

em que \$h\$ é altura do escoamento, \$d\$ é o diâmetro dos sedimentos, \$\gamma_s\$ peso específico dos sedimentos e \$\gamma\$ peso específico da água (Cardoso (1998)).

- **Critério de Neil**

$$\frac{U_{cr}^2}{(\frac{\gamma_s - 1}{\gamma})gD} = 2,5 \left(\frac{h}{D} \right)^{0,2} \quad (21)$$

- **Critério de Zanke**

$$U_{cr} = 2,8 \sqrt{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) gd} + 14,7 c_1 \frac{v}{D} \quad (22)$$

em que c_1 é um coeficiente de coesividade 0,1 até 1 para materiais não coesivos como argila e ν é a viscosidade cinemática do fluido (Carvalho e Proença (2010))

- **Critério de Garde**

$$\frac{U_{cr}}{\sqrt{\frac{(\gamma_s - \gamma)d_{50}}{\rho}}} = 0,50 \log\left(\frac{h}{d}\right) + 1,63 \quad (23)$$

- **Critério de Yang**

$$\frac{U_c}{v_f} = \frac{2,5}{\log\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) - 0,06} + 0,06, \text{ para } 1,2 < \frac{u_* d}{\nu} < 70 \quad (24)$$

ou:

$$\frac{U_c}{v_f} = 2,05, \text{ para } 1,2 < \frac{u_* d}{\nu} < 70 \quad (25)$$

em que u_* é a velocidade de atrito, d é o diâmetro da partícula e ν é a viscosidade cinemática do fluido e d_{50} é o diâmetro médio dos sedimentos (Aleixo, 2006).

2.4. Configurações do fundo

A natureza das interações entre o fundo e o fluido, bem como as configurações resultantes, dependem da profundidade e da velocidade do escoamento, das propriedades do fluido e do material granular (Figura 2.6). É comum distinguir-se entre quatro configurações:

- Rugas
- Dunas
- Leito plano superior
- Antidunas

As três primeiras configurações ocorrem em regime lento ($Fr < 1$), e a última ocorre para regime crítico ou rápido ($Fr > 1$).

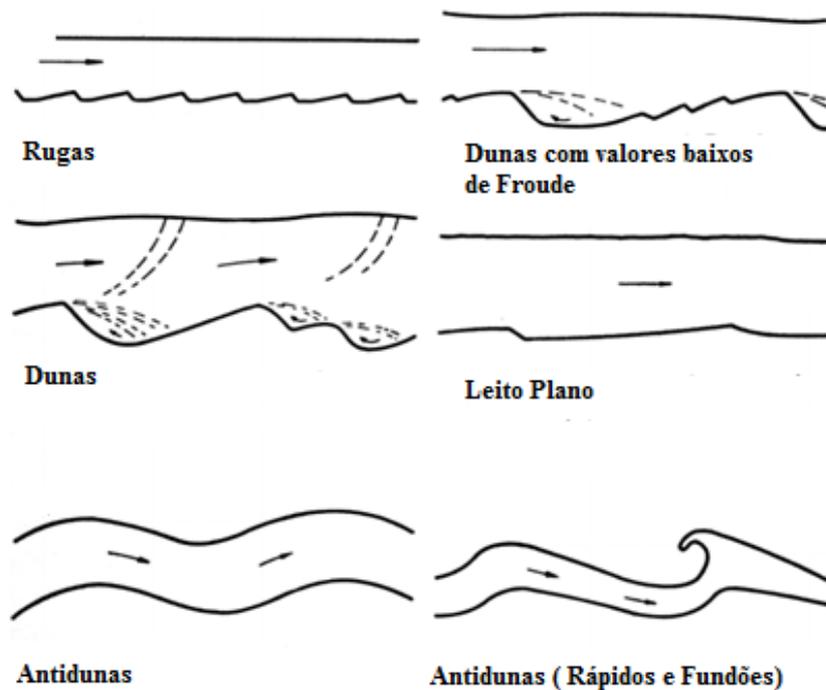


Figura 2.6 - Formas do leito (adaptado de Cardoso, 1998)

Sendo o fundo constituído por areia uniforme com $D \approx 0,6$ mm o fundo deforma-se dando origem a configurações designadas por rugas. Com o aumento da velocidade observam-se rugas sobre dunas. No caso de areias com $D \gg 0,6$ mm não se observa a formação de rugas, sendo as dunas as primeiras configurações de fundo.

Por aumento da velocidade sobre o fundo com dunas, atinge-se um valor acima do qual as configurações começam a desaparecer e o fundo tende para configurações planas (leito plano superior). Uma vez atingido o leito plano superior, a superfície do fundo é também plana (leito plano).

Para velocidades ainda mais elevadas e conseqüentemente números de Froude superiores, a superfície livre do escoamento torna-se instável e qualquer perturbação é ampliada dando lugar a ondas superficiais. As variações de velocidade associadas às ondas superficiais

induzem o desenvolvimento de erosões e deposição alternadas, formando ondas de sedimentos, conhecidas por antidunas, que crescem até atingir um equilíbrio ou até provocarem a rebentação das ondas de superfície.

Assim é usual identificar três regimes de escoamento associados aos vários tipos de configurações:

- regime inferior: leito plano, rugas e dunas
- regime de transição: duas em fase desaparecimento e outras configurações de fundo instáveis
- regime superior: leito plano superior e antidunas.

2.4.1. Rugas e dunas

As rugas têm normalmente altura aproximada de 5 cm, um comprimento aproximado de 60 cm e uma largura que se pode estender até a secção transversal do leito. A rugosidade de forma é maior que a rugosidade do grão para $30 < K_s < 50m^{1/3}s^{-1}$ e o seu aparecimento depende, essencialmente, da instabilidade de superfície do fundo.

As dunas são as configurações de fundo mais frequentes, podendo desenvolver-se com materiais de qualquer granulometria, com dimensões bastante superiores às das rugas e comprimentos que podem atingir cinco a sete vezes a sua altura. Têm uma rugosidade entre $30 < K_s < 50m^{1/3}s^{-1}$ mas são mais irregulares do que as rugas e existe transporte sólido por arrastamento e por suspensão, com concentrações de sedimentos que variam entre 100 e 1200 ppm (Sancho, 2002).

2.4.2. Leito superior

Esta configuração distingue-se do fundo plano inferior pela intensa mobilidade do material do fundo, com uma transporte de sólidos intenso, com concentrações de sedimentos que variam entre 1500 e 3000 ppm. Neste caso reduz-se a rugosidade de grão sendo ligeiramente inferior à que ocorre na ausência de transporte de sólido, $65 < K_s < 95m^{1/3}s^{-1}$.

2.4.3. Antidunas

Ocorrem em regime crítico e rápido com uma altura que varia entre 60 e 150 cm e com comprimento de 3 a 12 metros. São bastante instáveis, podendo migrar para montante, jusante ou manterem-se estacionárias.

Na intensa mobilidade do material do fundo podem ocorrer acelerações ou desacelerações do escoamento sobre a crista, conforme a altura do escoamento. A resistência depende da ocorrência, ou da não rebentação das ondas de superfície, e apresentam valores de rugosidade que rondam $30 < K_s < 65 m^{1/3} s^{-1}$ (Sancho, 2002).

2.4.4. Considerações finais

A tabela 2.1 resume os valores típicos do coeficiente de Manning-Strickler (K_s) e do caudal sólido, associados às diferentes configurações de fundo. A Figura 2.7 ilustra a evolução quantitativa do coeficiente de Manning-Strickler num leito de areia fina em função da velocidade ou do caudal (Cardoso, 1998).

Tabela 2.1 - Configuração do fundo (Cardoso, 1998)

Configurações de fundo	$K_s (m^{1/3} s^{-1})$	Caudal sólido em peso (ppm)
Rugas	30-50	10-200
Dunas	20-50	100-1200
Leito plano	65-95	1500-3000
Antidunas: sem rebentação	35-80	>2000
Antidunas: com rebentação	30-65	>2000

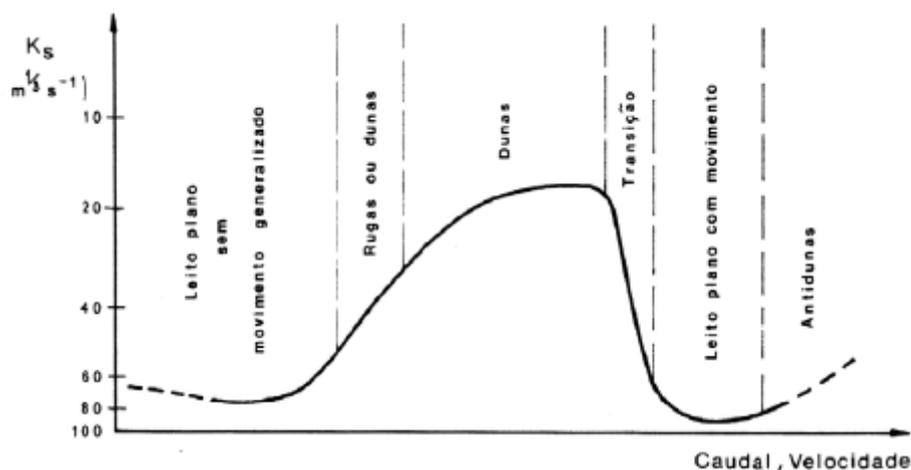


Figura 2.7 - Configurações de fundo, coeficiente de Manning-Strickler em função do caudal ou da velocidade (Adaptado de Lencastre e Franco 1984)

2.5. Barragens

Apresenta-se nesta secção uma breve revisão bibliográfica relativa a estruturas hidráulicas, nomeadamente barragens. A construção de barragens permite grandes armazenamentos de água. As primeiras civilizações usufruíram desses depósitos para o desenvolvimento e expansão agrícola, mais tarde com o progresso e necessidade de consumir água direta da barragem outras questões se levantaram, como a saúde pública e a qualidade da água.

Num contexto internacional, a utilização da água adequada e atempadamente, representa umas das mais importantes contribuições da engenharia civil para o bem-estar da sociedade. Cada barragem é uma obra única, independentemente do seu tamanho ou forma, onde se mobilizam vários conhecimentos, nomeadamente geologia, estruturas, construção e hidrologia (Novak et al., 1996).

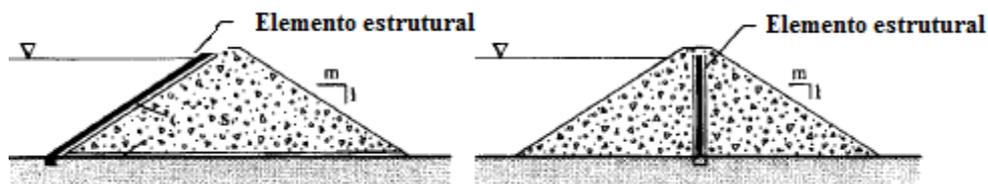
As primeiras barragens a surgir foram construídas a partir de meios naturais, materiais escavados ou obtidos por perto, e são usualmente designadas por barragens de aterro. O preenchimento natural dos materiais é obtido recorrendo à colocação de camadas compactadas, num processo que atualmente é mecanizado. Podem ainda empregar-se um elemento rígido permeável ou impermeável na zona de talude ou no núcleo, para conferir mais estabilidade à estrutura.

Estas barragens podem ser de diferentes tipos, dependendo da forma como se utilizam os materiais, como por exemplo:

1. aterros *Earthfill*, construídos principalmente por solos selecionados e compactados de maneira uniforme e intensiva em camadas finas e um teor de humidade controlada, em que os solos compactados representam mais de 50% do seu volume (Figura 2.8 a).
2. aterros de enrocamento, incluem um elemento impermeável discreto ou um elemento estrutural ou membrana betuminosa. Na prática moderna estes aterros são classificados como fortemente compactados e o método de execução é idêntico ao *Earthfill* (Figura 2.8 b).



a) Aterro Earthfill



b) Aterro de enrocamento

Figura 2.8 - Barragens de aterro (Novak et al., 1996)

As vantagens para a utilização deste tipo de barragens, são:

1. facilidade em adaptar-se a vários locais e vales;
2. facilidade em adaptar-se a uma vasta gama de fundações, desde rocha a solos macios ou eventualmente a solos permeáveis;
3. uso de materiais naturais e da zona, minimizando grandes deslocamentos ou grandes quantidades de material;
4. processo de execução altamente mecanizado e eficiente;
5. custo de execução menos dispendioso, comparativamente às barragens de betão;
6. o aterro pode acomodar com segurança um apreciável grau de deformação, sem risco de fissuras.

Posteriormente, na segunda metade do século XIX, surgiram as barragens de alvenaria, nomeadamente alvenaria em pedra até 10 toneladas, assentes sobre uma argamassa seca (alvenaria ciclópica). Mais tarde começaram a surgir as primeiras barragens de betão, como por exemplo:

1. barragem por gravidade (Figura 2.9 a), em que a sua estabilidade depende unicamente da sua massa, tendo um enorme volume na sua base e diminuindo à medida que se atinge o topo, em forma triangular;
2. barragem de contraforte (Figura 2.9 b), constituída por uma parede lisa a montante ao longo da estrutura, apoiada por paredes perpendiculares na zona jusante da barragem;
3. barragem em arco (Figura 2.9 c), que apresenta uma curvatura para montante que funciona como arco, descarregado as forças em pilares ou nas paredes laterais dos vales.

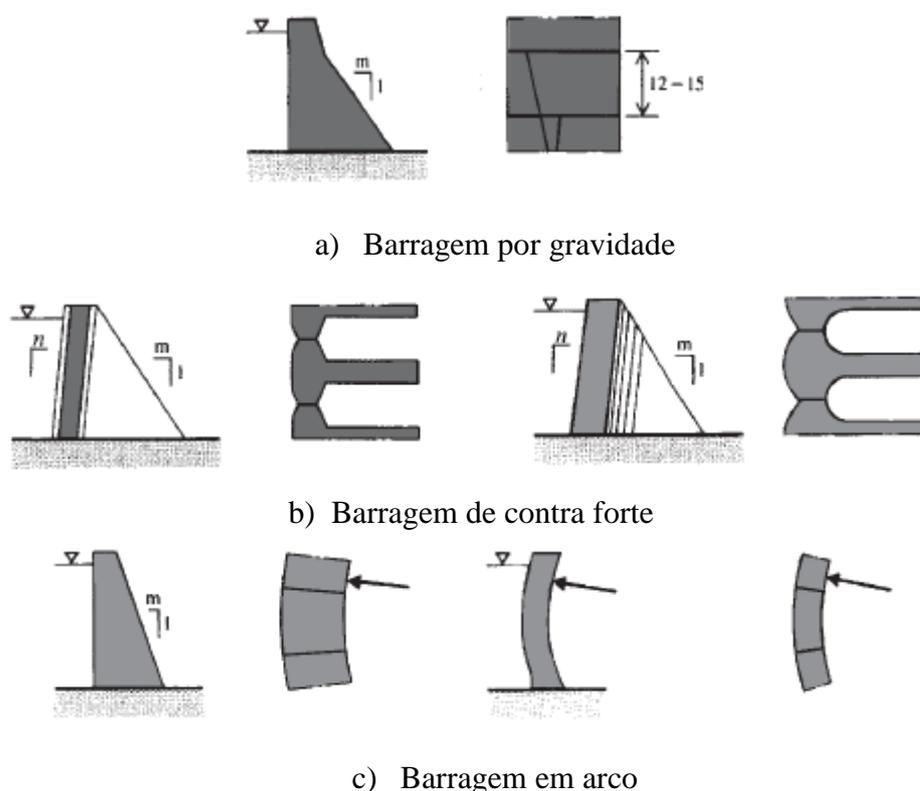


Figura 2.9 – Barragens em betão (Novak et al., 1996)

A escolha do modelo de barragem depende do projetista, ou das características de cada uma, como por exemplo:

1. barragem em arco é adequada para uma extensão entre margens pequena ou grande, desde que o solo de fundações seja adequado;
2. todas as barragens podem alojar uma descarga de cheia no seu topo e ao longo do seu topo;
3. podem acomodar todo o seu equipamento em galerias dentro da própria barragem;
4. têm a capacidade de resistir a sismos.

Em comparação com as barragens de aterro, as barragens de betão apresentam algumas desvantagens:

1. são exigentes em relação à fundação, necessitando de rocha forte;
2. requerem materiais naturais adequados e de qualidade, e armazenamento de enormes quantidades de cimento;
3. o processo de execução é demasiado lento, trabalhoso e descontínuo e há necessidade de mão de obra especializada, em varias áreas como a cofragem e betonagem;
4. o custo unitário de cimento para a execução barragem em betão é mais elevado do que para a barragem em aterro.

As barragens possuem necessariamente órgãos de segurança, como os descarregadores de cheias e órgãos que permitem o seu correto funcionamento, como é o caso das descargas de fundo.

As descargas de fundo, são aberturas no fundo da barragem que permitem esvaziar a mesma, em que a sua saída pode ser projetada sob pressão ou com fluxo livre sobre a zona jusante do rio. O seu dimensionamento tem como objetivo minimizar a erosão a jusante da barragem, utilizando-se para tal válvulas reguladoras, paredes curvas e junção de jatos na atmosfera (Figura 2.10 a) para diminuir a força de impacto do jato. No caso em que a descarga de fundo se encontra submersa (Figura 2.10 b) deve-se garantir um colchão de água com altura suficiente para evitar a erosão por vórtice. As descargas de fundo de grandes dimensões normalmente são utilizadas sobre colchões de água a jusante, para amortecer o efeito erosivo do jato originado.

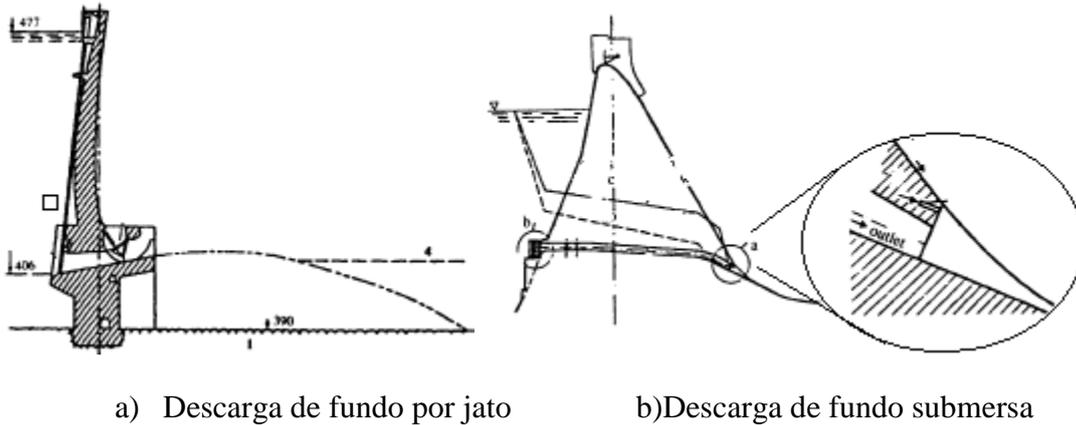


Figura 2.10 – Descargas de fundo (Novak et al., 1996)

Em relação às válvulas de retenção a instalar nas descargas de fundo, a mais utilizada é a válvula de dispersão em cone, de eixo horizontal com um cone dispersor a jusante, que permite projetar o jato de água em várias direções (Figura 2.11 a). A válvula de *Howell-Bunger* é mais económica, menos robusta, mas mais confiável e tem um coeficiente de vazão menor do que a válvula de cone, mas só pode ser utilizada quando se descarrega para a atmosfera (Figura 2.11 b) (Novak et al., 1996).

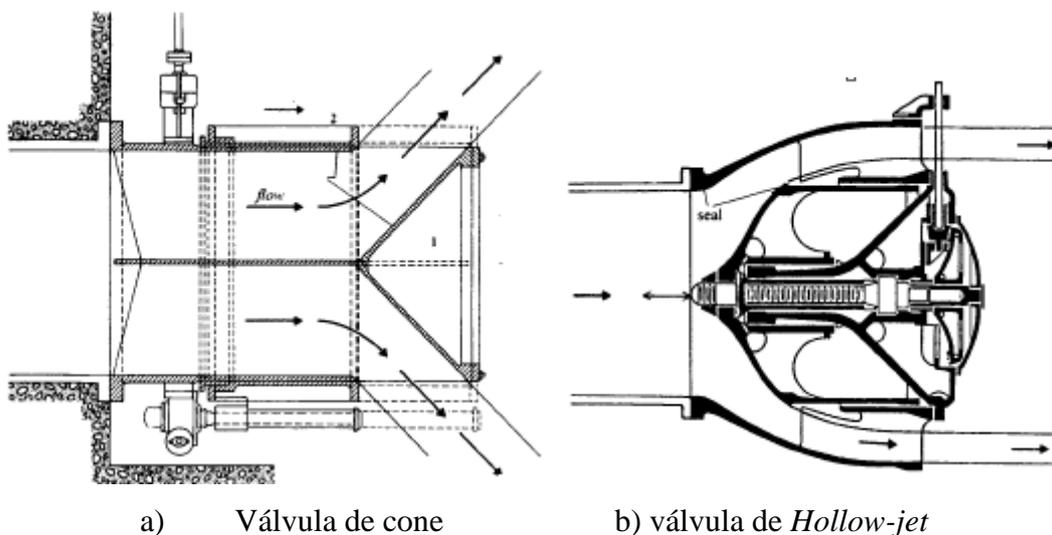


Figura 2.11 – Válvula de cone (Novak et al., 1996)

Existem ainda comportas utilizadas em descargas de cheia, para que não se ultrapasse o nível máximo de armazenamento da albufeira, nomeadamente (Novak et al. 1996):

1. comportas verticais, constituídas por um painel único ou duplo de chapa lisa, apoiado por estruturas fixas nas extremidades, e que podem deslizar através de rodas ou de um sistema de lagartas, esvaziando a albufeira (Figura 2.12 a);
2. comportas radiais, constituídas por painéis radiais ou verticais com barras transversais e braços, geralmente com o seu centro do eixo e sistema de rotação a jusante da comporta, normalmente içada por uma grua fixa com cabos com a vantagem de se poder elevar a comporta acima da grua (Figura 2.12 b);
3. comportas flutuadoras, constituídas por dois painéis fixos perpendicularmente ou em v, eixo articulado a montante, fazendo com que à medida que a barragem vai enchendo funcione como um flutuador aumentando a capacidade de armazenamento de água até atingir o seu ponto de equilíbrio e fazendo transbordar o excesso de água. São comportas difíceis de instalar e exigem uma manutenção cuidada, mas em contrapartida possuem auto regulação, não sendo necessário qualquer tipo de elevação mecânica (Figura 2.12 c);
4. comportas de *Flap* ou basculantes, um sistema muito idêntico às comportas flutuadoras mas recorrendo a um meio mecânico que faz a elevação da comporta regulando a capacidade de armazenamento de água. É uma das comportas mais simples e mais utilizada (Figura 2.12 d);
5. comportas rotacionais, construídas a partir de um cilindro onde numa das suas extremidades é colocada uma comporta fixa num ponto que à medida que vai rodando vai proporcionando o esvaziamento da barragem (Figura 2.12 e).

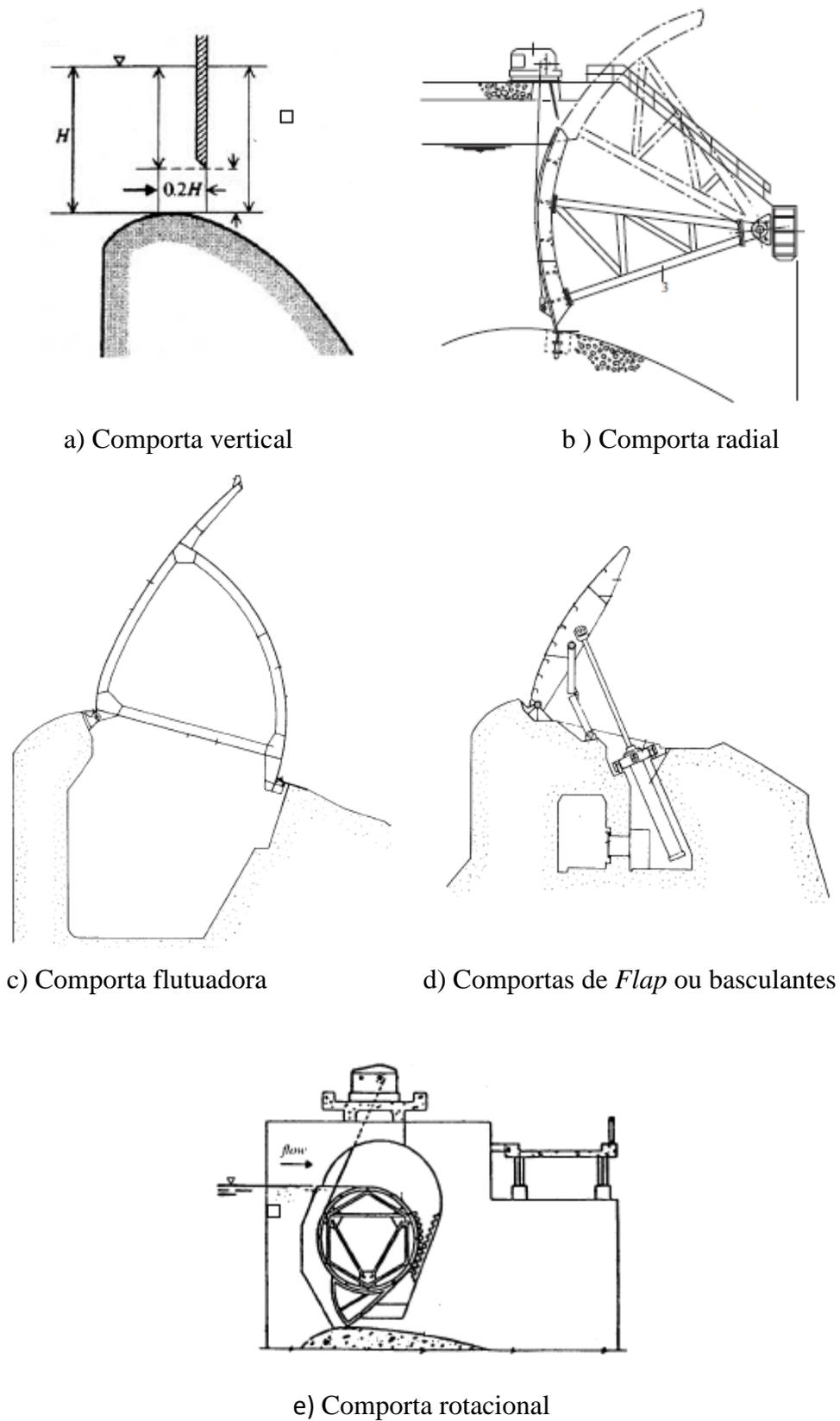


Figura 2.12 – Descarregadores de cheias (Novak et al., 1996)

Existe ainda a descarga proveniente do circuito hidráulico da barragem, onde estão instaladas as turbinas (Figura 2.13).

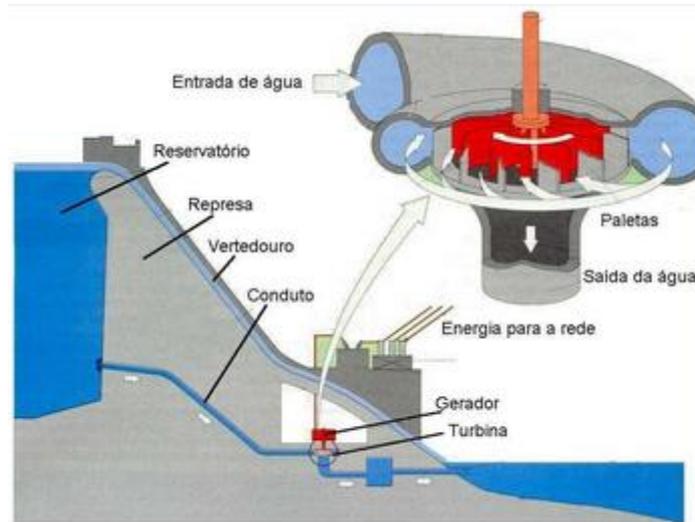


Figura 2.13 - Turbina Hidroelétrica (retirado de Ebah, 2014)

As barragens estão equipadas com dissipadores de energia, resultando na dissipação de energia proveniente dos descarregadores de cheia. Há um número considerável de fenômenos hidráulicos envolvidos, nomeadamente, transição de escoamentos críticos, escoamentos não arejados ou arejados, jatos de água em queda livre no colchão de água, que podem provocar a erosão na proximidade das barragens, como se poderá, constatar da leitura da próxima secção.

2.6. Erosão nas proximidades das estruturas hidráulicas

A erosão é um problema bastante estudado em hidráulica, em especial a erosão localizada em pilares e encontros de pontes, e em barragens e soleiras descarregadoras. A importância de controlar a corrente das estruturas hidráulicas existente nas obras fluviais deu origem a vários estudos de forma a controlar essa erosão. Apresenta-se de seguida uma súmula dos estudos identificados relativos a esta problemática.

Dargahi (2010) estudou experimentalmente um descarregador de cheias com bacia de dissipação (Figura 2.14), tendo observado a ocorrência de ressalto hidráulico na bacia. Este ressalto originou escoamentos secundários caracterizados pela existência de vórtices e originou cavidades de erosão a jusante. Observou que o número de cavidades era função do material do fundo e do caudal descarregado. A variação temporal do leito causou mudanças significativas nas condições de fronteira, que originaram padrões de transporte complexos que incluíam todos os modos de transporte.

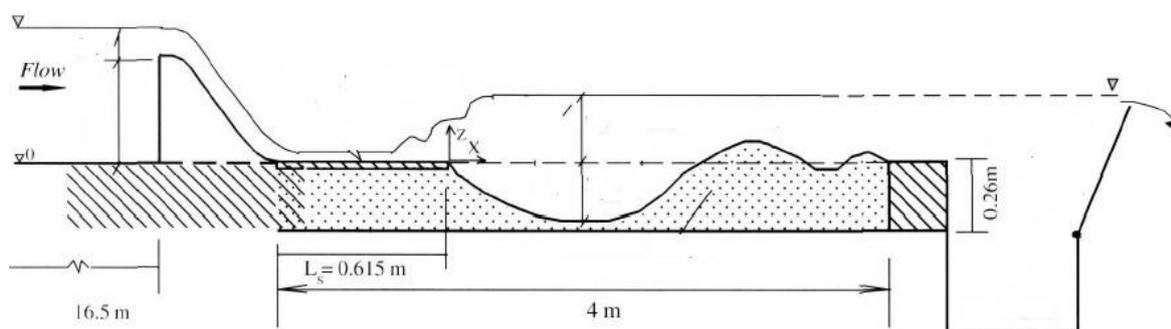


Figura 2.14 – Seção de teste descarregador de soleira (retirado de Dargahi, 2010)

Hill e Younkin (2006) estudaram experimentalmente as cavidades de erosão originadas a jusante de jatos planos paralelos à superfície de sedimentos, tendo medido o campo de velocidades no interior da cavidade de erosão e por cima da duna originada a jusante. Observaram que a geometria da cavidade de erosão era bem representada por três segmentos lineares com inclinações próximas do ângulo de repouso dos sedimentos distintos. As medições do campo de velocidades revelaram a presença de uma zona de recirculação no interior da cavidade e um jato de parede ao longo do principal talude da cavidade de erosão. Determinaram a tensão de corte para uma configuração do fundo próxima da de equilíbrio e observaram que estava de acordo com a tensão de corte correspondente ao movimento incipiente.

Oliveto e Conuniello (2009) utilizaram modelos empíricos baseados em resultados experimentais obtidos em descarregadores de soleira normal de baixa carga. Estimaram: a máxima profundidade de erosão na fase próxima do equilíbrio e sua distância à borda da bacia; o período de tempo de cada escavação e o perfil axial da cavidade erosão do ressalto hidráulico de um descarregador de soleira (Figura 2.15).

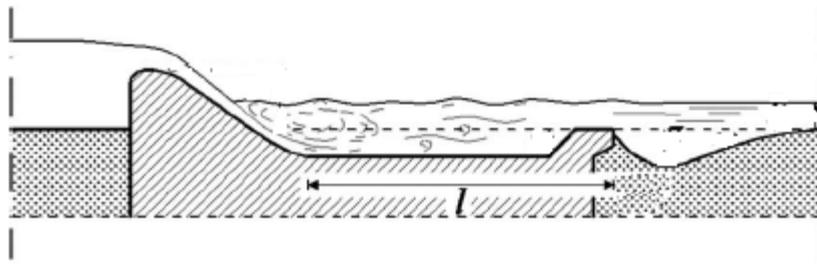


Figura 2.15 – Esquema a jusante de um descarregador de soleira (retirado de Oliveto e Conuniello 2009)

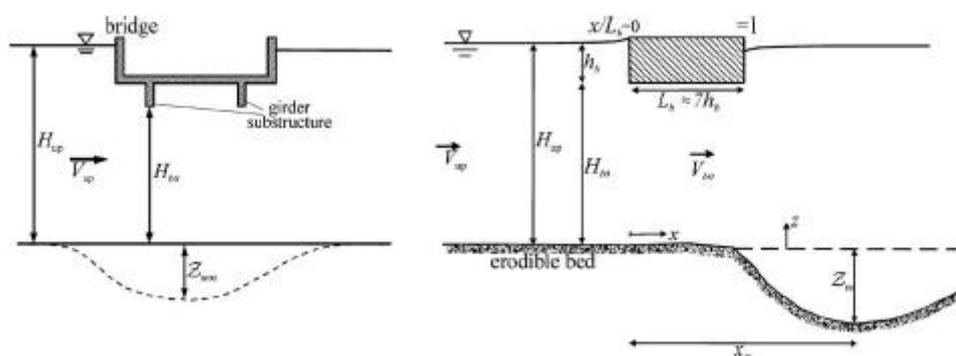
Toombes e Chanson (2007) estudaram o arejamento e transferência de momento linear de uma descarga de fundo. Os escoamentos de jatos de alta velocidade são extremamente turbulentos e a interferência do arejamento é comumente observada. Este estudo analisou as propriedades da mistura ar-água existente nos jatos originários de descargas de fundo (Figura 2.16).



Figura 2.16 - Fluxo de ar e água (retirado de Toombes e Chanson 2007)

Hahn e Lyn (2010) estudaram uma contração vertical que se verifica no caso de cheia quando o nível de água atinge o tabuleiro de uma ponte (Figura 2.17). Determinaram a

máxima erosão ocorrida no leito móvel, e observaram erosões até 48 h após a aplicação da contração no início do ensaio.



a) Modelo de referência

b) Modelo estudado

Legenda:

h_b Profundidade da submersão

H_{up} Profundidade a montante

H_{b0} Profundidade do leito submerso

L_b Comprimento de submersão

$Z_{m\infty} - Z_m$ Profundidade máxima vascular

Z coordenada vertical original

$V_{up} - V_{bo}$ Velocidade a montante e velocidade na secção da submersão

Figura 2.17 – Contração Vertical (Hahn e Lyn, 2010)

Lima e Ferreira (2012) avaliaram um conjunto de ensaios em canal hidráulico e descrevem os procedimentos de estudos experimentais do fenómeno da erosão localizada a jusante de um descarregador de soleira delgada. O fenómeno de erosão localizada a jusante do descarregador caracteriza-se por uma cavidade de erosão que aumenta muito rapidamente de profundidade máxima e de extensão. Observaram que para o mesmo caudal descarregado a cavidade de erosão evolui mais rapidamente para menores alturas de água a jusante do descarregador.

Mignot e Riviere (2010) descreveram os padrões de escoamento que ocorrem na interação com obstáculos, onde ocorre um ressalto hidráulico. O escoamento aproxima-se do obstáculo e o gradiente da pressão adversa entre o escoamento a montante e o escoamento do obstáculo origina uma separação da camada limite. Consequentemente observa-se um vórtice a montante do obstáculo. Se a velocidade do escoamento de entrada for

suficientemente lenta, múltiplos vórtices ocorrem, quando a velocidade do escoamento aumenta, observa-se um único vórtice, mas se a velocidade continuar a aumentar não se observa nenhum vórtice.

Leandro et al. (2012) apresentaram um estudo relativo a um ressalto hidráulico que pode ser encontrado em escoamentos com superfície livre. Este ressalto é caracterizado pela existência de uma superfície em forma de “rolo” com a introdução de ar, turbulência e dissipação de energia. Este trabalho baseou-se no processamento de imagem, e os resultados demonstraram a sua aplicabilidade neste tipo de estudo. A determinação da fração de vazios, associada à mistura água-ar, num ressalto hidráulico pode ser estimada com base na intensidade de pixels.

Bey et al. (2007) efetuou experiências laboratoriais acerca da interação de jatos com leitos móveis. Pagliara et al. (2006) investigaram uma série de dados bidimensionais sobre os efeitos de um jato de água sobre uma camada de rochas, dando origem a uma variedade de configurações geométricas e hidráulicas.

Pagliara et al. (2008 a) apresentaram uma experiência que diz respeito ao estudo de um jato aplicado a um colchão de água e a uma camada de sedimentos, estudando assim a cavidade de erosão com a profundidade máxima de escavação e altura máxima do depósito de areia, bem como as suas localizações em relação à origem. Pagliara et al. (2008 c) apresentaram uma experiência idêntica à anterior, mas desta vez o jacto era aplicado a meio do colchão de água e atingia a camada de sedimentos, estudando assim as novas condições para a cavidade de erosão com a profundidade máxima de escavação e altura máxima do depósito de areia, bem como as suas localizações em relação à origem.

Pagliara e Palermo (2008b) estudaram a erosão localizada a jusante de uma estrutura hidráulica e avaliaram a utilização de anteparos para a sua mitigação.

Manso et al (2009) estudaram a dissipação de energia no colchão de água a jusante de uma queda vertical e as cargas dinâmicas transmitidas à fundação de rocha (Figura 2.18).

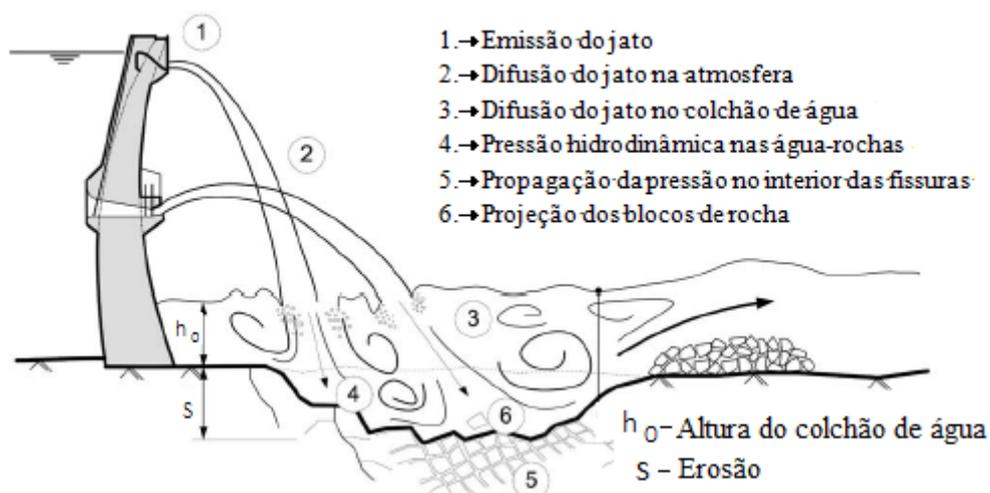


Figura 2.18 – Principais processos físicos na envolvente de fundos rochosos (Manso et al., 2009)

A geometria do colchão de água é um elemento chave na definição de carácter médio e turbulento e no impacto dinâmico de pressões. Os padrões de escoamento introduzidos pela interação da camada de corte turbulenta com a geometria associada alteram consideradamente a pressão do jacto e penetração das bolhas de ar nas laterais confinadas em relação às piscinas com laterais ilimitadas. Nos colchões de água com laterais confinadas o jacto gera correntes ascendentes que praticamente destroem o próprio jacto. Este ao mergulhar reduz a dimensão do vórtice e quanto mais confinado for o escoamento menos energia aparece no fundo da mesma. O confinamento lateral pode influenciar a transmissão de pressão para a rocha e também leva à amplificação de pressões dentro de fissuras subjacentes. Apesar desta desvantagem inicial o confinamento aumenta a dissipação de energia na coluna de água e reduz a pressão de impacto até 50%.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se o método experimental utilizado, descreve-se a instalação experimental, e as estruturas que simulam uma barragem e a respetiva descarga de fundo. Descreve-se igualmente o procedimento adotado para o processamento de imagem efetuado.

3.1. Instalação experimental

O trabalho experimental descrito foi realizado no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho em Azurém. Para a realização dos ensaios foi utilizado um banco hidráulico didático *Armfiel* (modelo F1-10), pretende-se simular em modelo reduzido à escala geométrica (λ_l) 1/500, e considerando uma semelhança de Froude para estabelecer a escala de caudais, se instalaram várias estruturas simulando uma descarga de fundo de uma barragem, variando os diâmetros do orifício, granulometrias das areias e caudais, e se observou o escoamento e respetiva erosão localizada a jusante.

3.1.1. Canal

Adaptou-se o acessório do banco hidráulico (*Armfiel*, modelo F1-19) instalado no canal didático (Figura 3.1), que originalmente permitia visualizar o escoamento em torno de obstáculos. Este canal, com paredes laterais em vidro acrílico, tinha secção transversal retangular com 15 mm de largura, e 150 mm de altura e 615 mm de comprimento. Como o canal é estreito, possibilita a criação de escoamentos bidimensionais e está especialmente indicado para o estudo de cavidades de erosão localizada bidimensionais.

O canal funcionava em circuito fechado, sendo alimentado por uma bomba centrífuga, que podia debitar um caudal máximo de 60 L min^{-1} , a partir do reservatório de armazenamento

do banco hidráulico (com uma capacidade de 250 L), para o reservatório de regularização existente a montante do canal. A ligação entre o reservatório de regularização e o canal era efetuada através de uma secção convergente, com uma configuração que permitia reduzir a turbulência do escoamento.



Figura 3.1 – Bancada *Armfield* e canal de visualização

3.1.2. Areia

Para melhor retratar as condições reais, foi necessária a alteração do canal para que fosse possível a colocação de uma camada inferior de areia, de forma a simular o leito do curso de água onde a barragem estaria instalada. Assim, optou-se por colocar nas extremidades do canal mangas vedantes formando um caixa de areia com 600 mm de extensão. Foi igualmente colocado um reservatório na bancada hidráulica, para que a areia proveniente do canal ficasse retida, evitando assim provocar danos à bomba.

Utilizaram-se três areias de granulometria diferente, de maneira a estudar a sua influência nos resultados experimentais. Selecionou-se uma areia de diâmetro médio igual a 1,425 mm, correspondentes à média das aberturas dos peneiros nº 10 (2 mm) e nº 20 (0,85 mm), nos quais a areia passa e fica retida, respetivamente. Esta areia, que será designada por areia grossa, corresponde no protótipo rochas de cerca de 0,71 m de diâmetro.

Utilizou-se igualmente uma areia que tem diâmetro médio compreendido entre as aberturas dos dois peneiros seguintes. Assim obteve-se uma areia de diâmetro médio igual 0,638 mm, que é a areia passada no peneiro nº 20 (0,85 mm) e retida no peneiro nº 40 (0,425mm). Esta areia, que será designada por areia média, no protótipo representa rochas com cerca de 0,32 m de diâmetro. Por fim utilizou-se uma areia de diâmetro médio igual a 0,338 mm, que é a areia passada no peneiro nº 40 (0,425 mm) e retida no peneiro nº 60 (0,25 mm), que no protótipo corresponde a seixos com cerca de 0,17 m de diâmetro. Esta areia será designada por areia fina.

Determinou-se a velocidade média crítica para cada uma das areias, com base no diagrama de Shields (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Velocidades Críticas

Da (mm)	Re	coef. Shields	u_{*c} (m/s)
1,425	59	0,040	0,0304
0,638	17	0,031	0,0170
0,338	8	0,033	0,0013

Nota: Re número do diagrama de Shields

3.1.3. Secção de Teste

Realizado o modelo reduzido à escala geométrica (λ_l) 1/500 da descarga de fundo de uma barragem, com o objetivo de visualizar a cavidade de erosão originada a jusante da barragem. O paramento da barragem foi simulado recorrendo a uma chapa de metal cubica com 15 mm em cada face e altura de 150 mm, na qual se fez um orifício, com o diâmetro pretendido para simular a descarga de fundo. Foram utilizados orifícios com diâmetros iguais a 5 mm, 3,6 mm e 2 mm correspondentes, na escala real, a 2500 mm, 1800 mm e 1000 mm respetivamente. Os orifícios encontravam-se localizados a distâncias de 2 cm, 1cm e 0 cm, entre o seu eixo e a superfície de camada de areia correspondendo, à escala real, a 10 m, 5 m e 0 m respetivamente (Figura 3.2).

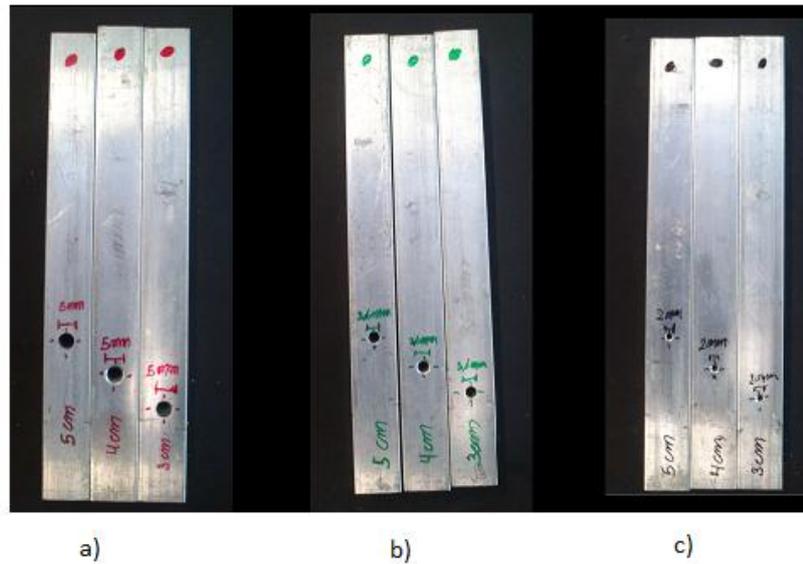


Figura 3.2 – Modelos da descarga de fundo, (a) orifícios com 5 mm de diâmetro, (b) orifícios com 3,6 mm de diâmetro, (c) orifícios com 2 mm de diâmetro

3.2. Condições Experimentais

A Figura 3.3 apresenta de uma forma esquemática os ensaios realizados. Para o mesmo valor de caudal estudam-se as areias grossa, média e fina e para cada tipo de areia fizeram-se ensaios diferentes para os três orifícios. Para cada orifício estudaram-se diferentes distâncias à superfície da areia e alturas de água a jusante. Ou seja repetindo o mesmo esquema da areia grossa, para a areia media e fina obtém-se um total de 45 ensaios. Juntando mais 45 ensaios realizados para uma redução de caudais igual a 20%, realizaram-se um total de 90 ensaios.

