

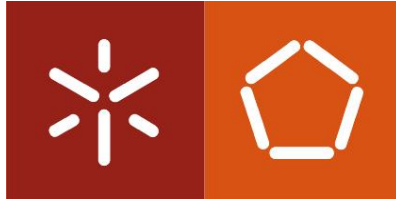
**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Luís Miguel Ferreira Carvalho

**Evolução temporal do leito de sedimentos  
a jusante de uma comporta vertical de  
abertura inferior**

Dezembro de 2017





**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Luís Miguel Ferreira Carvalho

**Evolução temporal do leito de sedimentos  
a jusante de uma comporta vertical de  
abertura inferior**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação da  
Professora Doutora Maria Manuela Carvalho de  
Lemos Lima  
e da Professora Doutora Elsa Maria da Silva  
Carvalho

Dezembro de 2017



## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação representa um enorme esforço de aprendizagem, crescimento e evolução a diversos níveis e só foi possível com a ajuda, apoio e contributo de algumas pessoas, às quais gostaria de agradecer:

À minha orientadora, Professora Doutora Maria Manuela Carvalho Lemos Lima, pela orientação científica e construtiva, pela exigência, pela constante motivação e apoio e pela disponibilidade demonstrada, foi a melhor professora que podia ter tido nesta importante fase da minha vida.

À minha coorientadora, Professora Doutora Elsa Maria da Silva Carvalho, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, pela valiosa participação na orientação, demonstrando sempre cooperação e apoio, quando assim necessitei.

Ao Doutor Rui Jorge Ferreira Aleixo, Investigador na Universidade de Bologna (Itália), pelo essencial contributo no apoio à utilização do código de Matlab, criado e disponibilizado para a utilização na minha dissertação, e pela celeridade e disponibilidade nas respostas às minhas dúvidas.

Ao Sr. Rui Oliveira, Técnico do Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil, pelo companheirismo, apoio, conselhos, disponibilidade e cooperação durante todo o processo experimental.

Este trabalho foi financiado por: Projeto PTDC/ECM-HID/6387/2014 – POCI-01-0145-FEDER-016825 financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais através da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P





## RESUMO

O escoamento de água junto de estruturas hidráulicas pode provocar a formação de cavidades de erosão que, caso não sejam controladas, podem pôr em risco a estabilidade dessas estruturas e conseqüentemente provocar o seu colapso. Com o objetivo de prevenir e evitar acidentes junto de estruturas hidráulicas é pois necessário um estudo aprofundado de todas as variáveis envolvidas para que assim as estruturas sejam devidamente construídas.

A presente dissertação descreve o estudo experimental de um modelo simplificado, utilizando um canal de pequenas dimensões, da evolução temporal da cavidade de erosão e conseqüente barra de deposição de sedimentos a jusante, provocados por uma comporta vertical de soleira delgada instalada no canal. Foi utilizado um leito composto (fundo fixo seguido de um fundo móvel) em que o fundo móvel poderia ser constituído por areia ou areia pintada com um diâmetro médio de 0,328 mm, e esferas de vidro com 2 mm de diâmetro. Para a realização da análise e comparação dos diferentes parâmetros foram definidos diferentes valores para o comprimento da bacia de dissipação ( $L=0$  cm,  $L=6$  cm,  $L=8$  cm e  $L=10$  cm), para o caudal ( $Q=0,055$  L/s e  $Q=0,0861$  L/s), para a abertura da comporta ( $b=0,6$  cm e  $b=0,9$  cm) e para a altura do colchão de água a jusante, condicionada pela altura do descarregador a jusante ( $P=1$  cm e  $P=2,5$  cm).

A recolha e tratamento de dados para análise foram realizados a partir de filmagens que, posteriormente, foram convertidas em imagens correspondentes a instantes previamente definidos. Com o auxílio de um código em Matlab efetuou-se automaticamente o reconhecimento da superfície do leito dos sedimentos e determinou-se o perfil longitudinal do leito de sedimentos em diferentes instantes, permitindo determinar com clareza a evolução temporal do fenómeno.

**Palavras-Chave:** Cavidade de erosão; Barra de deposição; Areia; Esferas de vidro.





## ABSTRACT

Water flow near hydraulic structures may cause scour which, if not controlled, could jeopardize the stability of these structures and consequently lead to their collapse. In order to prevent and avoid accidents with hydraulic structures, a detailed study of all the variables involved is necessary so that these structures are properly built.

This dissertation describes a case study based on a simplified model of a vertical sluice gate installed in a small channel, which allows the study of the scour hole temporal evolution, as well as the downstream dune formation and migration. To carry out this research a compound bed (fixed bottom bed followed by a moving bed of sediments) was used. The bed of sediments could be made out of sand and painted sand, with an average diameter of 0.328mm, and glass spheres with 2 mm diameter. In order to analyse and compare all different parameters, different values for the length of the basin ( $L$ ) ( $L=0$  cm,  $L=6$  cm,  $L=8$  cm and  $L=10$  cm); for the discharge ( $Q$ ) ( $Q=0.055$  L/s and  $Q=0.0861$  L/s); for the sluice gate opening ( $b$ ) ( $b=0.6$  cm and  $b=0.9$  cm) and for the downstream tailwater depth conditioned by the height of the downstream weir ( $P$ ) ( $P=1$  cm and  $P=2.5$  cm) were defined.

The data acquisition and processing consisted in turning videos into a set of still images at instants previously defined. With a Matlab code the sediments' bed surface was automatically recognized and the longitudinal profile of sediments' bed at different instants determined, making it possible to clearly determine this phenomenon temporal evolution.