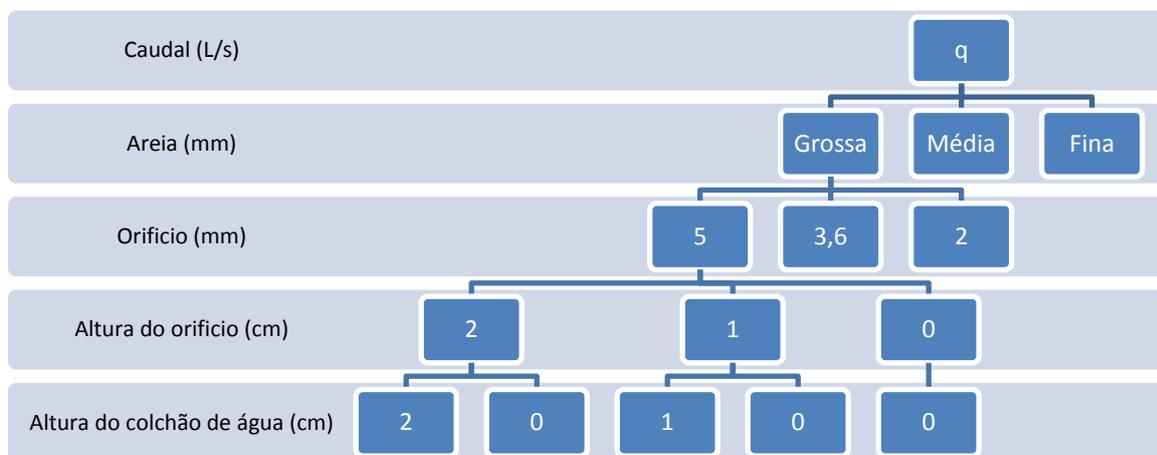
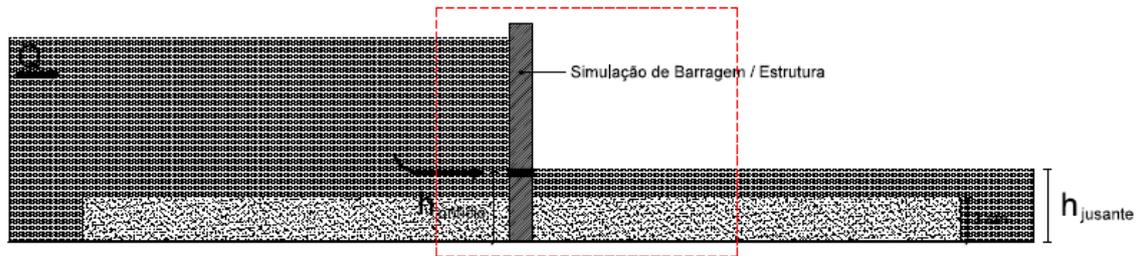


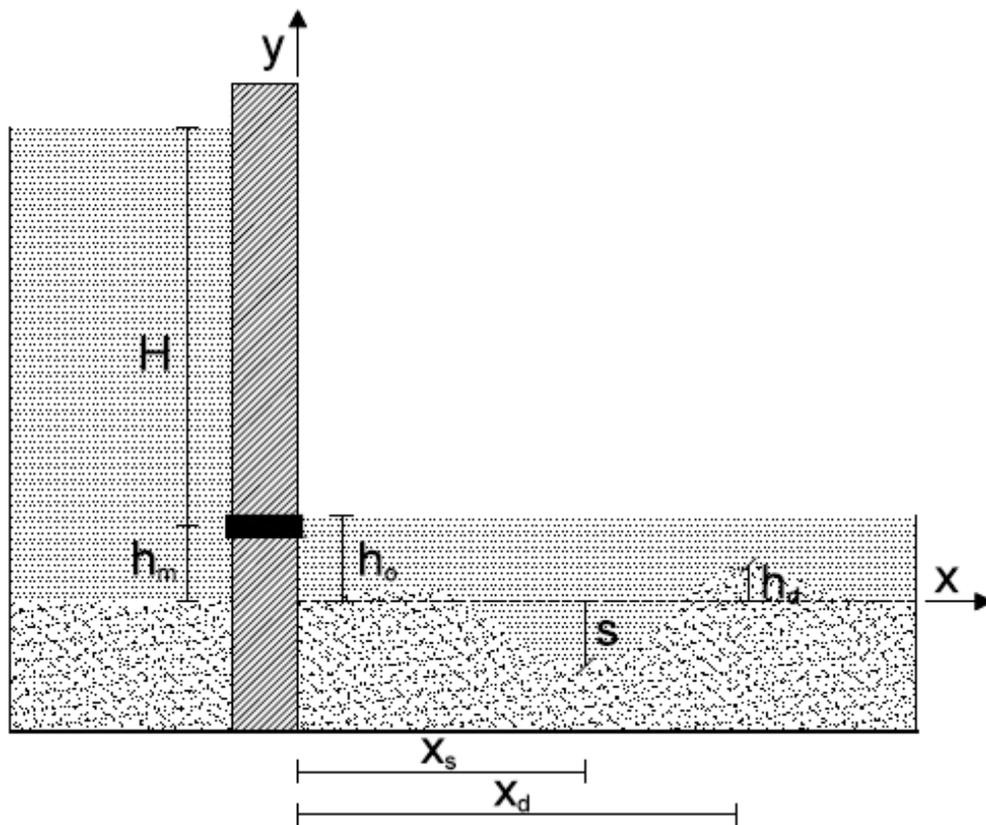
Figura 3.3 – Esquema dos ensaios realizados

Nota: Nesta face a altura do colchão de água é apenas uma estimativa, de forma a organizar e a planear os ensaios.

Atendendo a todas estas variantes, os ensaios podem ser classificados em três tipos diferentes de estruturas, tipo A (Figura 3.4), tipo B (Figura 3.5), e tipo C (Figura 3.6).



a)



b)

Figura 3.4 – Estrutura do Tipo A, a) Esquema da estrutura, (b) Pormenor da erosão

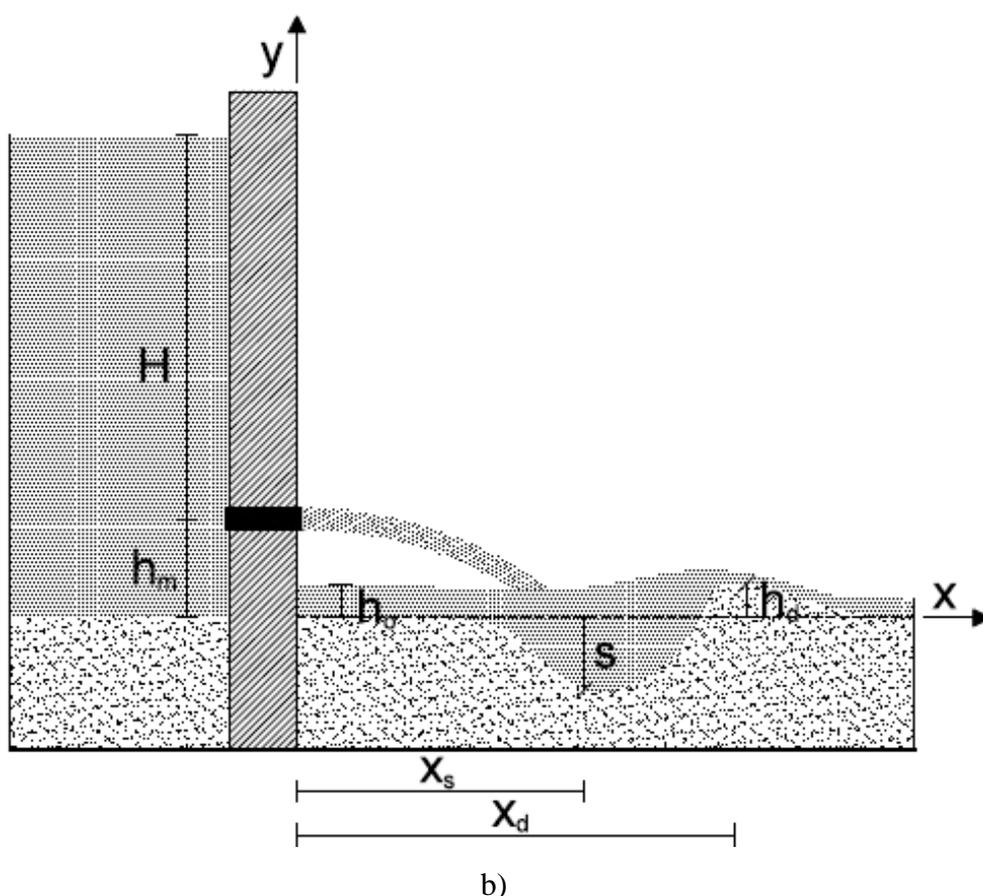
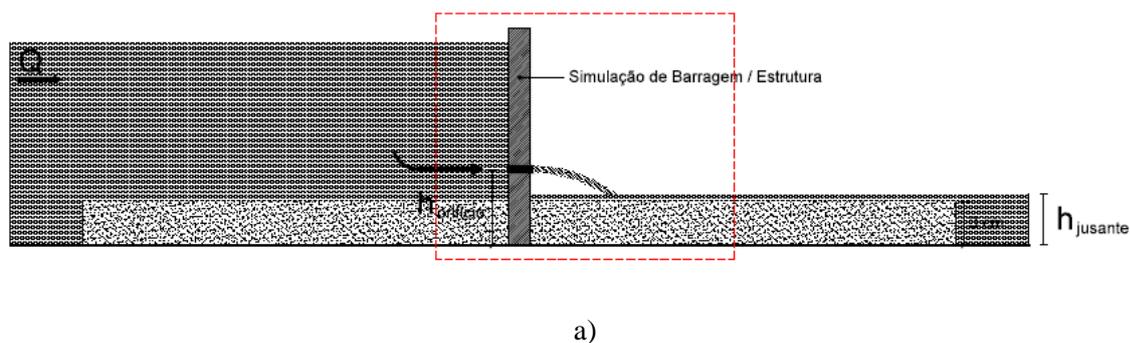


Figura 3.5 – Estrutura do Tipo B, a) Esquema da estrutura, (b) Pormenor da erosão

A determinação do caudal foi feita registando o intervalo de tempo necessário para escoar um determinado volume de água. Para cada tipo de diâmetro e para as diferentes alturas da descarga de fundo, mediu-se o tempo necessário para encher uma proveta com capacidade de 0,5 L, recorrendo a um cronómetro. Esta determinação volumétrica do caudal efetuou-se três vezes, para reduzir a incerteza experimental associada.

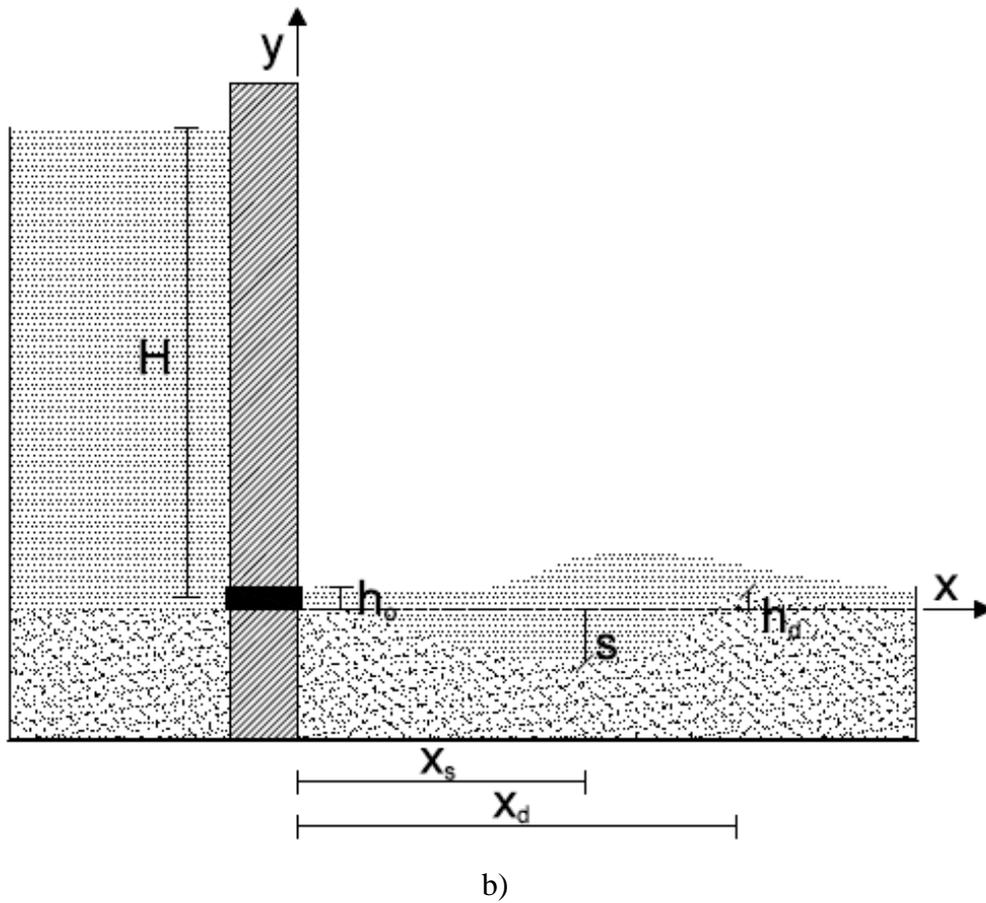
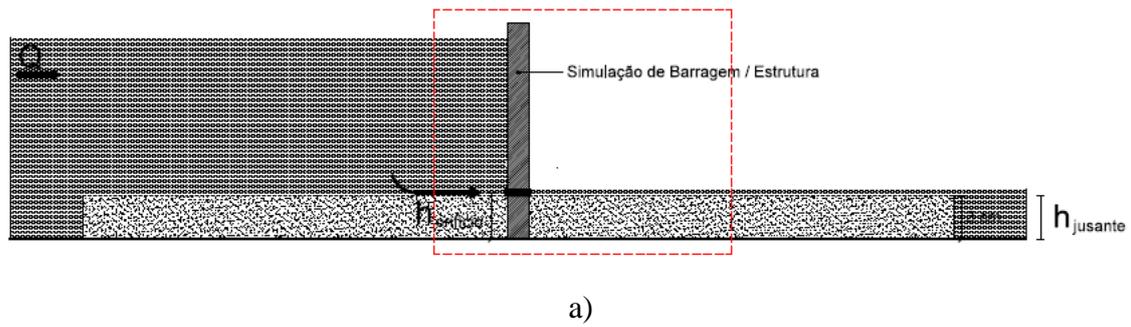


Figura 3.6 – Estrutura do Tipo C, a) Esquema da estrutura, (b) Pormenor da erosão

em que H é altura do escoamento a montante, h_o representa a altura do colchão de água, h_m é a altura do orifício, h_d a altura de deposição de areia, S é a erosão na camada de areia, X_s a distância da erosão à estrutura e X_d distância da deposição à estrutura.

O caudal a considerar para cada orifício corresponde à média daqueles três valores (Tabela 3.2 e Tabela 3.3). Considerando uma semelhança de Froude é possível, estabelecer uma

escala de caudais (λ_Q) igual a $\lambda_l^{5/2}$, ou seja, 1/5590170 (Novais-Barbosa, 1986) e estimar o correspondente caudal real.

Tabela 3.2 – Caudais no modelo e no protótipo, caudais máximos

Diâmetro do orifício (mm)	Ensaio	Caudal Modelo (L/s)	Caudal Real (m ³ /s)
5	1-16-31	0,0237	132,49
	2-17-32	0,0237	132,49
	3-18-33	0,0258	144,23
	4-19-34	0,0258	144,23
	5-20-35	0,0275	153,73
3,6	6-21-36	0,0120	67,08
	7-22-37	0,0120	67,08
	8-23-38	0,0140	78,26
	9-24-39	0,0140	78,26
	10-25-40	0,0150	83,85
2	11-26-41	0,0037	20,68
	12-27-42	0,0037	20,68
	13-28-43	0,0041	22,86
	14-29-44	0,0041	22,86
	15-30-45	0,0051	28,51

Tabela 3.3 – Caudais no modelo e no protótipo, caudais reduzidos em 20%

Diâmetro do orifício (mm)	Ensaio	Caudal Modelo (L/s)	Caudal Real (m ³ /s)
5	46-61-76	0,0190	105,99
	47-62-77	0,0190	105,99
	48-63-78	0,0206	115,38
	49-64-79	0,0206	115,38
	50-65-80	0,0220	122,98
3,6	51-66-81	0,0096	53,67
	52-67-82	0,0096	53,67
	53-68-83	0,0112	62,61
	54-69-84	0,0112	62,61
	55-70-85	0,0120	67,08
2	56-71-86	0,0030	16,55
	57-72-87	0,0030	16,55
	58-73-88	0,0033	18,29
	59-74-89	0,0033	18,29
	60-75-90	0,0041	22,81

Apresentam-se nas tabelas 3.4 a 3.9 as condições experimentais da totalidade dos ensaios realizados. Para cada um dos ensaios, adotou-se a designação do tipo de estrutura (A, B ou C) e do teste A_i (i=1 a 6), B_i (i= 1 a 6), C_i (i=1 a 3)) de acordo com a dimensão do orifício e a distância a que este se encontrava da superfície de areia.

Tabela 3.4- Condições experimentais para o caudal máximo e diâmetro da areia igual a 1,425 mm

Ensaio	Caudal (L/s)	Duração (h:m:s)	Diâmetros do orifício (mm)	Altura do orifício (cm)	h_0 (cm)	Tipo de estrutura/Teste
1	0,0237	00:00:55	5	2	2,49	A/A1
2	0,0237	00:01:23	5	2	1,11	B/B1
3	0,0258	00:01:11	5	1	1,22	A/A2
4	0,0258	00:01:23	5	1	0,94	B/B2
5	0,0275	00:01:08	5	0	0,20	C/C1
6	0,0120	00:00:36	3,6	2	2,62	A/A3
7	0,0120	00:00:41	3,6	2	0,92	B/B3
8	0,0140	00:01:00	3,6	1	1,35	A/A4
9	0,0140	00:01:00	3,6	1	0,65	B/B4
10	0,0150	00:00:38	3,6	0	0,35	C/C2
11	0,0037	00:01:03	2	2	2,56	A/A5
12	0,0037	00:00:31	2	2	0,32	B/B5
13	0,0041	00:00:58	2	1	1,44	A/A6
14	0,0041	00:00:41	2	1	0,65	B/B6
15	0,0051	00:00:41	2	0	0,24	C/C3

Tabela 3.5 - Condições experimentais para o caudal máximo e diâmetro da areia igual a 0,638 mm

Ensaio	Caudal (L/s)	Duração (h:m:s)	Diâmetro do orifício (mm)	Altura do orifício (cm)	h_0 (cm)	Tipo de estrutura/Teste
16	0,0237	00:01:06	5	2	2,5	A/A1
17	0,0237	00:01:00	5	2	1,07	B/B1
18	0,0258	00:01:14	5	1	1,39	A/A2
19	0,0258	00:00:50	5	1	0,67	B/B2
20	0,0275	00:00:30	5	0	0,60	C/C1
21	0,0120	00:00:51	3,6	2	2,52	A/A3
22	0,0120	00:00:50	3,6	2	0,79	B/B3
23	0,0140	00:00:30	3,6	1	1,30	A/A4
24	0,0140	00:00:49	3,6	1	0,87	B/B4
25	0,0150	00:00:35	3,6	0	0,45	C/C2
26	0,0037	00:00:30	2	2	2,62	A/A5
27	0,0037	00:00:30	2	2	0,70	B/B5
28	0,0041	00:00:20	2	1	1,49	A/A6
29	0,0041	00:00:30	2	1	0,61	B/B6
30	0,0051	00:00:30	2	0	0,11	C/C3

Tabela 3.6 - Condições experimentais para o caudal máximo e diâmetro da areia igual a 0,338 mm

Ensaio	Caudal (L/s)	Duração (h:m:s)	Diâmetro do orifício (mm)	Altura do orifício (cm)	h_0 (cm)	Tipo de estrutura/Teste
31	0,0237	00:00:50	5	2	2,68	A/A1
32	0,0237	00:01:13	5	2	1,32	B/B1
33	0,0258	00:01:04	5	1	1,28	A/A2
34	0,0258	00:00:40	5	1	0,42	B/B2
35	0,0275	00:00:50	5	0	0,54	C/C1
36	0,0120	00:00:40	3,6	2	2,26	A/A3
37	0,0120	00:00:41	3,6	2	0,82	B/B3
38	0,0140	00:00:40	3,6	1	1,04	A/A4
39	0,0140	00:00:50	3,6	1	0,61	B/B4
40	0,0150	00:00:40	3,6	0	0,65	C/C2
41	0,0037	00:01:14	2	2	2,30	A/A5
42	0,0037	00:00:30	2	2	0,61	B/B5
43	0,0041	00:00:22	2	1	1,49	A/A6
44	0,0041	00:00:30	2	1	0,57	B/B6
45	0,0051	00:00:50	2	0	0,31	C/C3

Tabela 3.7 - Condições experimentais para o caudal reduzido em 20% e diâmetro da areia igual a 1,425 mm

Ensaio	Caudal (L/s)	Duração (h:m:s)	Diâmetro do orifício (mm)	Altura do orifício (cm)	h_0 (cm)	Tipo de estrutura/Teste
46	0,0189	00:00:41	5	2	2,83	A/A'1
47	0,0189	00:00:30	5	2	0,98	B/B'1
48	0,0206	00:00:50	5	1	1,62	A/A'2
49	0,0206	00:00:31	5	1	1,03	B/B'2
50	0,0220	00:00:50	5	0	0,64	C/C'1
51	0,0096	00:00:30	3,6	2	2,64	A/A'3
52	0,0096	00:00:30	3,6	2	0,93	B/B'3
53	0,0112	00:00:30	3,6	1	1,56	A/A'4
54	0,0112	00:00:30	3,6	1	0,73	B/B'4
55	0,0120	00:00:40	3,6	0	0,33	C/C'2
56	0,0030	00:00:40	2	2	3,04	A/A'5
57	0,0030	00:00:41	2	2	0,68	B/B'5
58	0,0033	00:00:30	2	1	1,67	A/A'6
59	0,0033	00:00:30	2	1	0,75	B/B'6
60	0,0041	00:00:35	2	0	0,26	C/C'3

Tabela 3.8 - Condições experimentais para o caudal reduzido em 20%, e diâmetro da areia igual a 0,638 mm

Ensaio	Caudal (L/s)	Duração (h:m:s)	Diâmetro do orifício (mm)	Altura do orifício (cm)	h_0 (cm)	Tipo de estrutura/Teste
61	0,0189	00:00:30	5	2	2,41	A/A'1
62	0,0189	00:01:00	5	2	0,95	B/B'1
63	0,0206	00:00:50	5	1	1,14	A/A'2
64	0,0206	00:00:40	5	1	1,14	B/B'2
65	0,0220	00:00:30	5	0	0,75	C/C'1
66	0,0096	00:00:30	3,6	2	2,58	A/A'3
67	0,0096	00:00:30	3,6	2	1,10	B/B'3
68	0,0112	00:00:30	3,6	1	1,32	A/A'4
69	0,0112	00:00:30	3,6	1	0,66	B/B'4
70	0,0120	00:00:40	3,6	0	0,51	C/C'2
71	0,0030	00:00:30	2	2	2,47	A/A'5
72	0,0030	00:00:30	2	2	0,78	B/B'5
73	0,0033	00:00:30	2	1	1,28	A/A'6
74	0,0033	00:00:30	2	1	0,62	B/B'6
75	0,0041	00:00:30	2	0	0,37	C/C'3

Tabela 3.9 - Condições experimentais para o caudal reduzido em 20%, e diâmetro da areia igual a 0,338 mm

Ensaio	Caudal (L/s)	Duração (h:m:s)	Diâmetro do orifício (mm)	Altura do orifício (cm)	h_0 (cm)	Tipo de estrutura/Teste
76	0,0189	00:00:40	5	2	2,57	A/A'1
77	0,0189	00:00:40	5	2	1,06	B/B'1
78	0,0206	00:00:40	5	1	1,17	A/A'2
79	0,0206	00:01:00	5	1	0,68	B/B'2
80	0,0220	00:00:40	5	0	0,72	C/C'1
81	0,0096	00:00:30	3,6	2	2,37	A/A'3
82	0,0096	00:00:30	3,6	2	0,84	B/B'3
83	0,0112	00:00:30	3,6	1	1,32	A/A'4
84	0,0112	00:00:40	3,6	1	0,89	B/B'4
85	0,0120	00:00:30	3,6	0	0,65	C/C'2
86	0,0030	00:00:30	2	2	2,29	A/A'5
87	0,0030	00:00:30	2	2	0,73	B/B'5
88	0,0033	00:00:30	2	1	1,32	A/A'6
89	0,0033	00:00:30	2	1	0,58	B/B'6
90	0,0041	00:00:30	2	0	0,20	C/C'3

Nota: Após a realização dos ensaios a altura do colchão de água vai variando ao longo dos ensaios, conforme as suas condições, originando valores acima da estimativa (Figura 3.3).

3.3. Metodologia Experimental

Para uma melhor compreensão do trabalho realizado experimentalmente, nesta secção descreve-se todos os passos realizados e repetidos ao longo dos ensaios.

Inicialmente foi necessária a colocação de escalas nos canais para que fosse possível determinar distâncias a partir das imagens. De seguida preparou-se a máquina de filmar (Sony HDR-XR105E Full HD 1080) numa posição perpendicular à zona da estrutura hidráulica, para que se pudesse medir com rigor as características geométricas das cavidades de erosão e de deposição.

Após alguns ensaios exploratórios verificou-se que a melhor opção para as filmagens seria a utilização de um fundo preto por trás do canal e também atrás da câmara de filmar. Isto permitiu obter um maior contraste entre o fundo e a camada de areia e a água, assim como evitar o efeito de espelho nas paredes laterais do canal.

Na preparação do canal começava-se pela colocação da estrutura hidráulica numa posição vertical, colocando previamente uma fita isoladora nas zonas onde encostava à parede do canal para uma maior vedação (Figura 3.7). De seguida procedia-se à colocação da areia e ao seu alisamento.



Figura 3.7 – Vedação da peça

Estabelecidas todas as condições desejadas para o ensaio, ligava-se a bomba do canal e a máquina de filmar, registando assim todo o processo, desde o enchimento do canal até à erosão final. O orifício era vedado com uma pequena borracha, fixa a um arame rígido em forma de *U* invertido, que pressionava a parede da chapa a montante onde se encontrava a

borracha e pressionava igualmente a parede da chapa a jusante. No instante inicial do ensaio esta vedação era retirada, puxando simplesmente o arame.

Depois da realização do ensaio e de desligar os equipamentos (bomba e câmara de filmar), alisava-se a areia de forma grosseira, visto que a existência de água facilitava o seu alisamento e permitia reduzir a formação de bolhas de ar na camada de areia, o que era importante para a correta realização dos ensaios.

3.4. Processamento de Imagem

Para o processamento de imagem adotou-se o *software* GIMP (*GNU Image Manipulation Program*) programa de manipulação de imagem GNU disponível em www.gimp.org. (Aleixo e Proença (2007), Ferreira (2011)).

Uma vez realizados todos os ensaios, procedeu-se à importação dos vídeos correspondentes para o computador. Com recurso ao *software* PMB converteram-se os vídeos em fotografias para que, no programa GIMP, se pudesse proceder ao processamento da imagem, com o objetivo de determinar as coordenadas necessárias para a caracterização da cavidade de erosão e eventual deposição de sedimentos em diferentes instantes ao longo dos ensaios.

A utilização do *software* Gimp permitiu transformar as imagens de pixéis em coordenadas físicas, razão pela qual se introduziram as régua de escala nos eixos vertical e horizontal do canal. Em alternativa podia-se recorrer às quadrículas de marcação do canal que possuíam um espaçamento de 3 cm.

Para conhecer as medidas em pixéis de uma forma mais rigorosa recorrendo ao *software* GIMP, fez-se um recorte a uma quadrícula existente na imagem, utilizando a ferramenta de corte da “caixa de ferramentas” como demonstra a Figura 3.8.



Figura 3.8 – Ferramenta de corte

Assim sendo obteve-se a quadrícula e as suas dimensões de 90x90 px, para o caso de exemplo (Figura 3.9).

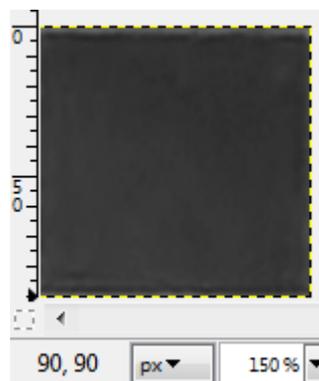


Figura 3.9 – Escala do programa

Relativamente ao eixo x:

$$B_x = \frac{x_0}{i_0} = \frac{3\text{cm}}{90\text{px}} = 0,03333 \frac{\text{cm}}{\text{px}} \quad (26)$$

De igual forma para o eixo do y:

$$B_y = \frac{x_0}{i_0} = \frac{3\text{cm}}{90\text{px}} = 0,03333 \frac{\text{cm}}{\text{px}} \quad (27)$$

No entanto no *software*, a resolução aparecia em px/cm, assim sendo:

$$\frac{1}{0,03333} = 30,00003 \frac{\text{px}}{\text{cm}} \quad (28)$$

Alterando este valor, obtiveram-se as coordenadas em centímetros.

Como a escala das várias imagens dos ensaios é a mesma, devido ao posicionamento fixo da máquina de filmar e do canal, bastou altera o valor da escala no *software*, seleccionando, na barra de ferramentas “Imagem – Escala de Imagem” (Figura 3.10).

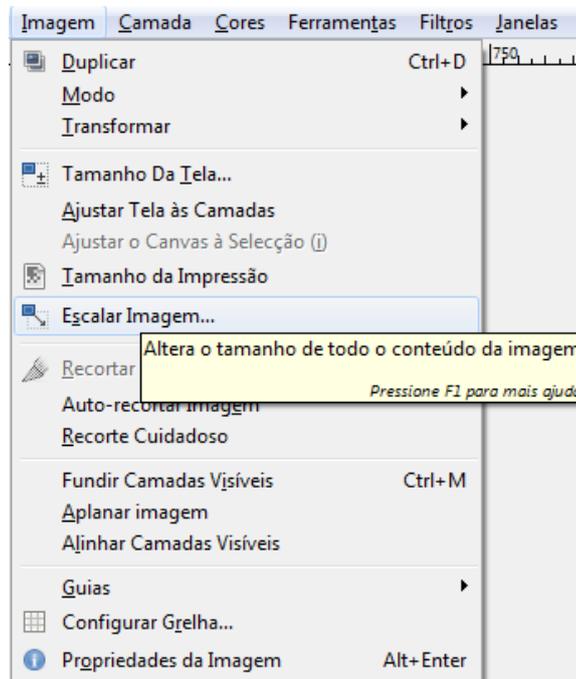


Figura 3.10 – Opção “escalar imagem”

Ao clicar abre-se uma nova janela (Figura 3.11), com a resolução de X e Y em pixel/in.

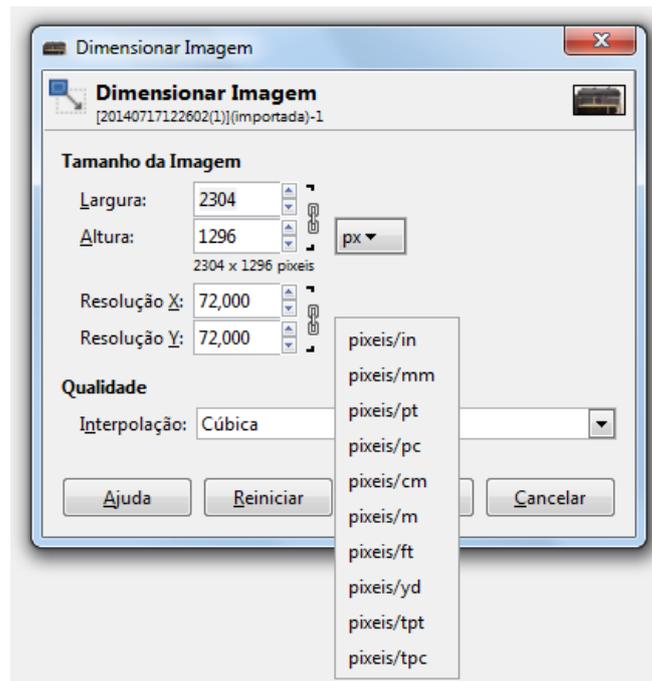


Figura 3.11 – Alteração da unidade de resolução de imagem

Ao clicar nessa opção, era possível selecionar 'pixels/cm' para a unidade da resolução.

Sendo assim, foi possível verificar que as variáveis 'Resolução X e 'Resolução Y' se alteravam automaticamente (Figura 3.12).

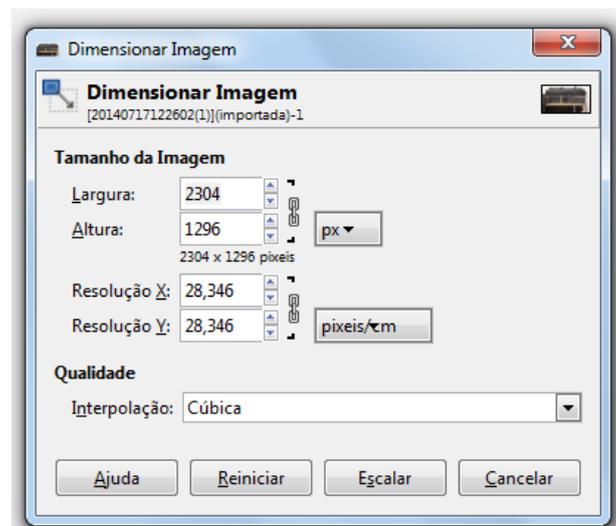


Figura 3.12 – resolução de imagem

Dado que a imagem já se encontrava na sua escala real, retiravam-se então as coordenadas necessárias.

No entanto ainda era necessário alterar a unidade de medida da imagem, pois como se mudou a resolução para pixel/cm interessava saber a medida em centímetros. Para isso existia um referencial no canto inferior esquerdo em que se podia alterar da unidade px para cm.

Antes de iniciar as medições transformava-se a imagem para tons de cinzento, permitindo diminuir o padrão de cores, para uma melhor visualização da superfície de separação entre a água e areia, utilizando o comando no canto superior esquerdo (Figura 3.13).

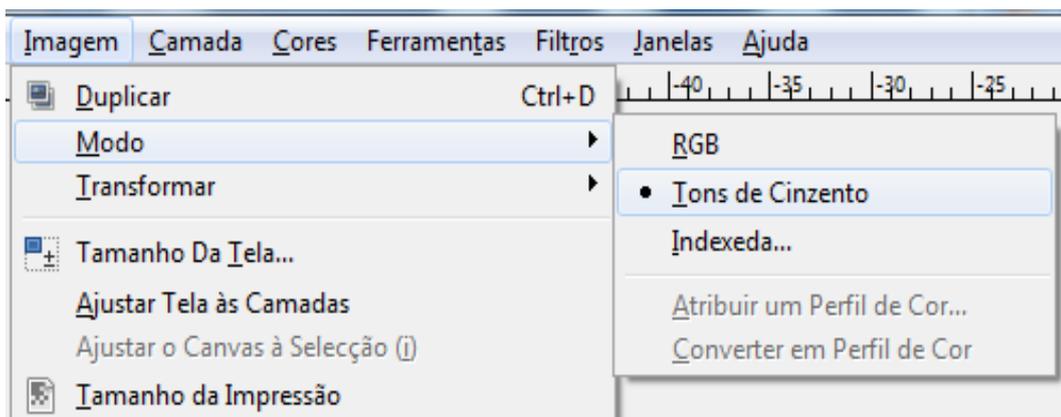


Figura 3.13 – Mudança de padrão de cores

Reunidas todas as condições, a imagem estava apta para conseguir retirar as coordenadas referentes à cavidade de erosão e forma de deposição, selecionado o oitavo ícone da ‘caixa de ferramentas’ (Figura 3.14).



Figura 3.14 – Ferramenta de “ Caminho”

Para obter as coordenadas selecionava-se o ponto pretendido. Os valores de x e de y apareciam na caixa no canto inferior, como mostra a título de exemplo na (Figura 3.15).



Figura 3.15 – Coordenadas Cartesianas

3.5. Processamento de resultados

Os ensaios realizados permitiram obter um conjunto alargado de resultados, para muitas condições experimentais. Assim, recorreu-se à análise dimensional para obter parâmetros adimensionais que permitissem uma análise dos resultados mais adequada.

A análise dimensional permite obter relações entre as grandezas físicas envolvidas num determinado fenómeno, a partir das respetivas dimensões (Novais Barbosa, 1986). A análise dimensional também fornece informação sobre a forma que deverá ter a relação entre as variáveis envolvidas nesse fenómeno, sendo essencial na análise e interpretação de resultados experimentais.

Identificaram-se todas as variáveis envolvidas na erosão e deposição a jusante da descarga de fundo, o que permitiu obter a equação (33)

$$A = F(D, D_a, H, h_D, h_m, h_0, S, X_s, X_d, \rho, \rho_s, g, Q) \quad (29)$$

em que D é o diâmetro do orifício, D_a o diâmetro da areia, H a altura do escoamento a montante, h_D é a altura da deposição, h_m a altura do orifício, h_0 a altura do colchão de água, S a profundidade de erosão, X_s a distância da erosão à estrutura, X_d a distancia da deposição à estrutura, Q o caudal, ρ a massa volúmica da água, ρ_s a massa volúmica dos sedimentos e g a aceleração gravítica.

Aplicando-se o teorema de Vaschy- Buckingham (Novais Barbosa, 1986) e seleccionando o sistema unidades fundamentais (D , g e ρ) obtêm-se os seguintes números adimensionais:

$$\Pi_1 = \frac{D}{D_a}; \Pi_2 = \frac{H}{D}; \Pi_3 = \frac{h_D}{D}; \Pi_4 = \frac{h_m}{D}; \Pi_5 = \frac{h_0}{D}; \Pi_6 = \frac{S}{D}; \Pi_7 = \frac{X_s}{D}; \Pi_8 = \frac{X_d}{D}; \Pi_9 = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (30)$$

Assim a equação (30) transforma-se na equação (31):

$$\varphi\left(\frac{D}{D_a}, \frac{H}{D}, \frac{h_D}{D}, \frac{h_m}{D}, \frac{h_0}{D}, \frac{S}{D}, \frac{X_s}{D}, \frac{X_d}{D}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho}, \frac{t\sqrt{g}}{\sqrt{D}}, \frac{Q}{D^2\sqrt{gD}}\right) = 0 \quad (31)$$

Se se combinarem os números adimensionais Π_5 e Π_6 (Fernandes e Cardoso, 2004) obtém-se um novo número adimensional

$$\Pi_5 + \Pi_6 = \frac{h_0 + S}{D} \quad (32)$$

Assim, e para cada uma das areias (ou seja, Π_1 e Π_9 são constantes), obtém-se uma equação com menos números adimensionais.

$$\frac{h_0 + S}{D} = F_1\left(\frac{t\sqrt{g}}{\sqrt{D}}; \frac{Q}{D^2\sqrt{gD}}\right) \quad (33)$$

Esta equação permite relacionar a evolução temporal da profundidade de erosão e a altura do colchão de água a jusante, adimensionalizadas pelo diâmetro do orifício, com os números adimensionais que traduzem a influência da variável tempo e do caudal.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Introdução

No presente capítulo são apresentados os resultados dos ensaios relativos à erosão localizada na proximidade de uma descarga de fundo de uma barragem, com o principal objetivo de avaliar a sua evolução temporal e de caracterizar a forma das cavidades de erosão e de deposição originadas. Como o escoamento é essencialmente bidimensional e se originam cavidades de erosão bidimensionais, é possível determinar de uma forma simples e rápida a erosão das partículas de areia do leito e visualizar a configuração de fundo. Os resultados são comparados entre si e com estudos idênticos na bibliografia para determinar a sua análise e discussão.

4.2. Imagens dos Ensaio

No seguimento dos ensaios realizados apresentam-se nesta secção as imagens relativamente aos acontecimentos ao longo do tempo. No início dos ensaios a superfície da areia era plana, o que facilitava a identificação do instante inicial de erosão (Figura 4.1).

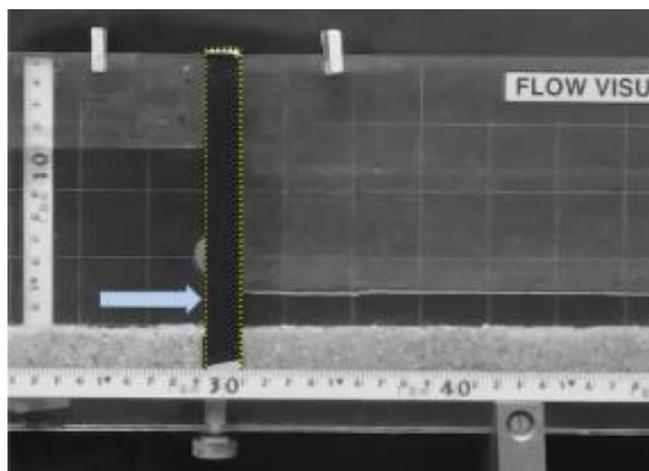


Figura 4.1 – Imagem antes do ensaio

Com a evolução dos ensaios, a cavidade de erosão ia evoluindo permitindo assim caracterizar a sua configuração, como demonstra a Figura 4.2.

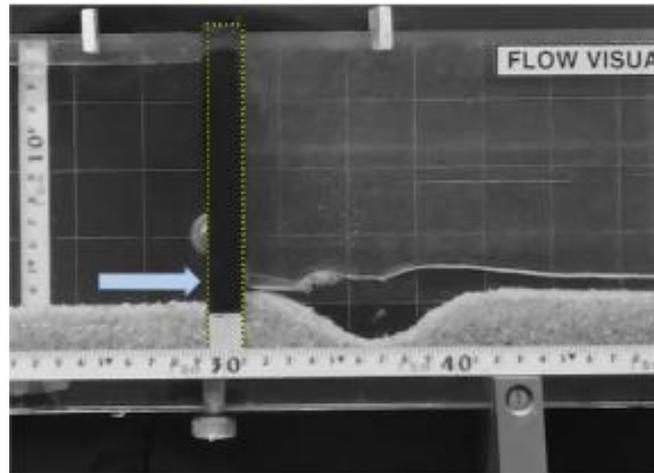


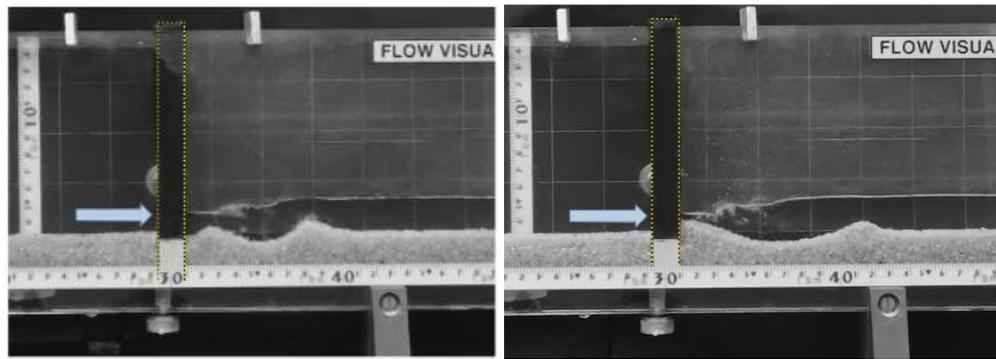
Figura 4.2 – Imagem do Ensaio 4, Estrutura Tipo B, para $t=70$ s

Apresentam-se nas figuras 4.3 a 4.5 imagens representativas da evolução dos ensaios para cada um dos tipos de estrutura identificadas, como o objetivo de descrever o escoamento e o processo erosivo.

As erosões originadas no caso das estruturas do Tipo A (Figura 4.3), são provocadas por um vórtice sobre o colchão de água, devido ao facto do jato originário do orifício se encontrar submerso, o que origina o arrastamento das areias quer para jusante, quer para montante. Observa-se a formação de uma barra ou duna, quer a montante, quer a jusante da zona do vórtice.

No caso das erosões originadas pelas estruturas Tipo B (Figura 4.4), o jato livre de água originário do orifício é responsável pela erosão, pois atinge a superfície de areia. Neste caso observa-se a formação de uma duna ou barra imediatamente a jusante da zona de impacto do jato e a duna de montante é praticamente inexistente.

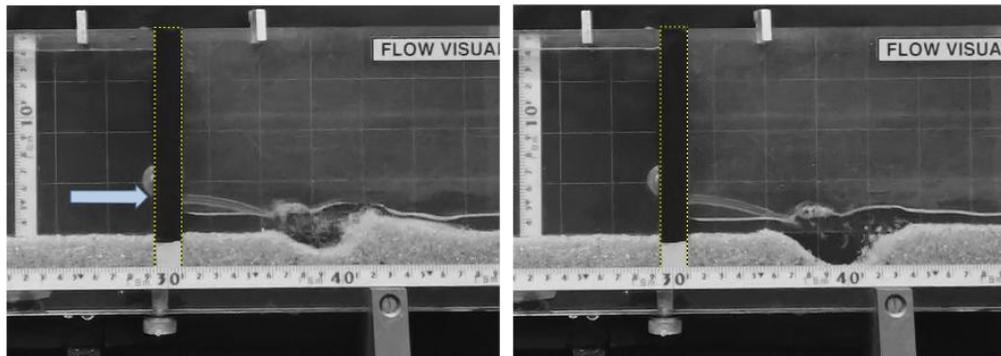
Em relação às erosões provocadas pelas estruturas do Tipo C (Figura 4.5), são originadas por um jato tangente à superfície da camada de areia, sendo a altura do colchão de água a jusante nula ou muito pequena. Observa-se a formação de uma duna ou barra extensa a jusante da zona de erosão.



a)

b)

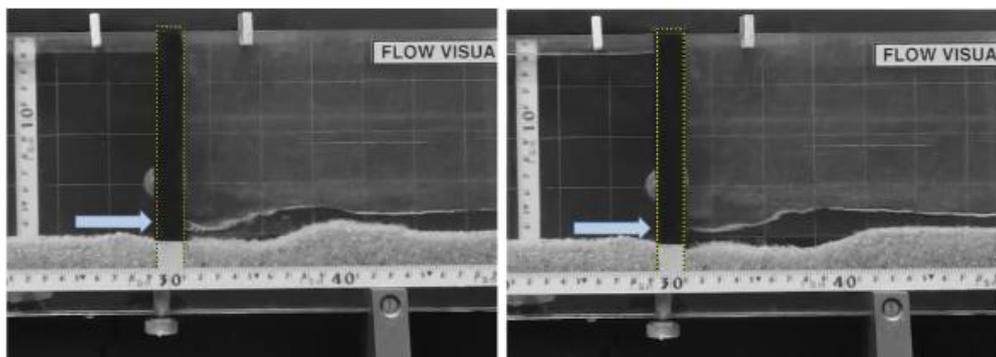
Figura 4.3 – Ensaio do tipo A (Ensaio 3, para $t=0$ s (a) e $t= 70$ s (b))



a)

b)

Figura 4.4 – Ensaio do tipo B (Ensaio 2, para $t=0$ s (a) e $t= 50$ s (b))



a)

b)

Figura 4.5 – Ensaio do tipo C (Ensaio 5, para $t=0$ s (a) e $t= 60$ s (b))

As imagens referentes a todos os ensaios podem ser consultadas no anexo 1.

A análise de evolução temporal da geometria das cavidades de erosão pode ser efetuada sob duas abordagens: i) caracterização da geometria da cavidade; ii) evolução da cavidade ao longo do tempo, até se atingir o tempo de equilíbrio.

O processo erosivo depende do instante temporal e analisando os vídeos é possível identificar três fases:

1. fase inicial em que a profundidade da cavidade aumenta muito rapidamente;
2. fase principal em que a cavidade se acentua em profundidade e extensão de forma sistemática embora a um ritmo progressivamente decrescente;
3. fase de equilíbrio, em que a cavidade de erosão deixa praticamente de evoluir.

As erosões estão limitadas pela capacidade do jato em erodir o material granular e pela capacidade de transporte para jusante desse mesmo material. Atingida uma dessas limitações o processo de erosão termina e obtém-se o estado do equilíbrio. No caso de não haver arrastamento do material granular para jusante, e de se continuar a observar a capacidade de erosão desse material, ele fica retido e depositado na cavidade (Fernandes e Cardoso, 2004).

4.3. Resultados Experimentais

Apresentam-se nesta secção os resultados experimentais e a sua análise. As imagens dos ensaios foram retiradas de 10 em 10 segundos a partir do instante inicial ($t=0s$). Para cada um dos conjuntos dos ensaios, agrupados de acordo com o tipo de estrutura e de teste (tabelas 3.4 a 3.9), apresenta-se a informação relativa aos processos de erosão e deposição de sedimentos. Assim, nas tabelas 4.1 a 4.12 e AII 1 a AII 13, t_s representa o instante em que ocorre a máxima erosão ($S_{máx}$) e t_d representa o instante em que ocorre a máxima deposição na barra ($hd_{máx}$).

4.3.1. Evolução temporal da geometria das cavidades de erosão, caudal máximo

Nesta subsecção apresenta-se a evolução temporal da geometria das cavidades de erosão obtidas no caso do caudal máximo, para os diferentes tipos de estrutura e de acordo com os vários testes realizados. Apresentam-se unicamente dois testes por cada tipo de estrutura, remetendo-se para o anexo II a consulta dos restantes testes realizados para cada tipo de estrutura.

Tipo A/ Teste A1

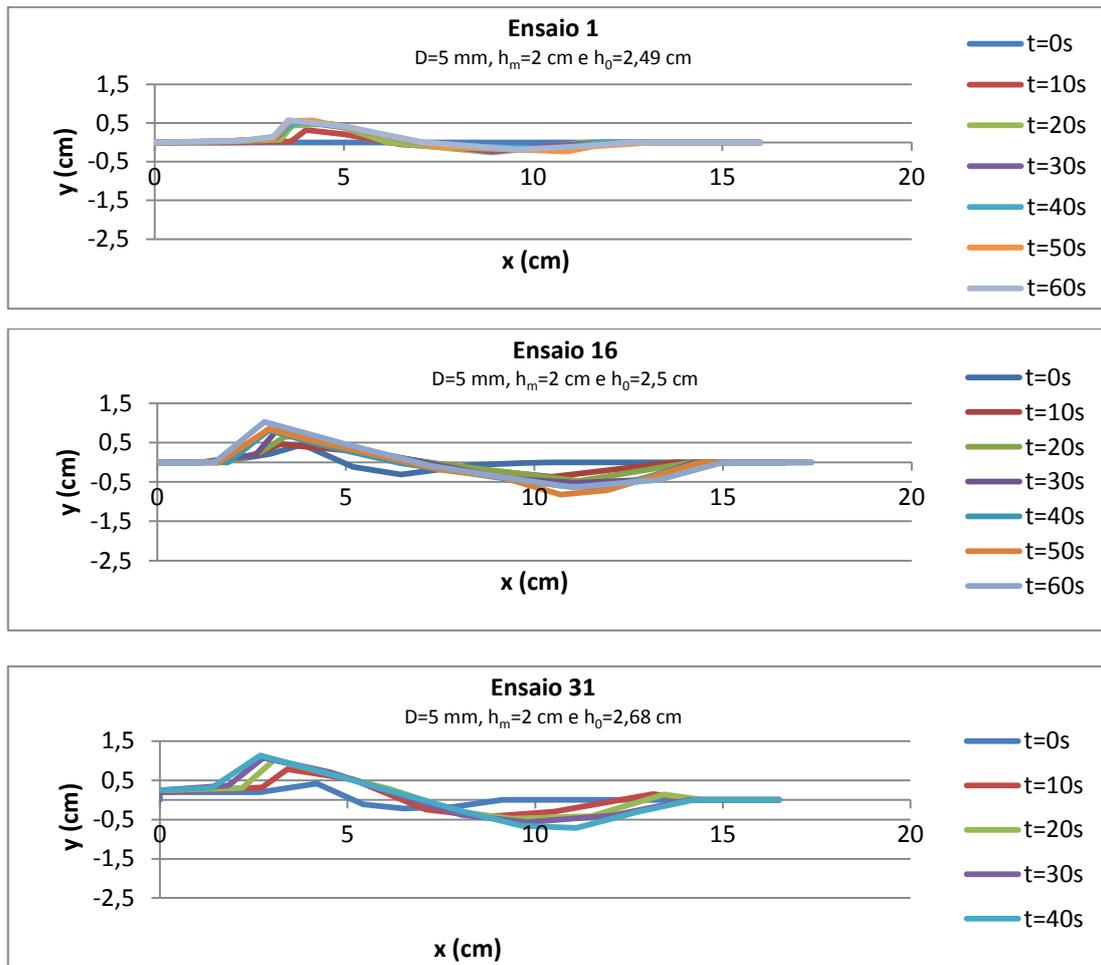


Gráfico 4.1 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 1, 16 e 31

A análise do Gráfico 4.1, permite constatar a evolução da superfície da camada de areia. Observa-se que a cavidade de erosão se forma logo no instante inicial dos ensaios aumentando depois em máxima profundidade e extensão. A máxima profundidade da cavidade de erosão vai-se movendo para jusante à medida que aumenta a altura de deposição ou seja a altura da barra a jusante. A máxima deposição na barra a montante também aumenta. à medida que a cavidade de erosão evolui, e a sua crista movimentar-se para montante. A erosão e deposição são menores no caso da areia grossa (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Dados recolhidos dos ensaios 1, 16 e 31

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
1	1,425	20	0,26	60	0,58
16	0,638	50	0,82	60	1,03
31	0,338	40	0,71	40	1,13

• **Teste A2**

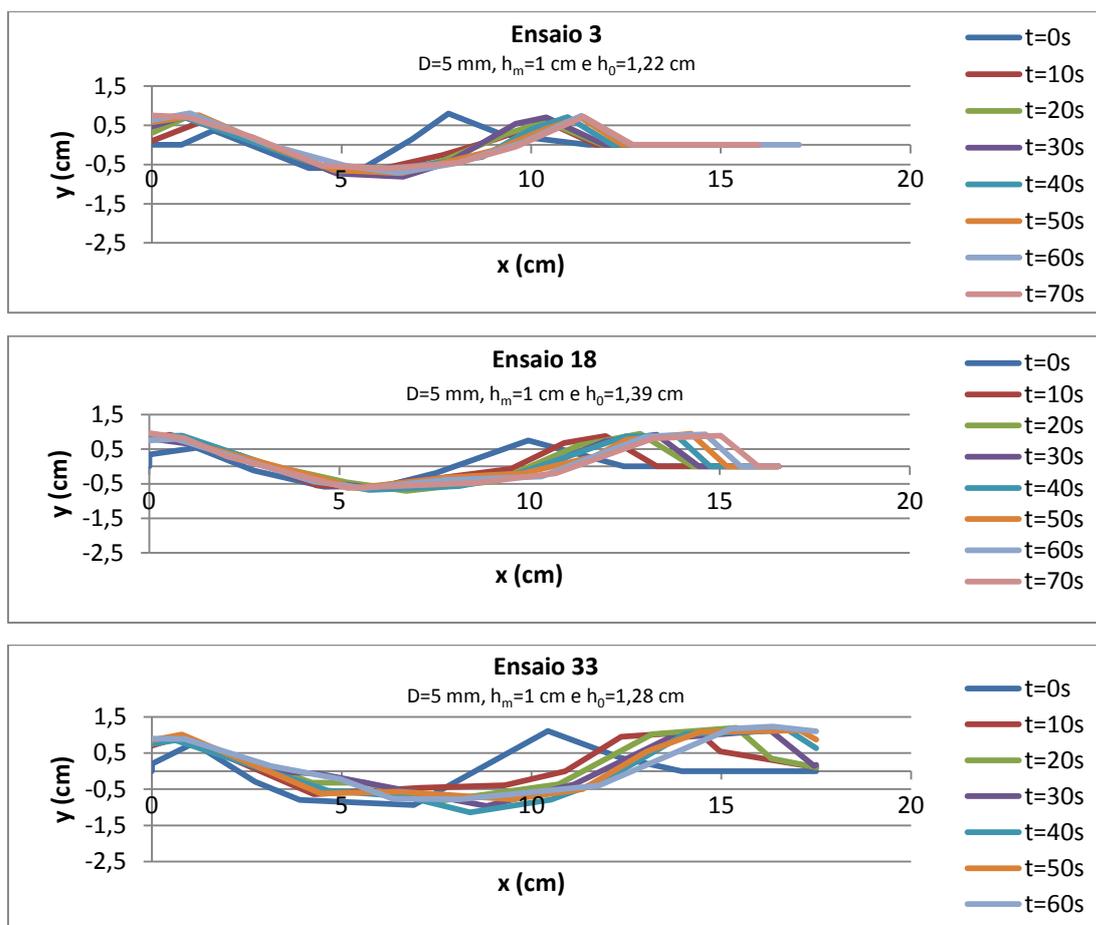


Gráfico 4.2 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 3, 18 e 33

No Gráfico 4.2, observa-se que a cavidade de erosão se forma logo no instante inicial dos ensaios aumentando depois em máxima profundidade e extensão. A máxima profundidade da cavidade de erosão vai-se movendo para jusante à medida que aumenta a altura de deposição ou seja a altura da barra a jusante. A barra a montante também aumenta à medida que a cavidade de erosão evolui, e a sua crista movimentava-se para montante alcançando $x=0$ (paramento de jusante da barragem) Da análise da Tabela 4.2, pode concluir-se que a máxima profundidade de erosão e altura de deposição são observados para a areia fina.

Tabela 4.2 – Dados recolhidos dos ensaios 3, 28 e 33

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
3	1,425	30	0,81	60	0,81
18	0,638	20	0,71	70	0,96
33	0,338	50	1,14	60	1,23

Os gráficos dos restantes ensaios do tipo A encontram-se no anexo II.

• **Tipo B/ Teste B1**

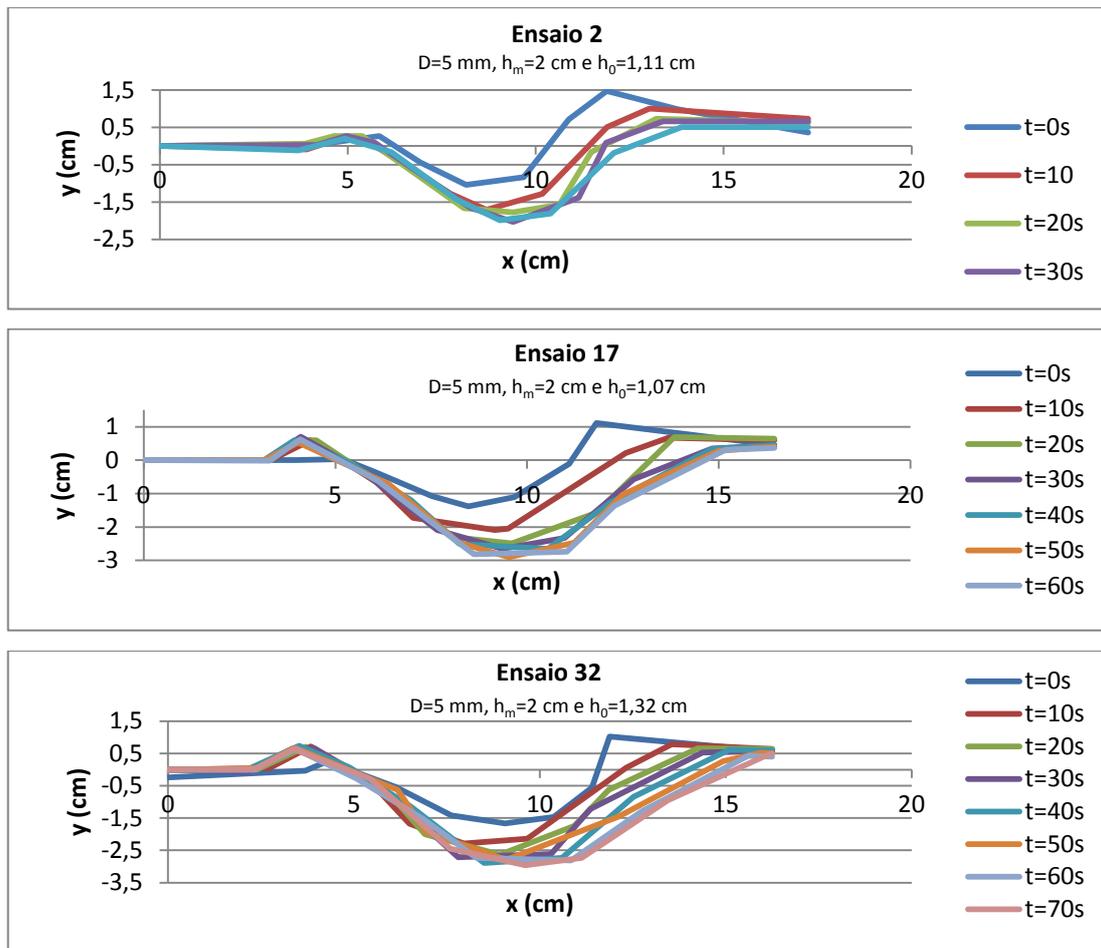


Gráfico 4.3 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 2, 17 e 32

O Gráfico 4.3 permite observar uma rápida evolução na cavidade de erosão nos instantes iniciais. A máxima profundidade da cavidade de erosão vai-se movendo levemente para jusante e a deposição de areia é máxima no instante inicial dos ensaios e vai diminuindo gradualmente com o tempo, à medida que ocorre mais para jusante. Há um aparecimento da barra a montante devido à erosão inicial, e que se mantém praticamente inalterada ao longo do ensaio. A erosão e deposição são menores no caso da areia grossa (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Dados recolhidos dos ensaios 2, 17 e 32

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
2	1,425	30	2,03	0	1,47
17	0,638	50	2,9	0	1,11
32	0,338	70	2,96	0	1,02

• **Teste B2**

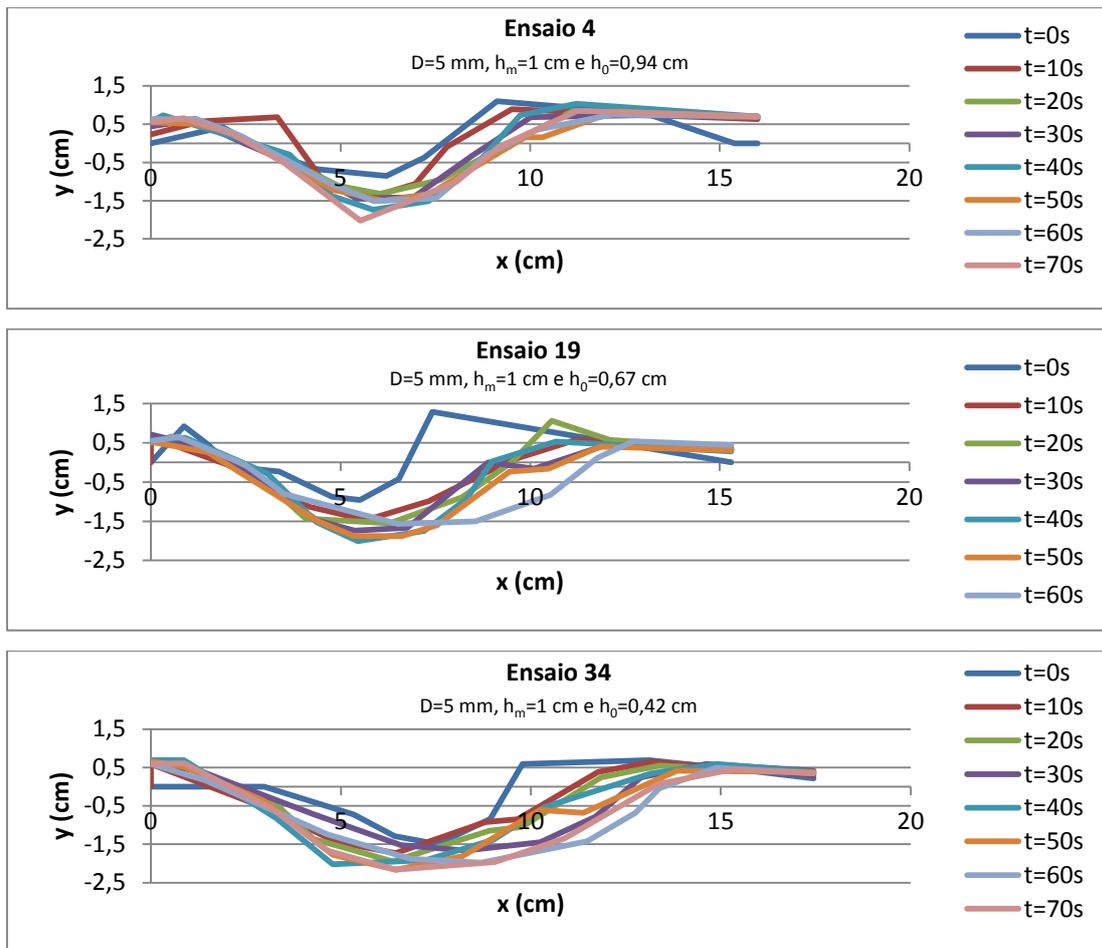


Gráfico 4.4 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 4, 19 e 34

No Gráfico 4.4 observa-se igualmente uma rápida evolução nos instantes iniciais da cavidade de erosão, aumentando ligeiramente até atingir a máxima profundidade e extensão. A máxima profundidade da cavidade de erosão vai-se movendo levemente para jusante e a deposição de areia é máxima no instante inicial dos ensaios, e vai diminuindo gradualmente para jusante. A barra a montante aumentada ligeiramente e aproxima-se da estrutura. A erosão e deposição são menores no caso da areia grossa (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Dados recolhidos dos ensaios 4, 19 e 34

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
4	1,425	70	2,02	0	1,1
19	0,638	40	2,01	0	1,29
34	0,338	50	2,16	0	0,69

Os gráficos dos restantes ensaios do tipo B podem ser consultados no anexo II.

• **Tipo C/ Teste C1**

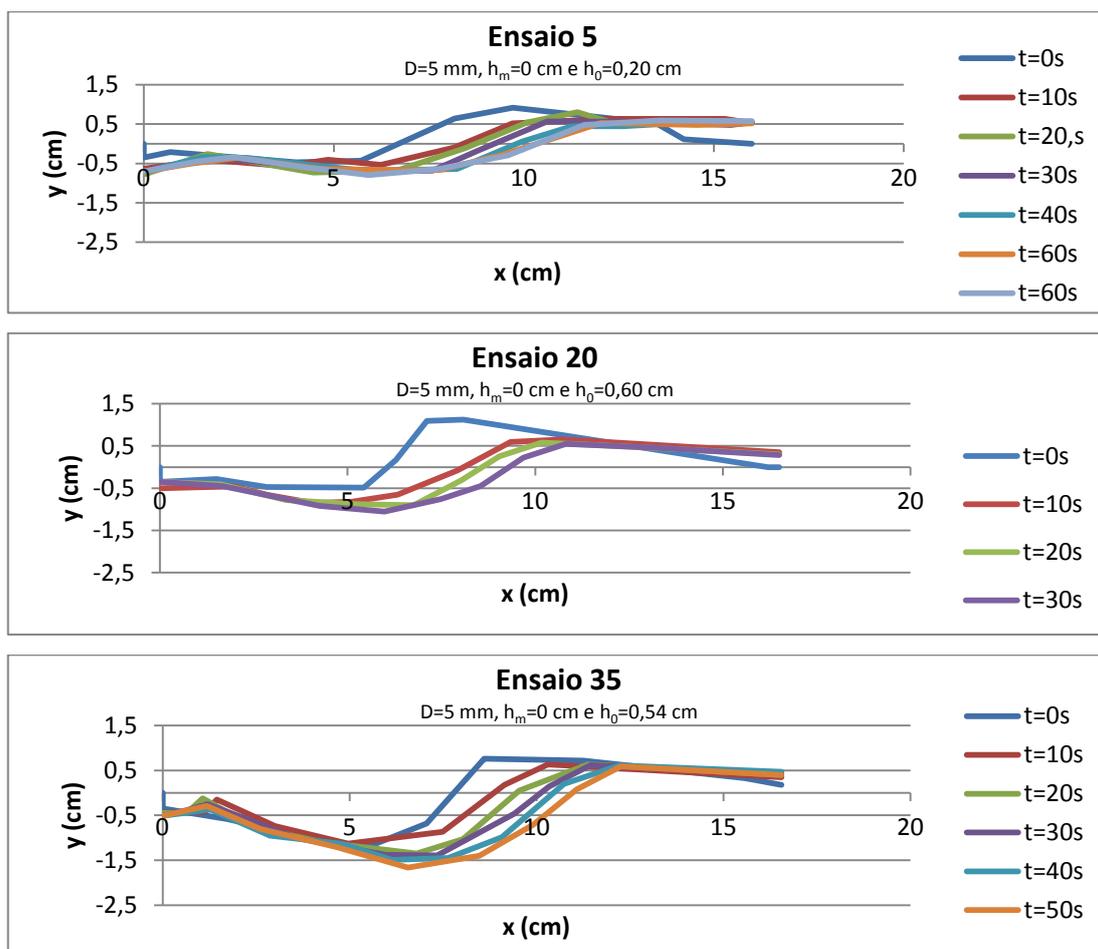


Gráfico 4.5 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 5, 20 e 35

No Gráfico 4.5 observa-se que a cavidade de erosão se forma logo no instante inicial dos ensaios, aumentando ligeiramente em máxima profundidade e extensão. Há um arrastamento dos grãos de areia para jusante originado a cavidade de erosão. A altura de deposição máxima regista-se no instante inicial e vai diminuindo ligeiramente à medida que se move para jusante até estabilizar. A erosão e deposição são menores no caso da areia grossa (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Dados recolhidos dos ensaios 5, 20 e 35

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
5	1,425	60	0,8	0	0,92
20	0,638	30	1,05	0	1,12
35	0,338	50	1,66	0	0,76

• **Teste C2**

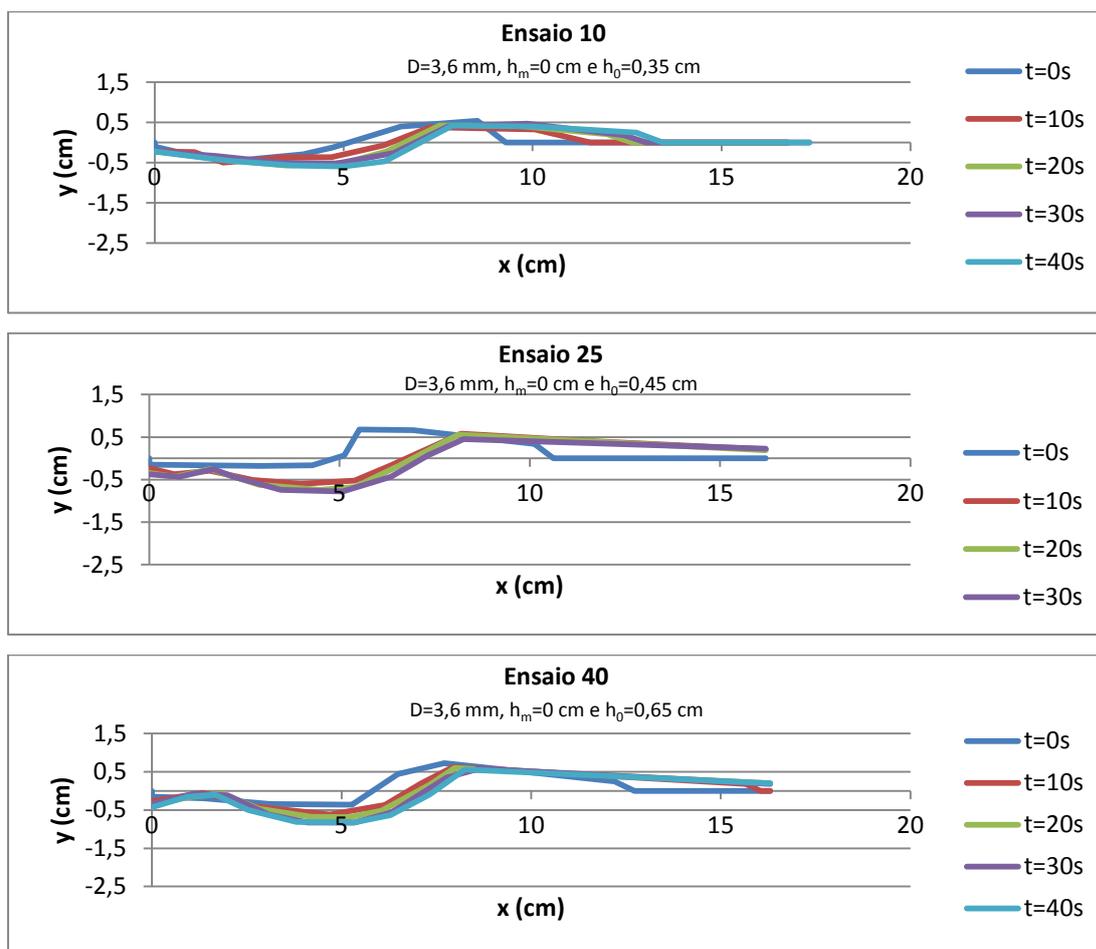


Gráfico 4.6 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 10, 25 e 40

O Gráfico 4.6 evidencia um comportamento semelhante ao teste anterior, pois a cavidade de erosão forma-se logo no instante inicial dos ensaios, aumentando ligeiramente em máxima profundidade e extensão. Há um arrastamento dos grãos de areia para jusante originado a cavidade de erosão. A máxima altura de deposição regista-se no instante inicial e vai diminuindo ligeiramente. A erosão e deposição são menores no caso da areia grossa (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Dados recolhidos dos ensaios 10, 25 e 40

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
10	1,425	40	0,59	0	0,54
25	0,638	30	0,78	0	0,68
40	0,338	40	0,83	0	0,72

Os gráficos dos restantes ensaios do tipo C podem ser consultados no anexo II.

4.3.2. Evolução temporal da geometria das cavidades de erosão, caudal reduzido em 20%

Nesta subsecção apresenta-se a evolução temporal da geometria das cavidades de erosão, para caudais reduzidos em 20% comparativamente aos caudais máximos, com objetivo de averiguar a influência do caudal nos fenómenos de erosão e deposição. Também neste caso se optou por apresentar unicamente dois testes por cada tipo de estrutura, remetendo-se para o anexo II a consulta dos restantes testes realizados para cada tipo de estrutura.

• **Tipo A/ Teste A'1**

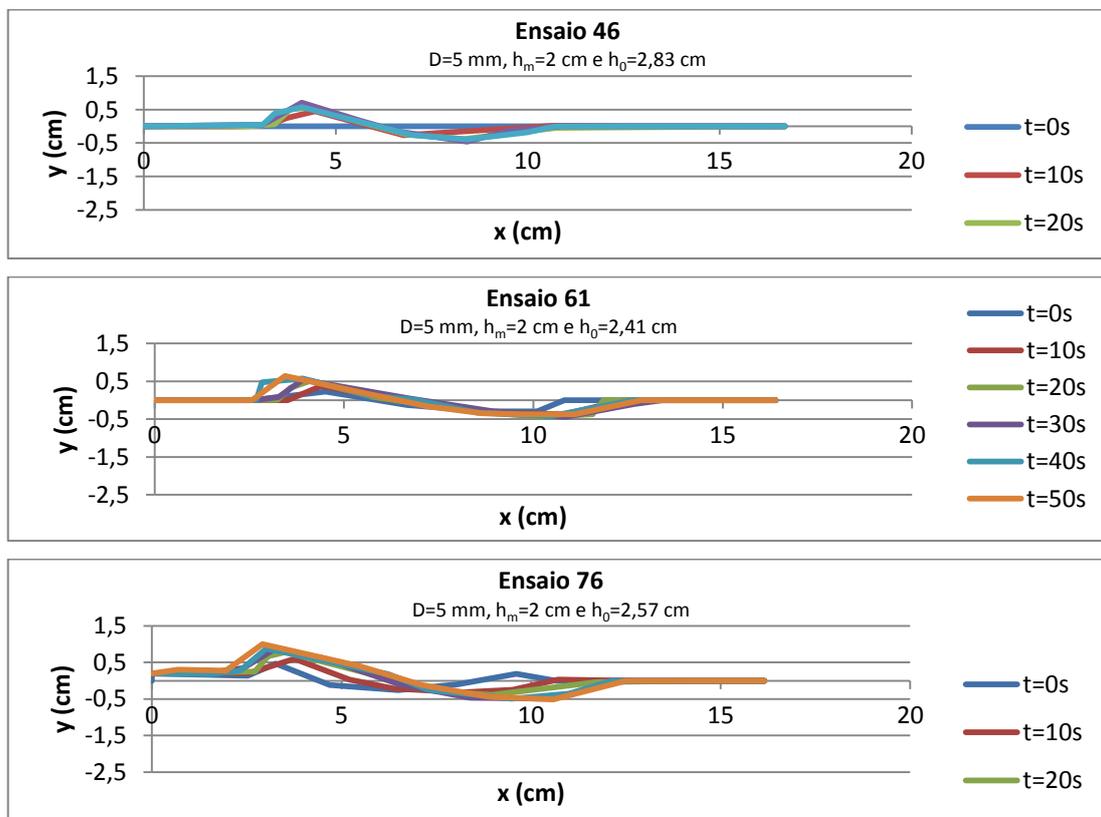


Gráfico 4.7 - Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 46, 61 e 76

No Gráfico 4.7 observa-se um comportamento idêntico ao do caudal máximo, mas com menos cavidades de erosão à exceção do ensaio 46 que apresenta erosões superiores (Tabela 4.7) comparativamente ao ensaio 1.

Tabela 4.7 - Dados recolhidos dos ensaios 46, 61 e 76

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{\text{máx}}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{\text{máx}}$ (cm)
46	1,425	30	0,46	30	0,71
61	0,638	30	0,44	50	0,64
76	0,338	50	0,51	50	1

• **Teste A'2**

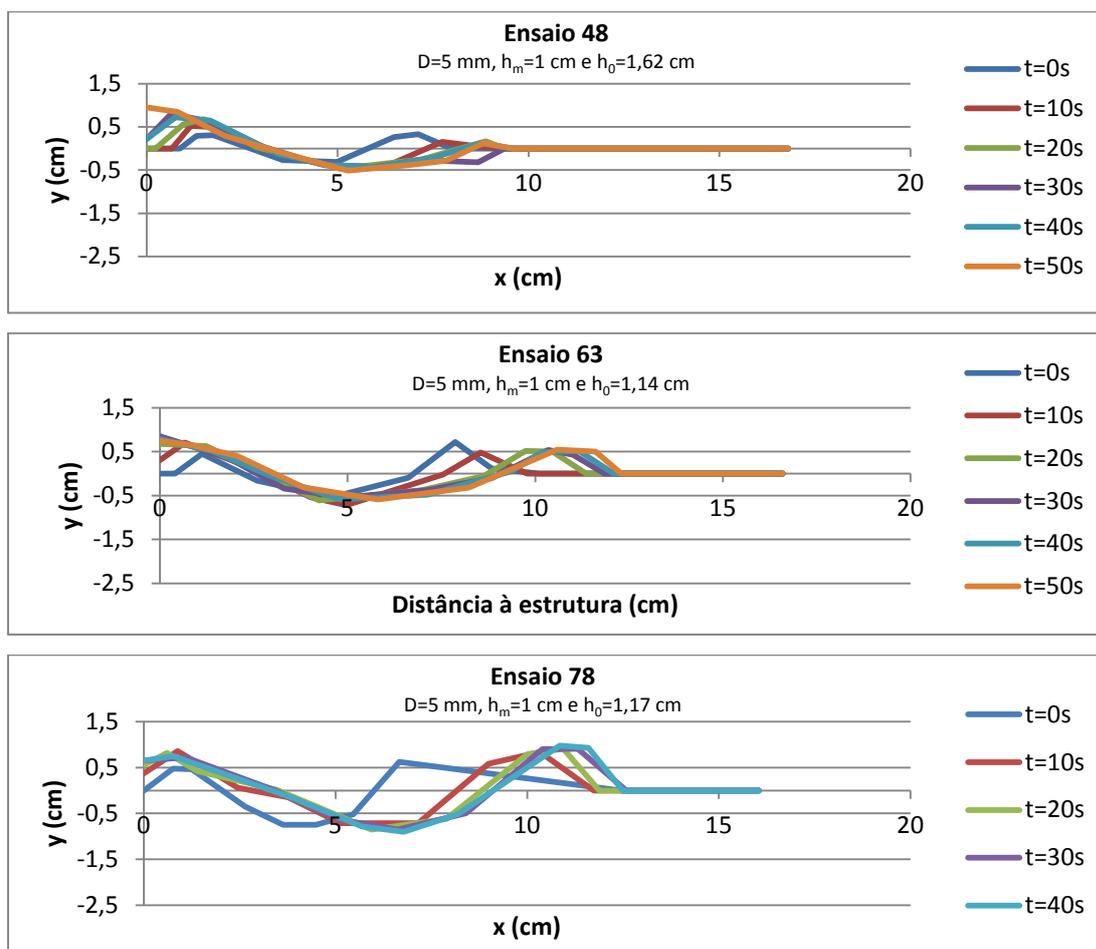


Gráfico 4.8 - Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 48, 63 e 78

O Gráfico 4.8 permite constatar que a redução de caudal para além de originar uma diminuição da erosão e deposição, como seria de esperar, origina igualmente uma clara diminuição da altura de deposição a montante no ensaio 48 (Tabela 4.8), em relação ao observado no ensaio 3.

Tabela 4.8 - Dados recolhidos dos ensaios 48, 63 e 78

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
48	1,425	50	0,51	50	0,95
63	0,638	10	0,72	30	0,85
78	0,338	40	0,9	40	0,98

Os gráficos dos restantes ensaios do tipo A' podem ser consultados no anexo II

• **Tipo B/Teste B'1**

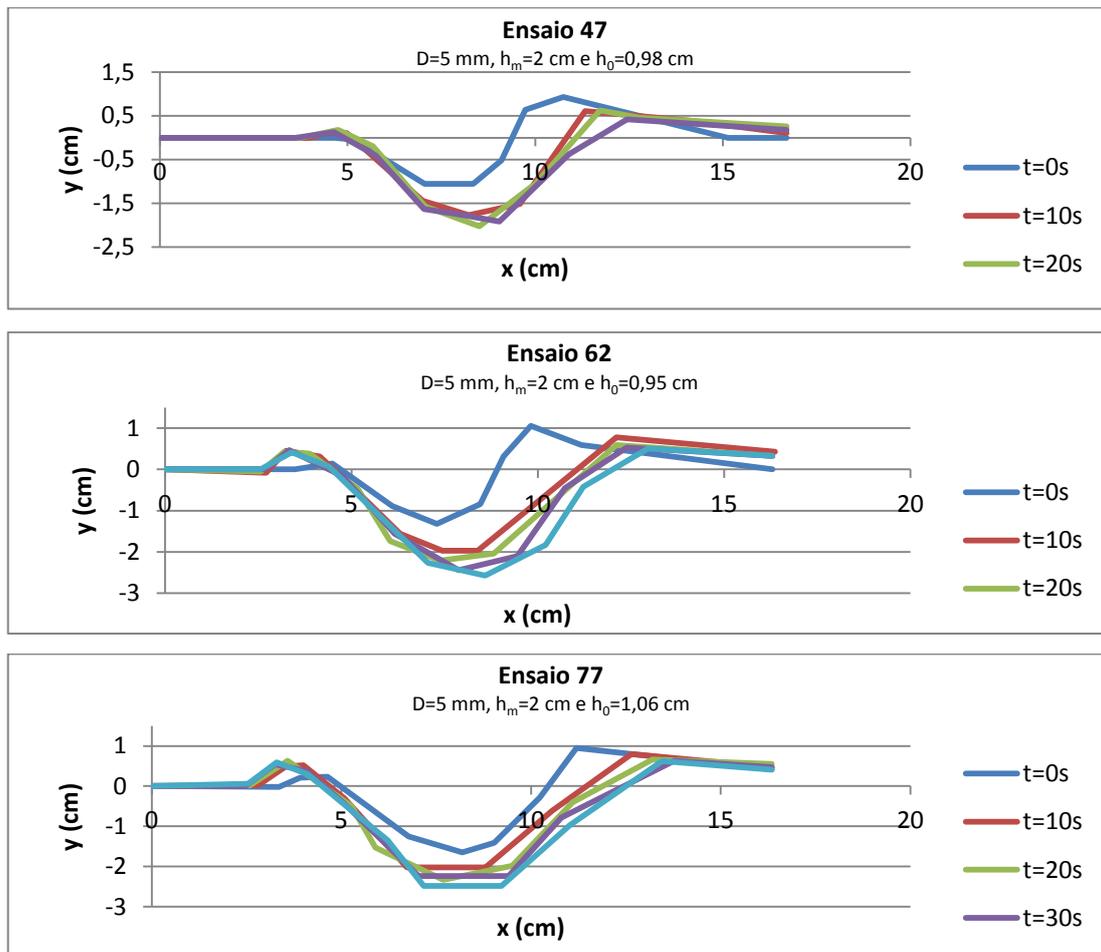


Gráfico 4.9 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 47, 62 e 77

O Gráfico 4.9 mostra que a configuração da areia se mantém idêntica à dos ensaios realizados para o caudal máximo, mas como seria de expectável com menor capacidade de erosão (Tabela 4.9).

Tabela 4.9 - Dados recolhidos dos ensaios 47, 62 e 77

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
47	1,425	20	2,02	0	0,93
62	0,638	40	2,57	0	1,06
77	0,338	40	2,48	0	0,95

• **Teste B'2**

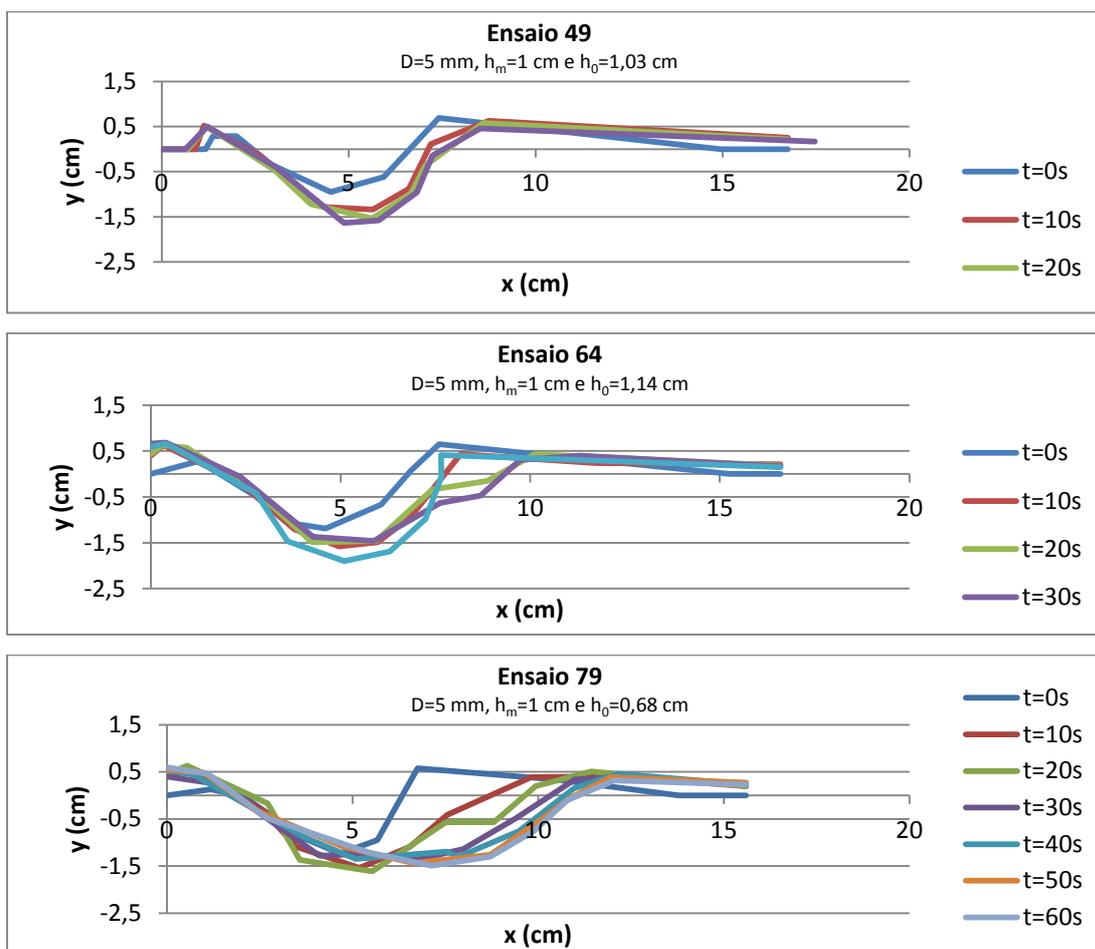


Gráfico 4.10 - Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 49, 64 e 79

O Gráfico 4.10 mostra que para este tipo de estrutura a configuração da camada de areia se mantém, mas com menor capacidade de erosão comparativamente aos ensaios realizados para o caudal máximo.

Tabela 4.10 - Dados recolhidos dos ensaios 49, 64 e 79

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
49	1,425	30	1,64	0	0,69
64	0,638	40	1,9	30	0,68
79	0,338	20	1,61	60	0,63

Os gráficos dos restantes ensaios do tipo B' podem ser consultados no anexo II.

• **Tipo C/Teste C'1**

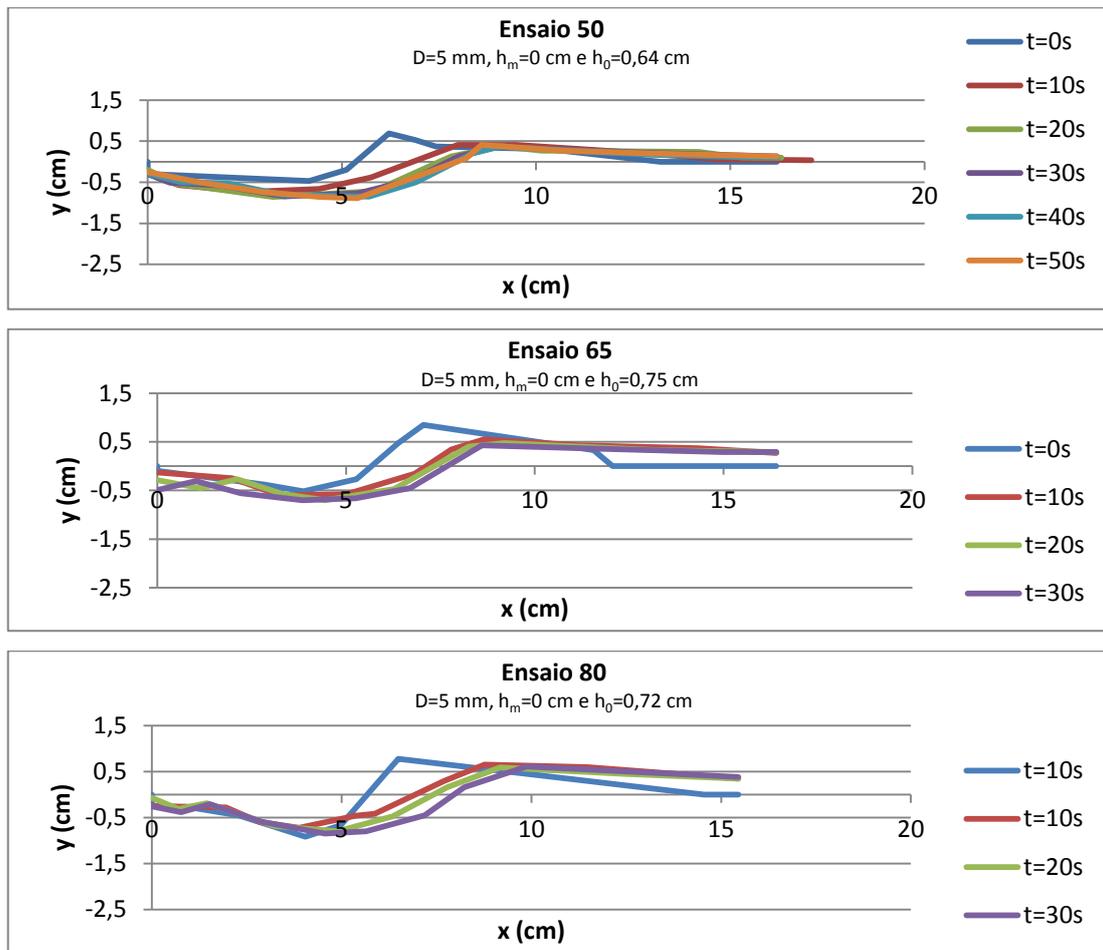


Gráfico 4.11 - Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 50, 65, 80

O Gráfico 4.11 evidencia erosão e deposição menores (Tabela 4.11), devido ao menor caudal, mantendo-se a configuração da camada de areia semelhante à observada no caso do caudal máximo.

Tabela 4.11 - Dados recolhidos dos ensaios 50, 65, 80

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
50	1,425	50	0,89	0	0,69
65	0,638	30	0,7	0	0,85
80	0,338	0	0,92	0	0,78

• **Teste C'2**

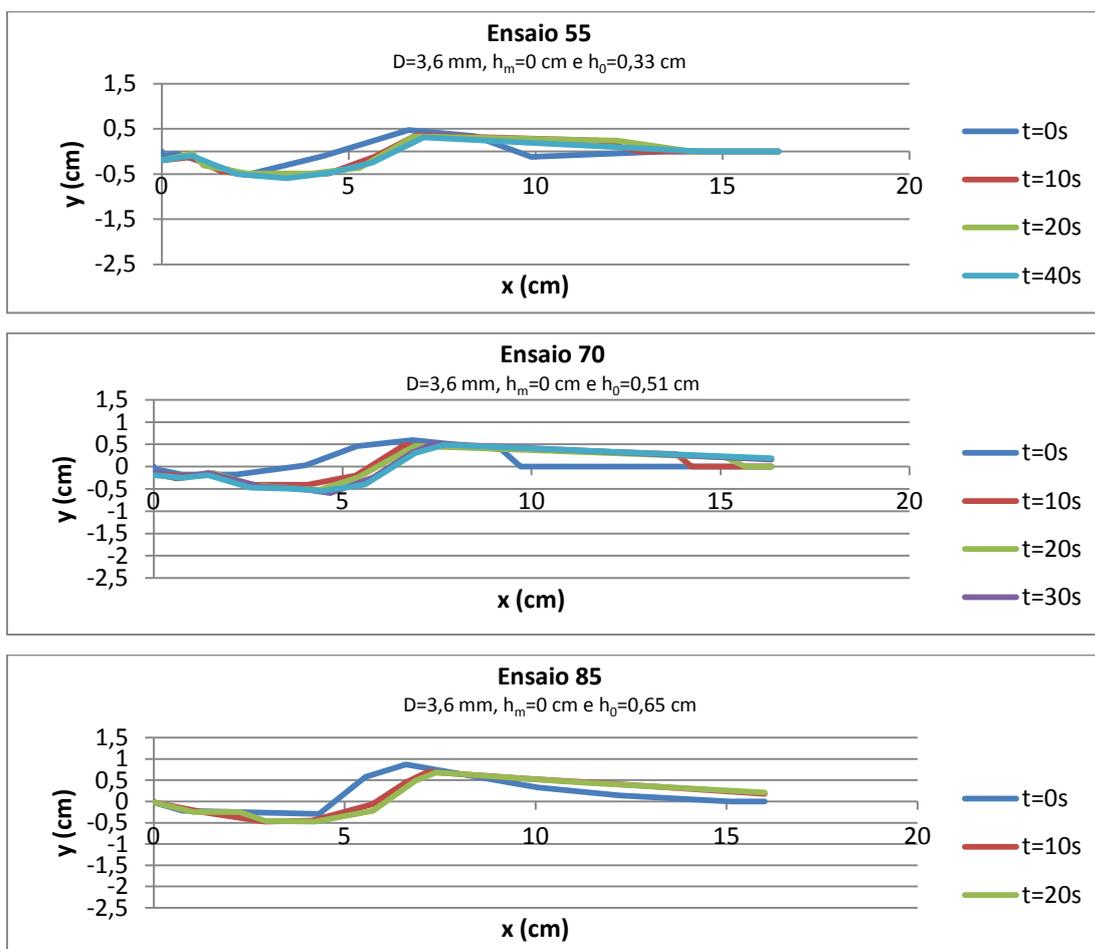


Gráfico 4.12 - Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 55, 70 e 85

O Gráfico 4.12 mostra que a configuração da camada de areia é semelhante ao caso de maior caudal, embora no ensaio 55 a máxima erosão observada seja igual à do ensaio 10. Nos outros ensaios há uma diminuição dos valores da erosão e deposição (Tabela 4.12).

Tabela 4.12 - Dados recolhidos dos ensaios 55, 70 e 85

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
55	1,425	40	0,59	0	0,47
70	0,638	30	0,59	0	0,6
85	0,338	20	0,47	0	0,87

Os gráficos referentes aos restantes ensaios do tipo C' podem se consultados no anexo II.

Os resultados obtidos assemelham-se às experiências descritas por Dargahi (2010), no caso das estruturas do tipo A e do tipo C, e às experiências realizadas por Pagliara et al. (2006) no caso das estruturas do tipo C (jato de água).

4.3.3. Erosão e deposição em função da granulometria da areia

Procedeu-se a uma análise das características da cavidade de erosão e da barra de deposição, em função do diâmetro da areia. Assim para a erosão apresenta-se o valor máximo da erosão (s) e a distância (x_s) do paramento da barragem a que ocorre. No caso da deposição apresenta-se o valor máximo da deposição (h_d) e a distância a que ocorre (x_{hd}).

4.3.3.1. Caudal máximo

Apresentam-se nesta subsecção os resultados obtidos para o caudal máximo.

- **Tipo A - Erosão**

No caso da estrutura do tipo A e no caso da erosão, o Gráfico 4.13 sistematiza os resultados dos testes A1 a A4, tendo-se observado que nos testes A5 e A6 não existia erosão.