Key-words: Scour hole; Dune; Sand; Glass spheres



# INDICE GERAL

AGRADECIMENTOS .....	v
RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	ix
INDICE GERAL .....	xi
INDICE DE FIGURAS .....	xiii
INDICE DE TABELAS .....	xxi
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xxiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento .....	1
1.2 Objetivos .....	1
1.3 Organização da dissertação .....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Propriedades dos sedimentos .....	3
2.2 Transporte de partículas .....	4
2.3 Configurações do fundo .....	5
2.4 Configurações do fundo a jusante de cavidades de erosão.....	8
2.5 Erosão a jusante de comporta com abertura inferior .....	8
3. MÉTODO EXPERIMENTAL .....	19
3.1 Instalação experimental.....	19
3.2 Parâmetros experimentais .....	21
3.2.1 Sedimentos .....	22
3.2.2 Caudal .....	25
3.3 Procedimento experimental.....	26
3.4 Condições experimentais.....	28
3.4.1 Fundo composto – Areia pintada.....	29
3.4.2 Fundo composto – Areia .....	32
3.4.3 Fundo composto – Esferas de vidro .....	32
3.5 Procedimento pós realização dos ensaios.....	33
3.5.1 Tratamento das imagens.....	33
3.5.2 Procedimento Matlab e tratamento de dados Excel .....	35
4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	37
4.1 Breve descrição dos ensaios .....	37
4.2 Aferição do Método Experimental .....	39

4.2.1	Análise da repetibilidade dos ensaios .....	39
4.2.2	Análise do efeito da pintura da areia .....	41
4.2.3	Análise da influência da variabilidade do caudal .....	43
4.3	Análise dos resultados dos ensaios com areia pintada.....	45
4.3.1	Análise da influência do comprimento da bacia de dissipação na evolução temporal do perfil .....	46
4.3.2	Análise da influência do valor do caudal na evolução temporal do perfil.....	48
4.3.3	Análise da influência do valor da abertura da comporta na evolução temporal do perfil.....	49
4.3.4	Análise da influência do valor da altura do colchão de água a jusante na evolução temporal do perfil .....	51
4.3.5	– Análise da deposição dos diferentes diâmetros das partículas de areia pintada ao longo da extensão do canal.....	53
4.4	Análise dos resultados dos ensaios com esferas de vidro.....	53
4.4.1	Análise da influência do comprimento da bacia de dissipação na evolução temporal do perfil .....	54
4.4.2	Análise da influência do valor da abertura da comporta na evolução temporal do perfil.....	57
4.4.3	Análise da influência do valor da altura do colchão de água a jusante na evolução temporal do perfil .....	60
4.5	Análise para idêntico número de Froude densimétrico .....	61
4.6	Celeridade.....	64
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
5.1	Conclusões gerais do trabalho .....	67
5.2	Desenvolvimento de trabalhos futuros .....	68
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	69
	ANEXOS .....	71
	Anexo I – Fotografias Areia Pintada .....	71
	Anexo II – Fotografias Esferas de Vidro.....	75

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Transporte sólidos: arrastamento, suspensão e saltação (Espírito Santo, 2012).....	5
Figura 2.2 – escoamento sobre um fundo com dunas (Cardoso, 1998).....	6
Figura 2.3 – escoamento sobre um fundo coberto por antidunas (Cardoso, 1998) .....	7
Figura 2.4 – Variação qualitativa de $K_s$ , para um leito de areia, em função da velocidade ou do caudal (Cardoso, 1998).....	7
Figura 2.5 - Desenvolvimento temporal de uma duna (Oliveto e Hager, 2014) .....	8
Figura 2.6 - Esquema da configuração experimental do fundo fixo (Dey e Sarkar, 2006).....	9
Figura 2.7 - Esquema da configuração experimental do fundo depois de sofrer erosão (Dey e Sarkar, 2006) .....	10
Figura 2.8 - Esquema da configuração experimental do fundo antes do ensaio (Dey e Sarkar, 2006).....	10
Figura 2.9 - Esquema da configuração experimental do fundo depois do ensaio (Dey e Sarkar, 2016).....	10
Figura 2.10 – Definição de parâmetro de erosão com vista da secção e do plano (adaptado de Faruque et al. (2006)) .....	11
Figura 2.11 – Secção de teste descarregador de soleira (Dargahi, 2010).....	12
Figura 2.12 – Diagrama de definição para erosões locais provocadas por jatos horizontais 2D (Melville e Lim, 2014) .....	13
Figura 2.13 – Definição de parâmetros (adaptado de Aamir e Ahmad, 2016).....	14
Figura 2.14 – Variação do volume da cavidade de erosão com o tempo para diferentes tamanhos de sedimentos, Ali e Neyshaboury, (citado em Aamir e Ahmad, 2016).....	14
Figura 2.15 – Variação de $d_s/a$ relativamente a $F_d$ , Rajaratnam e Macdougall, (citado em Aamir e Ahmad, 2016).....	15
Figura 2.16 – Variação de $x_d/a$ relativamente a $F_d$ , Rajaratnam e Macdougall, (citado em Aamir e Ahmad, 2016).....	16
Figura 2.17 – Fundos fixos com rugosidade artificial (Ali, et. al. (2014), citado em Aamir e Ahmad (2016)) .....	16
Figura 3.1 – Canal hidráulico .....	19
Figura 3.2 – Comporta vertical de soleira delgada com abertura inferior.....	20
Figura 3.3 – Esquema das condições experimentais e variáveis em estudo.....	21
Figura 3.4 – Peneiros utilizados na granulometria da areia.....	22