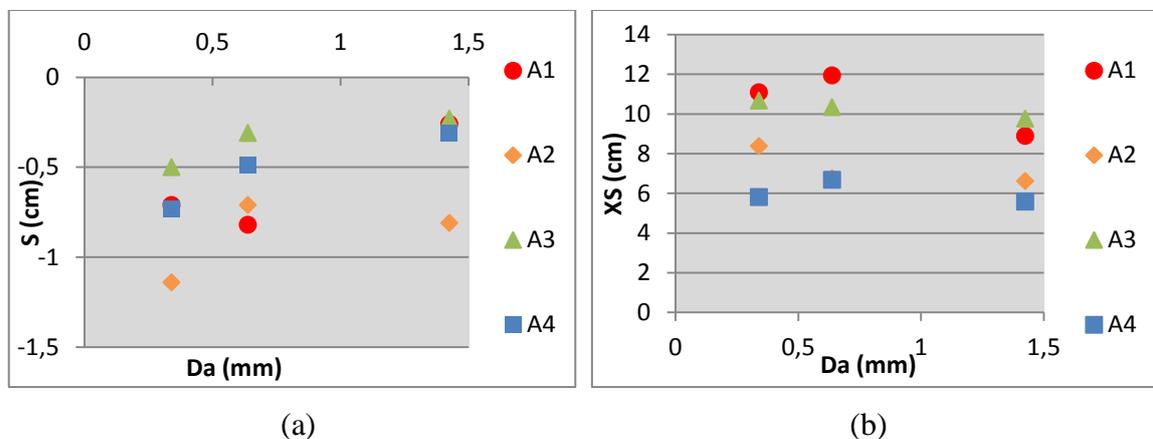


Gráfico 4.13 – Variação de s (a) e x_s (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo A

Pela análise do gráfico observa-se um aumento da erosão à medida que se diminui o diâmetro da areia. Observa-se o máximo afastamento da erosão em relação à estrutura, para os testes A1 e A3, que correspondem ao caso dos orifícios situados a 2 cm acima da camada de areia. As maiores distâncias observam-se para a areia média, à exceção do teste A2, caso em que a maior distância é observada para a areia fina.

- **Tipo A – Deposição**

O Gráfico 4.14 sistematiza os resultados da deposição no caso da estrutura do tipo A, testes A1 a A4, verificando-se que nos testes A5 e A6 não existia deposição

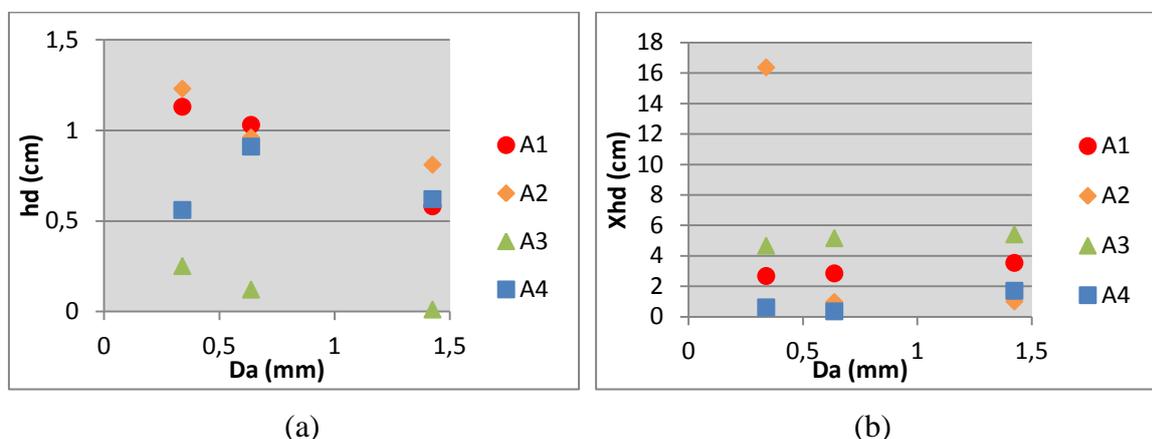


Gráfico 4.14 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo A

No caso da deposição observa-se naturalmente um aumento da deposição à medida que o diâmetro da areia diminui. Em relação às distâncias das cavidades de erosão há uma aproximação da estrutura à medida que a areia diminui de diâmetro, à exceção do teste A2 em que a maior deposição se regista mais afastada da estrutura.

- **Tipo B – Erosão**

No caso da estrutura do tipo B e no caso da erosão, o Gráfico 4.15 sistematiza os resultados dos testes B1 a B6.

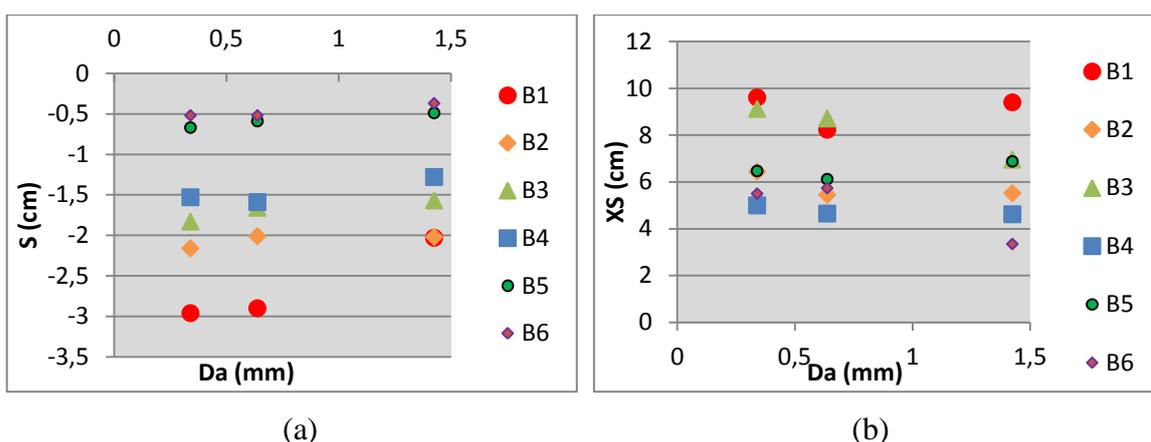


Gráfico 4.15 – Variação de s (a) e x_s (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo B

Neste conjunto de ensaios, a erosão é crescente à medida que o diâmetro da areia diminui, embora a erosão diminua com a diminuição do diâmetro do orifício, como seria expectável. No caso da distância, a maior altura dos orifícios origina uma maior distância de erosão, o que está relacionado com o alcance do jato de água.

• **Tipo B – Deposição**

O Gráfico 4.16 sistematiza os resultados dos testes B1 a B6, no caso da deposição das estruturas do tipo B.

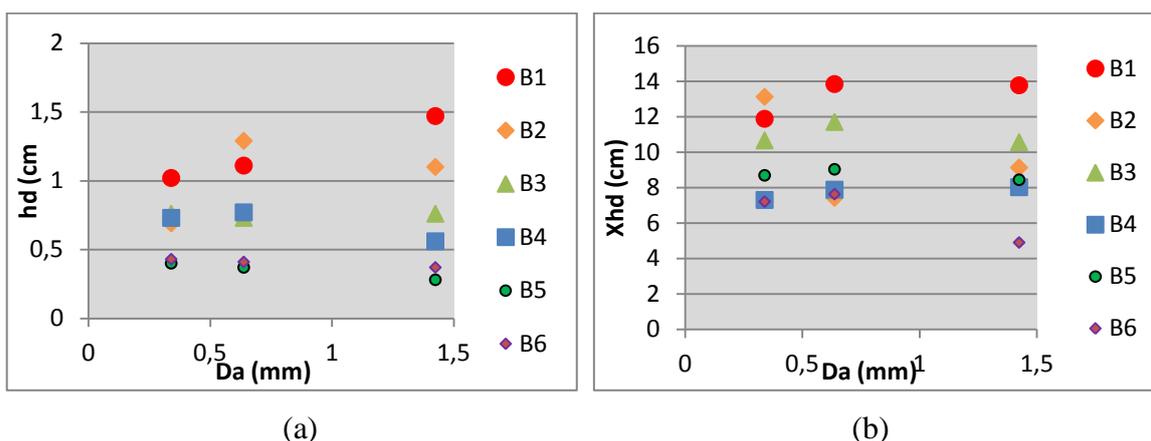


Gráfico 4.16 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo B

Em relação à deposição observa-se uma diminuição da deposição para os ensaios B1, B2 e B3 e um aumento da deposição para os ensaios B4, B5 e B6, à medida que o diâmetro da

areia diminui. Em relação às distâncias de deposição há uma tendência de se aproximar da estrutura, com exceção do teste B6 que demonstra o contrário.

• **Tipo C – Erosão**

Para completar esta análise no caso da erosão, o Gráfico 4.17 sistematiza os resultados dos testes C1 a C3.

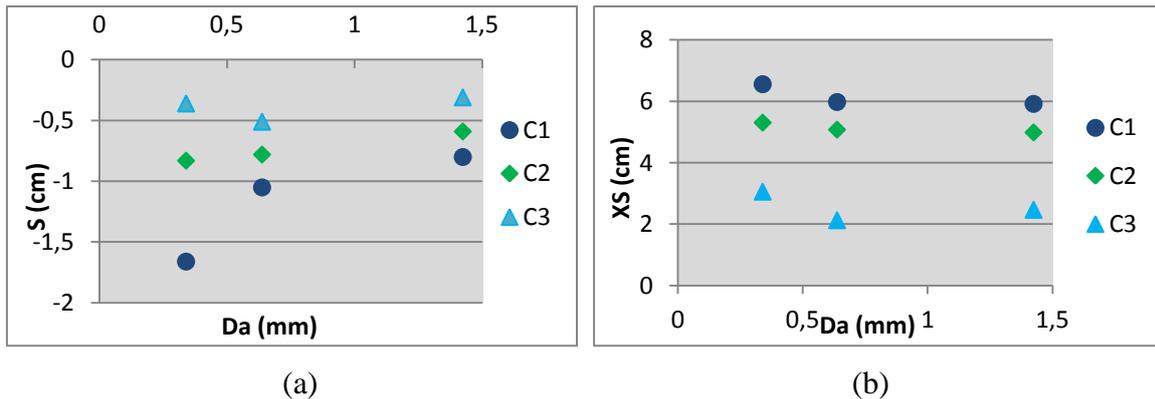


Gráfico 4.17 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo C

Neste tipo de estrutura podemos verificar que há um aumento da erosão à medida que a areia diminui e que a erosão abranda com a diminuição do diâmetro do orifício. Assim no teste C1, correspondente ao orifício de 5 mm, a erosão é mais acentuada, do que no caso do teste C3, correspondente ao orifício de 2 mm. Quanto à distância das cavidades de erosão há um ligeiro afastamento da estrutura à medida que o diâmetro da areia diminui.

• **Tipo C – Deposição**

Por último o Gráfico 4.18 sistematiza os resultados dos testes C1 a C3, no caso da deposição.

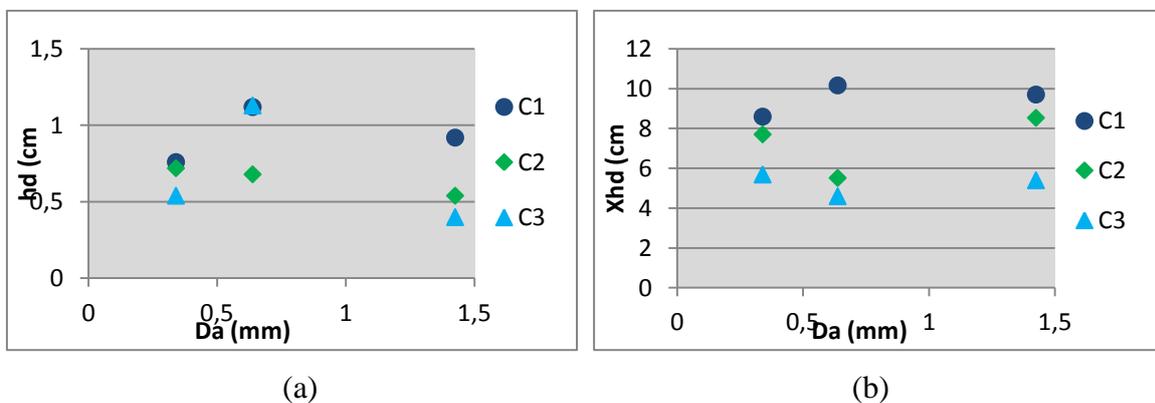


Gráfico 4.18 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo C

Neste caso a deposição é influenciada pela capacidade do jato arrastar as partículas para jusante, uma vez que o orifício se encontra junto da camada de areia. A maior capacidade de arrastamento observa-se para o orifício de maior diâmetro, assim como a maior distância a que se observa a máxima altura de deposição.

4.3.3.2. Caudal reduzido em 20%

Apresentam-se nesta subsecção os resultados obtidos para o caudal reduzido em 20%.

- **Tipo A – Erosão**

No caso da estrutura do tipo A e no caso da erosão, o Gráfico 4.19 sistematiza os resultados dos testes A'1 a A'4, tendo-se observado que no caso dos testes A'3, A'5 e A'6 não existia erosão.

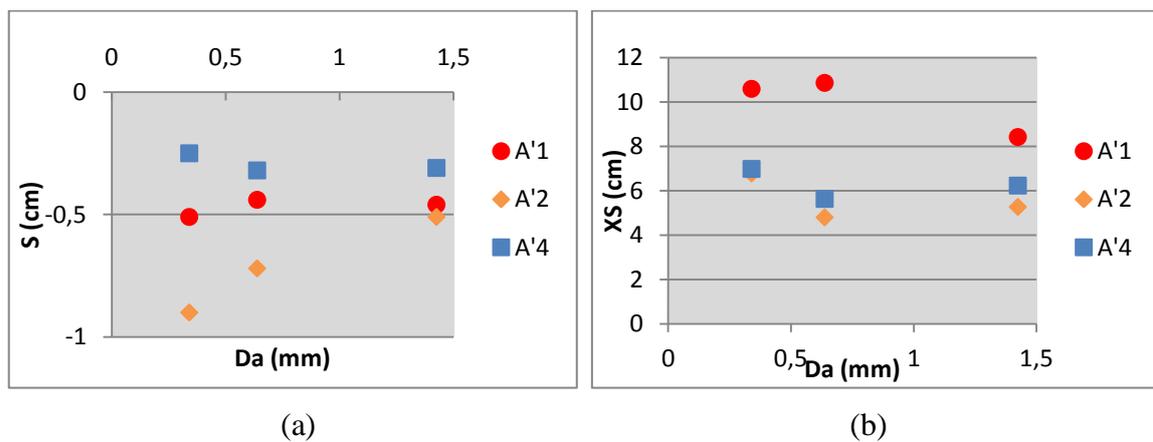


Gráfico 4.19 – Variação de s (a) e x_s (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo A, caudal reduzido

Uma vez reduzido o caudal e mantendo as restantes condições, verifica-se o mesmo comportamento para o mesmo tipo de testes, mas com um menor poder de erosão deixando mesmo de se observar erosão no teste A'3.

- **Tipo A – Deposição**

No caso da deposição da estrutura do tipo A, o Gráfico 4.20 sistematiza os resultados dos testes A1 a A4, verificando-se que nos testes A3, A5 e A6 não existia deposição.

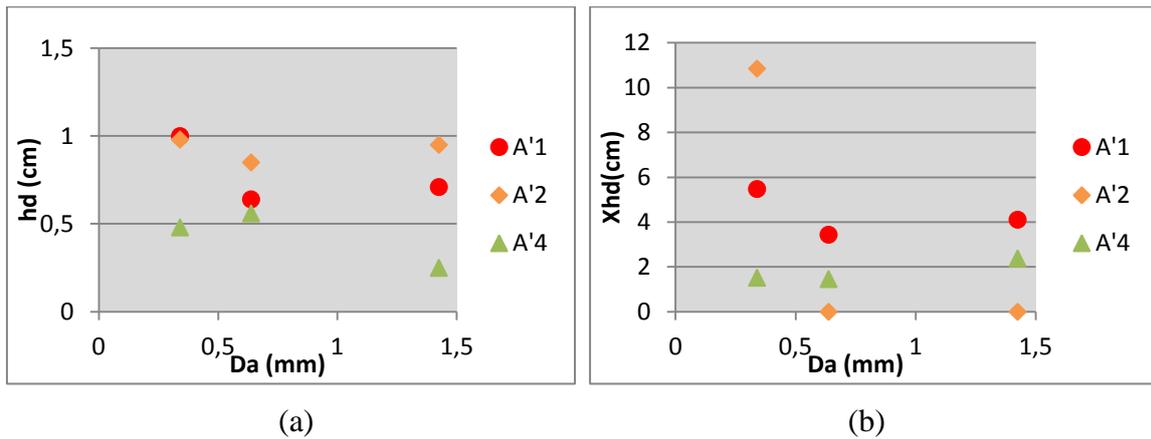


Gráfico 4.20 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo A, caudal reduzido

No caso da deposição, como seria de esperar, há uma diminuição comparativamente aos testes equivalentes. Observa-se que deixa de existir deposição no teste A3. Em relação às distâncias, observa-se uma diminuição nos testes A2 e A4, e um ligeiro aumento no teste A1.

- **Tipo B – Erosão**

No caso da estrutura do tipo B e no caso da erosão, o Gráfico 4.21 sistematiza os resultados dos testes B1 a B6.

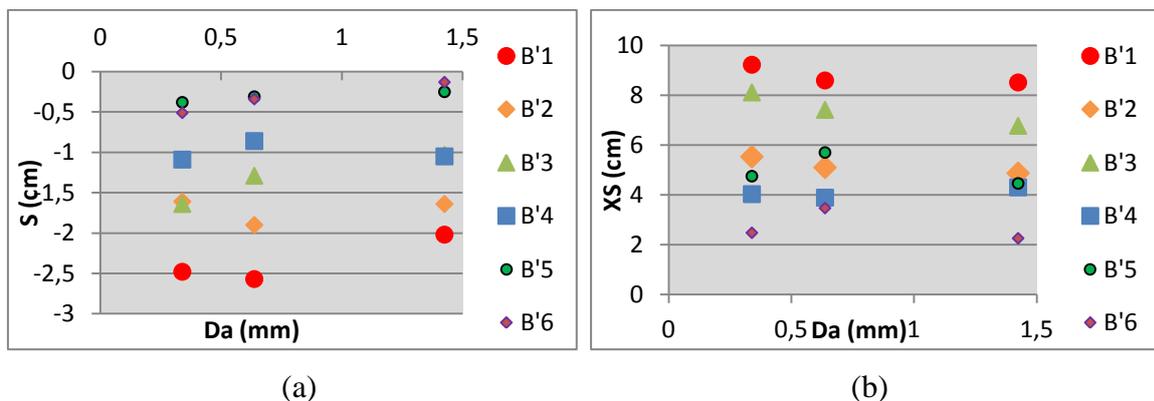


Gráfico 4.21 – Variação de s (a) e x_s (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo C, caudal reduzido

No que diz respeito à erosão, há uma diminuição mais acentuada no caso dos orifícios de maior diâmetro, e uma ligeira diminuição para o orifício de menor diâmetro. Observaram--se tendências idênticas na distância a que ocorre a máxima erosão.

• **Tipo B – Deposição**

No seguimento das estruturas do tipo B e no caso da deposição, o Gráfico 4.22 sistematiza os resultados dos testes B'1 a B'6.

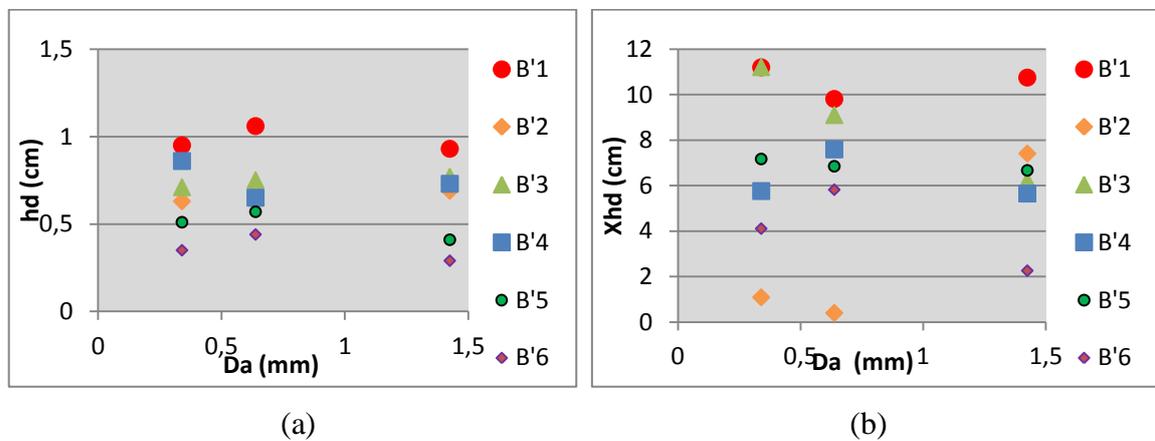


Gráfico 4.22 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo B, caudal reduzido

Relativamente à deposição comparativamente com os testes de caudal máximo há uma clara diminuição da deposição da areia grossa. Nas restantes areias a diminuição da deposição é ligeiramente menor à exceção do teste B5 em que a deposição aumenta nas areias média e fina. Em relação às distâncias existe uma maior variação comparativamente com os testes de caudal máximo.

• **Tipo C – Erosão**

Para completar esta análise no caso da erosão, o gráfico 4.23 sistematiza os resultados dos testes C1 a C3.

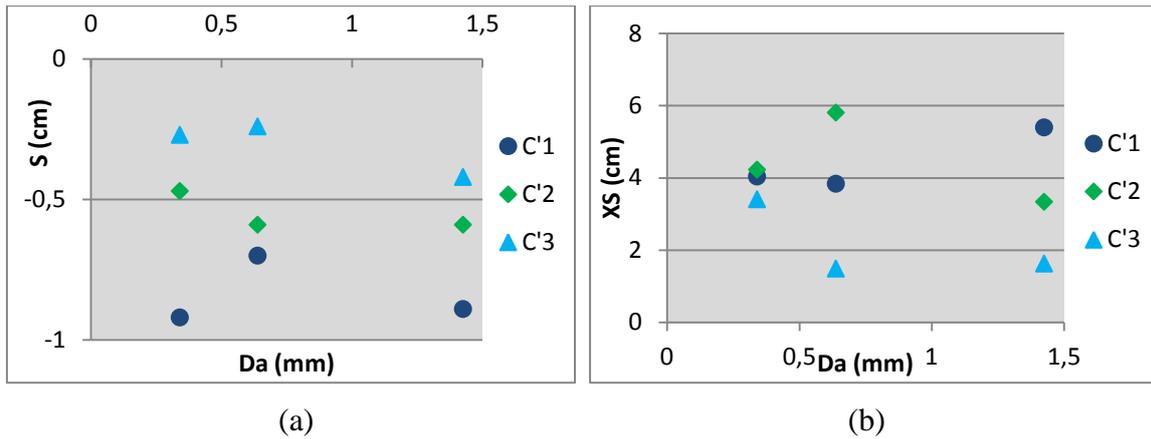


Gráfico 4.23 – Variação de s (a) e x_s (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo C, caudal reduzido

Para este tipo de estrutura, há uma redução da cavidade de erosão como seria expectável. Em relação à distância a que se encontra, existe igualmente uma redução, que é muito significativa no caso da areia grossa.

- **Tipo C – Deposição**

No caso da deposição, o gráfico 4.24 sistematiza os resultados dos testes C1 a C3.

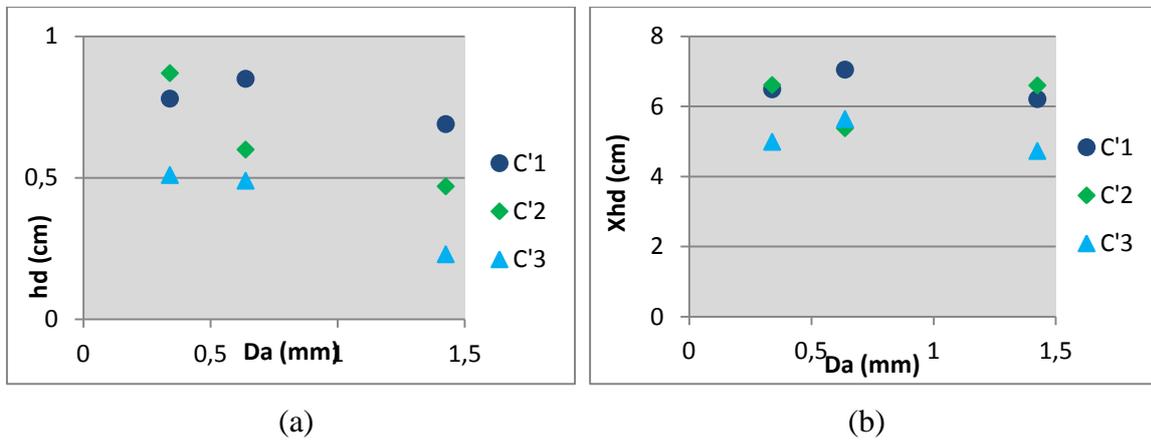


Gráfico 4.24 – Variação de h_d (a) e x_{hd} (b) em função do diâmetro da areia, para a estrutura Tipo C, caudal reduzido

Comparativamente com os testes de caudal máximo os valores da deposição são muito aproximados não havendo grande movimentação de partículas de um teste para o outro. Quanto às distâncias de deposição, em comparação com os testes de caudal máximo há

uma aproximação da estrutura nos testes C'1 e C'2, enquanto no ensaio C'3 as distâncias são praticamente idênticas.

4.3.4. Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão

Recorrendo à análise dimensional efetuada no capítulo 3, analisou-se a evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão. Apresenta-se os resultados de acordo com a equação (33), para o caudal máximo e para o caudal reduzido em 20%.

4.3.4.1. Evolução temporal para o caudal máximo

Utilizando D como o comprimento característico, obtiveram-se os Gráficos 4.25 a 4.27. Apresentam-se os resultados relativos aos ensaios 1 a 15, ou seja obtidos para a areia de maior diâmetro, encontrando-se no anexo III os gráficos correspondentes aos restantes resultados experimentais.

No caso da estrutura A, o Gráfico 4.25 apresenta os resultados dos ensaios 1 a 8, uma vez que nos ensaios 11 e 13 não se registou qualquer tipo de movimento das partículas.

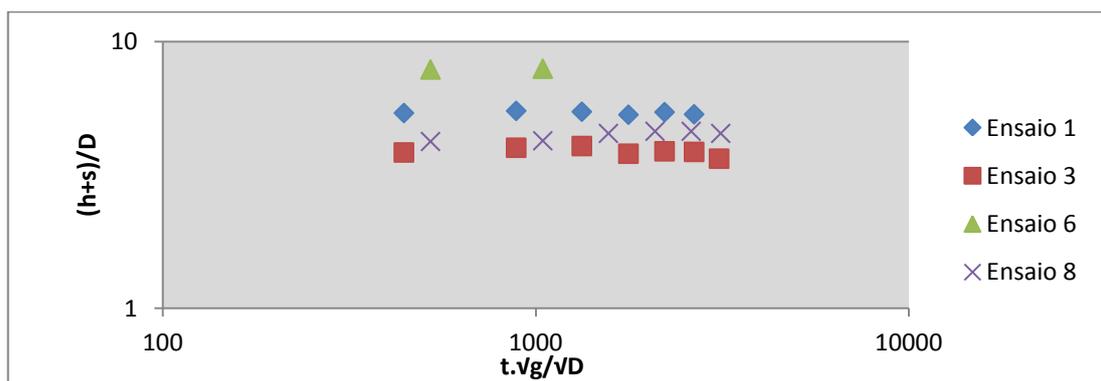


Gráfico 4.25 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 1, 3, 6 e 8

No caso da estrutura do tipo A (gráfico 4.28) observa-se alguma dispersão de resultados, apesar de todos os ensaios evidenciarem uma tendência linear praticamente constante. Isto mostra que o tempo de equilíbrio é alcançado no início dos ensaios. Por outro lado, o facto

de não se observar uma variação significativa da profundidade de erosão (s) poderá estar relacionada com os parâmetros experimentais escolhidos, tais como a granulometria da areia, o caudal e a espessura inicial da camada de areia a jusante da descarga de fundo.

No caso da estrutura B, o Gráfico 4.26 apresenta os resultados dos ensaios 2 a 14.

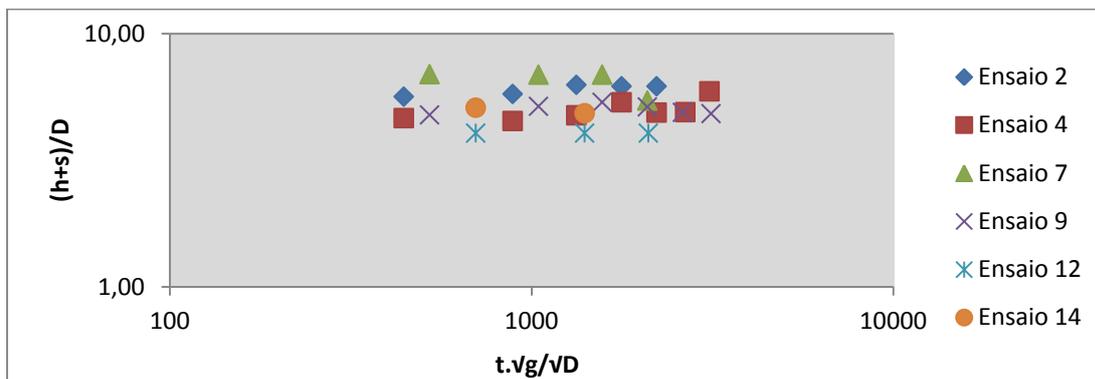


Gráfico 4.26 - Variação de $(h+s)/D$ com $(t \cdot \sqrt{g} / \sqrt{D})$ para os 2, 4, 7, 9, 12 e 14

No caso da estrutura do tipo B, o Gráfico 4.26 mostra que os resultados não variam muito entre si. Os ensaios 2, 7 e 12 os orifícios estão situados a 2 cm acima da camada de areia e nos ensaios 4, 9 e 14 os orifícios estão situados a 1 cm acima da camada de areia.

No caso da estrutura C, o gráfico 4.27 apresenta os resultados referentes aos ensaios 5, 10 e 15.

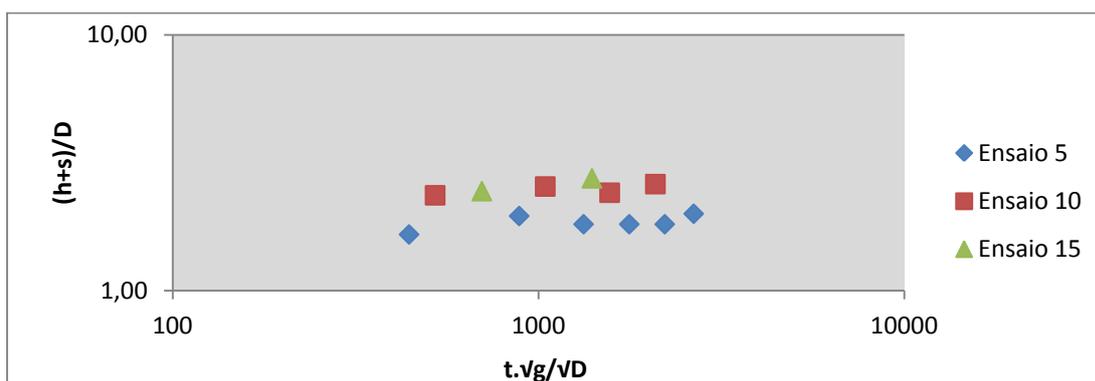


Gráfico 4.27 - Variação de $(h+s)/D$ com $(t \cdot \sqrt{g} / \sqrt{D})$ para os ensaios 5, 10 e 15

No caso da estrutura do tipo C, o Gráfico 4.27 mostra alguma proximidade entre as séries dos ensaios 10 e 15.

4.3.4.2. Evolução temporal para o caudal reduzido em 20%

Utilizando D como comprimento característico, obtiveram-se os Gráficos 4.28 a 4.30, obtidos para a areia de maior diâmetro e no caso do caudal reduzido em 20%. Os gráficos correspondentes aos restantes resultados experimentais encontram-se no anexo III.

No caso da estrutura do tipo A apresentam-se os resultados dos ensaios 46 a 53, uma vez que nos ensaios 51, 56 e 58 não se registou qualquer tipo de movimento das partículas.

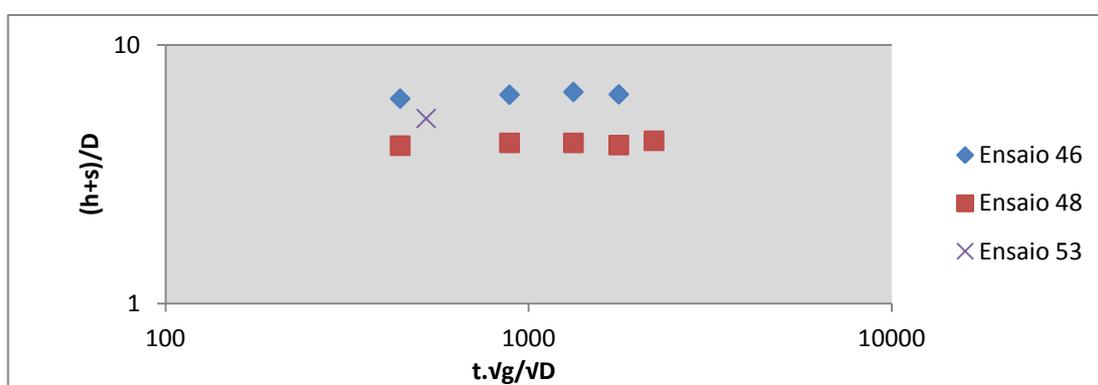


Gráfico 4.28 - Variação de $(h+s)/D$ com $(t \cdot \sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 46, 48 e 53, redução em 20% do caudal

No caso da estrutura B, o Gráfico 4.29 apresenta os resultados dos ensaios 47 a 59.

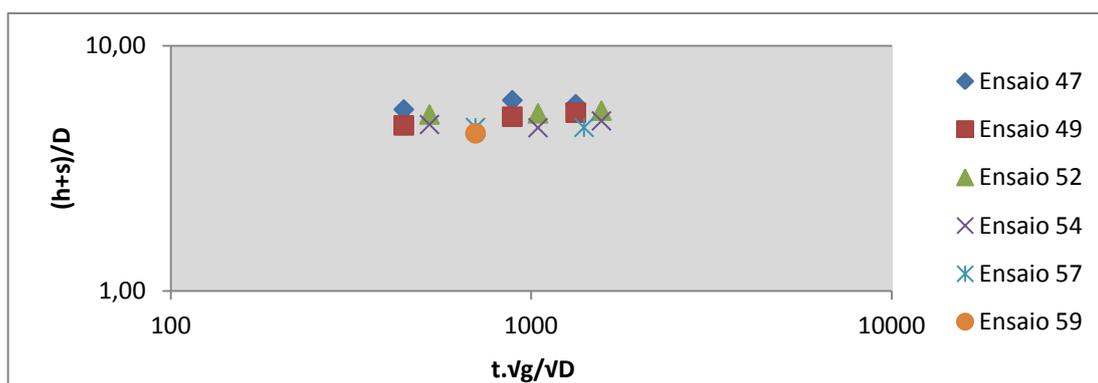


Gráfico 4.29 - Variação de $(h+s)/D$ com $(t \cdot \sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os 47, 49, 52, 54, 57 e 59, redução em 20% do caudal

No Gráfico 4.28, e comparativamente ao gráfico 4.25, observa-se uma sobreposição dos resultados idêntica, o que levará a concluir que se trata de uma adequada adimensionalização dos resultados.

O Gráfico 4.29 mostra uma sobreposição das séries dos ensaios, muito idêntico aos dos Gráficos 4.26.

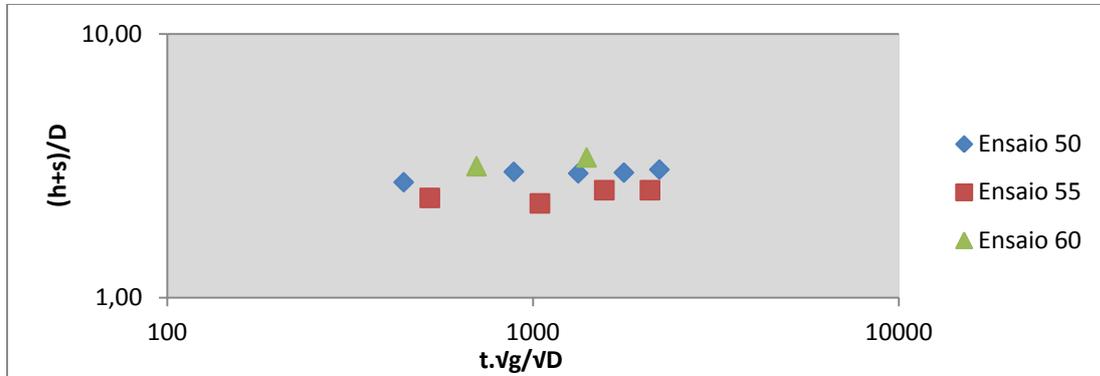


Gráfico 4.30 - Variação de $(h+s)/H$ com $(t \cdot \sqrt{g} / \sqrt{H})$ para os ensaios 50, 55 e 60, redução em 20% do caudal

No Gráfico 4.30 há uma maior proximidade dos ensaios 50 e 60, de que os ensaios 55 e 60 como acontecia no gráfico 4.27.

4.4. Análise e Discussão de Resultados

Analisados os ensaios das estruturas do tipo A, os ensaios 1, 16 e 33, obtidos para maior diâmetro do orifício, (5 mm), e a altura máxima de 2 cm acima da camada de areia, verifica-se um arrastamento das areias para montante levando, conseqüentemente à criação de anti-dunas. No entanto, à medida que o diâmetro da areia vai diminuindo esse arrastamento é mais evidente. Pode verificar-se que para a areia mais grossa a erosão máxima acontece para $t=20s$ e é igual 0,26 cm, correspondendo a 1,30 m no protótipo. Para as restantes areias (média e fina), a erosão máxima acontece para $t=50s$ e $t=40s$, a um profundidade de 0,82 cm e 0,71 cm que correspondem no protótipo a 4,1 m e 3,55 m, respetivamente.

No caso dos ensaios 3,18 e 33, nos quais se mantém o diâmetro do orifício mas em que o orifício se situa a 1 cm da camada de areia, há uma diminuição da altura do colchão de água, que provoca uma erosão mais acentuada, observando-se o arrastamento dos grãos de areia para montante e para jusante, em igual proporção. Embora a erosão máxima para as

areias grossa e média seja idêntica, o tempo de equilíbrio é superior para a areia mais grossa. Quanto à areia fina apresenta uma erosão maior, como seria expectável. As máximas erosões registadas para as areias grossa, média e fina são iguais a 0,81, 0,71 e 1,14 cm e ocorrem nos instantes $t=30$ s, $t=20$ s e $t=50$ s, respetivamente. Os valores de erosão correspondentes no protótipo são iguais a 4,05, 3,55 e 5,70 m respetivamente.

Os ensaios 6, 21 e 36 são uma repetição dos anteriores mas com uma diminuição no diâmetro do orifício para 3,6 mm e uma altura acima da camada de areia de 2 cm. Verifica-se um comportamento semelhante aos ensaios anteriores, mas a erosão é mais reduzida. Assim sendo, as erosões máximas são iguais a 0,23, 0,31 e 0,5 cm e ocorrem nos instantes $t=20$ s, $t=20$ s e $t=30$ s, respetivamente. Os valores de erosão correspondentes no protótipo são iguais a 1,15, 1,55 e 2,5 respetivamente. Para o mesmo orifício e com altura de água igual a 1 cm acima da camada de areia regista-se a erosão máxima dos ensaios 8, 23 e 38 com valores iguais a 0,31, 0,49 e 0,73 cm e ocorrem nos instantes $t=50$ s, $t=10$ s e $t=40$ s, respetivamente. Os valores de erosão correspondentes no protótipo são iguais a 1,55, 2,45 e 3,65 m, respetivamente. Reduzindo uma vez mais o orifício agora para 2 mm e variando a sua altura entre 2 cm e 1 cm da camada de areia, não revelou qualquer tipo de movimentação das partículas de areia.

Nos ensaios do tipo B, a erosão é provocada por um jato de água. No caso dos ensaios 2, 17 e 32, cujo diâmetro do orifício é de 5 mm com uma altura de 2 cm acima da camada de areia há uma rápida erosão na fase inicial obtendo-se iguais a 2,03, 2,90 e 2,96 cm que ocorrem nos instantes $t=30$ s, $t=50$ s e $t=70$ s respetivamente. Os valores de erosão correspondentes no protótipo são iguais a 10,15, 14,50 e 14,80 m, respetivamente. Para os restantes ensaios com o orifício situado 2 cm acima da areia, mas reduzindo o diâmetro do mesmo, encontramos comportamentos de erosão semelhantes mas com menor capacidade de erosão, algo expectável uma vez que há uma diminuição de caudal. Para os ensaios 7, 22 e 37 com o diâmetro do orifício de 3,6 mm os valores são iguais a 1,57, 1,66 e 1,83 cm e ocorrem nos instantes $t=10$ s, $t=50$ s e $t=40$ s, respetivamente. Os valores de erosão correspondentes no protótipo são 7,85, 8,3 e 9,15 m, respetivamente. Para os ensaios 12, 27 e 42, com o diâmetro de 2 mm, os valores registados são iguais a 0,49, 0,59 e 0,67 cm e ocorrem nos instantes $t=30$ s, $t=10$ s e $t=20$ s, respetivamente. Os valores de erosão correspondentes no protótipo são iguais a 2,45 m, 2,95 m e 3,35 m, respetivamente.

Analisando os ensaios seguintes repete-se o processo mas os orifícios estão situados a 1 cm acima da camada de areia. Assim para os ensaios 4, 19 e 34, com um orifício de 5 mm, avaliando os valores obtidos nota-se que a erosão máxima é limitada pela capacidade do jato ou seja a erosão é idêntica em todas as areias variando o tempo para que essa erosão seja atingida. As máximas erosões obtidas são iguais a 2,02, 2,01 e 2,26 cm e ocorrem nos instantes $t=70$ s, $t=40$ s e $t=50$ s, respetivamente. Os valores de erosão correspondentes no protótipo são iguais a 10,10, 10,05 e 10,80 m, respetivamente. Alterando apenas os diâmetros do orifício para 3,6 mm e 2 mm, observa-se uma erosão gradual onde as partículas de areia oferecem resistência. É de salientar que no ensaio 44 a erosão é influenciada pelo arrastamento das partículas para jusante. Os valores obtidos para os ensaios 9, 24, e 39 são iguais a 1,28, 1,59 e 2,01 cm e ocorrem nos instantes $t=30$ s, $t=30$ s e $t=20$ s, respetivamente. Os valores de erosão correspondentes no protótipo são iguais a 6,4, 7,95 e 10,05 m, respetivamente. Para os ensaios 14, 29 e 44 os valores registados são iguais a 0,37, 0,52 e 0,36 e ocorrem nos instantes $t=10$ s, $t=20$ s e $t=30$ s, respetivamente. Os valores de erosão correspondentes no protótipo são iguais a 1,85, 2,60 e 1,80 m, respetivamente.

Para os ensaios do tipo C, com os orifícios situados à face da camada de areia regista-se uma erosão provocada pelo arrastamento das partículas da areia. Esta erosão é provocada pelo maior ou menor caudal que passa pelo orifício, como se observa no ensaio 45, caso em que a erosão é provocada pela capacidade do caudal arrastar as partículas de areia para jusante. Assim, para o orifício de 5 mm, as erosões máximas são iguais a 0,80, 1,05 e 1,66 cm e ocorrem aos instantes $t=60$ s, $t=30$ s e $t=50$ s, respetivamente. Os valores de erosão correspondentes no protótipo são iguais a 4, 5,25 e 8,3 m, respetivamente. Relativamente aos ensaios 10, 25 e 40 com o orifício de 3,6 mm, as erosões são iguais a 0,59, 0,78 e 0,83 cm e ocorrem nos instantes $t=40$ s, $t=30$ s e $t=49$ s, respetivamente. Os valores de erosão correspondentes no protótipo são iguais a 2,95, 3,90 e 4,15 m. E por fim, nos ensaios 15, 30 e 45, com o menor diâmetro do orifício (2 mm) os valores são iguais a 0,31, 0,51 e 0,36 cm e ocorrem nos instantes $t=20$ s, $t=30$ s e $t=40$ s respetivamente. Os valores de erosão correspondentes no protótipo são iguais a 1,55, 2,55 e 1,8 m.

Para os ensaios com o caudal reduzido em 20%, o principal objetivo é comparar com os ensaios anteriores, e observar se o comportamento da erosão é igual ou se por alguma

razão existem comportamentos distintos, de forma a garantir mais fiabilidade nas estruturas.

Então assumindo que nos ensaios 1 a 45 a erosão é máxima e que equivale a valores de 100%, fazendo a comparação com os valores obtidos nos ensaios 46 a 90, obtemos as seguintes percentagens de redução R (%) (Tabelas 4.13 a 4.15), de acordo com a equação (34 e 35).

$$\frac{S_i - S_{i+45}}{S_i} \times 100 = R \quad (34)$$

ensaio S_i (i=1 a 45)

exemplo:

$$\frac{S_1 - S_{46}}{S_1} \times 100 = R \quad (35)$$

Tabela 4.13 – Percentagens de redução da erosão no orifício 5 mm

Ensaio	46	47	48	49	50	Areia Grossa
R(%)	-76,92	0,49	37,04	18,81	-11,25	
Ensaio	61	62	63	64	65	Areia Média
R(%)	46,34	11,38	-1,41	5,47	33,33	
Ensaio	76	77	78	79	80	Areia Fina
R(%)	28,17	16,22	21,05	25,46	44,58	

Tabela 4.14 – Percentagens de redução da erosão no orifício de 3,6 mm

Ensaio	51	52	53	54	55	Areia Grossa
R(%)	100,00	34,39	0,00	17,97	0,00	
Ensaio	66	67	68	69	70	Areia Média
R(%)	100,00	22,29	34,69	45,91	24,36	
Ensaio	81	82	83	84	85	Areia Fina
R(%)	100,00	10,38	65,75	28,76	43,37	

Tabela 4.15 – Percentagens de redução da erosão no orifício de 2 mm

Ensaio	56	57	58	59	60	Areia Grossa
R(%)	NR	48,98	NR	64,86	47,50	
Ensaio	71	72	73	74	75	Areia Média
R(%)	NR	47,46	NR	34,62	52,94	
Ensaio	86	87	88	89	90	Areia Fina
R(%)	NR	43,28	NR	1,92	25,00	

Nota: NR- Nada a registrar

Uma vez encontrados os valores em percentagens dos ensaios 46 a 90, pode-se observar de um maneira geral que é na areia média que se encontra a maior variação de resultados, sendo difícil relatar o seu comportamento. Relativamente à areia fina, quando existe colchão de água (estrutura do tipo A) a redução da erosão é mais significativa, sendo que no caso do orifício de 3,6 mm, no ensaio 81 não houve erosão e no ensaio 83 observou-se uma redução de 65,75%. Para o orifício de 2 mm continua a não haver erosão, e no orifício de 5 mm, a redução da profundidade da cavidade de erosão ronda os 25%. Nos ensaios onde existem jatos de água (estrutura do tipo B) ainda para a areia fina, a sua diferença é menor, comparativamente com os ensaios de caudal máximo, à exceção do ensaio 87 que apresenta uma redução de 43%. Para os ensaios toda estrutura do tipo C, nos orifícios de 5 mm e 3,6 mm, a redução ronda valores de 45%, enquanto que no orifício de 2 mm a erosão provocada pelo caudal máximo é a menor encontrada.

Com a areia mais grossa e nos ensaios de estrutura do tipo A encontram-se as maiores diferenças comparativamente aos ensaios de caudal máximo, ou seja a erosão é menor. No entanto o ensaio 53 a cavidade de erosão manteve-se, e no ensaio 51 não ocorreu erosão. Relativamente ao ensaio 46 há um aumento devido a uma redução do ângulo de ação do jato de água o que provoca um vórtice mas próximo da camada de areia. Para os ensaios onde se encontram os jatos de água (estrutura do tipo B) há uma perda da capacidade de erosão do jato de água à medida que o orifício diminui de diâmetro, comparativamente aos ensaios do caudal máximo. Quanto aos ensaios do tipo C, a redução do caudal origina uma menor velocidade do jato que atravessa o orifício e igualmente perde capacidade de transportar os sedimentos para jusante, ou seja, os sedimentos são transportados para jusante, e criam uma barreira a jusante mais próxima da estrutura, fazendo com que a energia restante do jato provoque uma maior erosão. Observa-se uma situação contraditória

no ensaio 60, que como a areia é mais fina, apresenta uma maior capacidade do jato de água para transportar os sedimentos fazendo com que a erosão seja significativamente menor (47,50% de redução).