Figura 3.5 – Mistura das areias pintadas .....	23
Figura 3.6 – Secagem e movimentação das areias .....	24
Figura 3.7 – Individualização da granulometria das areias por areia retida em cada peneiro .	24
Figura 3.8 – Esferas de vidro .....	25
Figura 3.9 – Paquímetro digital.....	25
Figura 3.10 – Canal com o tripé e câmara de filmar.....	26
Figura 3.11 – Canal com as condições de luz e captação de imagem ideais .....	27
Figura 3.12 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 10 s.....	34
Figura 3.13 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 10 s.....	34
Figura 3.14 – Par de imagens em concordância.....	35
Figura 3.15 – Resultado da identificação do leito através do código desenvolvido em Matlab .....	36
Figura 4.1 – Turbilhão das partículas de esferas de vidro, visível para diferentes instantes de tempo: (a) 6:00 min; (b) 8:00 min; (c) 10:00 min; (d) 12:00 min, ensaio n.º 45 .....	38
Figura 4.2 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 1), para $t=25$ s .....	39
Figura 4.3 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 33), para $t=25$ s .....	39
Figura 4.4 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 1 e 33), para $t=5$ s, 30 s e 60 s.....	40
Figura 4.5 - Evolução temporal da posição longitudinal do canal com $y=0$ cm (XiD), obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 1 e 33) .....	40
Figura 4.6 - Imagem do leito de sedimentos, obtida para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 1), para $t=5$ s (pormenor) .....	41
Figura 4.7 - Imagem do leito de sedimentos, obtida para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 39), para $t=5$ s (pormenor) .....	41
Figura 4.8 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 1), para $t=60$ s .....	42
Figura 4.9 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 39), para $t=60$ s .....	42

Figura 4.10 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 1 e 39), para $t=5$ s e $40$ s.....	43
Figura 4.11 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (YS), obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 1 e 39).....	43
Figura 4.12 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,055$ L/s, $b=0,6$ cm, $P=2,5$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 15 e 38), para $t=5$ s .....	44
Figura 4.13 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,055$ L/s, $b=0,6$ cm, $P=2,5$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 15 e 38), para $t=40$ s .....	44
Figura 4.14 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,055$ L/s, $b=0,6$ cm, $P=2,5$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 15 e 38), para $t=6$ min .....	45
Figura 4.15 - Evolução temporal da posição longitudinal do canal com $y=0$ cm (XiD) obtidos para $Q=0,055$ L/s, $b=0,6$ cm, $P=2,5$ cm e $L=0$ cm (Ensaio n.º 15 e 38).....	45
Figura 4.16 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e diferentes valores de $L$ [cm] (Ensaio n.º 1, 2, 17 e 18), para $t=5$ s.....	46
Figura 4.17 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e diferentes valores de $L$ [cm] (Ensaio n.º 1, 2, 17 e 18), para $t=40$ s.....	47
Figura 4.18 - Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (YS), obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e diferentes valores de $L$ [cm] (Ensaio n.º 1, 2, 17 e 18).....	47
Figura 4.19 - Evolução temporal da máxima elevação da barra (HD), obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e diferentes valores de $L$ [cm] (Ensaio n.º 1, 2, 17 e 18).....	47
Figura 4.20 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $L=0$ cm, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm, e diferentes valores de $Q$ [L/s] (Ensaio n.º 1 e 35), para $t=5$ s e $40$ s .....	48
Figura 4.21 - Evolução temporal da máxima elevação da barra (HD), obtidos para $L=0$ cm, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm, e diferentes valores de $Q$ [L/s] (Ensaio n.º 1 e 35).....	49
Figura 4.22 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $L=0$ cm, $b=0,9$ cm, $P=1$ cm e diferentes valores de $Q$ [L/s] (Ensaio n.º 1, 35), respetivamente para $t=40$ s e $t=14$ min .....	49
Figura 4.23 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $L=0$ cm, $P=1$ cm e diferentes valores de $b$ [cm] (Ensaio n.º 1, 9), para $t=5$ s e $t=40$ s.....	50
Figura 4.24 - Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (YS), obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $L=0$ cm, $P=1$ cm e diferentes valores de $b$ [cm] (Ensaio n.º 1, 9) .....	50

Figura 4.25 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861\text{L/s}$ , $L=0\text{ cm}$ , $b=0,9\text{ cm}$ e diferentes valores de $P\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 1, 3), para $t=5\text{ s}$ e $40\text{ s}$ .....	51
Figura 4.26 - Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (YS), obtidos para $Q=0,0861\text{L/s}$ , $L=0\text{ cm}$ , $b=0,9\text{ cm}$ e diferentes valores de $P\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 1, 3) .....	52
Figura 4.27 - Evolução temporal da máxima elevação da barra (HD), obtidos para $Q=0,0861\text{L/s}$ , $L=0\text{ cm}$ , $b=0,9\text{ cm}$ e diferentes valores de $P\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 1, 3).....	52
Figura 4.28 - Evolução temporal da posição longitudinal para a qual a elevação da barra é máxima (XD), obtido para $Q=0,0861\text{L/s}$ , $L=0\text{ cm}$ , $b=0,9\text{ cm}$ e diferentes valores de $P\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 1, 3) .....	52
Figura 4.29 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para $Q=0,055\text{ L/s}$ , $b=0,9\text{ cm}$ , $P=1\text{ cm}$ e $L=0\text{ cm}$ (Ensaio n.º 35), para $t=3\text{ min}$ .....	53
Figura 4.30 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para $Q=0,0861\text{ L/s}$ , $b=0,9\text{ cm}$ , $P=1\text{ cm}$ e diferentes valores de $L\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 41), para $t=5\text{ s}$ (pormenor) .....	54
Figura 4.31 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para $Q=0,0861\text{ L/s}$ , $b=0,9\text{ cm}$ , $P=1\text{ cm}$ e diferentes valores de $L\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 41), para $t=10\text{ min}$ .....	54
Figura 4.32 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861\text{ L/s}$ , $b=0,9\text{ cm}$ , $P=1\text{ cm}$ e diferentes valores de $L\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 41, 42, 43 e 44), para $t=5\text{ s}$ .....	55
Figura 4.33 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861\text{ L/s}$ , $b=0,9\text{ cm}$ , $P=1\text{ cm}$ e diferentes valores de $L\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 41, 42, 43 e 44), para $t=40\text{ s}$ .....	55
Figura 4.34 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861\text{ L/s}$ , $b=0,9\text{ cm}$ , $P=1\text{ cm}$ e diferentes valores de $L\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 41, 42, 43 e 44), para $t=10\text{ min}$ .....	56
Figura 4.35 - Evolução temporal da máxima elevação da barra (HD), obtido para $Q=0,0861\text{ L/s}$ , $b=0,9\text{ cm}$ , $P=1\text{ cm}$ e diferentes valores de $L\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 41, 42, 43 e 44).....	56
Figura 4.36 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861\text{ L/s}$ , $b=0,9\text{ cm}$ , $P=1\text{ cm}$ e diferentes valores de $L\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 1, 2, 17, 18), $t=40\text{ s}$ .....	57
Figura 4.37 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861\text{ L/s}$ , $b=0,9\text{ cm}$ , $P=1\text{ cm}$ e diferentes valores de $L\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 41, 42, 43 e 44), $t=40\text{ s}$ .....	57
Figura 4.38 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861\text{ L/s}$ , $L=0\text{ cm}$ , $P=1\text{ cm}$ e diferentes valores de $b\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 41 e 49), $t=5\text{ s}$ e $t=40\text{ s}$ .....	58
Figura 4.39 - Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (YS), obtidos para $Q=0,0861\text{ L/s}$ , $L=0\text{ cm}$ , $P=1\text{ cm}$ e diferentes valores de $b\text{ [cm]}$ (Ensaio n.º 41 e 49) .....	58