Em relação à análise dos gráficos de erosão/deposição em função da areia, para as estruturas do tipo A, pode-se dizer que à medida que o diâmetro da areia diminui a erosão aumenta, já a distância da erosão à estrutura vai aumentando com a diminuição da areia. Em relação à deposição, esta aumenta com a diminuição do diâmetro da areia, e aproxima-se da estrutura. De registrar a exceção do teste A2 (ensaio 33), onde se observa para a areia mais fina que a deposição é mais afastada. Esta situação pode ser alterada, pois a deposição das areia é muito semelhante a montante e a jusante, e pode alternar com a evolução do ensaio no tempo (Gráfico 4.2). Assim como seria expectável há um aumento de erosão, logo origina um aumento de deposição.

Em relação às estruturas do tipo B, verifica-se mais um vez o aumento da erosão com a diminuição do diâmetro da areia. No entanto, em relação aos ensaios com o orifício situado a 2 cm acima da camada de areia, observam-se dois comportamentos distintos: há uma tendência para que a erosão se aproxime da estrutura, à exceção dos ensaios com o orifício de 3,6 mm uma vez que a erosão é limitada pela capacidade de transporte dos grãos de areia para jusante; ou o jato continua a erodir mas há uma reposição da areia, sendo registada a maior erosão pela capacidade do jato, e aumentando a sua distância com a diminuição do diâmetro da areia. Para a estrutura com o orifício situado a 1 cm acima da camada de areia há uma tendência para o afastamento da erosão à medida que a areia diminui de diâmetro. Em relação à deposição, à medida que o diâmetro da areia vai diminuindo, a deposição também diminui, isto deve-se ao fato do jato de água provocar uma erosão muito rápida inicialmente, originando igualmente um maior depósito de areia no início e que vai diminuindo ao longo do tempo. Quanto à distância da deposição há uma tendência para que se afaste da estrutura, apesar de nos testes B1, B4 e B6 com areia fina, se observar o contrário. Nestes casos o tempo de registo dessa deposição é feito para os instantes iniciais o que depende muito da impulsão provocada pelo jato, mas ao longo do tempo a tendência é para que a deposição ocorra mais afastada da estrutura como demostram os Gráficos 4.3, AII.4 e AII.6.

As estruturas do tipo C apresentam resultados mais uniformes com o aumento da erosão e da distância da mesma, à medida que a granulometria da areia diminui. Como seria de esperar com o aumento da erosão há o aumento da deposição, com exceção do ensaio 35 em que a areia é mais fina e permite uma maior fluidez dos grãos de areia para jusante.

Ao reduzir o caudal em 20% observa-se para as estruturas do tipo A, que subsiste o mesmo comportamento, mas com uma menor capacidade de erosão, deposição e também no transporte dos grãos de areia. De salientar uma clara perda do efeito erosivo do teste A'4 e o facto de não haver qualquer erosão ou deposição no teste A'3.

Para as estruturas do tipo B, como seria de esperar, verifica-se o mesmo comportamento, mas com um menor poder de erosão que origina menor deposição. Embora as distâncias de erosão se mantenham idênticas, as distâncias de deposição diminuem.

Nas estruturas do tipo C, à medida que se diminui o diâmetro da areia a erosão também diminui, pois nestes ensaios os orifícios estão situados junto da camada de areia. À medida que vai havendo erosão vai aumentando a deposição, até que o escoamento perde a capacidade de arrastar os grãos de areia, criando um obstáculo para o jato de água que continua a ter energia suficiente para provocar erosão, observando-se que no teste C'1 para a areia grossa acaba por ter uma erosão superior em relação ao teste C1. No caso do teste C'3, comparativamente com os ensaios de caudal máximo (teste C3), não se observam grandes diferenças na areia fina, uma vez que oferecem menos resistência e a energia provocada pelo jato de água continua a arrastar os grãos da areia.

A evolução temporal para o caudal máximo com $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$, não permite identificar um grupo de ensaios com comportamento idêntico. Observa-se alguma dispersão de resultados, apesar de todos os ensaios evidenciarem uma tendência linear praticamente constante. Isto permite concluir que o processo erosivo se encontra na fase de equilíbrio.

No caso das estruturas do tipo A existe uma evolução temporal semelhante, devido à altura do orifício. Neste caso o orifício situado a 2 cm acima da camada de areia apresenta valores mais elevados relativamente aos orifícios situados a 1 cm da camada de areia.

Nas estruturas do tipo B, a evolução temporal não varia muito em função do diâmetro dos orifícios. Ainda assim, os orifícios situados a 2 cm acima da camada de areia apresentam os maiores valores para todos os diâmetros das areias.

Nas estruturas do tipo C, a evolução temporal é praticamente idêntica, não havendo grandes diferenças entre os orifícios. A análise dimensional realizada revela-se mais adequado a este tipo de estrutura.

A evolução temporal para o caudal reduzido em 20%, com $(h+s)/Da$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{Da})$ permite observar comportamento linear constante idêntico a cada estrutura já referenciada.

5. CONCLUSÃO

O presente capítulo apresenta as conclusões de todos os trabalhos experimentais e principais aspetos abordados ao longo desta dissertação, assim como algumas sugestões para trabalhos futuros.

5.1. Síntese de conclusões

Na realização deste trabalho relativo à erosão provocada por uma descarga de fundo de uma barragem, realizaram-se um total de 90 ensaios, 45 dos quais para um caudal máximo e os restantes 45 para um caudal reduzido em 20%. Procurou-se analisar o seu comportamento de uma forma rápida, com um tempo limite de 1 min: 30 s.

Com o recurso a uma máquina de filmar e a um programa de manipulação de imagem disponível gratuitamente na *internet*, foi possível:

1. Observar, descrever e classificar os ensaios de acordo com a conjugação do diâmetro do orifício com a sua altura em relação à camada de sedimentos e a altura do colchão de água a jusante. Foi possível agrupar os dados por vários tipos de estrutura, nomeadamente, tipo A, tipo B e tipo C.
2. Elaborar gráficos recorrendo a imagens correspondentes a diferentes instantes do ensaio, acompanhado a evolução temporal da erosão e deposição. Observou-se que nas estruturas do tipo A a erosão é provocada por um vórtice, no tipo B por um jato em queda e no tipo C por um jato paralelo à camada de areia.

3. Analisar os resultados obtidos para os vários tipos de estruturas e para os diferentes tipos de areia, identificando o seu comportamento e apurando as características da cavidade de erosão, da camada de deposição e das suas respectivas distâncias à estrutura, encontrando tendências de evolução e identificando os agentes de transporte das partículas de areia, nomeadamente, a capacidade de erosão do jato ou de transporte do escoamento para jusante.
4. Observar que com a diminuição do caudal em 20% o comportamento era idêntico aos ensaios com o máximo caudal, à exceção dos ensaios 46 e 50.
5. Identificar que se atingiu o tempo de equilíbrio, através da representação da relação entre os parâmetros adimensionais $(h+s)/D$ e $(t\sqrt{g}/\sqrt{D})$.
6. Concluir que o método experimental se mostrou adequado, permitindo estudar em laboratório de uma forma simplificada o modelo reduzido de uma descarga de fundo de uma barragem.

5.2. Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros sugere-se que as experiências realizadas sejam alteradas, nomeadamente no que se refere ao canal *Armfield*, de forma a poder comparar resultados com os obtidos nesta dissertação.

Outra forma seria alterar as variáveis presentes nesta dissertação, com a alteração dos diâmetros e alturas do orifício da descarga de fundo, utilizando outras granulometrias de areia e a cota a jusante do canal. Poder-se-ia igualmente pôr outras estruturas hidráulicas,

tais como descarregador de soleira, contração vertical e aplicação de jatos sobre as granulometrias.

Outra opção seria estudar a zona a montante da descarga de fundo da barragem, como por exemplo o arrastamento de lodos na abertura da mesma e classificar os tipos de filtros a utilizar nessa zona. Da mesma forma poder-se-ia classificar a qualidade da água na saída da descarga de fundo uma vez que são águas de muito fraca qualidade e avaliar a quantidade a descarregar de forma a não prejudicar a fauna e flora a jusante ou se seria necessário algum processo de tratamento antes da sua descarga.

BIBLIOGRAFIA

Aleixo, R. J. (2006). *Estudos de Sedimentação e Transporte Empregando Novas Técnicas Analíticas e Experimentais, Dissertação de Mestrado em Fundações e Aplicações da Mecânica dos Fluidos, Faculdade de Engenharia Universidade do Porto*. Porto.

Aleixo, R., & Proença, M. F. (2007). *Medição da Trajectória de um Jato Livre Usando Aquisição de Imagens*, 2ª Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambientais da FEUP, 139-146.

Barboza, T. (2013). *Sediment behind dams creates greenhouse gas "hot spots" study finds. Los Angeles Times 1 de agosto de 2013* .

Bey, A., Faruque, M., & Balachandar, R. (2007). *Two- Dimensional Scour Hole Problem: Role of Fluid Structures*, Journal of Hydraulic Engineering 133(4), 414-430.

Cardoso, A. (1998). *Hidráulica Fluvia*,. Fundação Calouste Gulbenkian.

Carvalho, E., Maia, R., & Proença, M. (2007). *Estudo Experimental de Escoamentos e Transporte- Início do Movimento*, 2ª Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da FEUP, 978- 989.

Dargahi, B. (2010). *Scour development downstream of spillway*, Journal of Hydraulic Research 41:4, 417-426.

Ebah. (2014). *ebah.com.br*. Obtido em 11 de Novembro de 2014

Fernandes, J., & Cardoso, A. H. (2004). *Erosões localizadas a jusante de soleiras de parede delgada em canais de leito móvel*, Congresso Internacional sobre o Rio Minho, Melgaço, 26 a 28 de Maio. Portugal.

Ferreira, J. S. (Novembro de 2011). *Contributo para o Estudo de Cavidades de Erosão em Escoamentos com Superfície Livre sobre Leitões Móveis*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, Guimarães .

Hahn, E., & Lyn, D. A. (2010). *Vertical-Contraction Case*, Journal of Hydraulic Engineering, 136(2), 137-141.

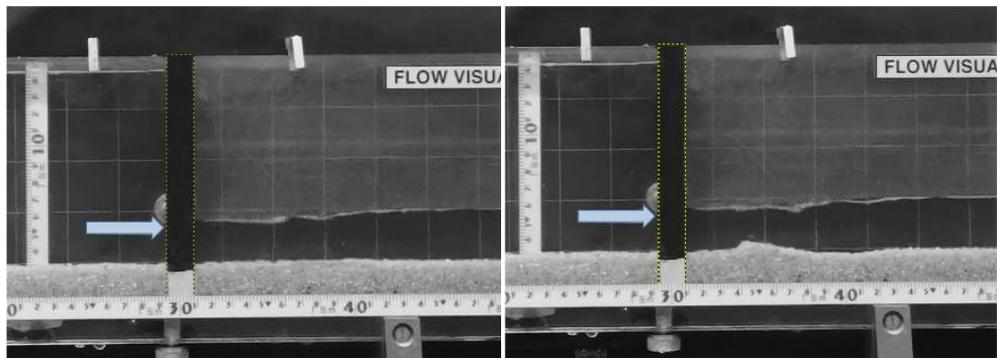
Herpor, E. (2014). *herpor.com*. Obtido em 28 de Setembro de 2014

- Hill, D. F., & Younkin, B. D. (2006). *PIV Measurements of Flow In and Around Scour Holes*, *Experiments in Fluids*, 41: 295-307.
- Leandro, J., Carvalho, R., Chachereau, Y., & Chanson, H. (03 de janeiro de 2012). *Estimating void fraction in a hydraulic jump by measurement of pixel intensity*, Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Springer-Verlag .
- Lencastre, A. (1996). *Hidraulica Geral- Volume I e Volume II*. Lisboa.
- Lencastre, A., & Franco, F. M. (1984). *Lições de Hidrologia*, Universidade Nova de Lisboa-Faculdade de Ciências e Tecnologia. Lisboa.
- Lima, M. M., & Ferreira, J. S. (2012). Contributo para O Estudo De Cavidades de Erosão em *Escoamento com Superfície Livre sobre Leitos Móveis, IV Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos*, Termodinâmica e Energia, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, MEFTE 201.
- Manso, P. A., Bollaert, E. F., & Schleiss, A. J. (October de 2009). *Influence of Plunge Pool Geometry on High-Velocity jet Impact Pressures and Pressure Propagation inside Fissured Rock Media*, *Journal of Hydraulic Engineering*, 783-792.
- Mignot, E., & Riviere, N. (Fevereiro de 2010). *Bow-wave-like hydraulic jump and horseshoe vortex around an obstacle in a supercritical open flow*, *Physics of Fluids* 22, 117105.
- Novais-Barbosa. (1986). *Mecânica dos fluidos e Hidráulica Geral*, Porto Editora. Porto.
- Novak, P., Moffat, A., Nalluri, C., & Narayanan, R. (1996). *Hydraulic Structures*, E& Fn Spon .
- Oliveto, G., & Comuniello, V. (October de 2009). *Local Scour Downstream of Positive-Step Stilling Basins*, *Journal of Hydraulic Engineering*, 846-851.
- Pagliara, S., & Palermo, M. (2008b). *Scour Control Downstream of Block Ramps*, *Journal of Hydraulic Engineering* 134(9) 1275-1283.
- Pagliara, S., Amidei, M., & Hager, W. H. (2008c). *Hydraulics of 3D Plunge Pool Scour*, *Journal of Hydraulic Engineering* 134(9), 1275-1284.

- Pagliara, S., Hager, W. H., & Minor, H.-E. (2006). *Hydraulics of Plane Plunge pool Scour*, Journal of Hydraulic Engineering 132(5) 450-461.
- Pagliara, S., Hager, W., & Unger, J. (Novembro de 2008a). *Temporal Evolution of Plunge Pool Scour*, Journal of Hydraulic Engineering 134 (11) 1630-1638.
- Proença, M. F. (28 de Setembro de 2011). *Canais com escoamento em Superfície Livre*. Obtido de engenhariacivil.com.
- Sancho, F. (2002). *Hidráulica dos escoamentos em canais de Leito móvel-Processos Fluviais e Costeiros*.
- Sumamer, D. (2005). *Geology lecture notes*. Obtido de www.geology.ucdavis.edu.
- Toombes, L., & Chason, H. (2007). *Free-surface aeration and momentum exchange at bottom outlet*, Journal of Hydraulic Research 45(1), 100-100.
- Villermaux, E., & Pomeau, Y. (2010). *Super free fall*, Cambridge University, *J. Fluid Mech* 642, 147-157. Cambridge Universit.

ANEXOS

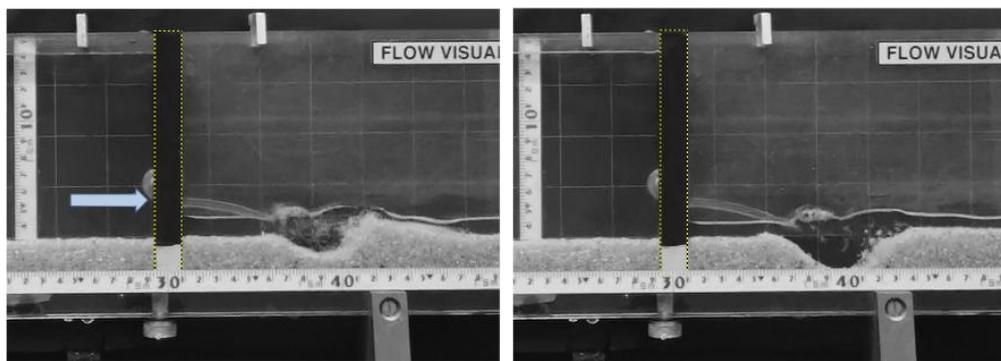
Anexo I



a)

b)

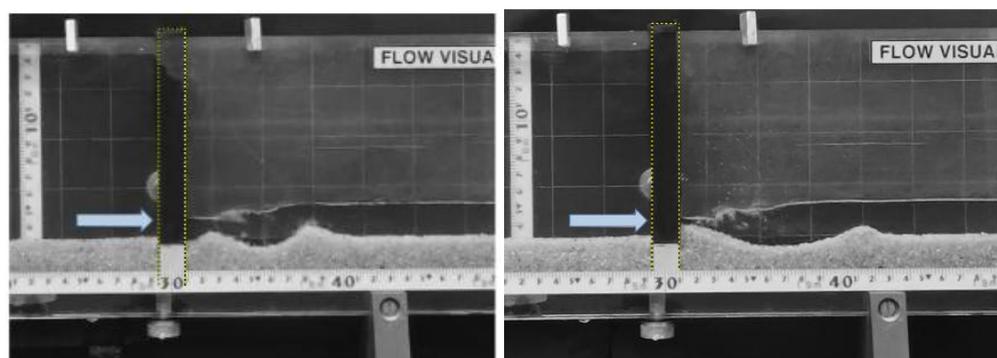
Figura AI.1 – Ensaio 1, para $t=0$ s (a) e $t= 60$ s (b)



a)

b)

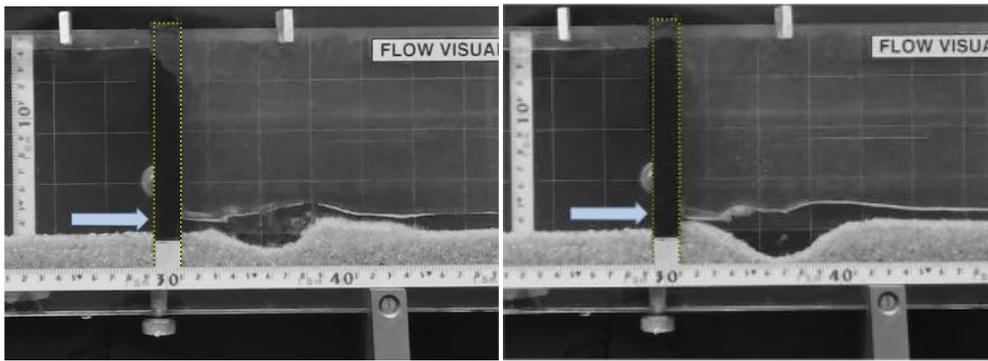
Figura AI.2 – Ensaio 2, para $t=0$ s (a) e $t= 50$ s (b)



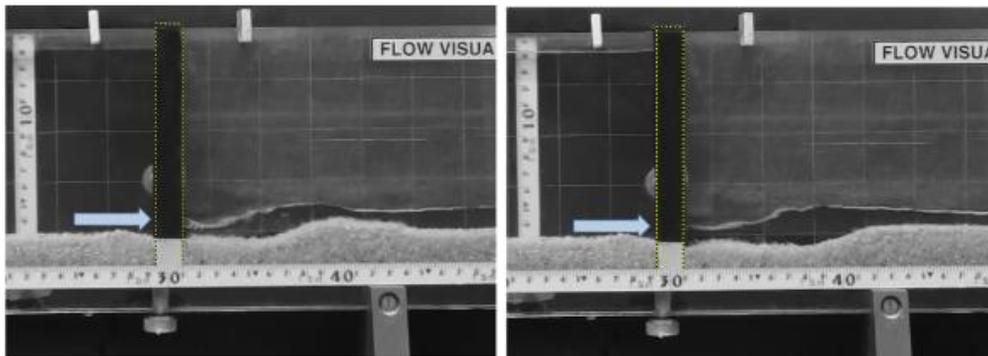
a)

b)

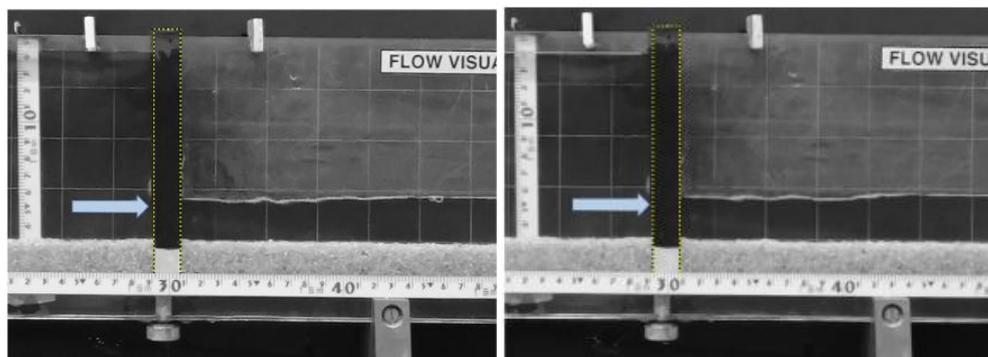
Figura AI.3 – Ensaio 3, para $t=0$ s (a) e $t= 70$ s (b)



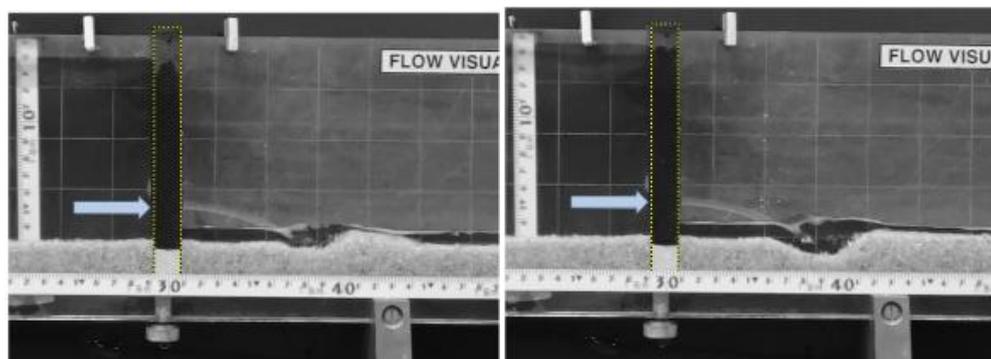
a) b)
Figura AI 4 – Ensaio 4, para $t=0$ s (a) e $t= 70$ s (b)



a) b)
Figura AI.5 – Ensaio 5, para $t=0$ s (a) e $t= 60$ s (b)

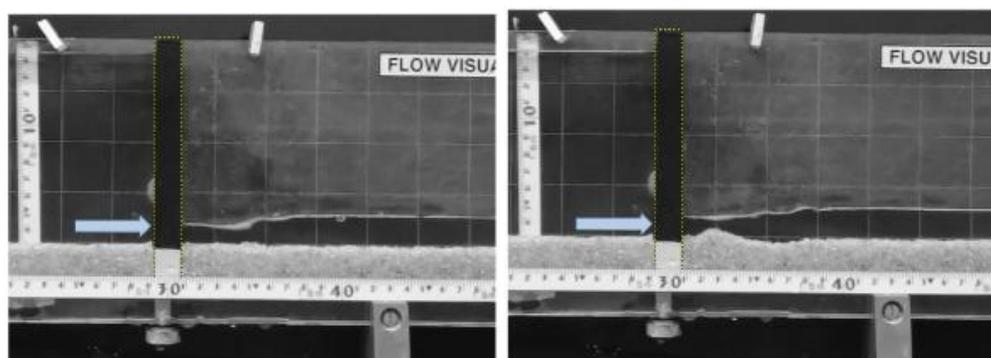


a) b)
Figura AI.6 – Ensaio 6, para $t=0$ s (a) e $t= 10$ s (b)



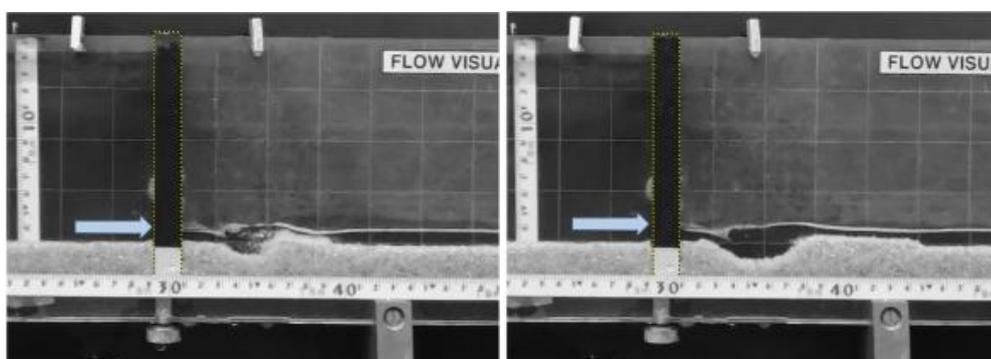
a)

b)

Figura AI.7 – Ensaio 7, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)

a)

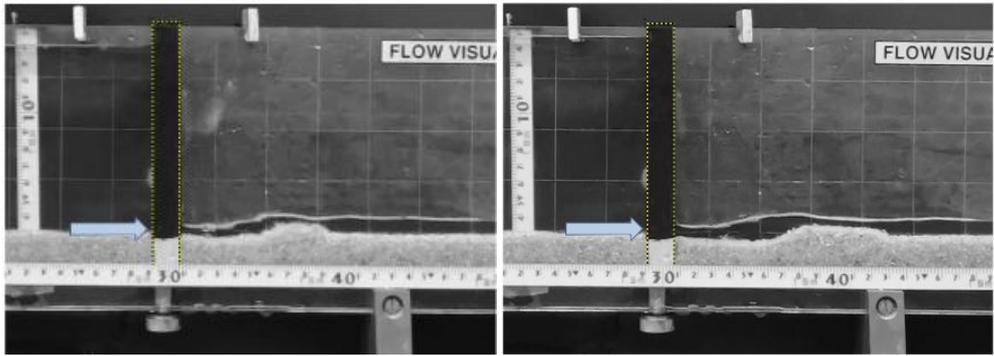
b)

Figura AI.8 – Ensaio 8, para $t=0$ s (a) e $t=60$ s (b)

a)

b)

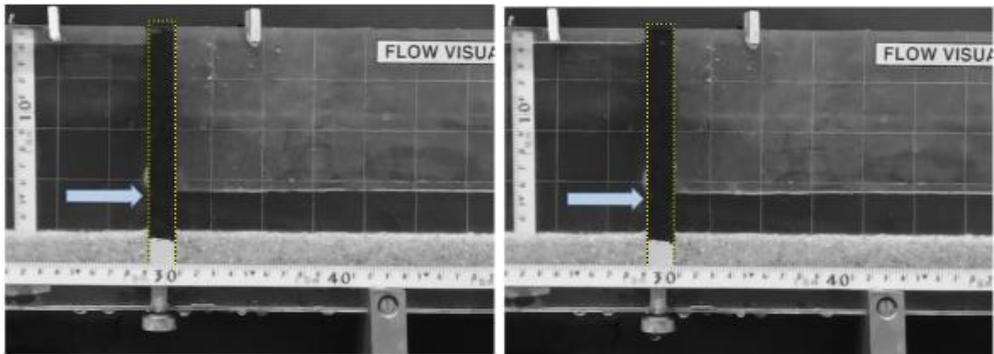
Figura AI.9 – Ensaio 9, para $t=0$ s (a) e $t=60$ s (b)



a)

b)

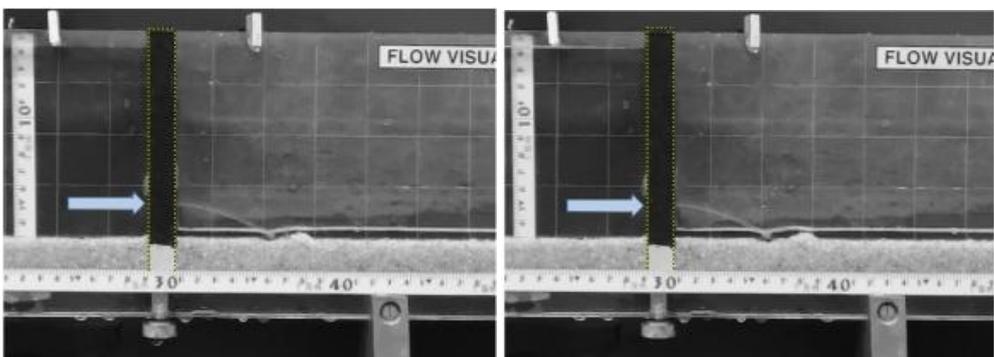
Figura AI.10 – Ensaio 10, para $t=0$ s (a) e $t= 40$ s (b)



a)

b)

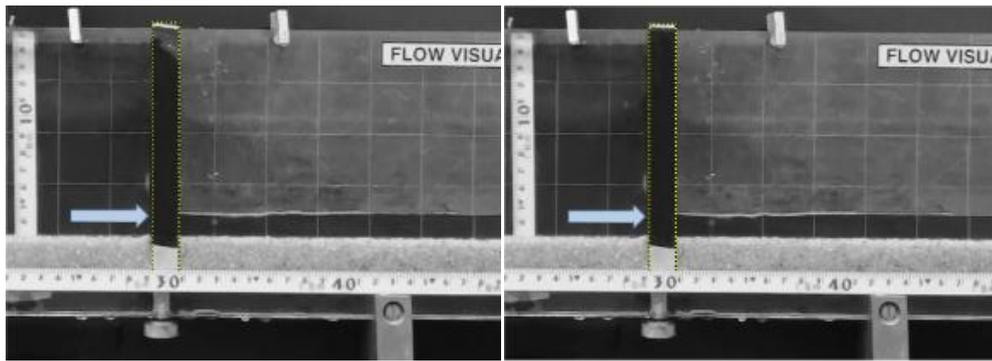
Figura AI.11 – Ensaio 11, para $t=0$ s (a) e $t= 10$ s (b)



a)

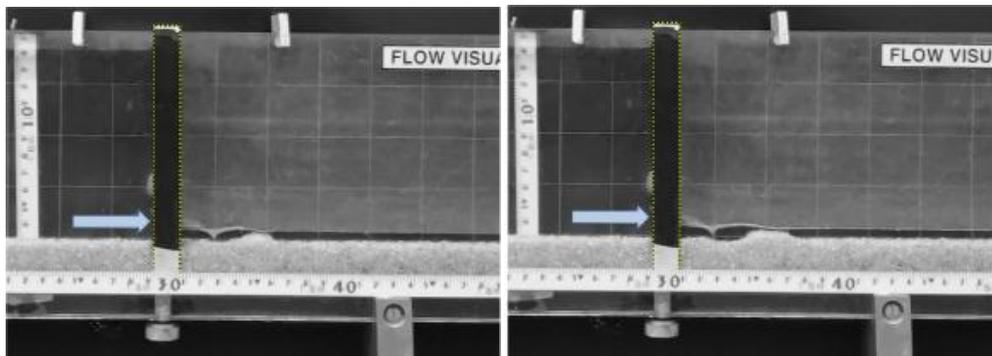
b)

Figura AI. 12 – Ensaio 5, para $t=0$ s (a) e $t= 60$ s (b)



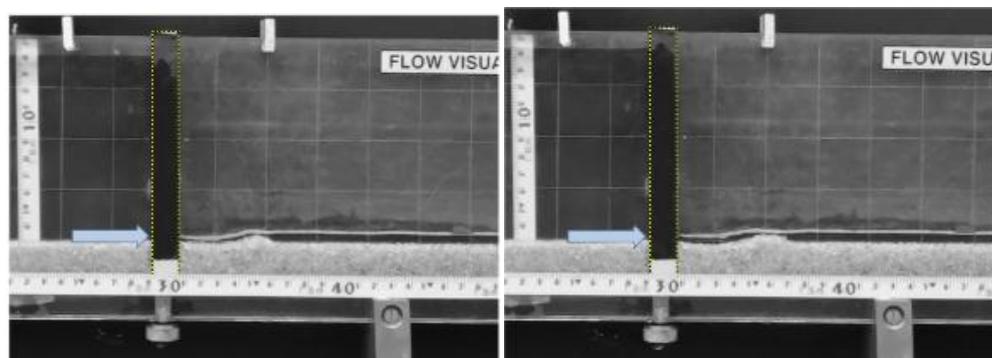
a)

b)

Figura AI.13 – Ensaio 13, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)

a)

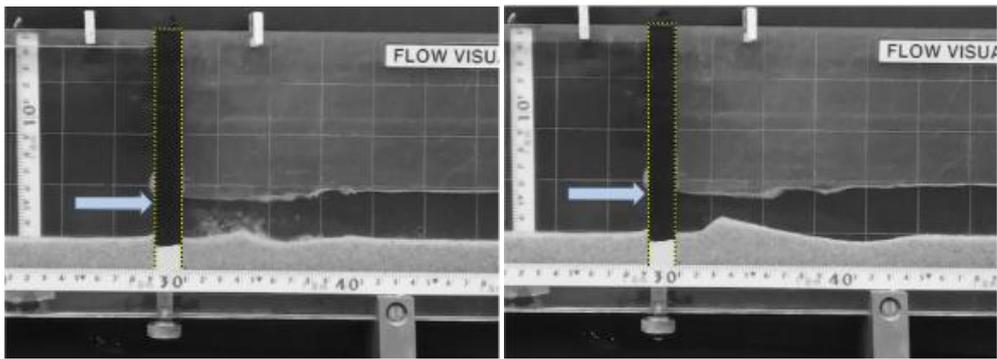
b)

Figura AI.14 – Ensaio 14, para $t=0$ s (a) e $t=20$ s (b)

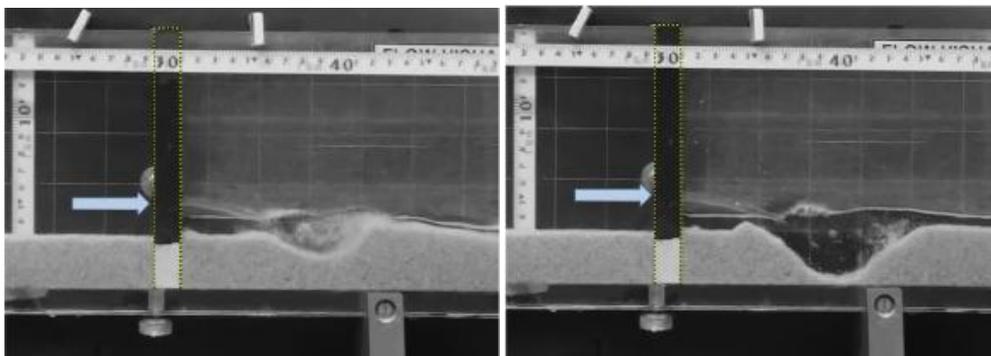
a)

b)

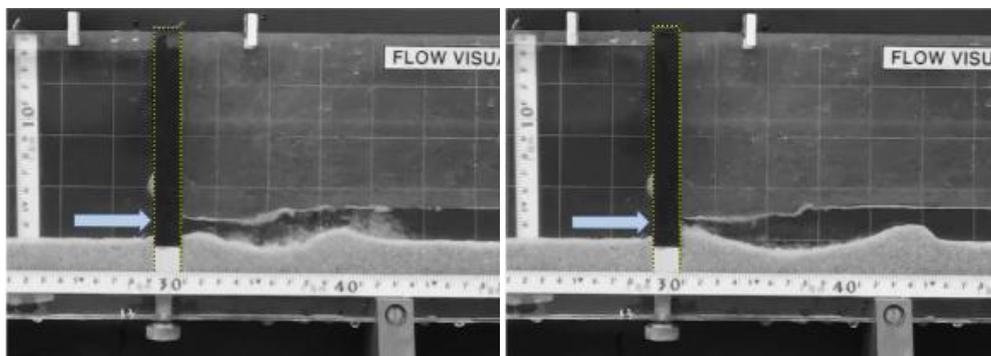
Figura AI.15 – Ensaio 15, para $t=0$ s (a) e $t=20$ s (b)



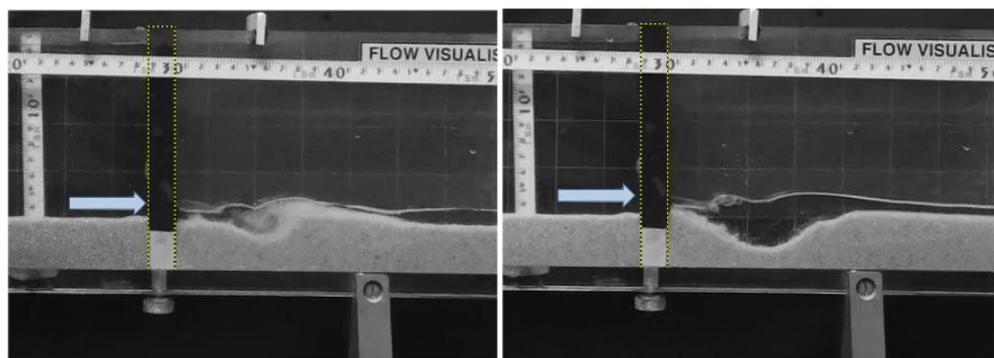
a) b)
Figura AI.16 – Ensaio 16, para $t=0$ s (a) e $t=60$ s (b)



a) b)
Figura AI.17 – Ensaio 17, para $t=0$ s (a) e $t=60$ s (b)

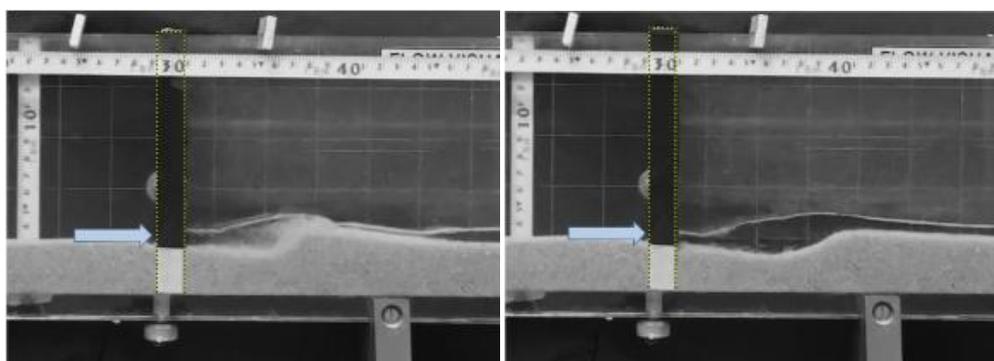


a) b)
Figura AI.18 – Ensaio 18, para $t=0$ s (a) e $t=70$ s (b)



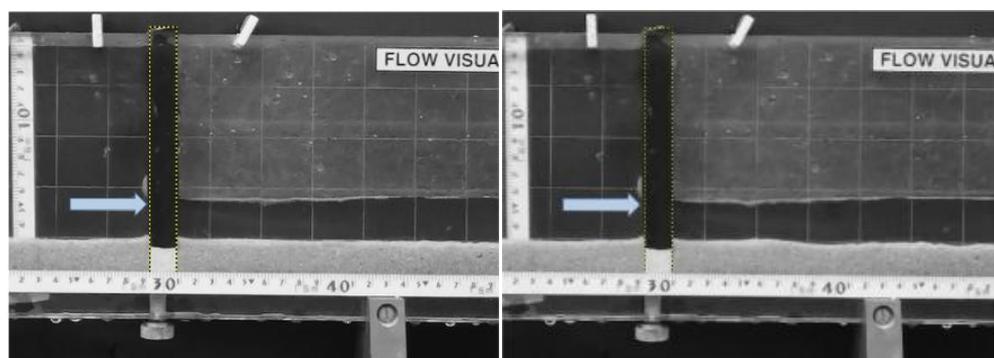
a)

b)

Figura AI.19 – Ensaio 19, para $t=0$ s (a) e $t=60$ s (b)

a)

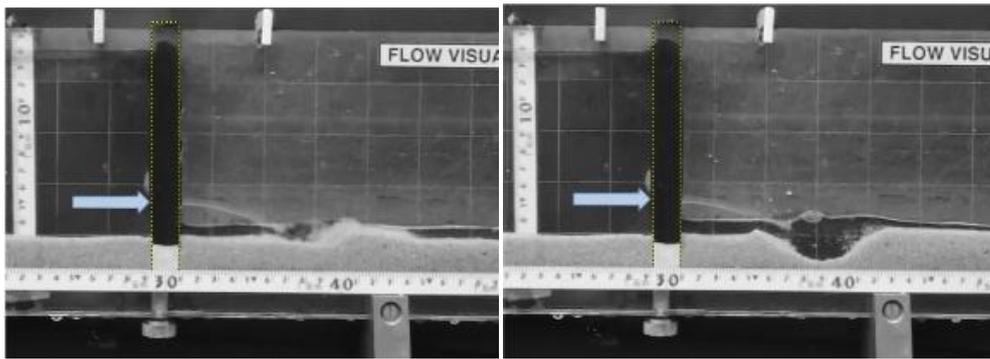
b)

Figura AI.20 – Ensaio 20, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)

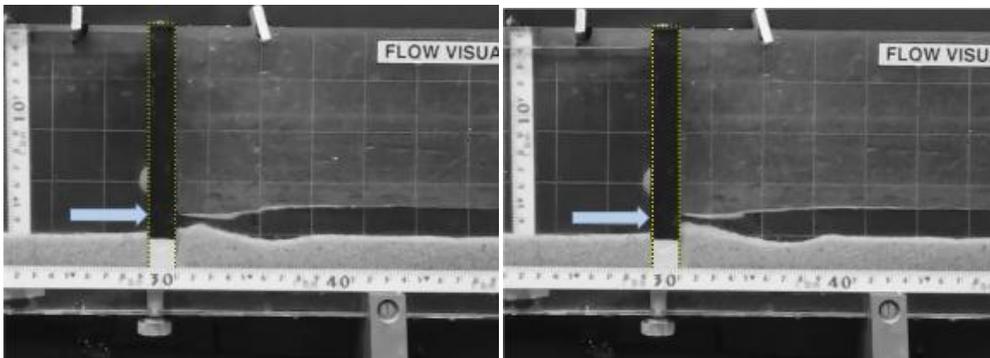
a)

b)

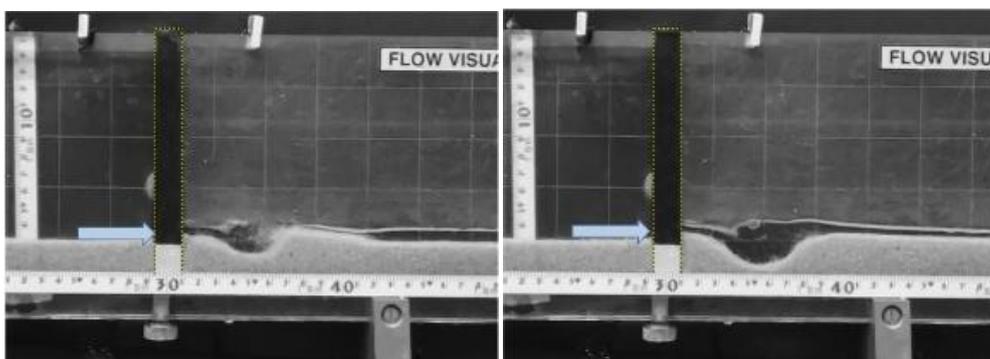
Figura AI.21 – Ensaio 21, para $t=0$ s (a) e $t=20$ s (b)



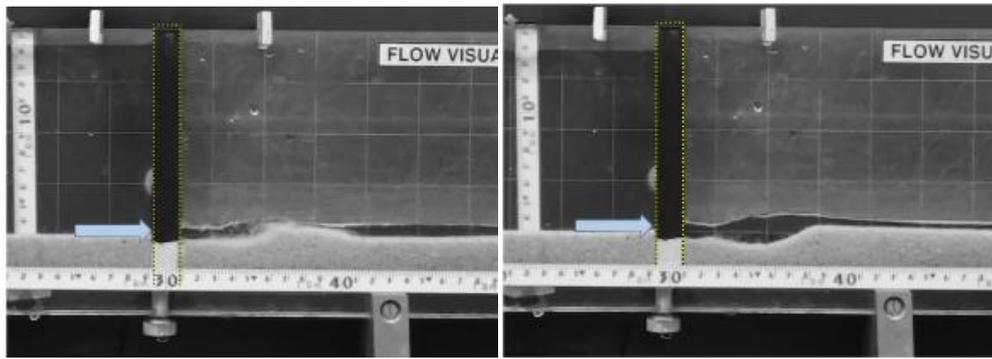
a) b)
Figura AI.22 – Ensaio 22, para $t=0$ s (a) e $t=50$ s (b)



a) b)
Figura AI.23 – Ensaio 23, para $t=0$ s (a) e $t=20$ s (b)

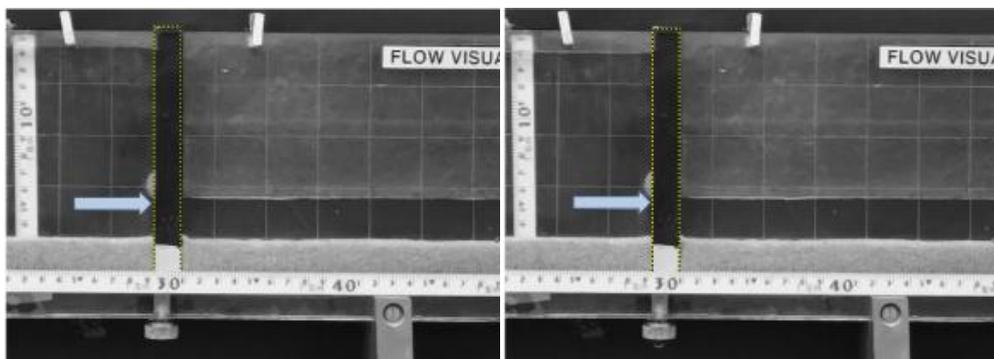


a) b)
Figura AI.24 – Ensaio 24, para $t=0$ s (a) e $t=50$ s (b)



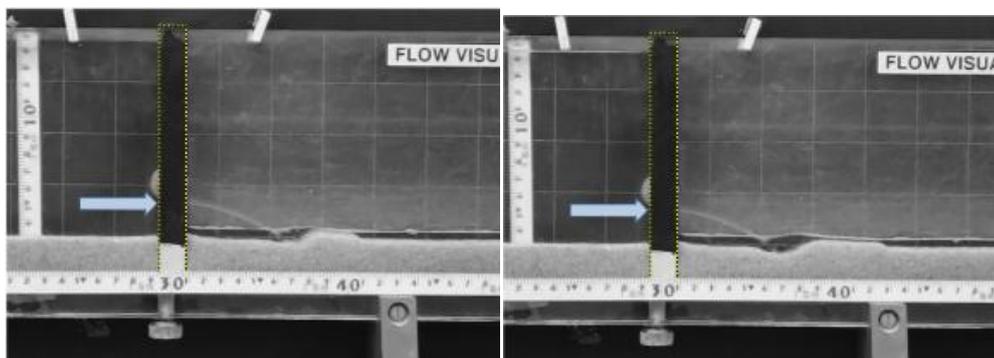
a)

b)

Figura AI.25 – Ensaio 25, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)

a)

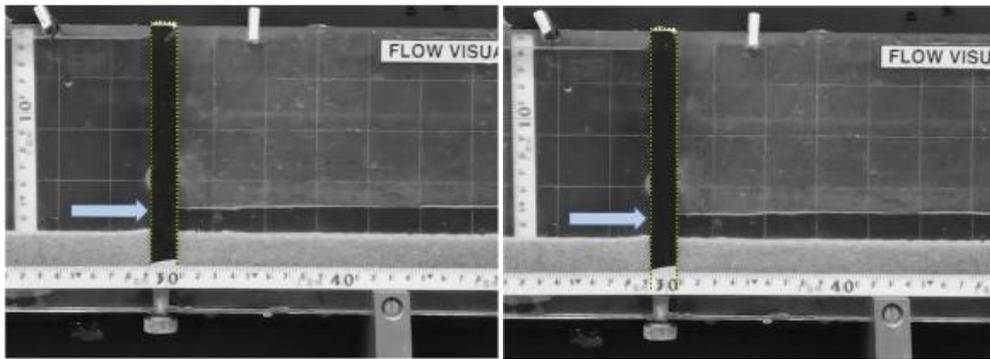
b)

Figura AI.26 – Ensaio 26, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)

a)

b)

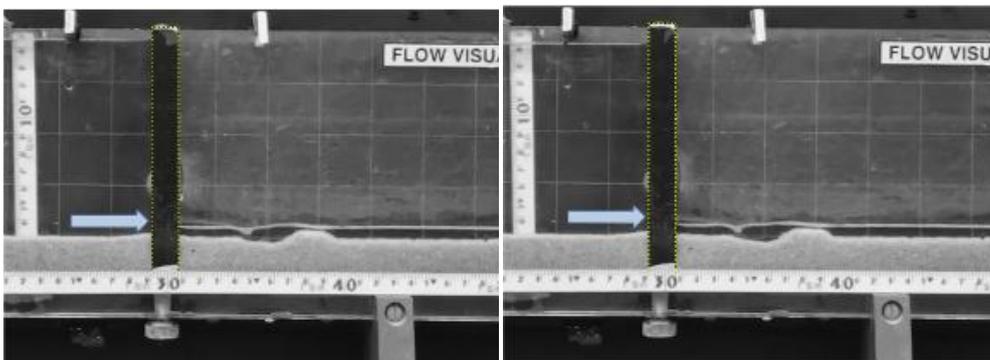
Figura AI.27 – Ensaio 27, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



a)

b)

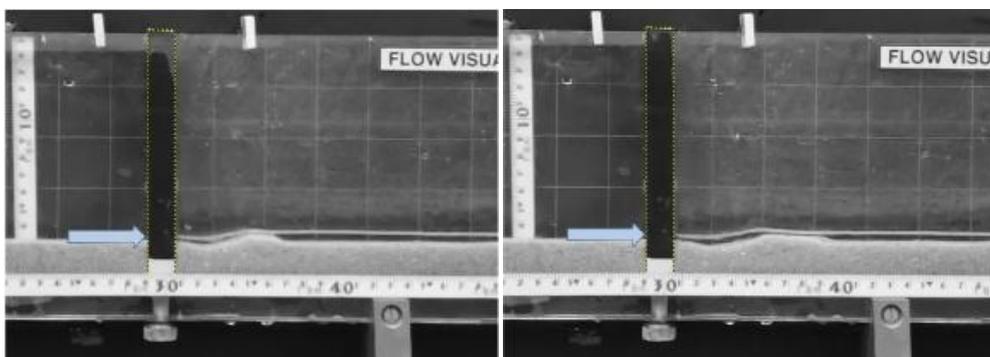
Figura AI.28 – Ensaio 28, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)



a)

b)

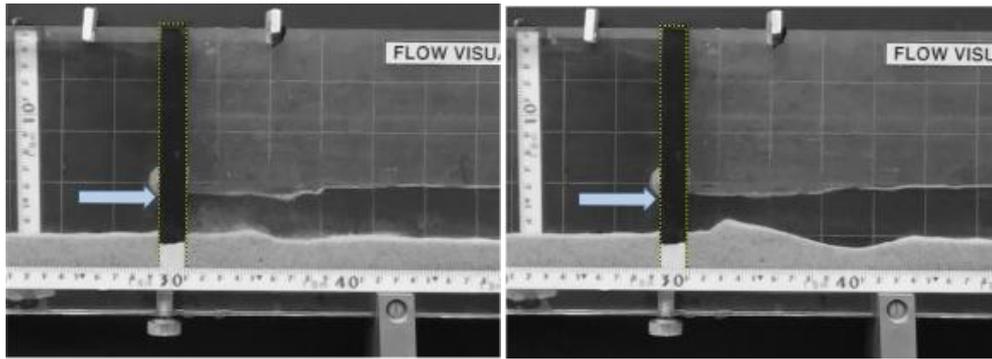
Figura AI.29 – Ensaio 29, para $t=0$ s (a) e $t=20$ s (b)



a)

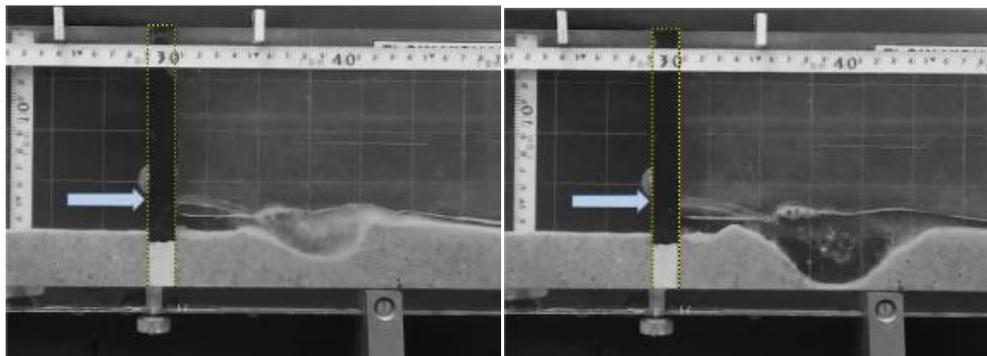
b)

Figura AI.30 – Ensaio 30, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



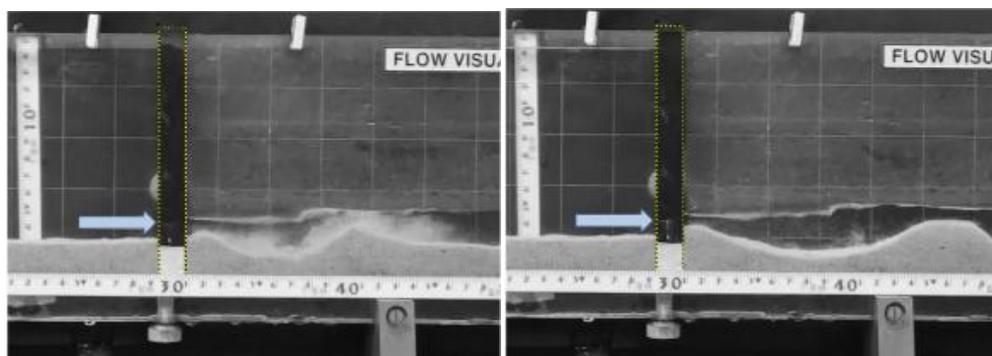
a)

b)

Figura AI.31 – Ensaio 31, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)

a)

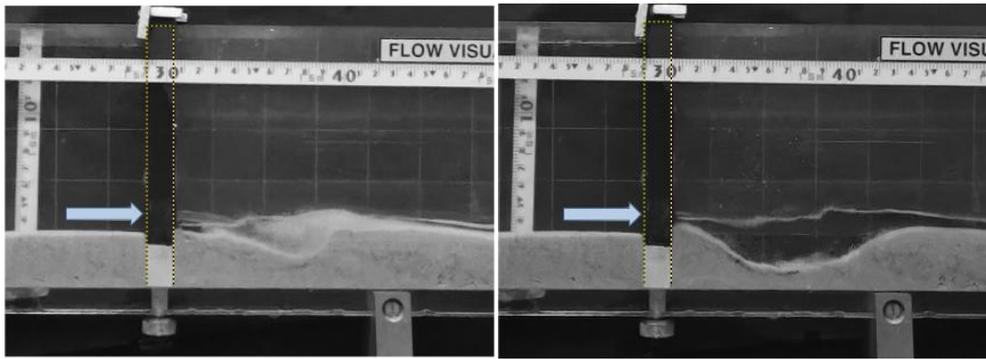
b)

Figura AI.32 – Ensaio 32, para $t=0$ s (a) e $t=70$ s (b)

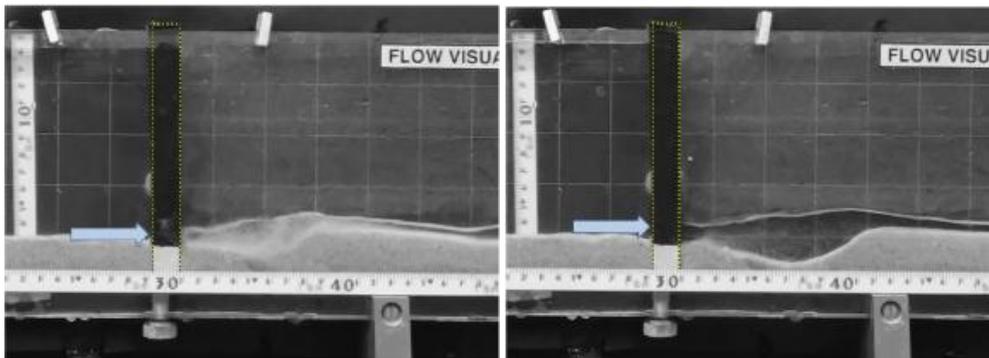
a)

b)

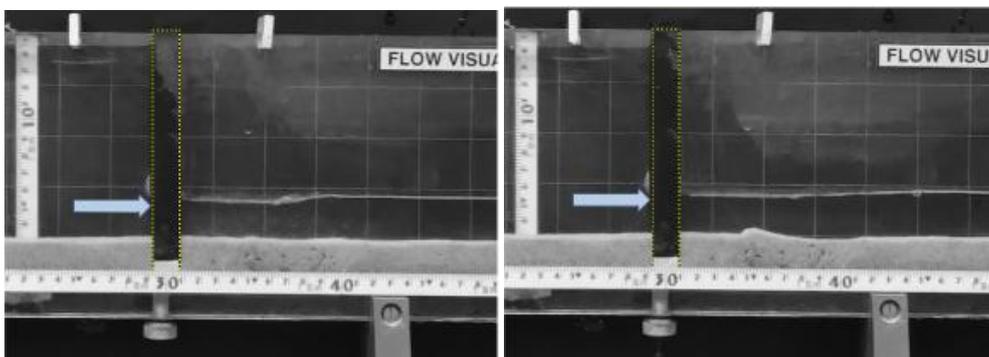
Figura AI.33 – Ensaio 33, para $t=0$ s (a) e $t=60$ s (b)



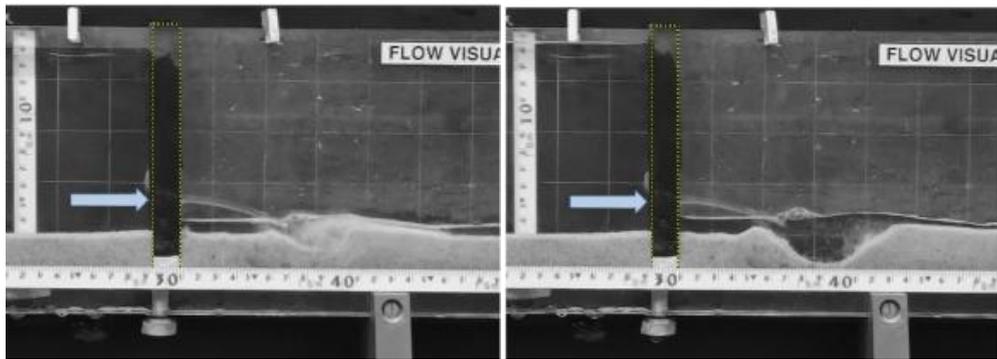
a) b)
Figura AI.34 – Ensaio 34, para $t=0$ s (a) e $t=70$ s (b)



a) b)
Figura AI.35 – Ensaio 35, para $t=0$ s (a) e $t=50$ s (b)

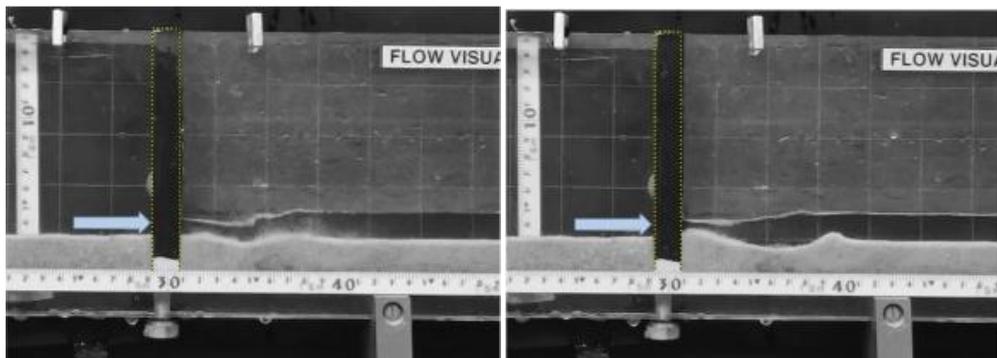


a) b)
Figura AI.36 – Ensaio 36, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



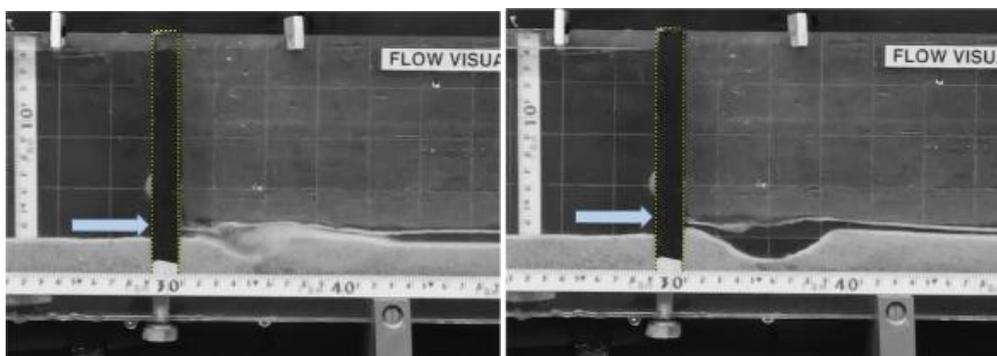
a)

b)

Figura AI.37 – Ensaio 37, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)

a)

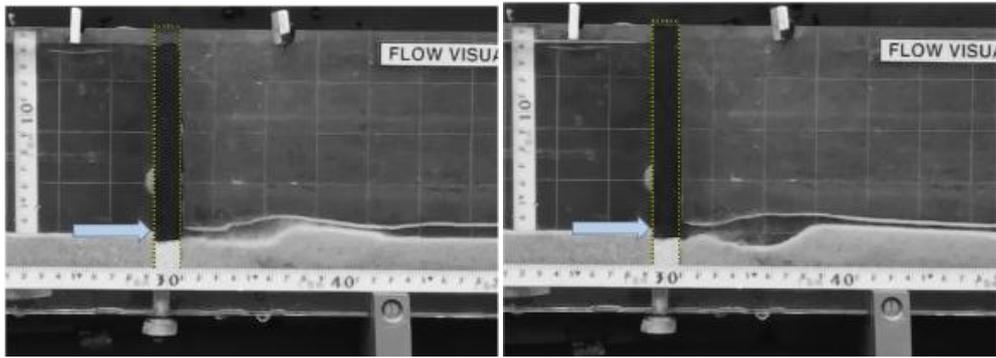
b)

Figura AI.38 – Ensaio 38, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)

a)

b)

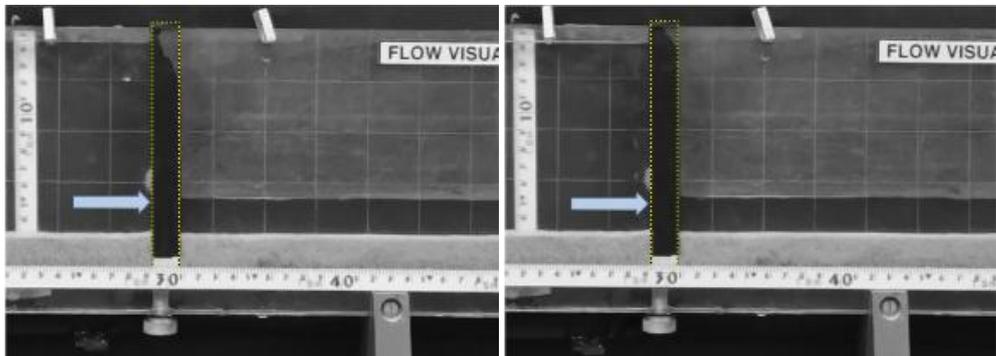
Figura AI.39 – Ensaio 39, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)



a)

b)

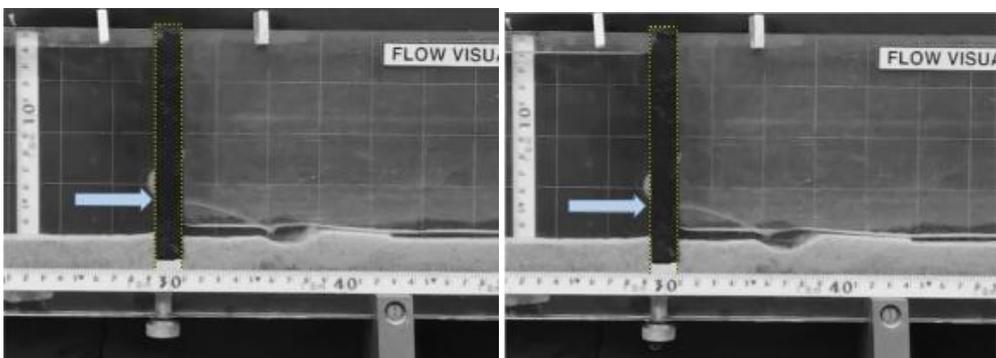
Figura AI.40 – Ensaio 40, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)



a)

b)

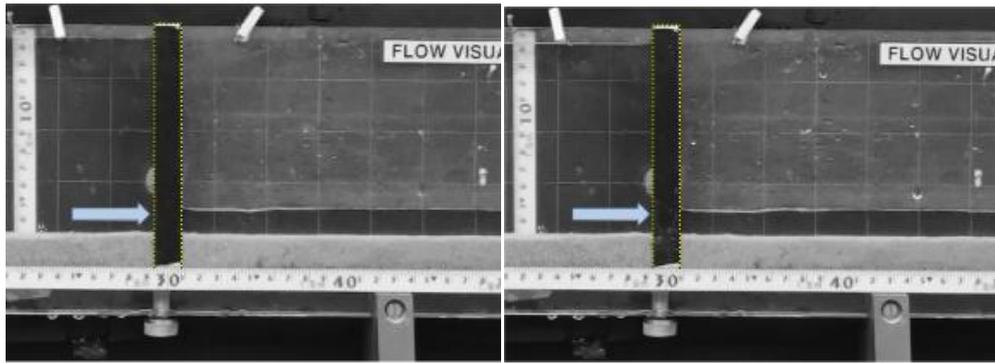
Figura AI.41 – Ensaio 41, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)



a)

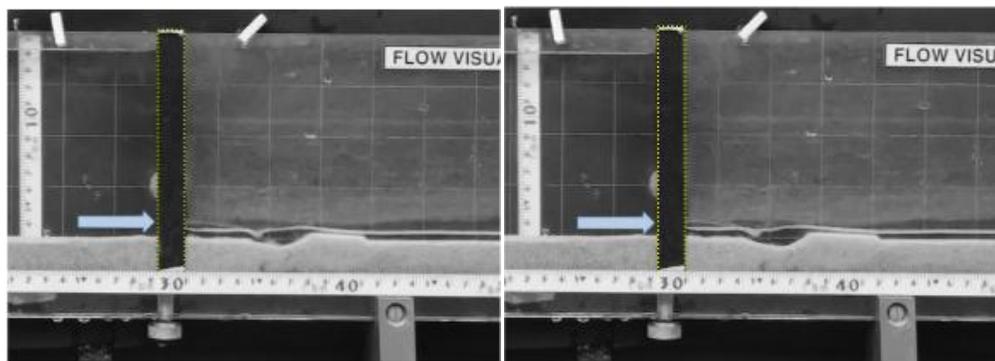
b)

Figura AI.42 – Ensaio 42, para $t=0$ s (a) e $t=20$ s (b)



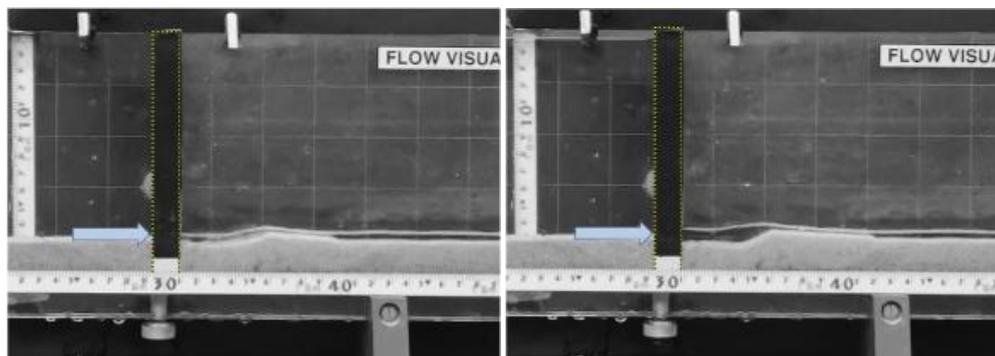
a)

b)

Figura AI.43 – Ensaio 43, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)

a)

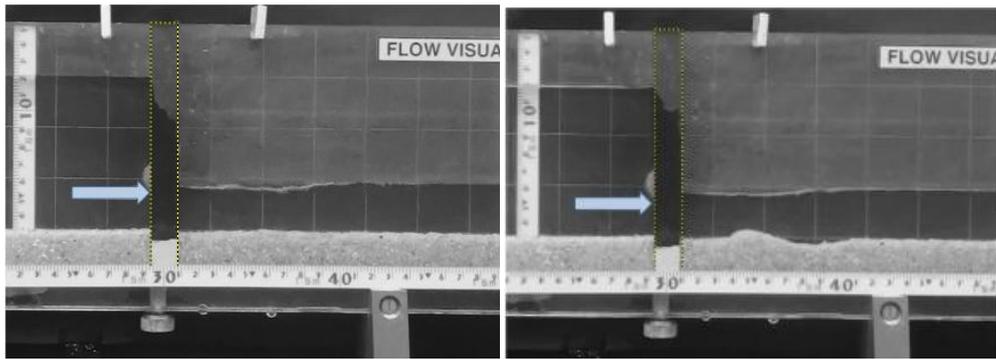
b)

Figura AI.44 – Ensaio 44, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)

a)

b)

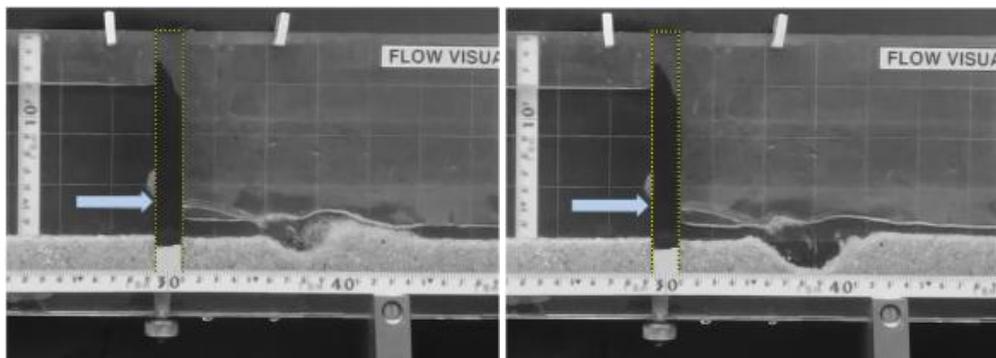
Figura AI.45 – Ensaio 45, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)



a)

b)

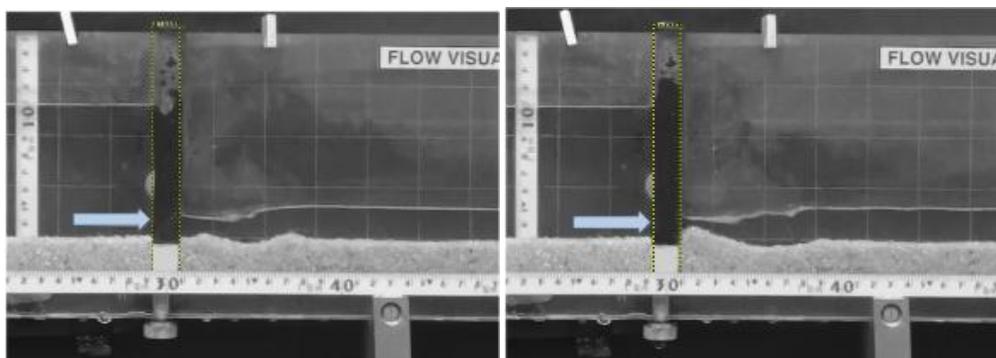
Figura AI.46 – Ensaio 46, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)



a)

b)

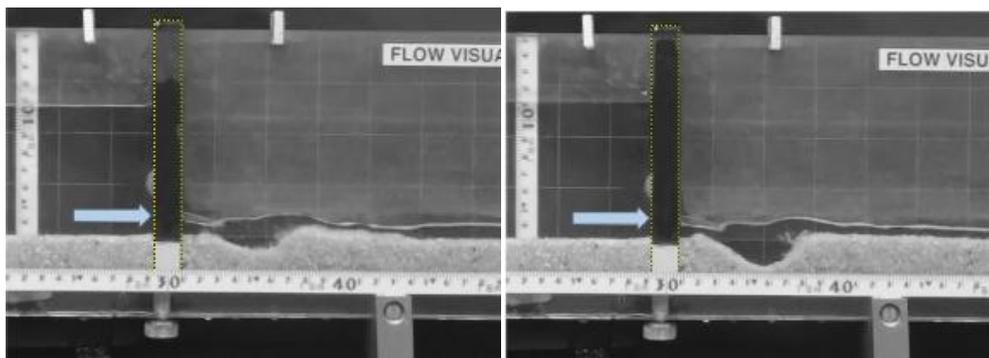
Figura AI.47 – Ensaio 47, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



a)

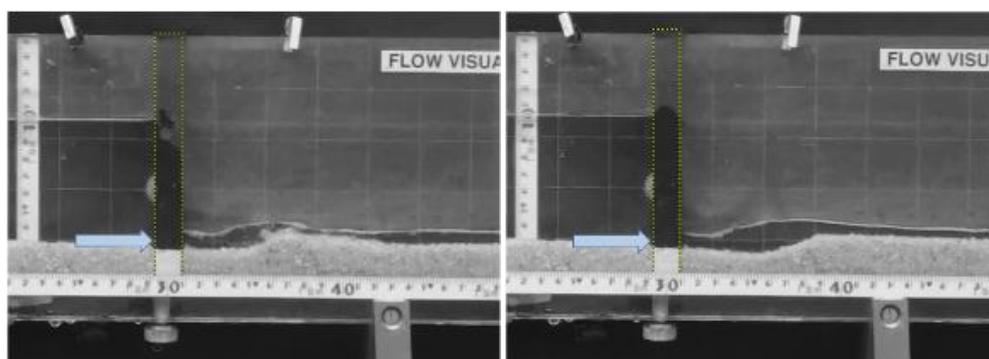
b)

Figura AI.48 – Ensaio 48, para $t=0$ s (a) e $t=50$ s (b)



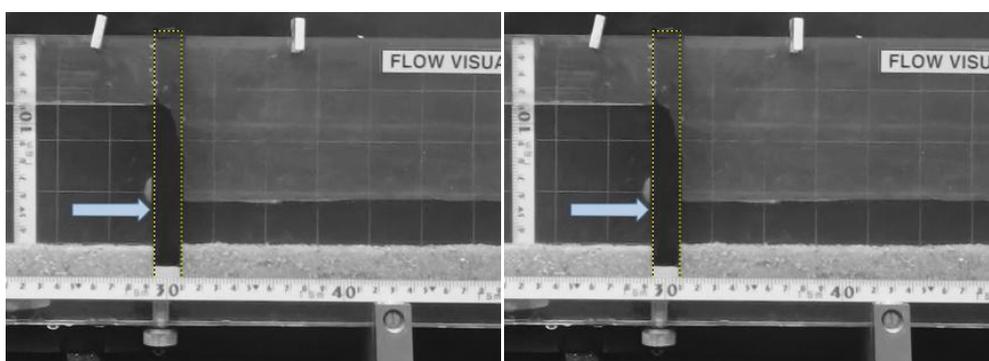
a)

b)

Figura AI.49 – Ensaio 49, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)

a)

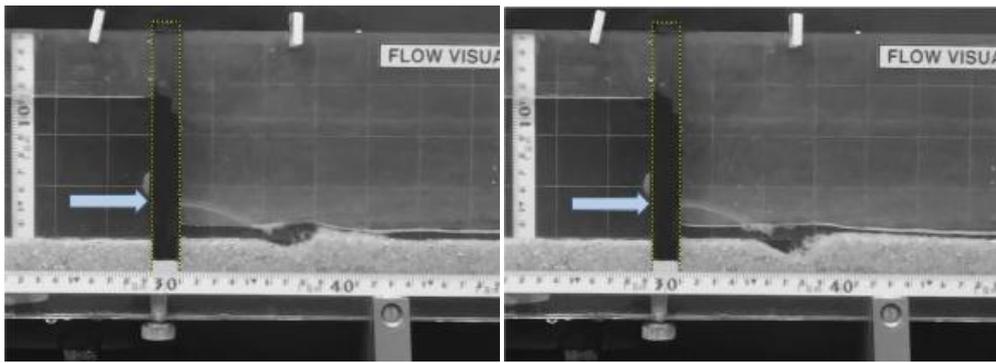
b)

Figura AI.50 – Ensaio 50, para $t=0$ s (a) e $t=50$ s (b)

a)

b)

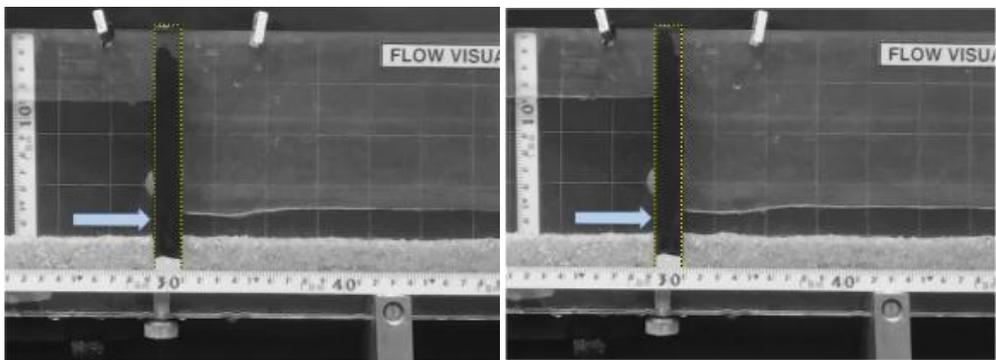
Figura AI.51 – Ensaio 51, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)



a)

b)

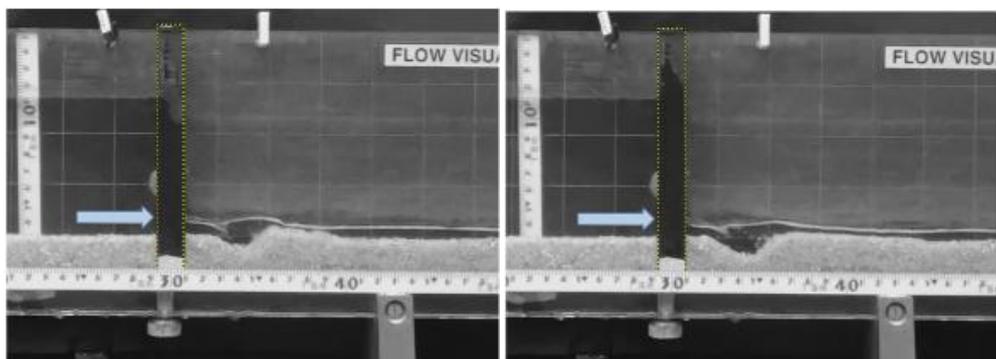
Figura AI.52 – Ensaio 52, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



a)

b)

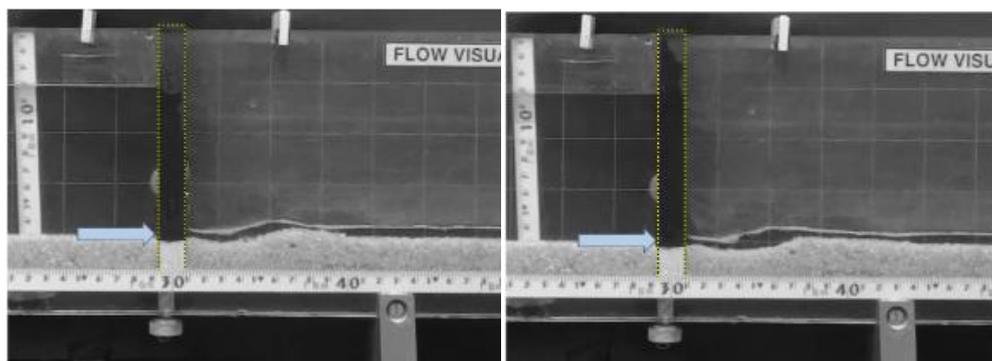
Figura AI.53 – Ensaio 53, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)



a)

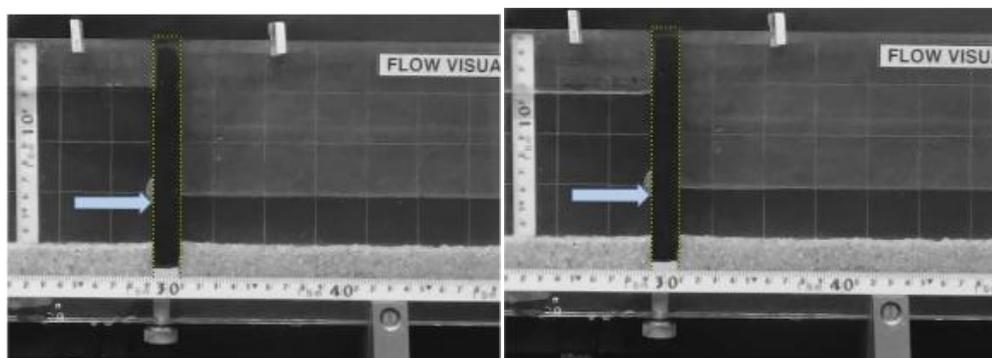
b)

Figura AI.54 – Ensaio 54, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



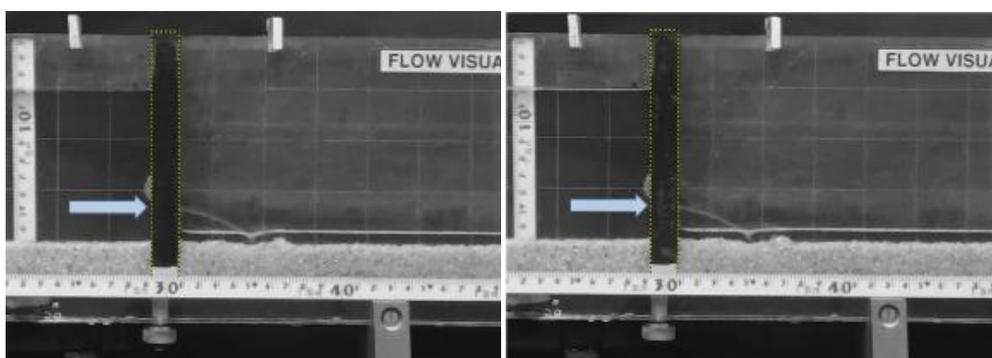
a)

b)

Figura AI.55 – Ensaio 55, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)

a)

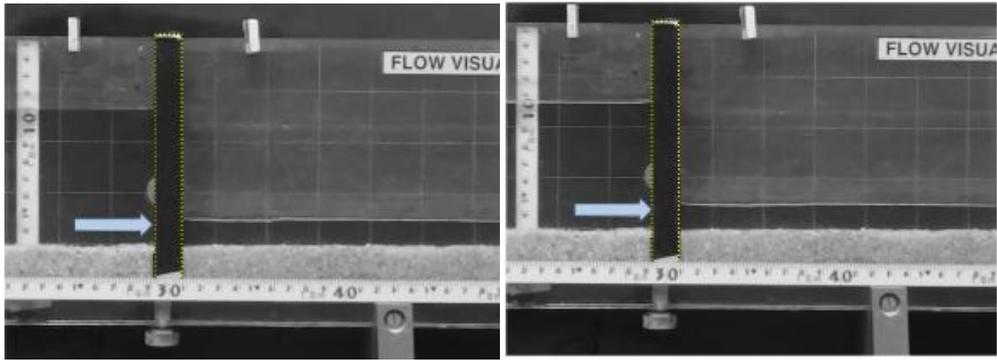
b)

Figura AI.56 – Ensaio 56, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)

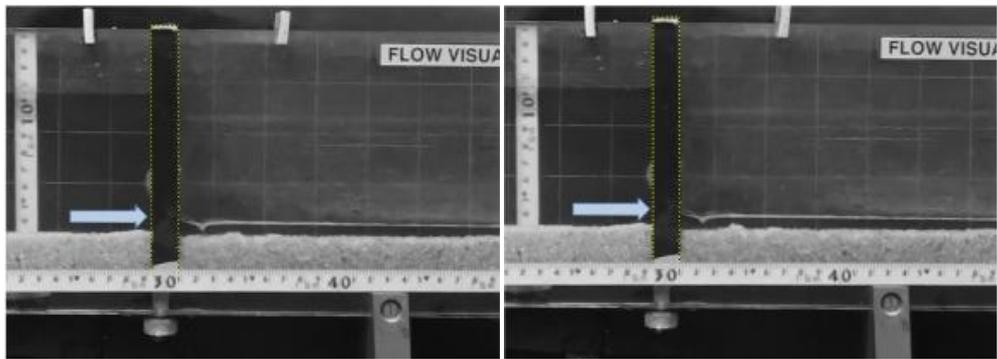
a)

b)

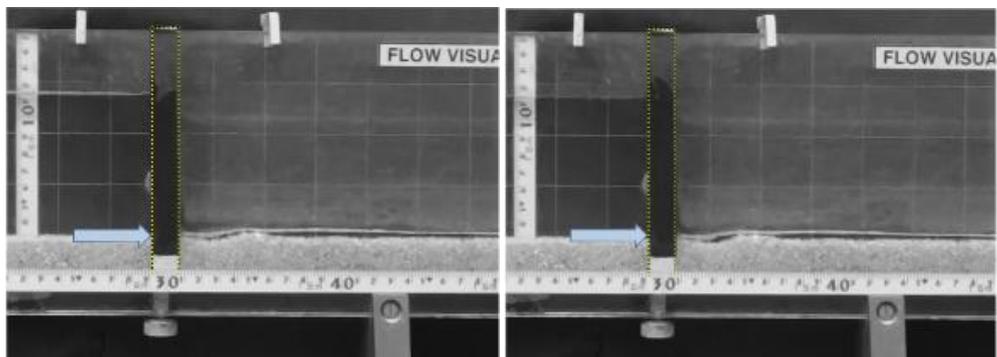
Figura AI.57 – Ensaio 57, para $t=0$ s (a) e $t=20$ s (b)



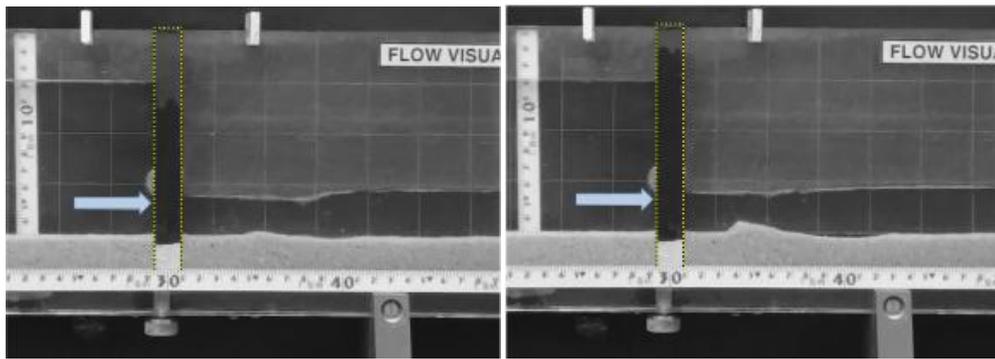
a) b)
Figura AI.58 – Ensaio 58, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)



a) b)
Figura AI.59 – Ensaio 59, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)

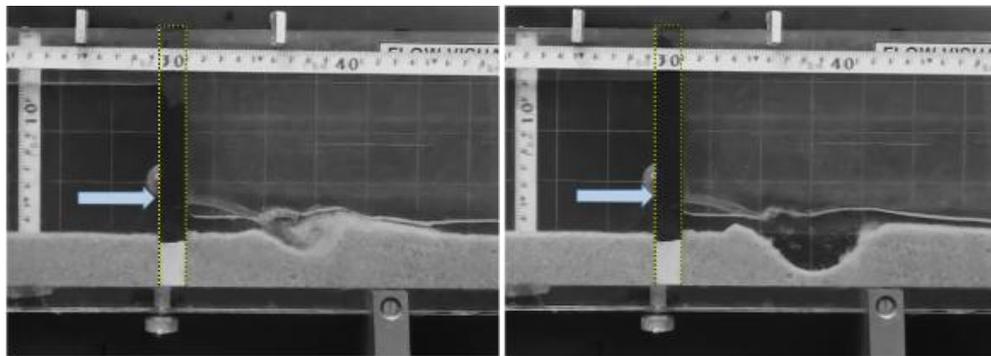


a) b)
Figura AI.60 – Ensaio 60, para $t=0$ s (a) e $t=20$ s (b)



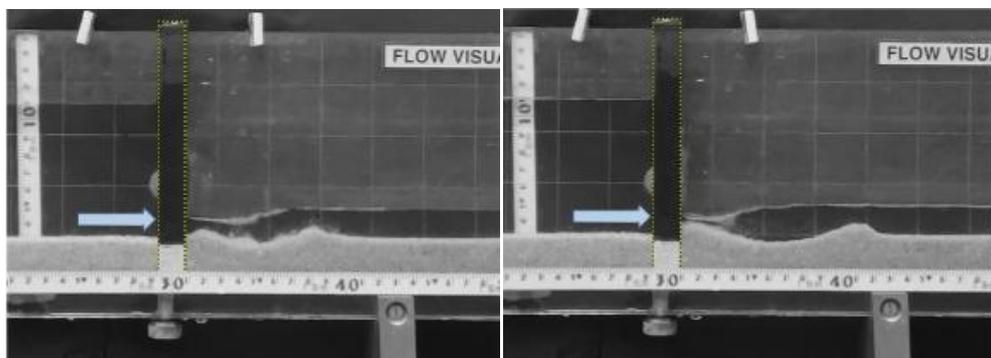
a)

b)

Figura AI.61 – Ensaio 61, para $t=0$ s (a) e $t=50$ s (b)

a)

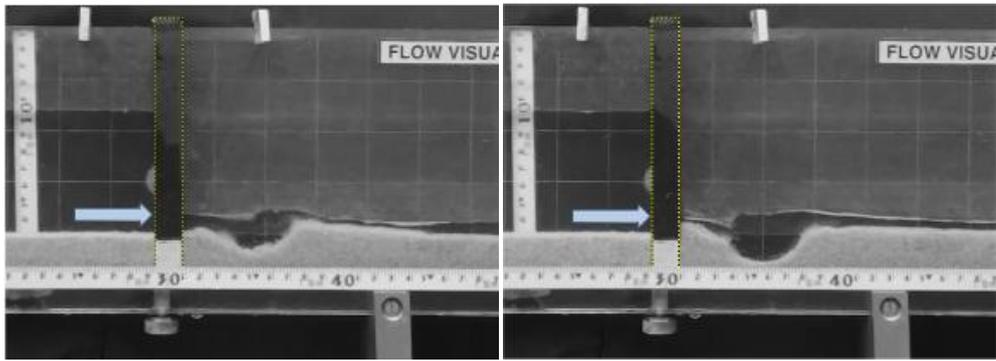
b)

Figura AI. 62 – Ensaio 62, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)

a)

b)

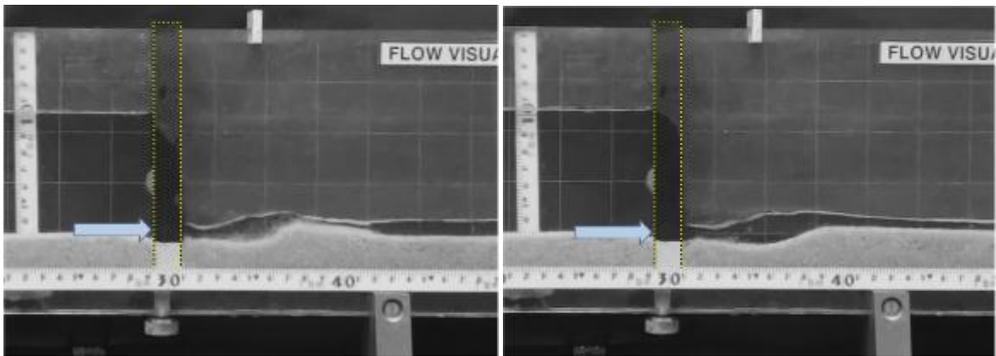
Figura AI.63 – Ensaio 63, para $t=0$ s (a) e $t=50$ s (b)



a)

b)

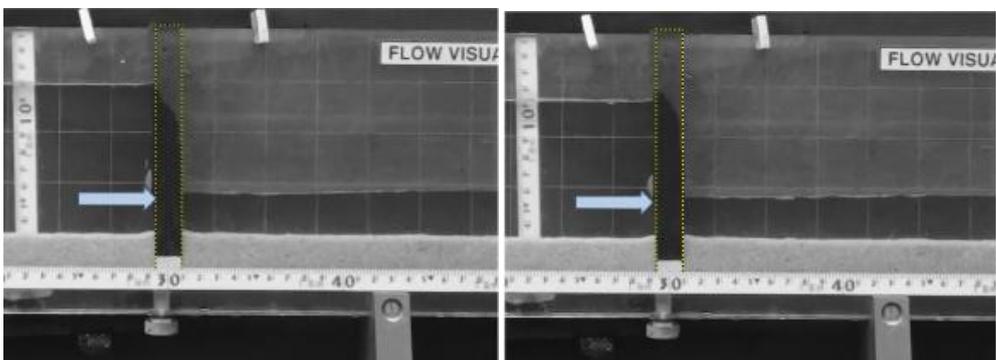
Figura AI.64 – Ensaio 64, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)



a)

b)

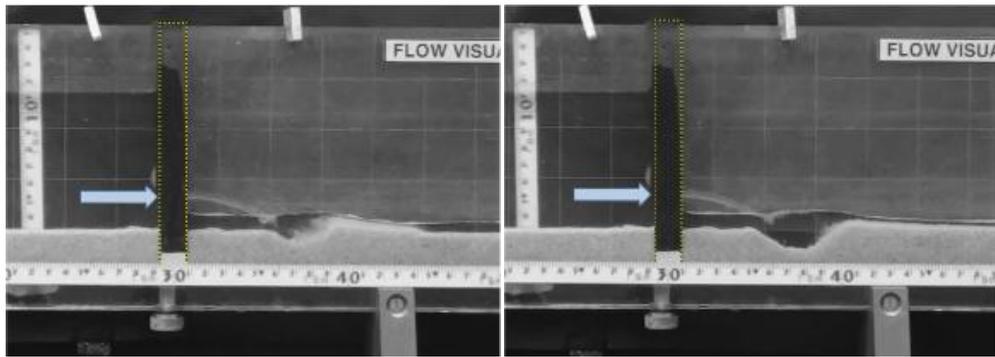
Figura AI.65 – Ensaio 65, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



a)

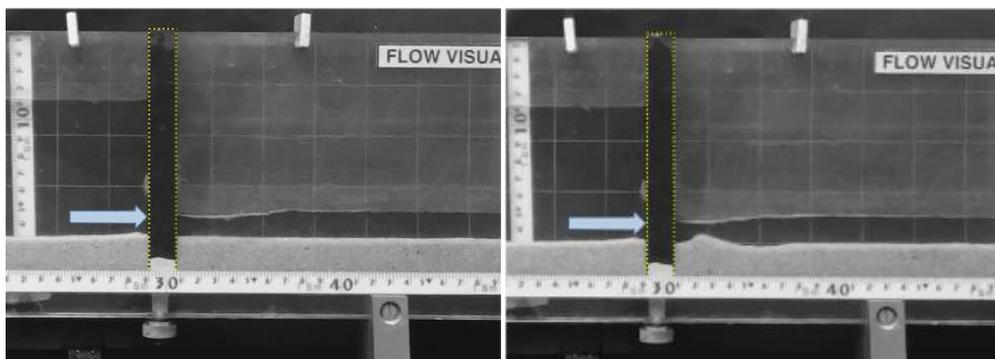
b)

Figura AI.66 – Ensaio 66, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)



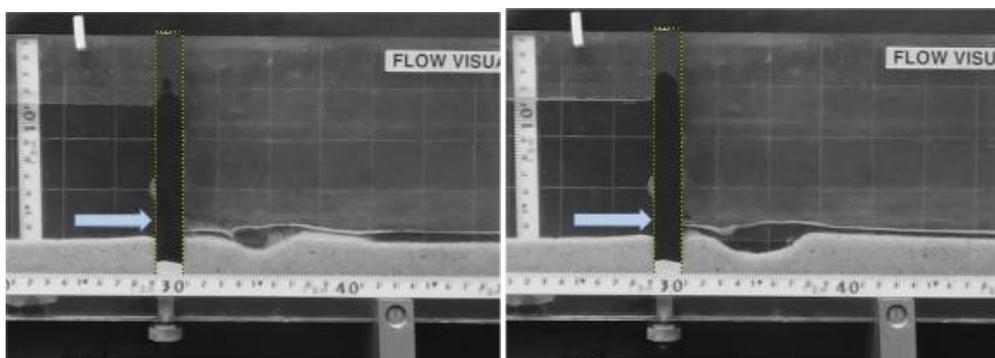
a)

b)