Figura 4.40 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $L=0$ cm, $P=1$ cm e diferentes valores de $b$ [cm] (Ensaio n.º 41 e 49), $t=50$ s e $t=10$ min .....	59
Figura 4.41 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $L=0$ cm, $P=1$ cm e diferentes valores de $b$ [cm] (Ensaio n.º 1, 9, 41 e 49), $t=40$ s .....	59
Figura 4.42 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $L=0$ cm, $b=0,9$ cm e diferentes valores de $P$ [cm] (Ensaio n.º 41 e 45), $t=5$ s e $t=40$ s.....	60
Figura 4.43 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $L=0$ cm, $b=0,9$ cm e diferentes valores de $P$ [cm] (Ensaio n.º 41 e 45), $t=5$ s e $t=8$ min.....	61
Figura 4.44 - Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (YS), obtidos para $Q=0,0861$ L/s, $L=0$ cm, $b=0,9$ cm e diferentes valores de $P$ [cm] (Ensaio n.º 41 e 45).....	61
Figura 4.45 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,055$ L/s, $b=0,9$ cm, $L=0$ cm e $P=1$ cm (Ensaio n.º 35), $t=5$ s e $t=40$ s e $Q=0,0861$ L/s, $b=0,6$ cm, $L=0$ cm e $P=1$ cm (Ensaio n.º 49), $t=5$ s e $t=40$ s.....	62
Figura 4.46 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,055$ L/s, $b=0,9$ cm, $L=0$ cm e $P=1$ cm (Ensaio n.º 35), $t=2$ m e $t=6$ m e $Q=0,0861$ L/s, $b=0,6$ cm, $L=0$ cm e $P=1$ cm (Ensaio n.º 49), $t=2$ min e $t=6$ min.....	62
Figura 4.47 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,055$ L/s, $b=0,9$ cm, $L=0$ cm e $P=2,5$ cm (Ensaio n.º 7), $t=5$ s e $t=40$ s e $Q=0,0861$ L/s, $b=0,6$ cm, $L=0$ cm e $P=2,5$ cm (Ensaio n.º 54), $t=5$ s e $t=40$ s.....	63
Figura 4.48 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para $Q=0,055$ L/s, $b=0,9$ cm, $L=0$ cm e $P=2,5$ cm (Ensaio n.º 7), $t=2$ m e $t=6$ m e $Q=0,0861$ L/s, $b=0,6$ cm, $L=0$ cm e $P=2,5$ cm (Ensaio n.º 54), $t=2$ min e $t=6$ min.....	63
Figura 4.49 – Gráfico celeridade obtido para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $L=0$ cm e $P=1$ cm (Ensaio n.º 1), e $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $L=0$ cm e $P=1$ cm (Ensaio n.º 41), instante 0 s até 60 s.....	64
Figura 4.50 – Gráfico celeridade obtido para $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $L=0$ cm e $P=1$ cm (Ensaio n.º 1), e $Q=0,0861$ L/s, $b=0,9$ cm, $L=0$ cm e $P=1$ cm (Ensaio n.º 41), instante 0 s até 10 min.....	64
Figura A.I.1 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 0 s .....	71
Figura A.I.2 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 5 s .....	71

Figura A.I.3 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 10 s.....	71
Figura A.I.4 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 15 s.....	72
Figura A.I.5 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 20 s.....	72
Figura A.I.6 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 25 s.....	72
Figura A.I.7 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 30 s.....	73
Figura A.I.8 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 40 s.....	73
Figura A.I.9 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 50 s.....	73
Figura A.I.10 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 1 min.....	74
Figura A.II.1 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 0 s.....	75
Figura A.II.2 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 5 s.....	75
Figura A.II.3 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 10 s.....	75
Figura A.II.4 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 15 s.....	76
Figura A.II.5 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 20 s.....	76
Figura A.II.6 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 25 s.....	76
Figura A.II.7 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 30 s.....	77
Figura A.II.8 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 40 s.....	77

Figura A.II.9 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 50 s .....	77
Figura A.II.10 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 1 min.....	78
Figura A.II.11 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 1:20 min .....	78
Figura A.II.12 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 1:40 min .....	78
Figura A.II.13 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 2:00 min .....	79
Figura A.II.14 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 2:30 min .....	79
Figura A.II.15 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 3:00 min .....	79
Figura A.II.16 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 4:00 min .....	80
Figura A.II.17 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 6:00 min .....	80
Figura A.II.18 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 8:00 min .....	80
Figura A.II.19 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 10:00 min .....	81



## INDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 – Valores utilizados para a realização dos ensaios .....	21
Tabela 3.2 – Distribuição granulométrica de areia e cores atribuídas à areia retida em cada peneiro .....	23
Tabela 3.3 – Condições experimentais $b=0,9$ cm e $Q=0,0861$ L/s com P e L variáveis .....	30
Tabela 3.4 – Condições experimentais $b=0,9$ cm e $Q=0,055$ L/s com P e L variáveis .....	30
Tabela 3.5 – Condições experimentais $b=0,6$ cm e $Q=0,0861$ L/s com P e L variáveis .....	31
Tabela 3.6 – Condições experimentais $b=0,6$ cm e $Q=0,055$ L/s com P e L variáveis .....	31
Tabela 3.7 – Condições experimentais $b=0,9$ cm, $Q=0,055$ L/s, $P=1$ cm e $L=0$ cm.....	32
Tabela 3.8 – Condições experimentais $b=0,9$ cm e $Q=0,0861$ L/s com P e L variáveis .....	32
Tabela 3.9 – Condições experimentais $b=0,6$ cm e $Q=0,0861$ L/s com P e L variáveis .....	33



## SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- b – Abertura da comporta, distância entre a superfície do fundo fixo e a comporta
- B - Largura da secção transversal
- d – Diâmetro característico
- $D_{50}$  – Diâmetro médio dos sedimentos
- Fr – Número de Froude
- $Fr_b$  – Número de Froude calculado em função da abertura na secção da comporta b
- $Fr_d$  – Número de Froude densimétrico
- $Fr_p$  – Número de Froude calculado em função da altura da água na secção a jusante
- g – Aceleração da gravidade
- h – Altura do escoamento
- HD – Máxima altura de deposição
- L – Distância entre a posição da comporta e a linha de fronteira do fundo fixo e fundo móvel
- P – Altura da soleira do descarregador a jusante da comporta
- Q – Caudal
- $Q_i$  – Caudal registado durante a realização do ensaio
- U – Velocidade média do escoamento
- $W_s$  – Velocidade de queda das partículas
- XD – Coordenada x para a qual ocorre a máxima altura de deposição na barra a jusante (HD)
- $X_{iD}$  – Coordenada x para a posição do perfil em que  $y=0$
- XS – Coordenada x para a qual ocorre a máxima profundidade da cavidade de erosão (YS)
- YS – Máxima profundidade da cavidade de erosão
- $Y_t$  – Altura do colchão de água a jusante da comporta
- $\sigma_g$  – Coeficiente de graduação da curva granulométrica do sedimento
- $\rho$  – Massa volúmica
- $\rho_s$  – Massa volúmica dos sedimentos
- $\sigma_D$  – Coeficiente de graduação da distribuição granulométrica
- $\nu$  – Viscosidade cinemática





# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

O fenómeno de erosão localizada junto de estruturas hidráulicas foi alvo da atenção de muitos investigadores, dada a sua importância na garantia de segurança das estruturas hidráulicas. A erosão localizada persistente pode levar à exposição das fundações dessas estruturas, causando assim uma ameaça à sua estabilidade (Aamir e Ahmad, 2016). Esta erosão é originada pela presença de obstáculos no leito, provocando cavidades de erosão (Euler e Herget, 2009). A título de exemplo refere-se o escoamento num rio, que quando se aproxima de um obstáculo origina alterações no escoamento que provocam a erosão do solo de fundação da estrutura, até que a cavidade de erosão atinja o estado de equilíbrio. A profundidade máxima de erosão depende das características geométricas das estruturas hidráulicas e do canal, das características do escoamento, das propriedades do fluido e dos sedimentos e do tempo (Couto e Cardoso 2001).

## 1.2 Objetivos

Com a realização da presente dissertação pretende-se estudar o comportamento de um leito de sedimentos ao longo da sua extensão (sejam partículas de areia ou esferas de vidro) a jusante de uma comporta vertical de abertura inferior, num pequeno canal hidráulico, para diferentes condições experimentais. Para tal, é desenvolvido um método experimental, baseado no registo em vídeo dos ensaios, que permite a posterior captação e processamento de imagens, adquiridas em instantes de tempo previamente definidos. O processamento é realizado com recurso a um código desenvolvido em Matlab, que permite efetuar, de forma expedita e eficaz, o reconhecimento automático da superfície do leito de sedimentos. A representação dos perfis permite estudar a evolução temporal dos perfis do leito de sedimentos e a influência de diferentes parâmetros, como o tipo de sedimentos, o caudal, o comprimento da bacia de dissipação, a abertura da comporta e a altura do escoamento a jusante, bem como a celeridade e o número de Froude densimétrico.

### **1.3 Organização da dissertação**

A dissertação está dividida em cinco capítulos. No primeiro apresenta-se a dissertação, os seus objetivos e a sua estrutura. O segundo capítulo é referente à revisão bibliográfica, apresentando-se uma síntese dos artigos e trabalhos já desenvolvidos sobre o tema, bem como alguns conceitos de base que permitem uma melhor compreensão de todos os fenómenos envolvidos. O terceiro capítulo descreve o método experimental utilizado e o tratamento de dados, apresentando-se, em pormenor, os equipamentos, materiais a analisar e condições experimentais utilizadas. O quarto capítulo apresenta os resultados dos ensaios experimentais e comparações entre os mesmos, visando uma melhor compreensão da erosão, transporte e deposição para dois tipos de sedimentos, areia e esferas de vidro. Por fim, o capítulo cinco apresenta as conclusões de todo o trabalho realizado e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se a síntese da bibliografia com maior relevância para o desenvolvimento da presente dissertação, dando ênfase aos artigos com estudos relativos à erosão a jusante de uma comporta com abertura inferior.

### 2.1 Propriedades dos sedimentos

A erosão é um processo provocado pela ação da corrente de escoamento, que escava e arrasta o material do leito (Richardson e Davies 2001). Origina-se desta forma o transporte sólido. As partículas transportadas pelos escoamentos, que estão expostas a fenômenos de erosão e deposição, podem ter diversas origens e propriedades. Estas afetam os escoamentos e a forma como se depositam ao longo dos leitos. As propriedades físicas dos sedimentos assumem um importante papel no processo de transporte sólido. Neste sentido, é possível selecionar diversas variáveis independentes que determinam os escoamentos fluviais (Cardoso, 1998).

Começa-se por apresentar as quatro variáveis do material do fundo: 1) Massa volúmica dos sedimentos, ( $\rho_S$ ); 2) Diâmetro característico, ( $d$ ); 3) Coeficiente de graduação da distribuição granulométrica, ( $\sigma_D$ ); 4) Velocidade de queda das partículas, ( $W_S$ ).

Seguem-se as variáveis das características do fluido, no qual os sedimentos se encontram submersos: 1) Massa volúmica, ( $\rho$ ); 2) Viscosidade cinemática, ( $\nu$ ).

Finalmente apresentam-se as características do escoamento. As quatro variáveis que se destacam são: 1) Aceleração da gravidade, ( $g$ ); 2) Velocidade média do escoamento, ( $U$ ); 3) Altura do escoamento, ( $h$ ); 4) Largura da secção transversal, ( $B$ ).

Importa fazer a distinção entre as propriedades das partículas, consideradas individualmente, e as propriedades das misturas granulométricas. De acordo com Cardoso (1998), os grãos que se encontram nos leitos de curso de água exibem diversas irregularidades de formas, o que dificulta a determinação das referidas dimensões. A forma dos grãos influencia a velocidade de transporte nos leitos fluviais, a sua densidade, que se transforma tendo em conta a composição mineralógica, e ainda a velocidade de queda ou sedimentação dos grãos.

No entanto, o fundo dos leitos dos cursos de água é essencialmente constituído por partículas de dimensões bastante diferentes, sendo necessário recorrer à análise dos diâmetros que constituem os mesmos, identificando assim a mistura granulométrica dos sedimentos. Esta análise pode ser efetuada através das distribuições granulométricas, definidas depois da peneiração mecânica. Os resultados podem ser exibidos, por exemplo, sob a forma de curvas de frequência acumuladas de acordo com a sua dimensão (Cardoso, 1998).

Neste sentido e definindo porosidade de uma dada mistura granulométrica como a percentagem de vazios num dado volume de sedimentos secos, pode constatar-se que a porosidade, dependendo da forma das partículas individuais, da arrumação entre diferentes diâmetros e da distribuição granulométrica, influencia o peso de misturas de partículas. A porosidade total refere-se a todos os vazios, incluindo aqueles que se encontram no interior dos grãos, por outro lado, a porosidade efetiva considera apenas os vazios interligados, com o objetivo de facilitar a passagem do fluido. Para caracterizar convenientemente uma mistura granulométrica é importante ter ainda em consideração o peso volúmico aparente seco, o ângulo de atrito e o ângulo de suporte (Cardoso, 1998).

## **2.2 Transporte de partículas**

São normalmente considerados dois tipos de transporte sólido, por arrastamento e em suspensão. Para além deste, Cardoso (1998) e Junior (2013) consideram relevante um terceiro tipo de transporte sólido, por saltação. Assim, o transporte sólido por arrastamento é concretizado por partículas que rolam e escorregam longitudinalmente sobre o fundo, estando as partículas em contacto com o leito quase permanentemente (Junior, 2013). Por sua vez, o transporte sólido em suspensão é efetuado com as partículas suportadas por componentes verticais das velocidades do escoamento turbulento, enquanto são transportadas por componentes horizontais dessas mesmas velocidades. Ainda que estas componentes horizontais sejam pequenas, são suficientes para que as partículas se mantenham em suspensão, podendo contactar esporadicamente com o fundo, ao contrário das anteriores. Finalmente o transporte sólido por saltação é realizado pelas partículas que saltam ao longo de um curso de água devido à corrente ou mesmo ao impacto causado por outras partículas (Junior, 2013). Na figura 2.1 é possível observar os três tipos de transporte sólido referidos anteriormente.

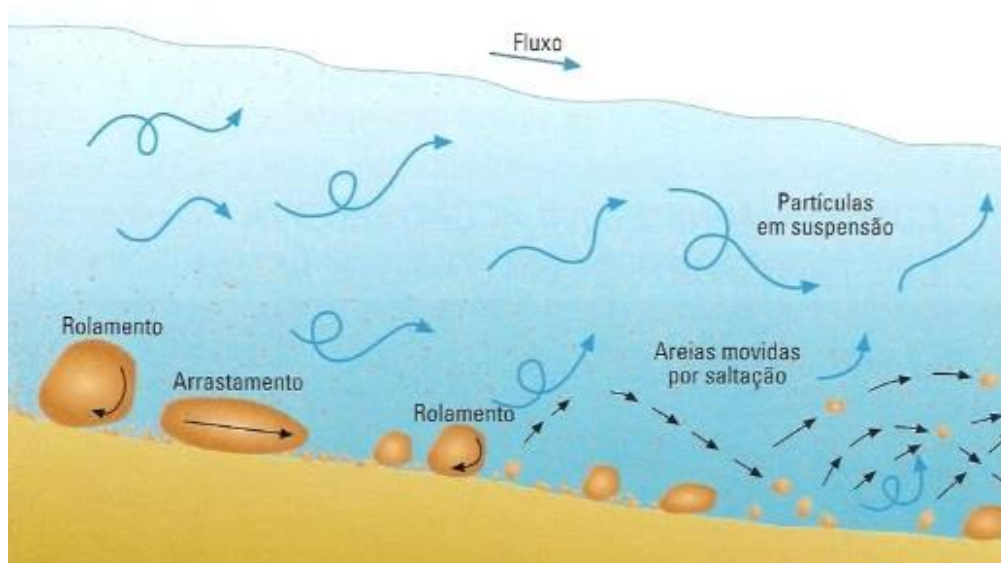


Figura 2.1 - Transporte sólidos: arrastamento, suspensão e saltação (Espírito Santo, 2012)

### 2.3 Configurações do fundo

Quando se observa um escoamento num rio ou canal com fundo móvel, constata-se que para pequenos valores de caudal, para determinados ângulos do leito e de equilíbrio, os sedimentos do fundo não se movem. No entanto, aumentando este caudal transportado observa-se o transporte aleatório de sedimentos, iniciando-se assim o transporte sólido (Cardoso, 1998). Ocorrendo o transporte sólido por arrastamento, o escoamento da água interage com o fundo móvel, o que determina a modelação do leito e, posteriormente, origina diferentes configurações do fundo (Cardoso, 1998).