Figura AI.67 – Ensaio 67, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)

a)

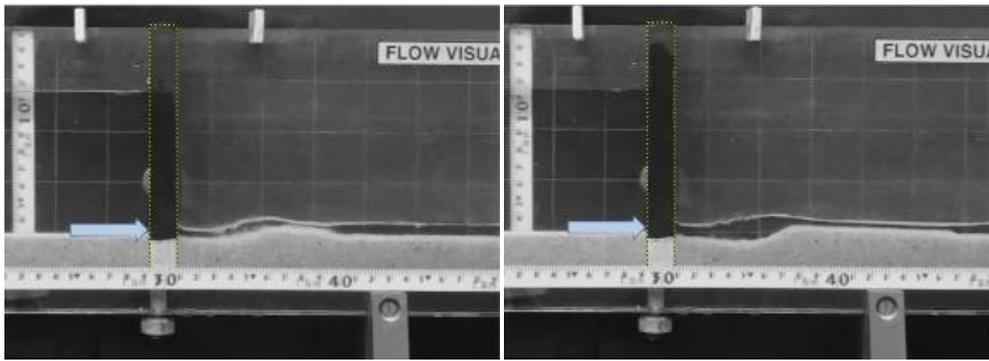
b)

Figura AI.68 – Ensaio 68, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)

a)

b)

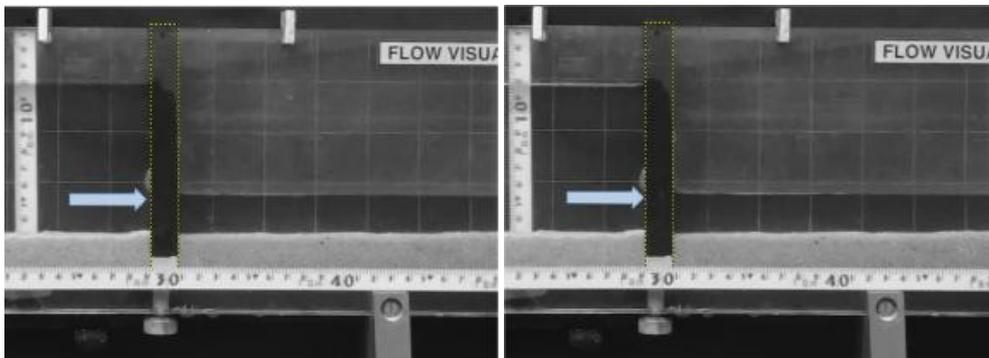
Figura AI.69 – Ensaio 69, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



a)

b)

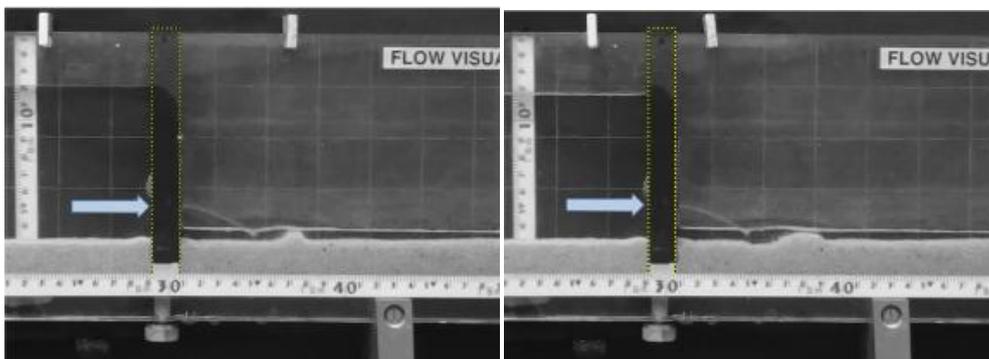
Figura AI.70 – Ensaio 70, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)



a)

b)

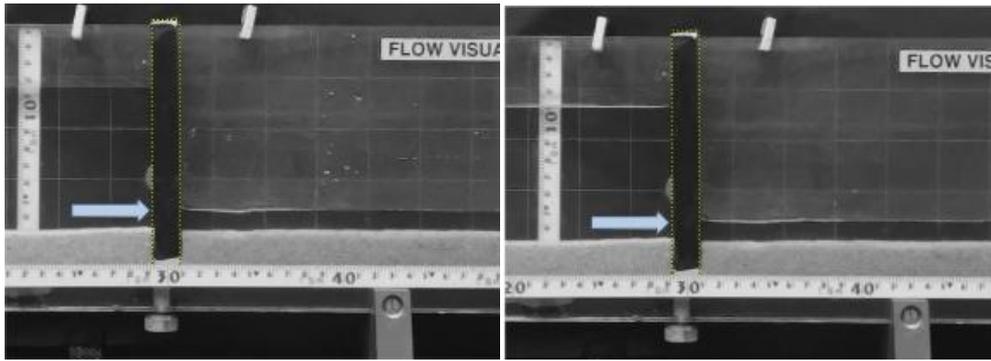
Figura AI.71 – Ensaio 71, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)



a)

b)

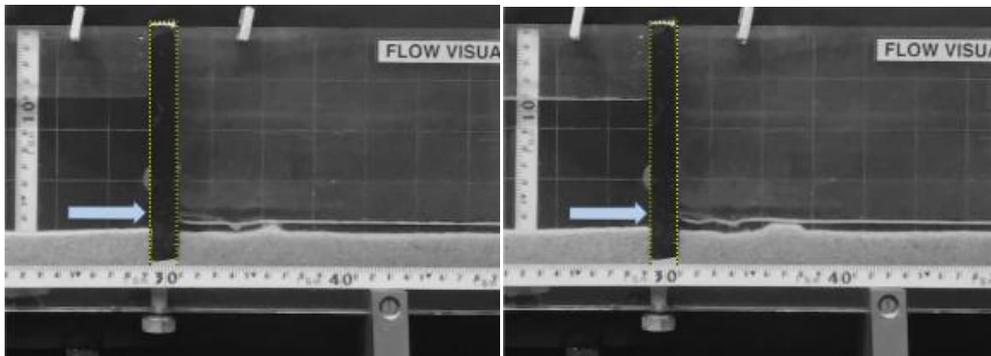
Figura AI.72 – Ensaio 72, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



a)

b)

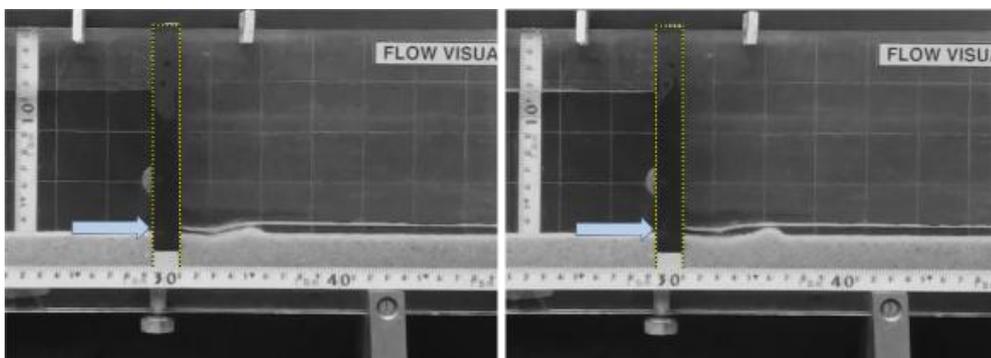
Figura AI.73 – Ensaio 73, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)



a)

b)

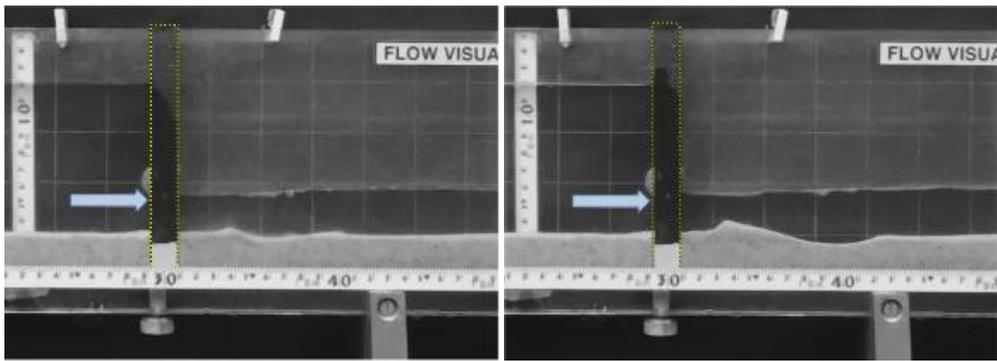
Figura AI.74 – Ensaio 74, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



a)

b)

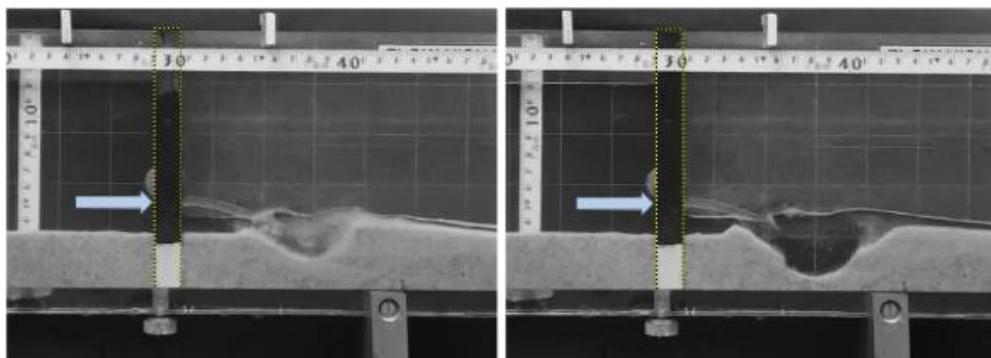
Figura AI.75 – Ensaio 75, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



a)

b)

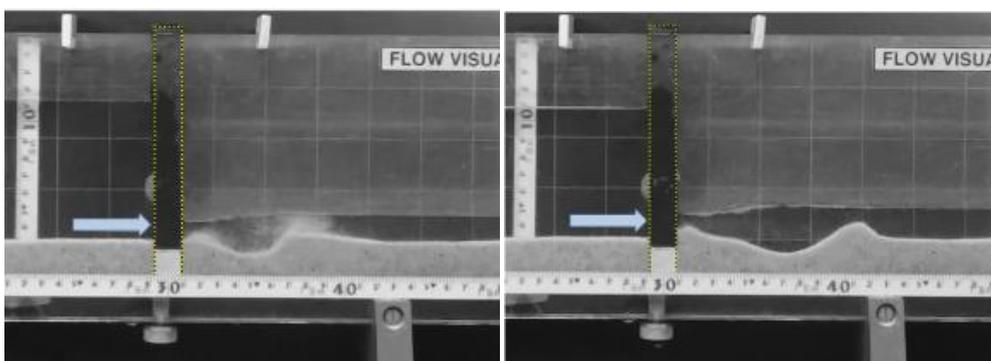
Figura AI.76 – Ensaio 76, para $t=0$ s (a) e $t=50$ s (b)



a)

b)

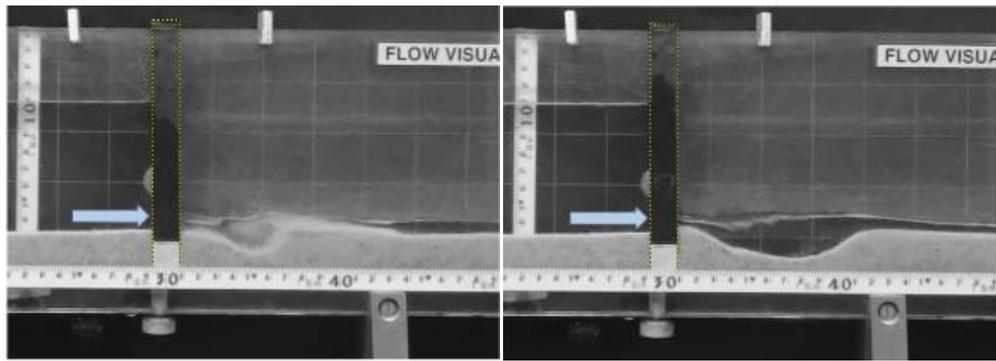
Figura AI.77 – Ensaio 77, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)



a)

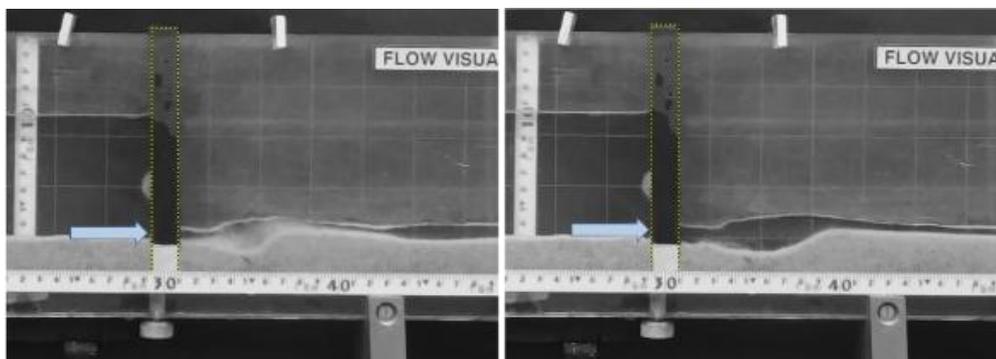
b)

Figura AI.78 – Ensaio 78, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)



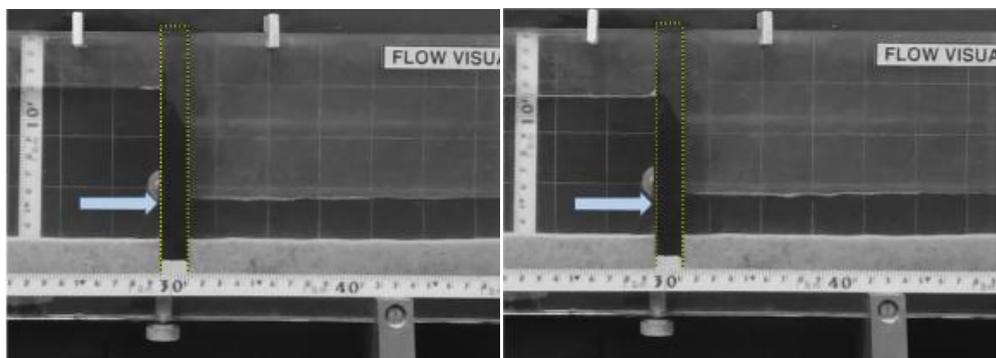
a)

b)

Figura AI.79 – Ensaio 79, para $t=0$ s (a) e $t=60$ s (b)

a)

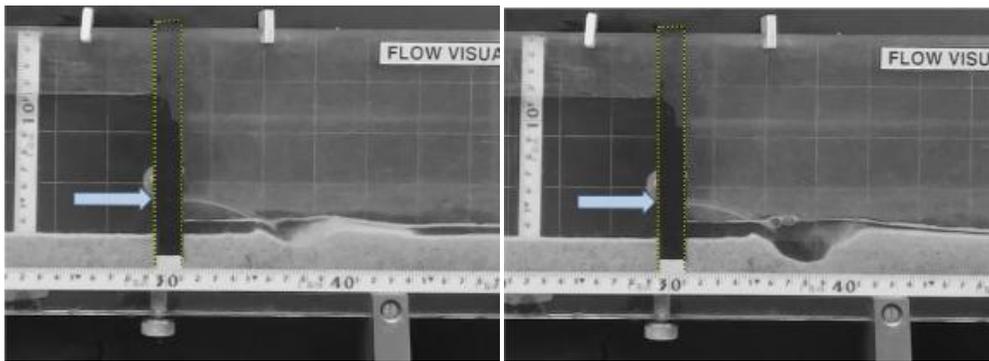
b)

Figura AI.80 – Ensaio 80, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)

a)

b)

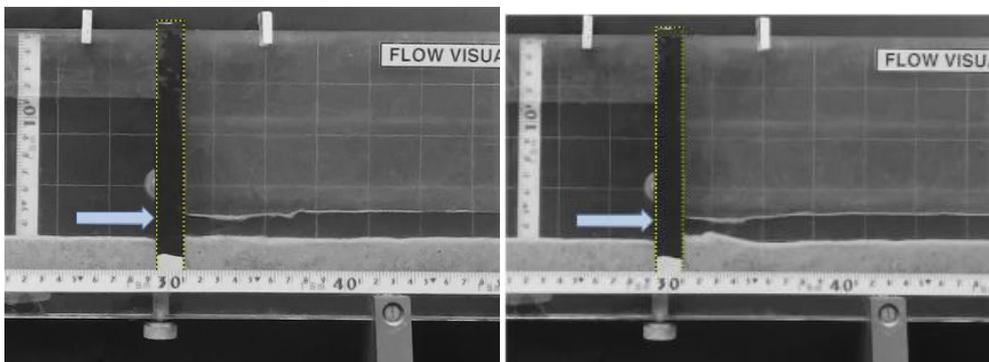
Figura AI.81 – Ensaio 81, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)



a)

b)

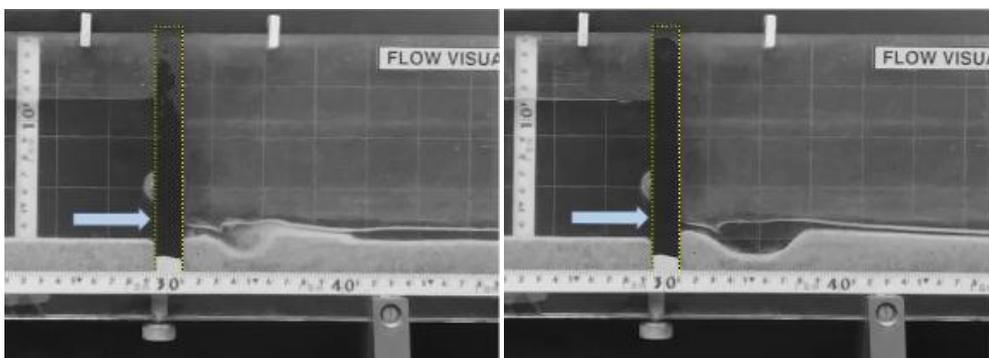
Figura AI.82 – Ensaio 82, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



a)

b)

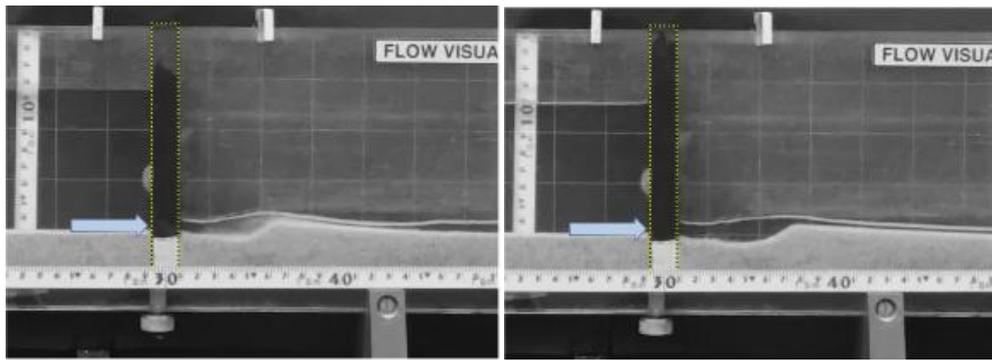
Figura AI.83 – Ensaio 83, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



a)

b)

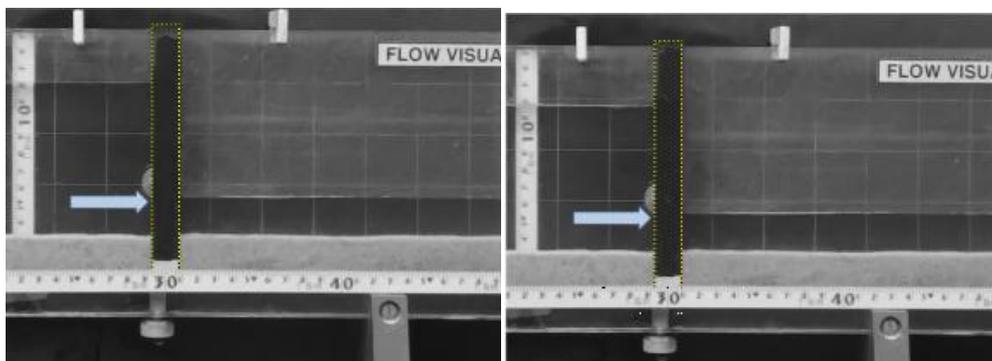
Figura AI.84 – Ensaio 84, para $t=0$ s (a) e $t=40$ s (b)



a)

b)

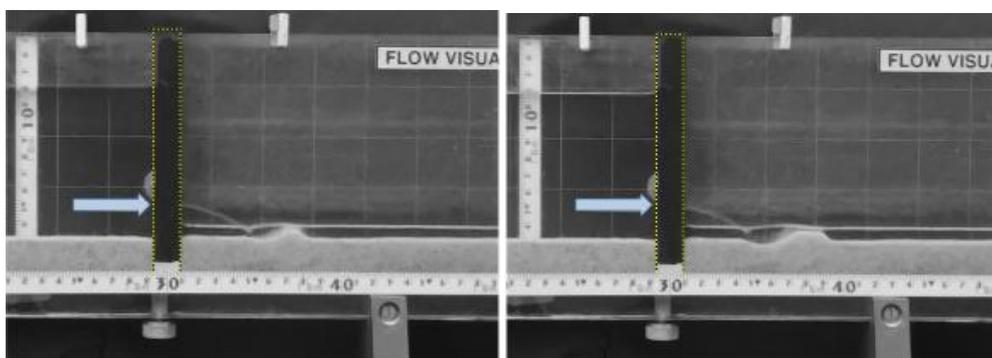
Figura AI.85 – Ensaio 85, para $t=0$ s (a) e $t=20$ s (b)



a)

b)

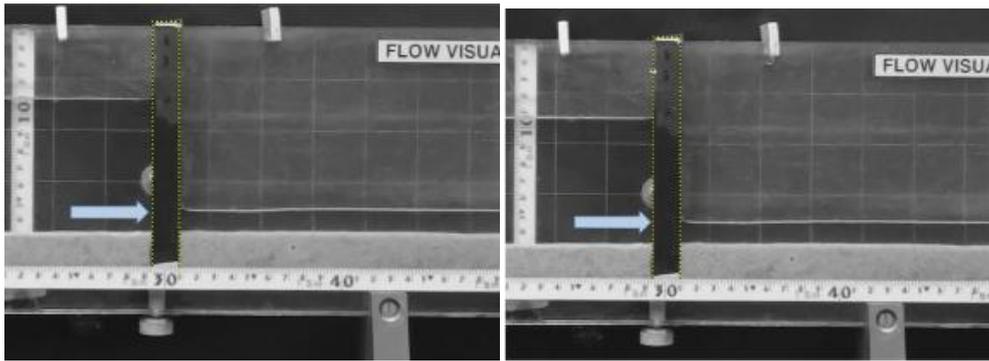
Figura AI.86 – Ensaio 86, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)



a)

b)

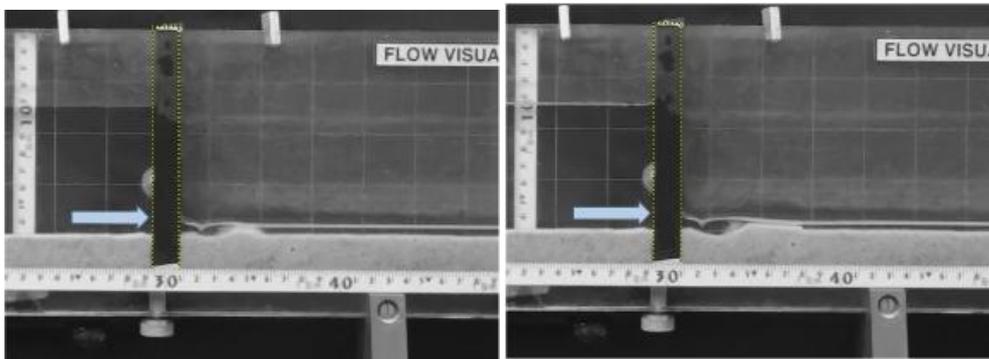
Figura AI.87 – Ensaio 87, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



a)

b)

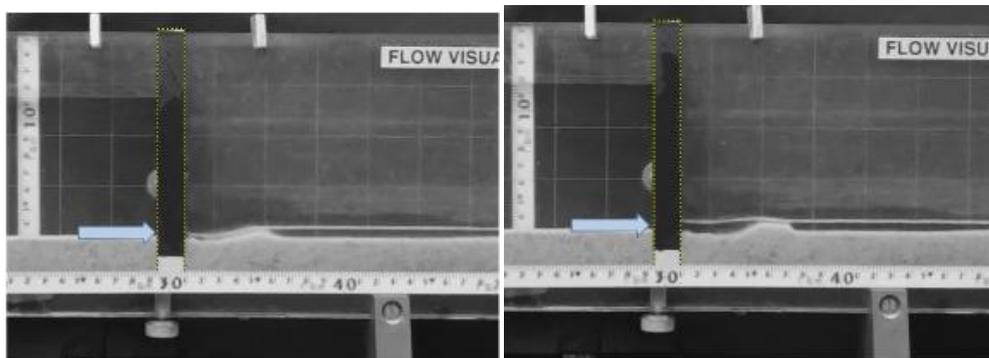
Figura AI.88 – Ensaio 88, para $t=0$ s (a) e $t=10$ s (b)



a)

b)

Figura AI.89 – Ensaio 89, para $t=0$ s (a) e $t=30$ s (b)



a)

b)

Figura AI.90 – Ensaio 90, para $t=0$ s (a) e $t=20$ s (b)

Anexo II

- Tipo A/Teste A3

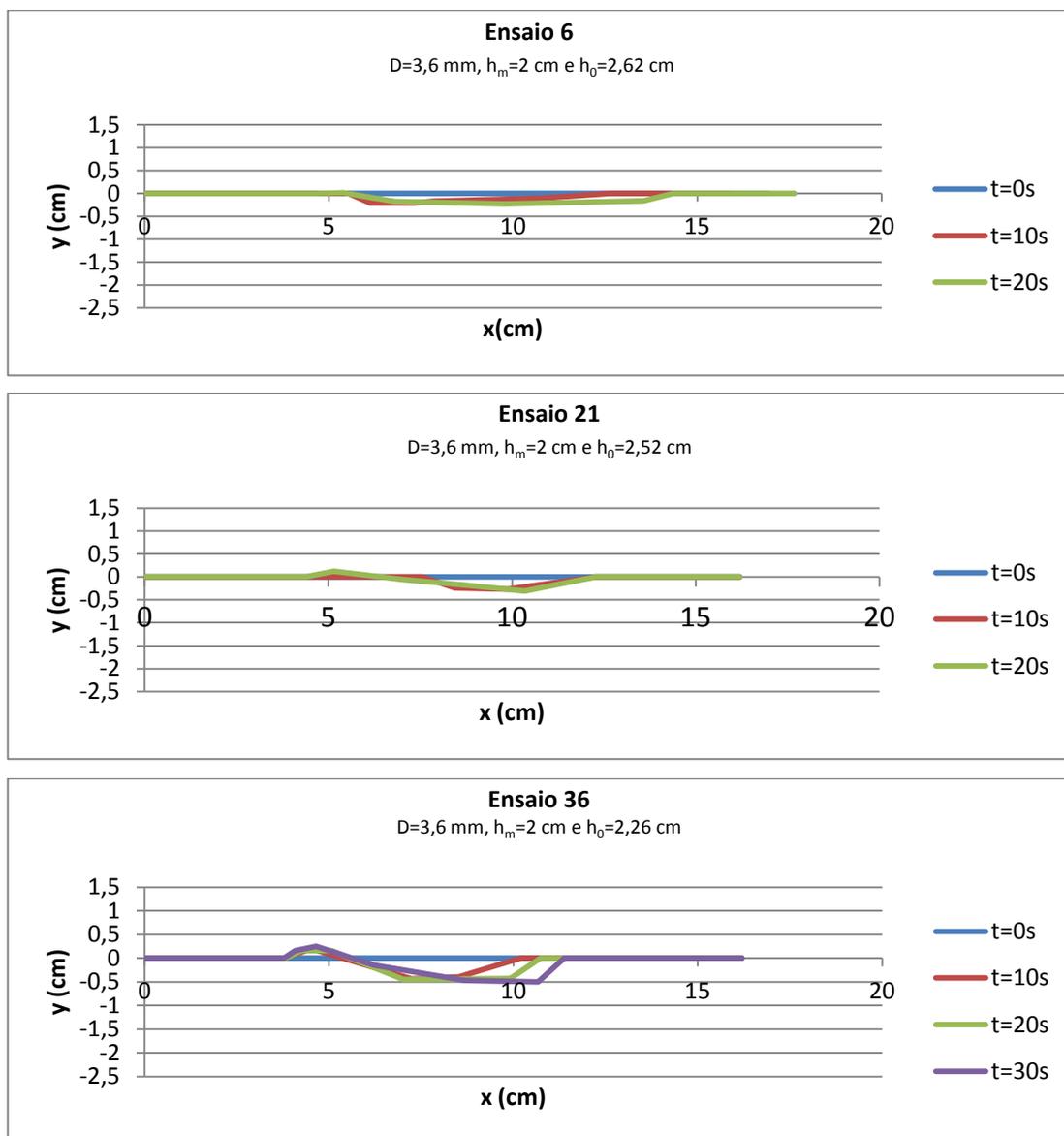


Gráfico AII.1 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 2, 21 e 36

Tabela AII.1 – Dados recolhidos dos ensaios 2,21 e 36

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{\text{máx}}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{\text{máx}}$ (cm)
6	1,425	20	0,23	20	0,01
21	0,638	20	0,31	20	0,12
36	0,34	30	0,5	30	0,25

• **Teste A4**

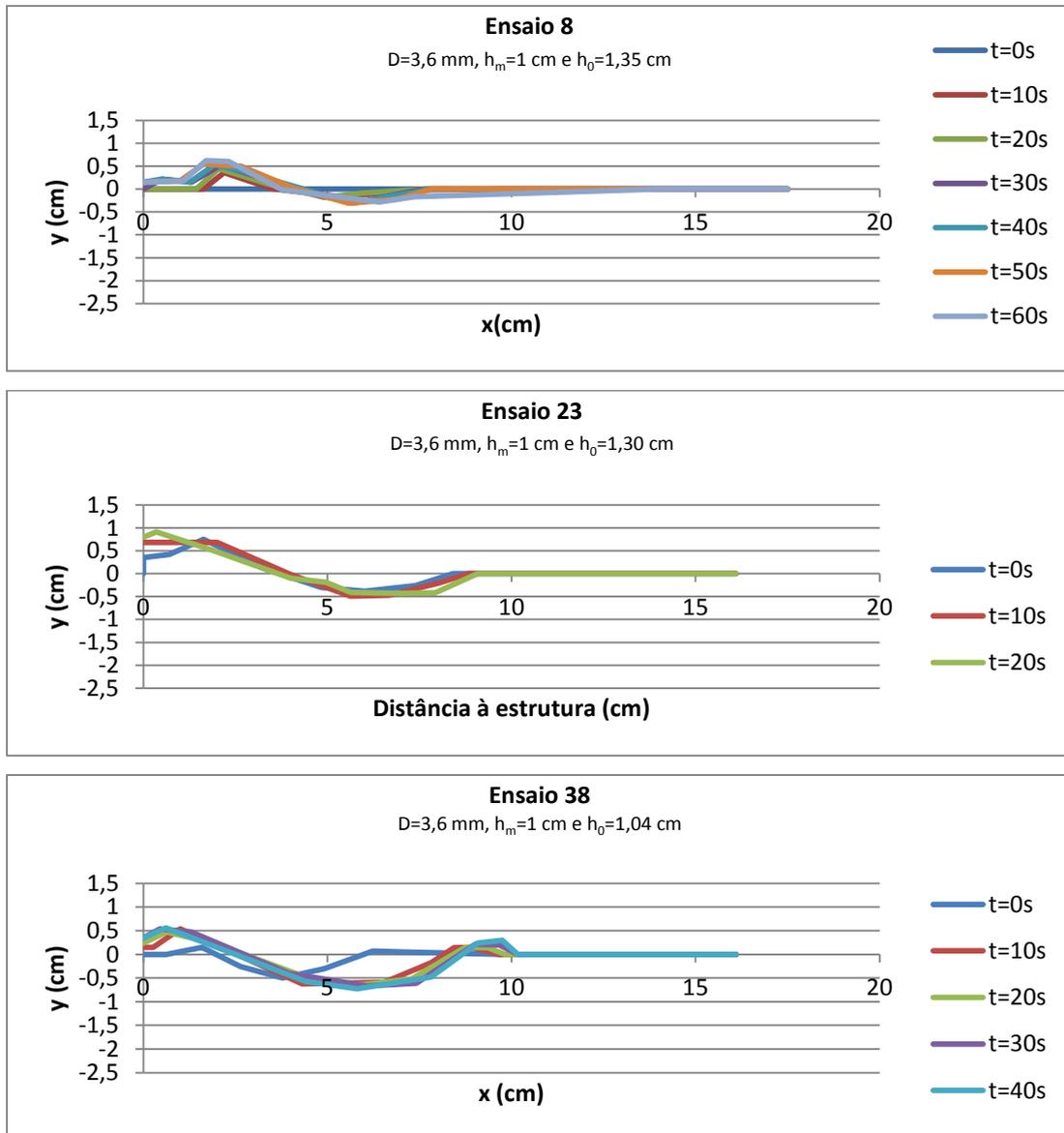


Gráfico AII.2 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 8, 23 e 38

Tabela AII.2 – Dados recolhidos dos ensaios 8, 23 e 38

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
8	1,425	50	0,31	60	0,62
23	0,638	10	0,49	20	0,91
38	0,34	40	0,73	40	0,56

A5 e A6 não houve movimentos das partículas de areia, logo não existe dados a registar.

Tipo B:

• Teste B3

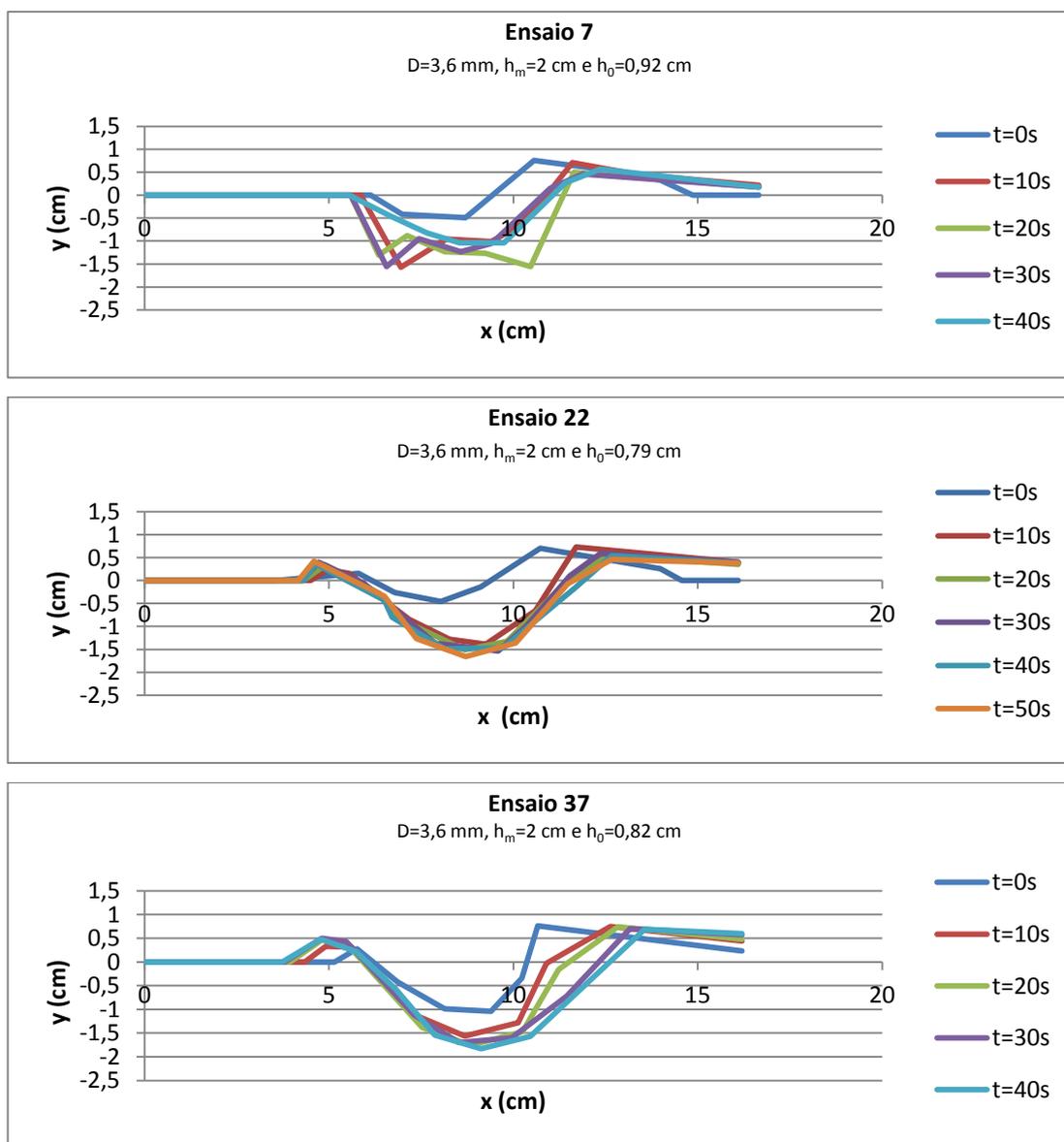


Gráfico AII.3 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 7, 22 e 37

Tabela AII.3 – Dados recolhidos dos ensaios 7, 22 e 37

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
7	1,425	10	1,57	0	0,76
22	0,638	50	1,66	10	0,73
37	0,34	40	1,83	0	0,76

• **Teste B4**

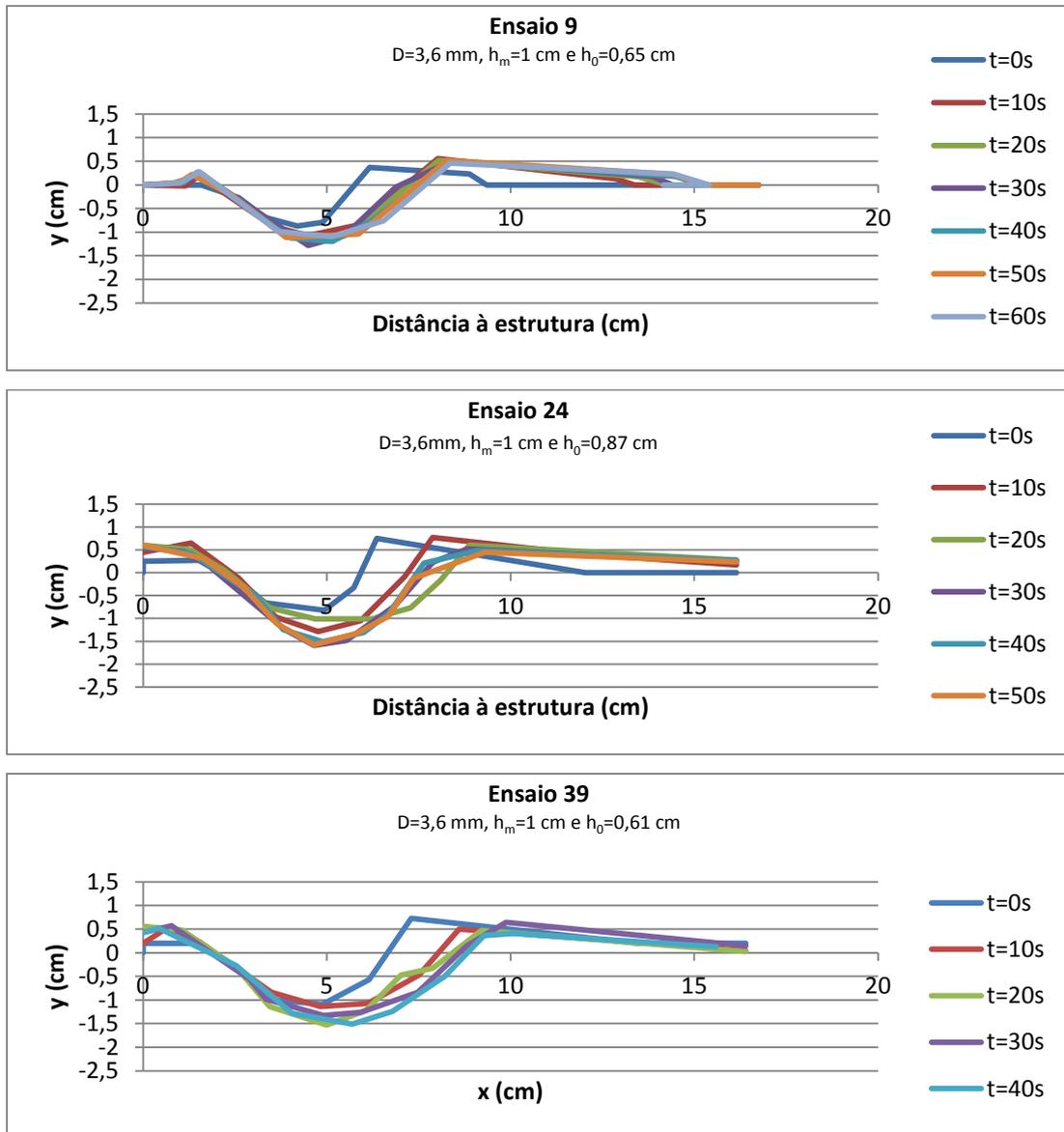


Gráfico AII.4 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 9, 24 e 39

Tabela AII.4 – Dados recolhidos dos ensaios 9,24 e 39

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{\text{máx}}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{\text{máx}}$ (cm)
9	1,425	30	1,28	10	0,56
24	0,638	30	1,59	10	0,77
39	0,34	20	2,01	0	1,29

- **Teste B5**

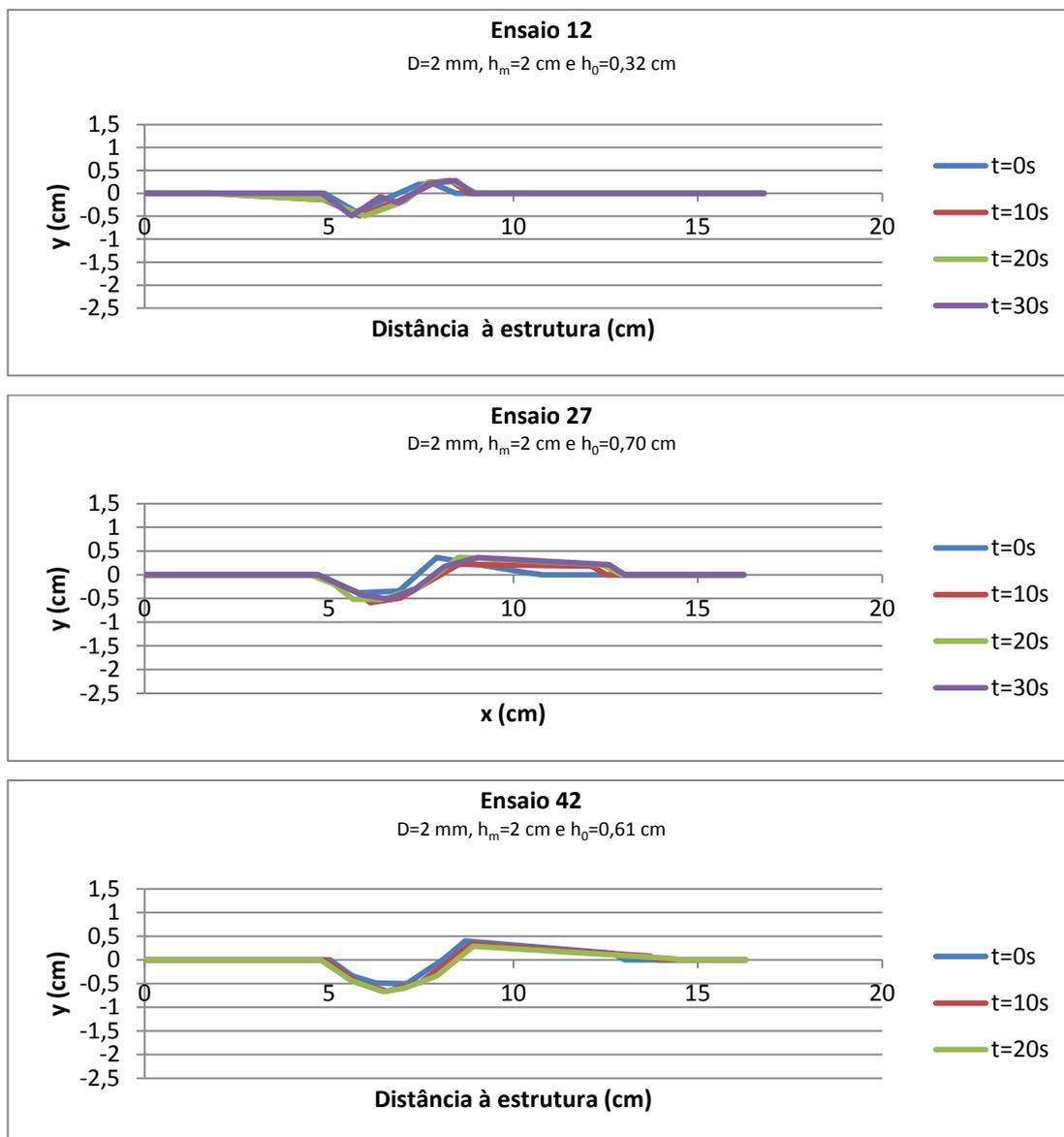


Gráfico AII.5 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 12, 27 e 42

Tabela AII.5 – Dados recolhidos dos ensaios 12, 27 e 42

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
12	1,425	30	0,49	30	0,28
27	0,638	10	0,59	30	0,37
42	0,34	20	0,67	0	0,4