Segundo Cardoso (1998) usualmente identificam-se três regimes de escoamento associados aos vários tipos de configurações de fundo. Estes regimes e as respectivas configurações de fundo são:

Regime inferior: 1) Leito plano inferior; 2) Rugas; 3) Rugas sobre dunas; 4) Dunas;

Regime de transição: 1) Dunas em desaparecimento; 2) Configurações instáveis;

Regime superior: 1) Leito plano superior; 2) Antidunas;

Foi considerado por Cardoso (1998) como mais relevantes as rugas, dunas, leito plano superior e antidunas.

As rugas têm cerca de 5 cm de altura, um comprimento de onda aproximadamente de 60 cm, sendo a sua extensão transversal geralmente bastante inferior à largura do fundo. A resistência ao escoamento é relativamente elevada: o valor do coeficiente  $K_S$  de Manning-Strickler varia entre 30 e 50  $m^{1/3}s^{-1}$ . À medida que a altura do escoamento aumenta, diminui a influência da rugosidade do fundo na resistência ao escoamento (Cardoso, 1998).

As dunas são as configurações de fundo mais frequentes, podendo desenvolver-se, teoricamente, para matérias de qualquer granulometria, com dimensões bastante maiores do que as rugas e comprimentos que podem atingir cinco a sete vezes a sua altura. Têm uma rugosidade entre 20 e 50  $m^{1/3}s^{-1}$  (Cardoso, 1998).

Tanto no caso das dunas como no das rugas observa-se a separação do escoamento junto à crista, formando-se uma zona a jusante no interior da qual ocorre uma recirculação conforme se representa na figura 2.2 (Cardoso, 1998). Na figura 2.2 é visível a configuração típica do escoamento sobre um fundo coberto por dunas, sendo patente a sua não uniformidade (Cardoso, 1998).

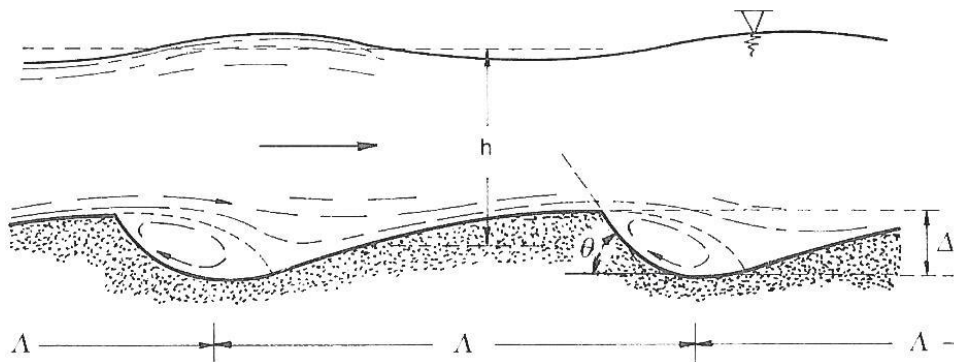


Figura 2.2 – Escoamento sobre um fundo com dunas (Cardoso, 1998).

Relativamente ao leito plano superior distingue-se do fundo plano inferior pela intensa mobilidade do material do fundo, com um 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 e 95  $m^{1/3}s^{-1}$ . A transição do regime de dunas para o regime de leito plano superior é caracterizado pela instabilidade das configurações do fundo, relacionada com a instabilidade do escoamento (Cardoso, 1998).

As antidunas (figura 2.3) ocorrem para números de Froude superiores à unidade, caso em que a superfície livre do escoamento se torna instável. Possuem uma forma sinusoidal e ao contrário das restantes configurações do fundo, não são estáveis, variando continuamente de geometria. O coeficiente  $K_S$  varia entre  $30$  e  $65 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$  (Cardoso, 1998).

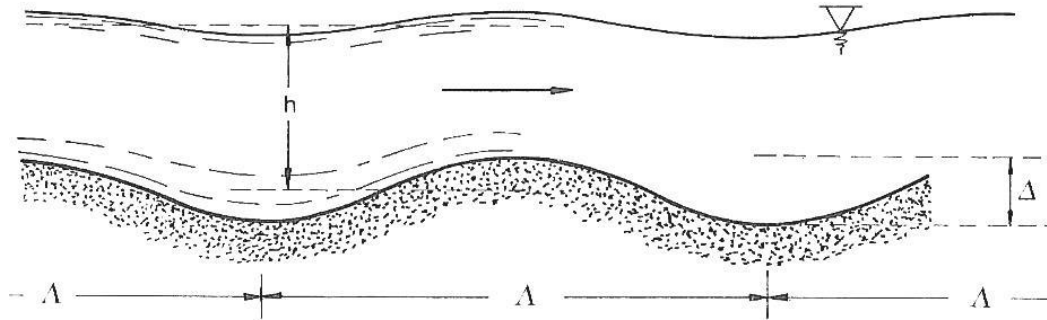


Figura 2.3 – Escoamento sobre um fundo coberto por antidunas (Cardoso, 1998)

Na figura 2.4 apresenta a evolução qualitativa do coeficiente  $K_S$  de Manning-Strickler num leito de areia fina em função da velocidade ou do caudal (Cardoso, 1998).