• **Teste B6**

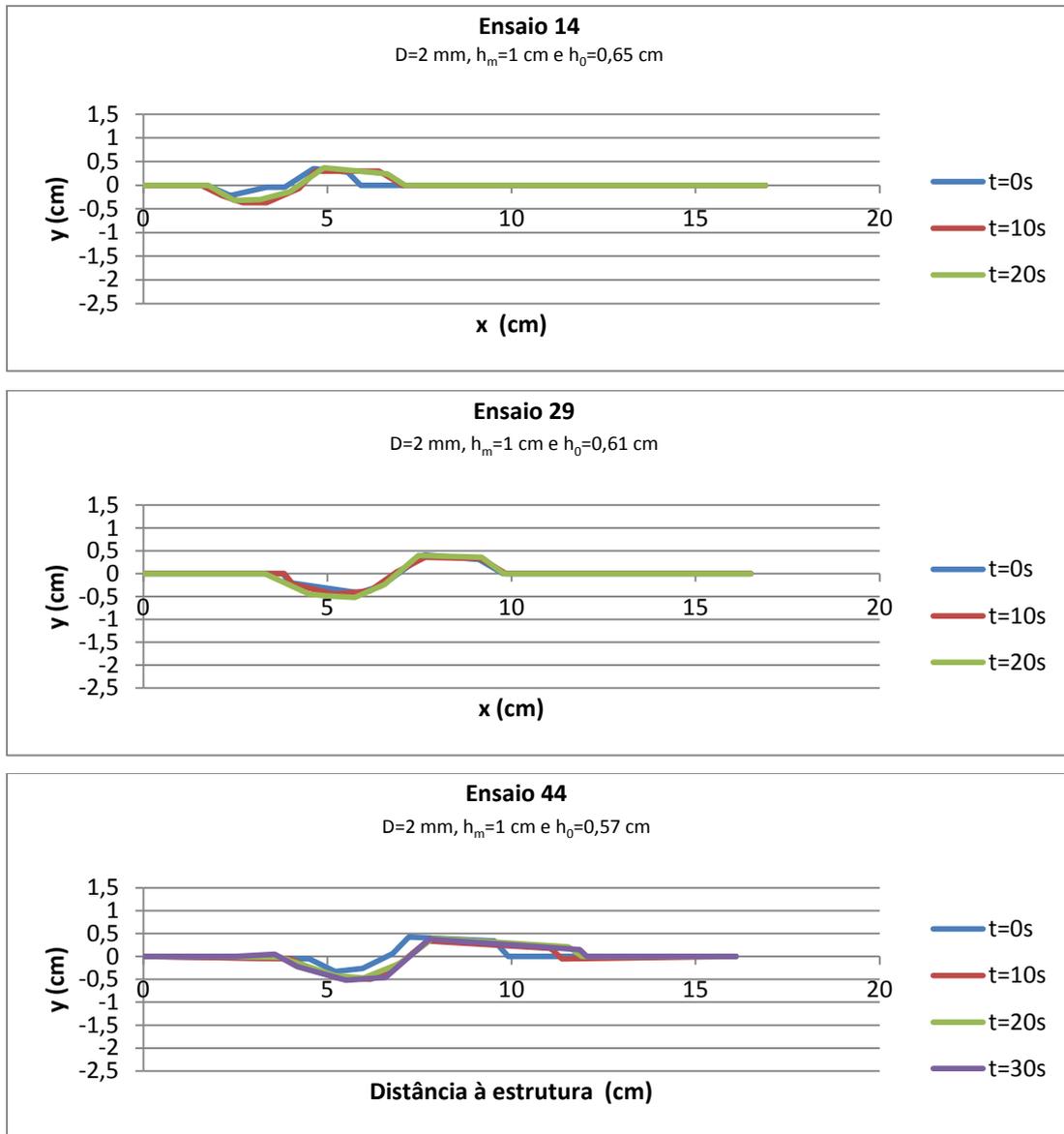


Gráfico AII.6 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 14, 29 e 44

Tabela AII.6 – Dados recolhidos dos ensaios 14, 29 e 44

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
14	1,425	10	0,37	20	0,37
29	0,638	20	0,52	0	0,41
44	0,34	30	0,36	0	0,43

Tipo C

• Teste C3

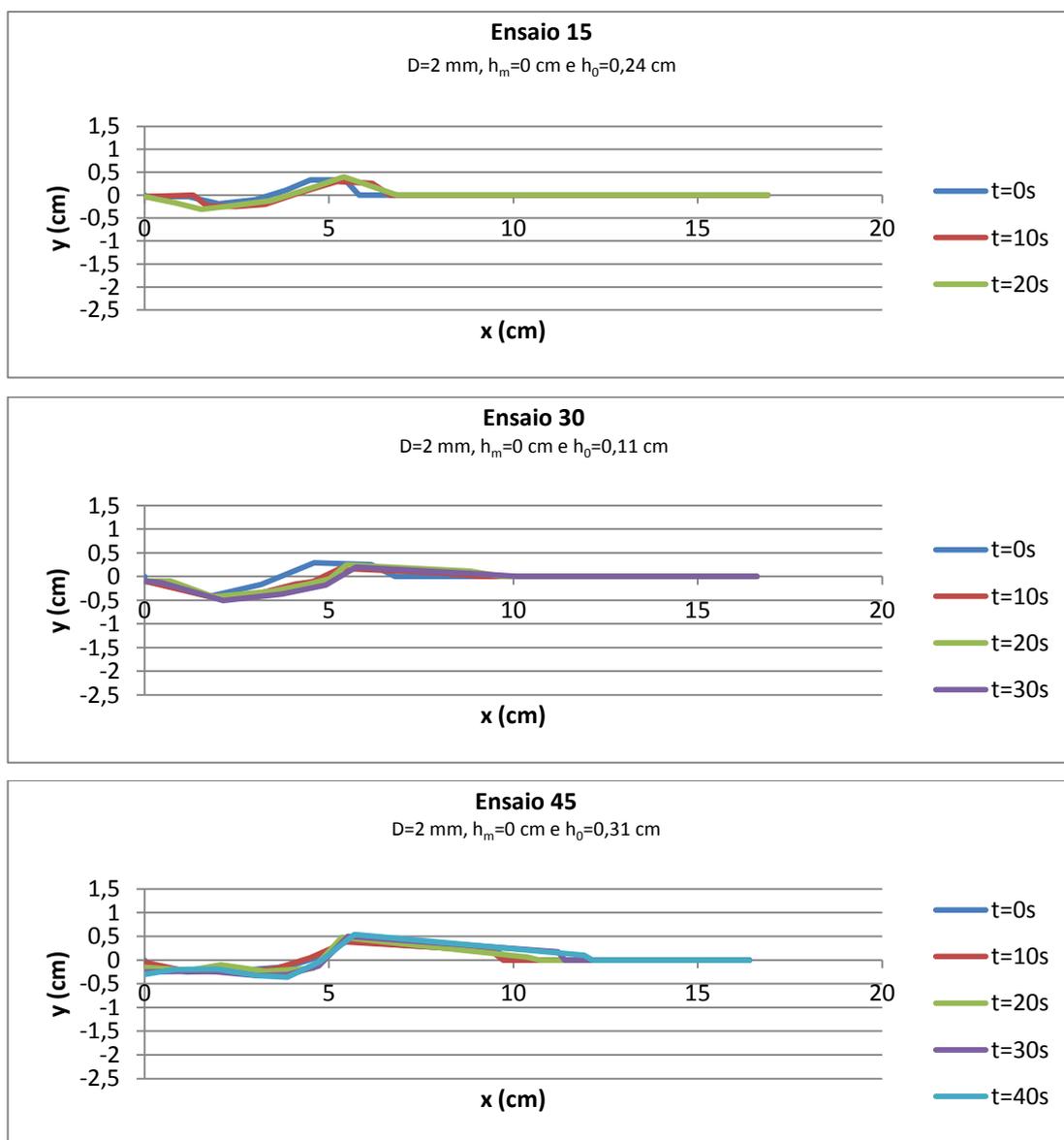


Gráfico AII.7 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 15, 30 e 45

Tabela AII.7 – Dados recolhidos dos ensaios 15, 30 e 45

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{\text{máx}}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{\text{máx}}$ (cm)
15	1,425	20	0,31	20	0,4
30	0,638	30	0,51	0	0,29
45	0,34	40	0,36	40	0,54

Tipo A

• **Teste A'4**

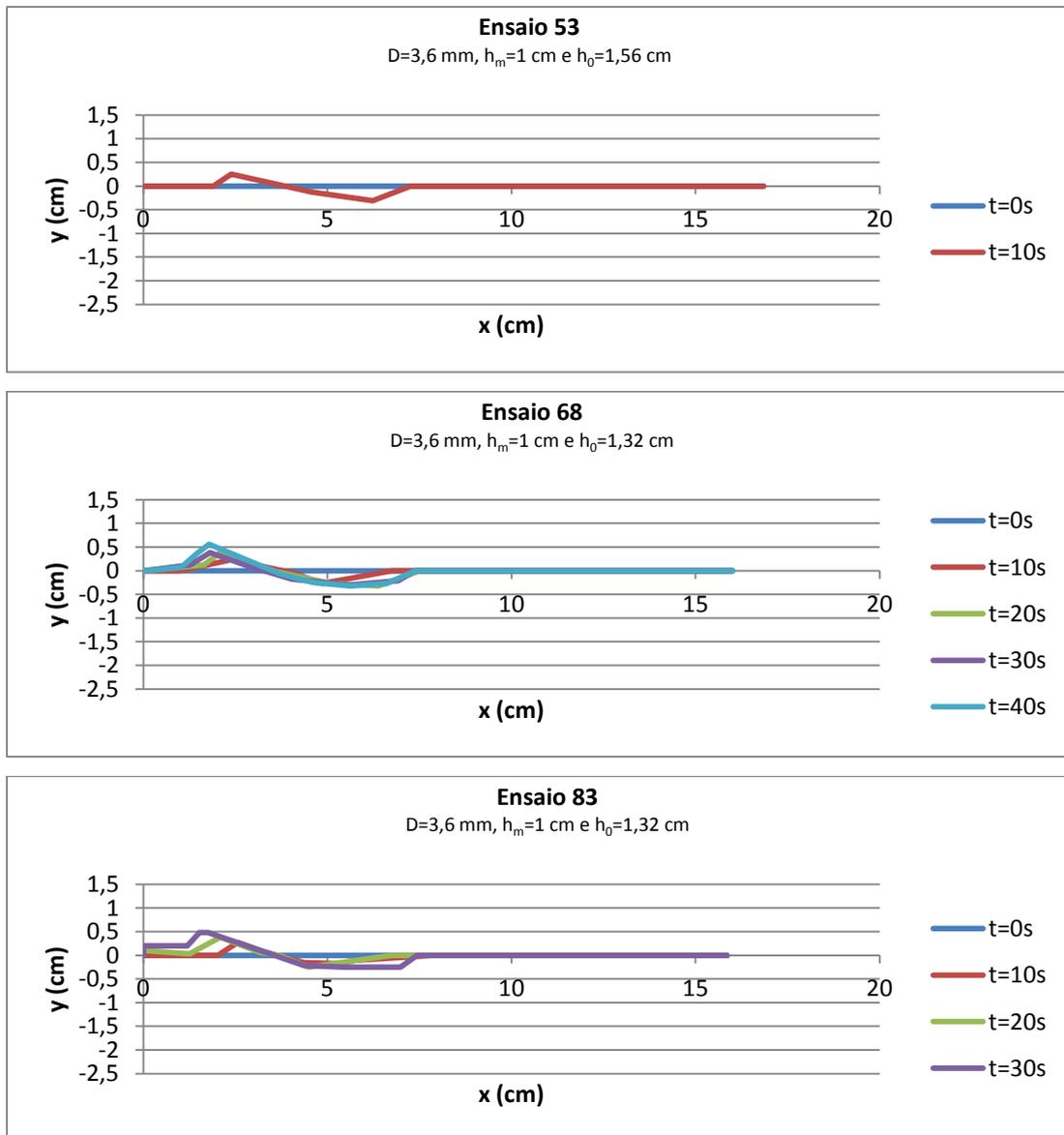


Gráfico AII. 8 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 53, 68 e 83

Tabela AII.8 – Dados recolhidos dos ensaios 53, 58 e 83

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
53	1,425	10	0,31	10	0,25
68	0,638	40	0,32	40	0,56
83	0,34	30	0,25	30	0,48

A3, A5 e A6 não houve movimentos das partículas de areia, ou dados a registar.

Tipo B:

• Teste B'3

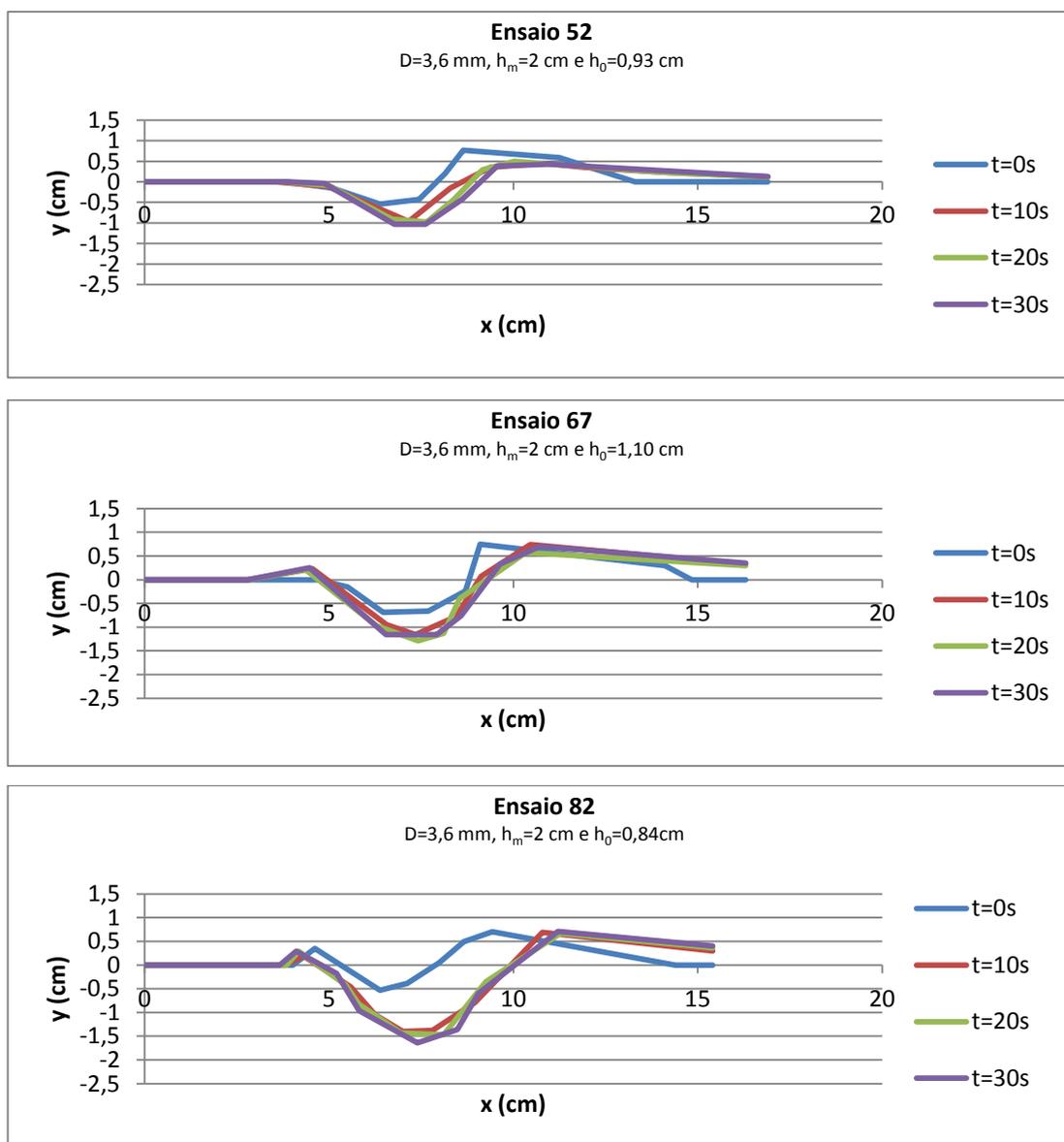


Gráfico AII.9 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 52, 67 e 82

Tabela AII.9 – Dados recolhidos dos ensaios 52, 67 e 82

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
52	1,425	30	1,03	0	0,77
67	0,638	20	1,29	0	0,75
82	0,34	30	1,64	30	0,71

• Teste B'4

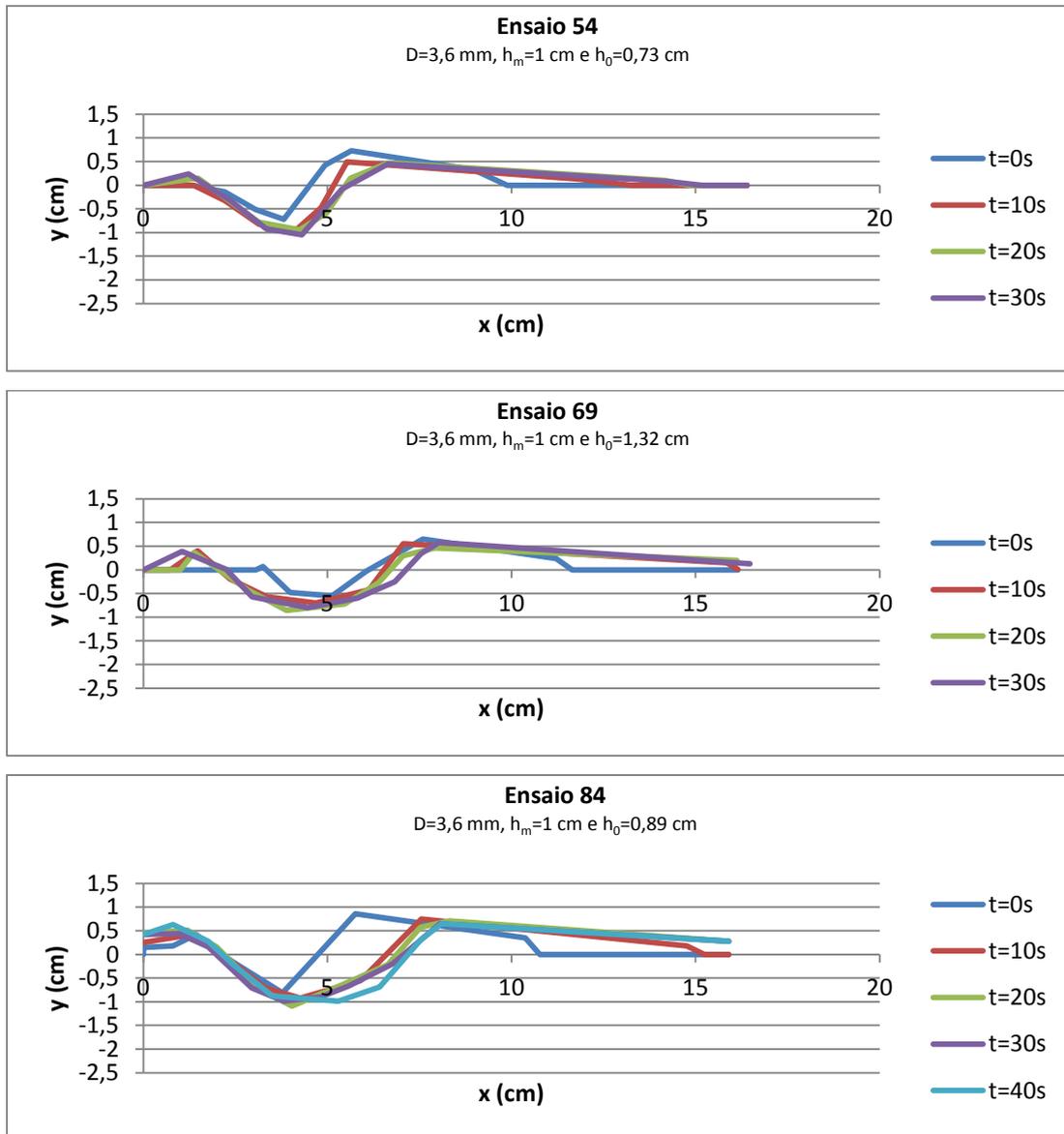


Gráfico AII. 10 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 54, 69 e 84

Tabela AII.10 – Dados recolhidos dos ensaios 54, 69 e 84

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
54	1,425	30	1,05	0	0,73
69	0,638	20	0,86	0	0,65
84	0,34	20	1,09	0	0,86

- **Teste B'5**

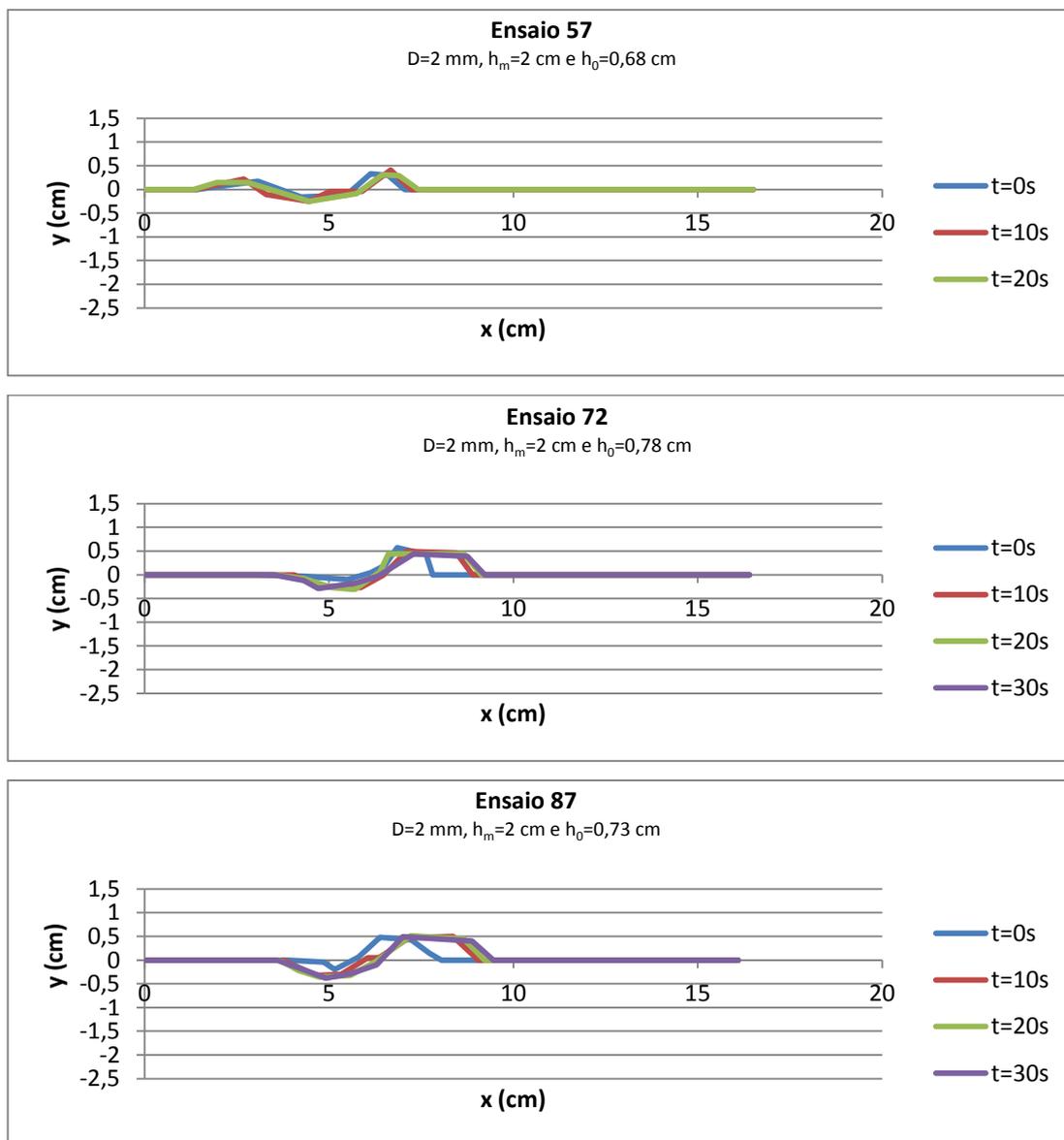


Gráfico AII.11 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 57, 72 e 87

Tabela AII.11 – Dados recolhidos dos ensaios 57, 72 e 87

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
57	1,425	20	0,25	10	0,41
72	0,638	20	0,31	0	0,57
87	0,34	30	0,38	20	0,51

• **Teste B'6**

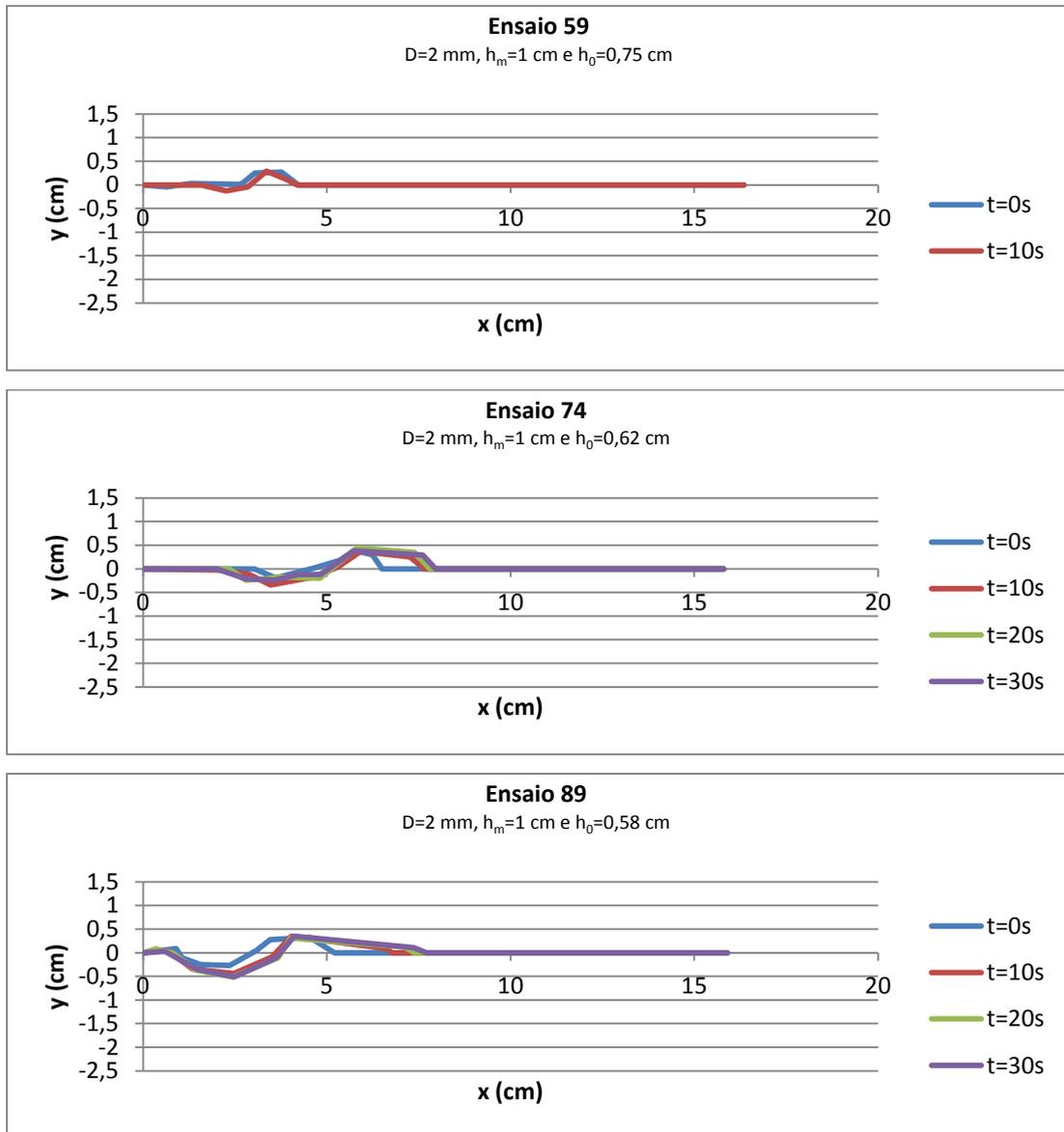


Gráfico AII. 12 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 59, 74 e 89

Tabela AII.12 – Dados recolhidos dos ensaios 59, 74 e 89

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{m\acute{a}x}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{m\acute{a}x}$ (cm)
59	1,425	10	0,13	10	0,29
74	0,638	10	0,34	20	0,44
89	0,34	30	0,51	30	0,35

Tipo C

• Teste C'3

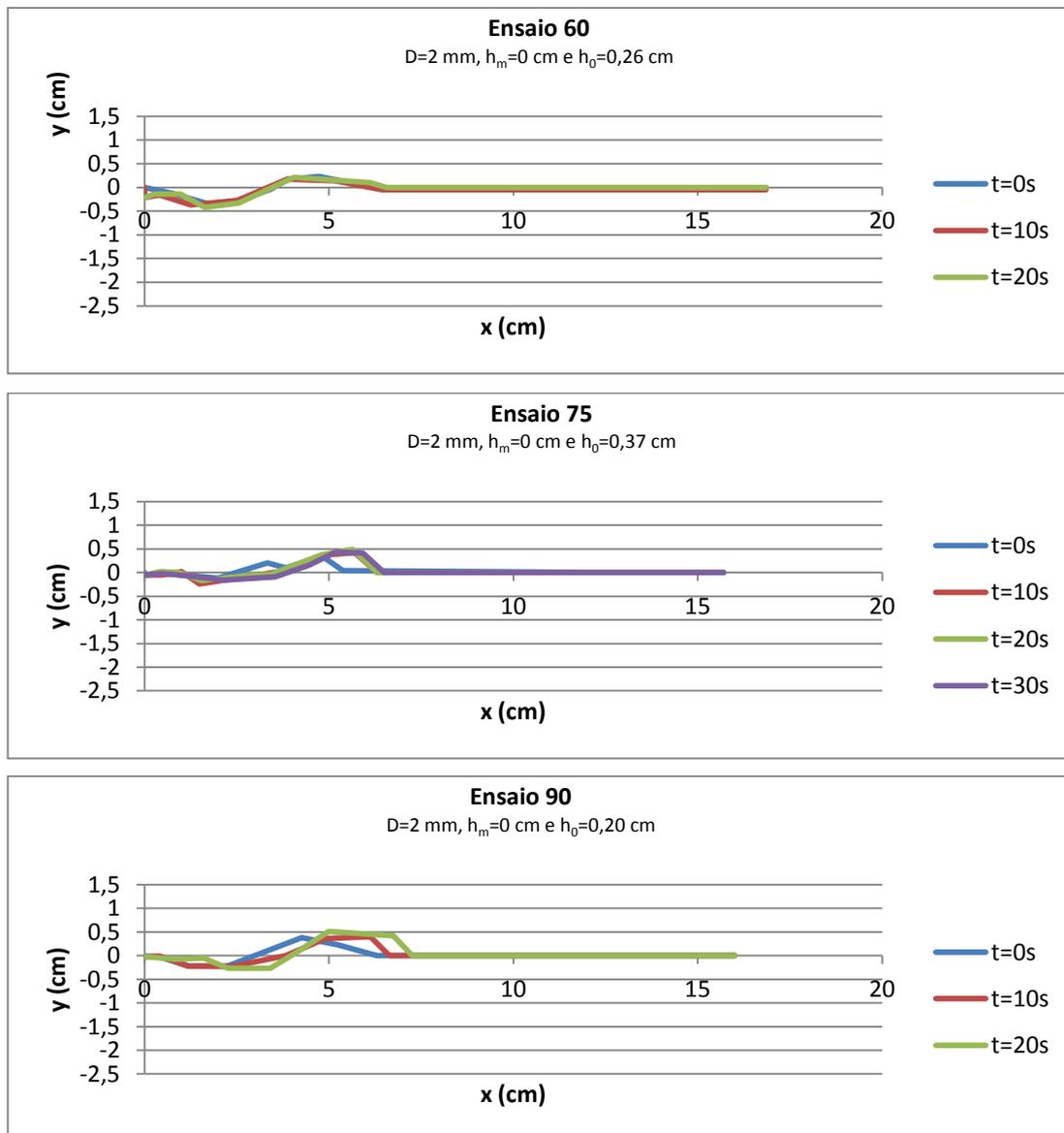


Gráfico AII.13 – Perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da descarga de fundo para os ensaios 60, 75 e 90

Tabela AII.13 – Dados recolhidos dos ensaios 60, 75 e 90

Ensaio	D areia (mm)	Erosão		Deposição	
		t_s (s)	$S_{\text{máx}}$ (cm)	t_d (s)	$hd_{\text{máx}}$ (cm)
60	1,425	40	0,42	0	0,23
75	0,638	10	0,24	20	0,49
90	0,34	20	0,27	20	0,51

Anexo III

Evolução temporal, para o caudal máximo e areia média, variação de D

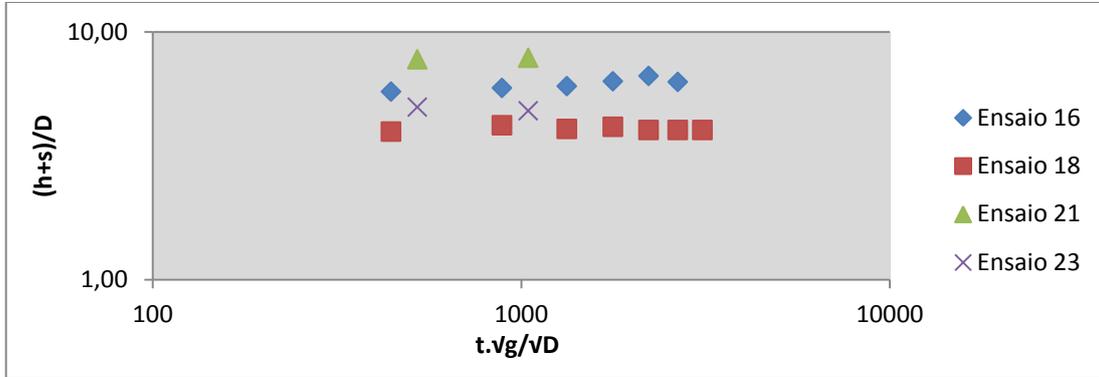


Gráfico III.1 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t \cdot \sqrt{g} / \sqrt{D})$ para os ensaios 16, 18, 21 e 23

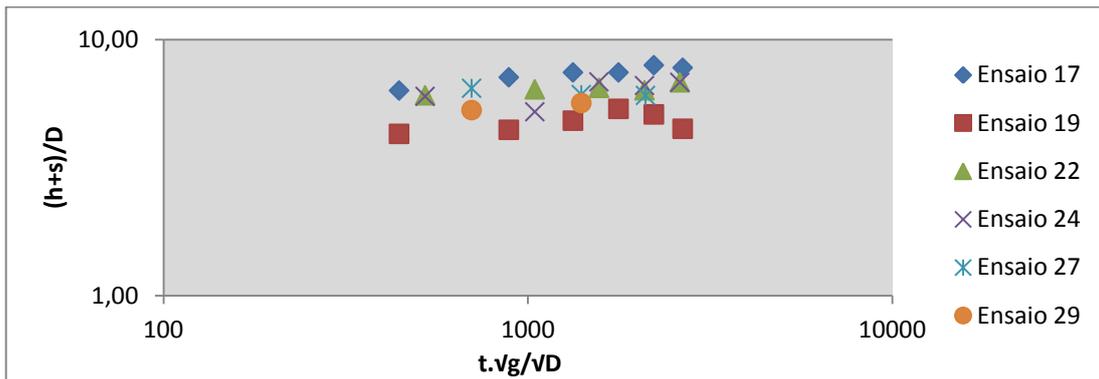


Gráfico III.2 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t \cdot \sqrt{g} / \sqrt{D})$ para os ensaios 17, 19, 22, 24, 27 e 29

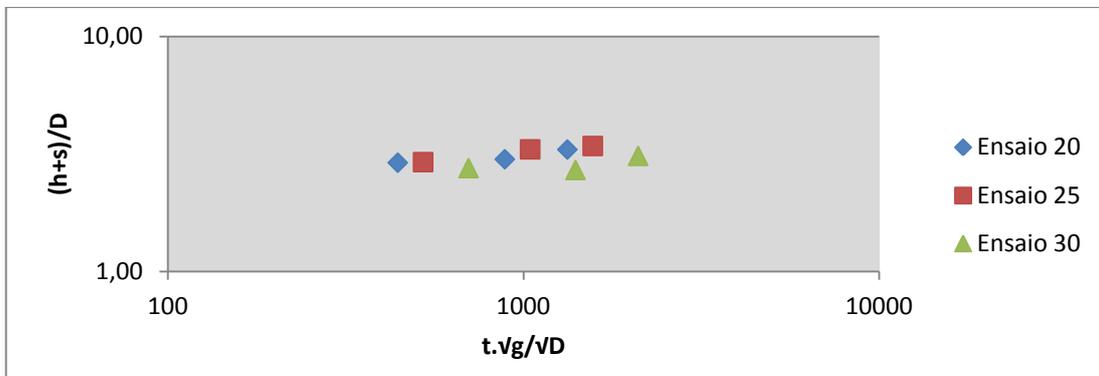


Gráfico III.3 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t \cdot \sqrt{g} / \sqrt{D})$ para os ensaios 20, 25 e 30

Evolução temporal, para o caudal máximo e areia fina, variação de D

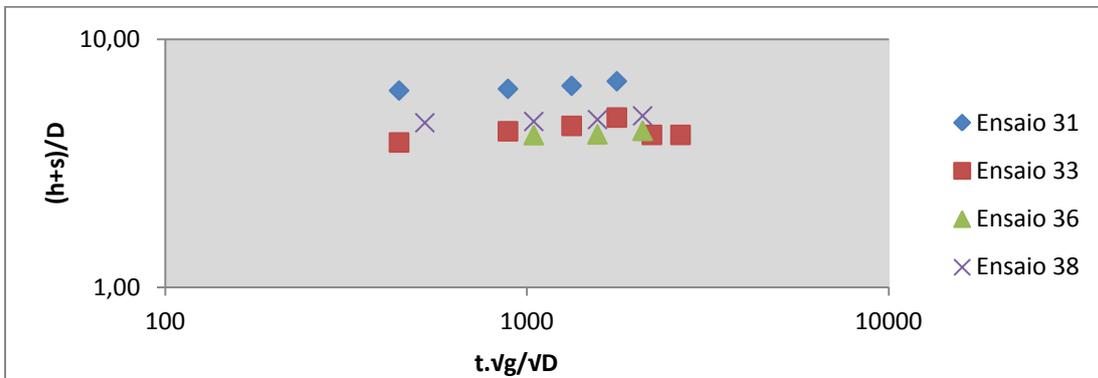


Gráfico III.4 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 31, 33, 36 e 38

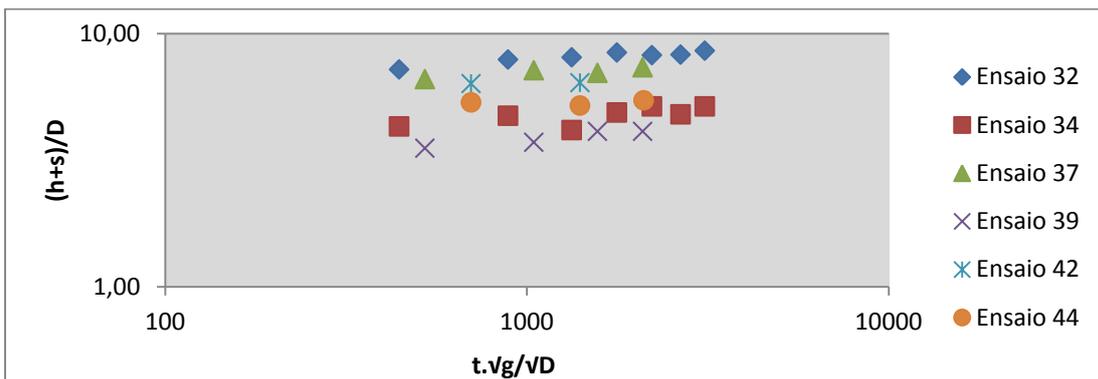


Gráfico III.5 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 32, 34, 37, 39, 42 e 44

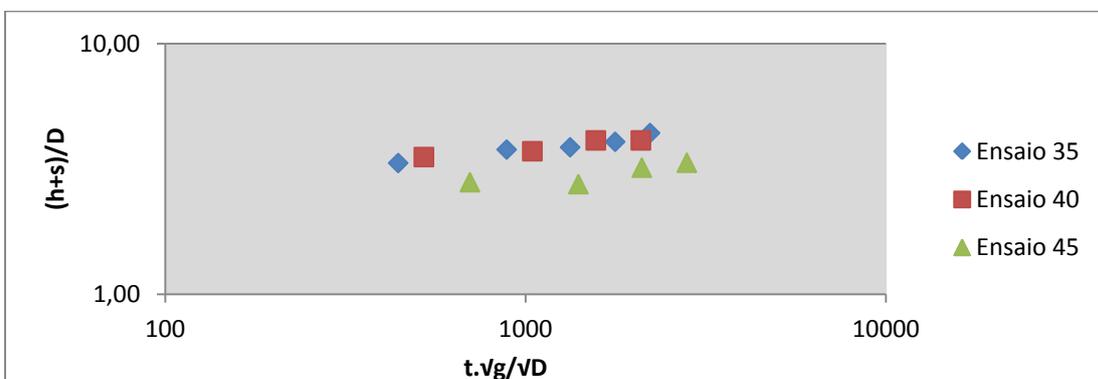


Gráfico III.6 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 35, 40 e 45

Evolução temporal, com a redução em 20% do caudal e areia média, variação de D

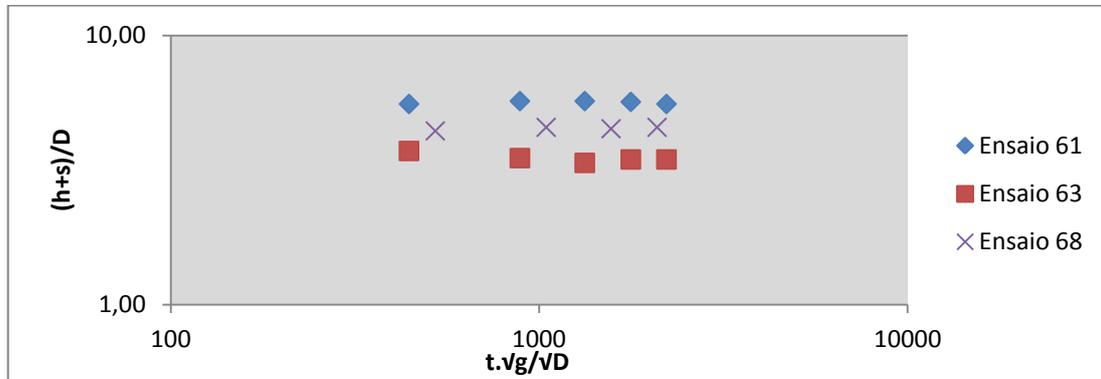


Gráfico III.7 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 61, 63 e 68, caudal reduzido

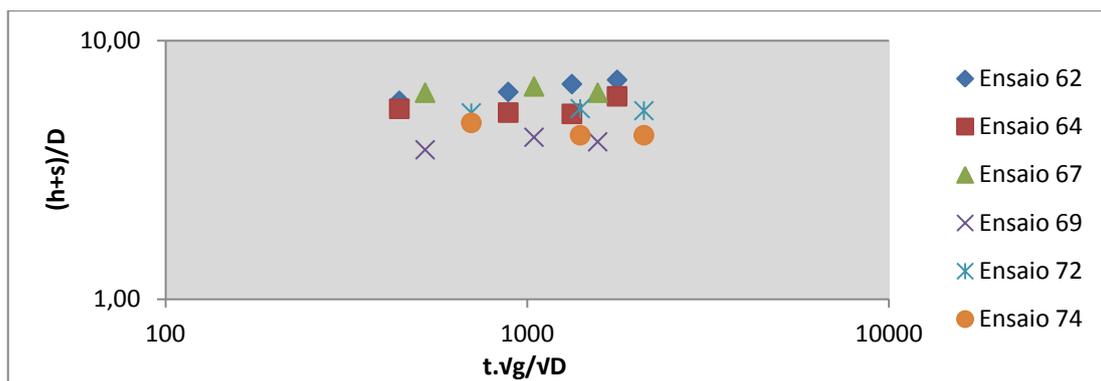


Gráfico III.8 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 62, 64, 67, 69, 72 e 74, caudal reduzido

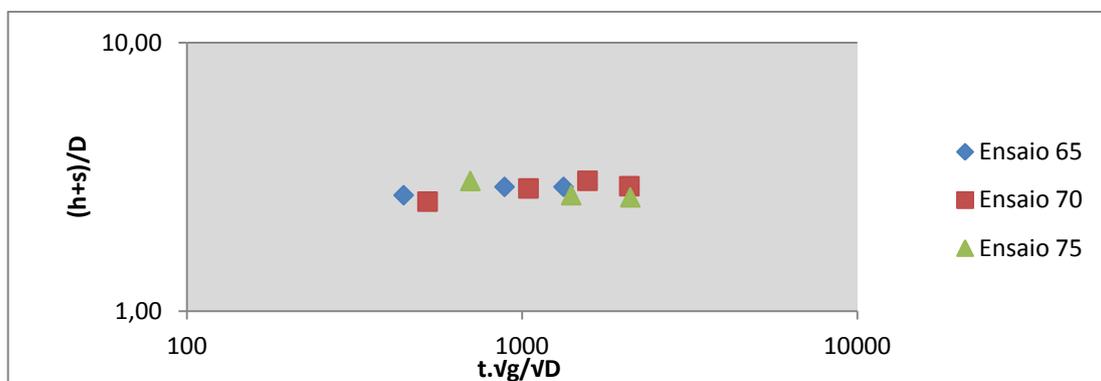


Gráfico III.9 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 65, 70 e 75, caudal reduzido

Evolução temporal, com a redução em 20% do caudal e areia fina, variação de D

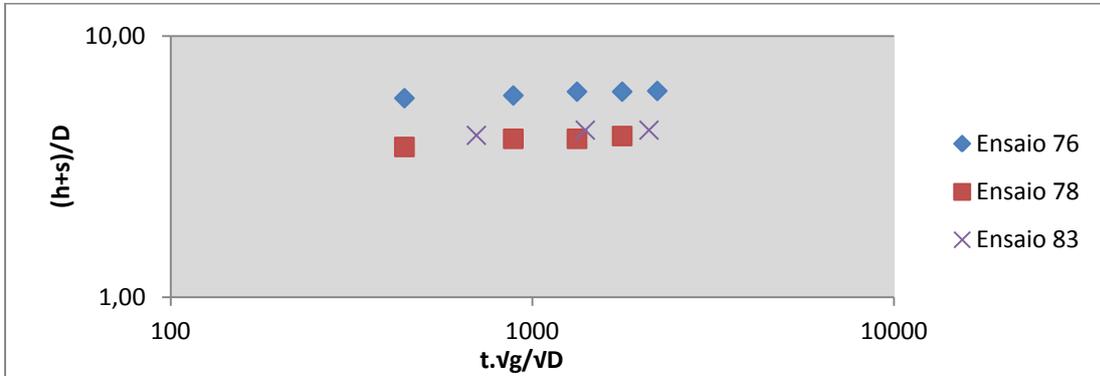


Gráfico III.10 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 76, 78 e 83

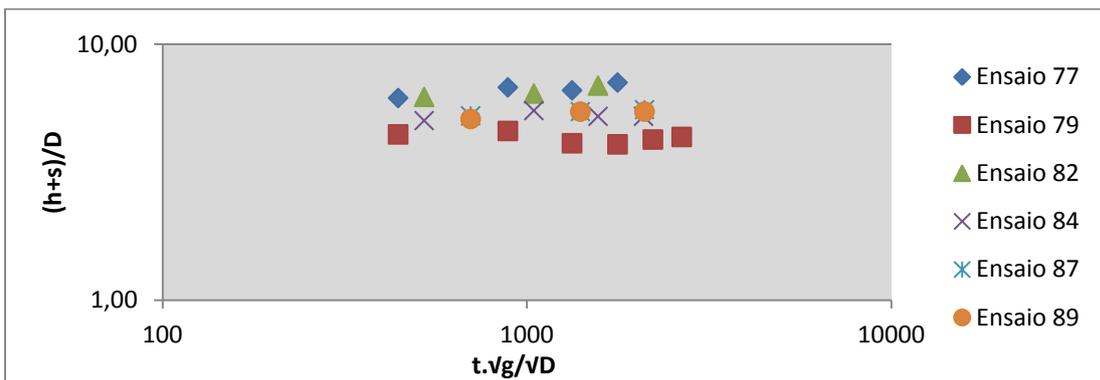


Gráfico III.11 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios 77, 79, 82, 87 e 89, caudal reduzido

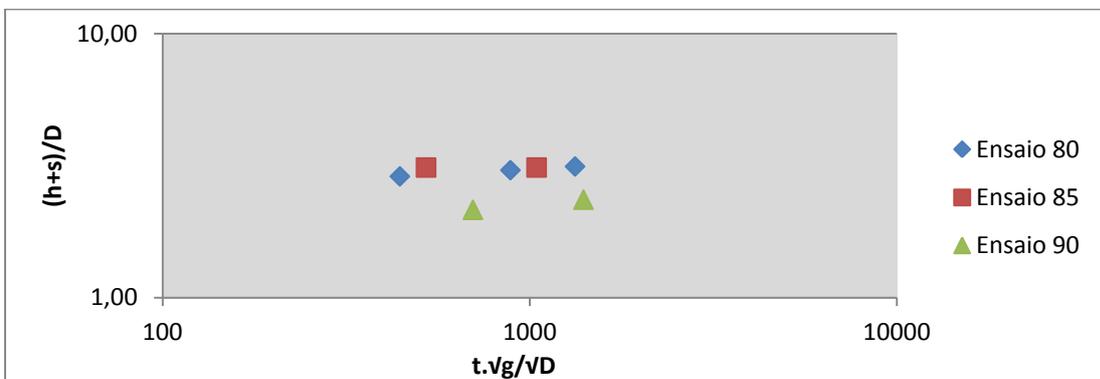


Gráfico III.12 – Variação de $(h+s)/D$ com $(t.\sqrt{g}/\sqrt{D})$ para os ensaios, caudal reduzido