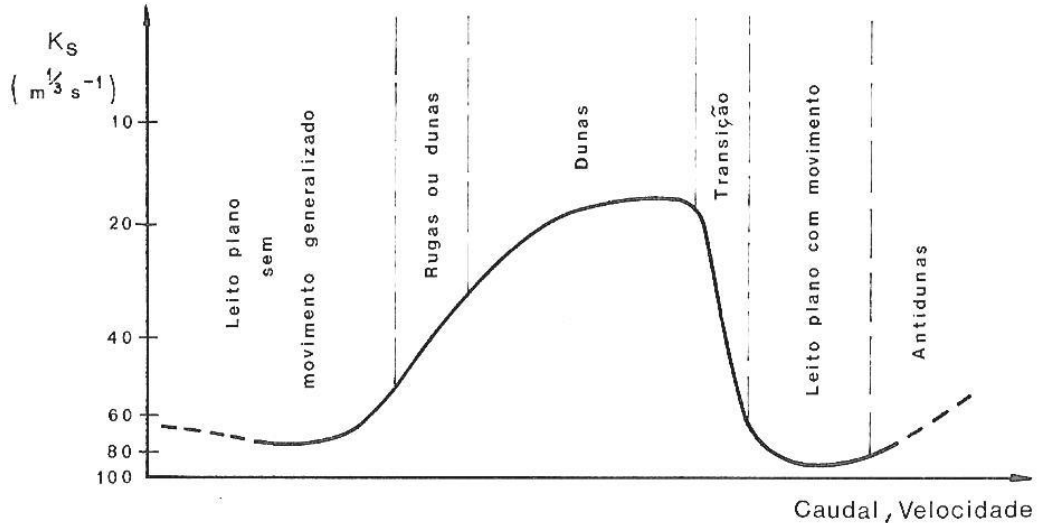


Figura 2.4 – Variação qualitativa de  $K_S$ , para um leito de areia, em função da velocidade ou do caudal (Cardoso, 1998)

## 2.4 Configurações do fundo a jusante de cavidades de erosão

Oliveto e Hager (2014) apresentaram um estudo no qual caracterizam a formação de barras a jusante dos elementos de uma ponte, considerando os mesmos como causadores da erosão localizada. As conclusões deste estudo completaram trabalhos realizados anteriormente pelos mesmos autores (Oliveto e Hager, 2002; 2005). Este estudo foi importante no sentido de verificar e confirmar modelos numéricos destinados a prever o comportamento de erosão nestes contextos (Oliveto e Hager, 2014). Na figura 2.5 apresenta-se uma representação do desenvolvimento temporal de uma barra, em que  $h_o$  é a altura do colchão de água a montante do pilar;  $h_d$  é a altura do colchão de água a jusante do pilar;  $y_{D,max}$  e  $x_{D,max}$  é a máxima altura de deposição e respetiva ordenada;  $y_D(t)$  e  $x_D(t)$  é a altura de deposição ao longo do tempo e respetiva ordenada.

Estes autores observaram que as barras a jusante de pilares ou encontros de pontes tendem a propagar-se com uma celeridade relativa (definida como o quociente entre a celeridade da duna e  $(gh_o)^{1/2}$ ) aproximadamente igual a  $0.5 \times 10^{-4}$ , i.e. menor que a velocidade de barras ou dunas em rios.

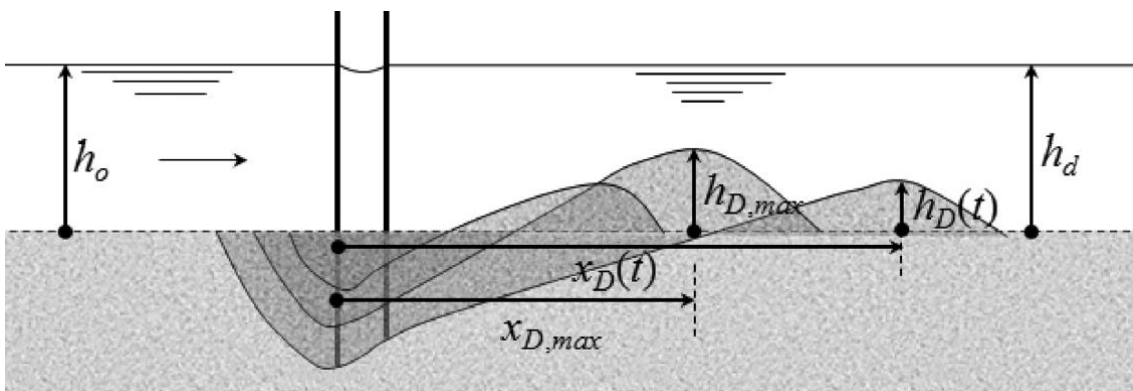


Figura 2.5 - Desenvolvimento temporal de uma duna (Oliveto e Hager, 2014)

## 2.5 Erosão a jusante de comporta com abertura inferior

Um dos problemas mais estudados em Hidráulica prende-se com a erosão devido ao escoamento, nomeadamente a erosão localizada em pilares, barragens e soleiras descarregadoras. Neste sentido, e com o objetivo de controlar a erosão, foram elaborados ao longo dos anos vários estudos. De seguida, apresenta-se uma síntese de alguns estudos relativos a este tema.



Dey e Sarkar (2006) analisaram a velocidade e turbulência em jatos submersos. Apresenta-se na figura 2.6 uma representação da configuração experimental com fundo fixo. Os referidos autores sugerem diversas combinações de parâmetros experimentais para fundo fixo e fundo móvel. Assim, para calcular o rácio da submersão ( $S$ ) e altura do colchão de água a jusante de um salto livre ( $h_j$ ) usaram as equações 1 e 2.

$$h_j = 0,5b(\sqrt{1 + 8F^2} - 1) \quad [1]$$

$$S = \frac{h_t - h_j}{h_j} \quad [2]$$

Nestas,  $F$  é o número de Froude referente à comporta,  $b$  a altura da abertura da comporta,  $h_t$  a altura do colchão de água a jusante da estrutura hidráulica e  $L$  o comprimento do fundo fixo.

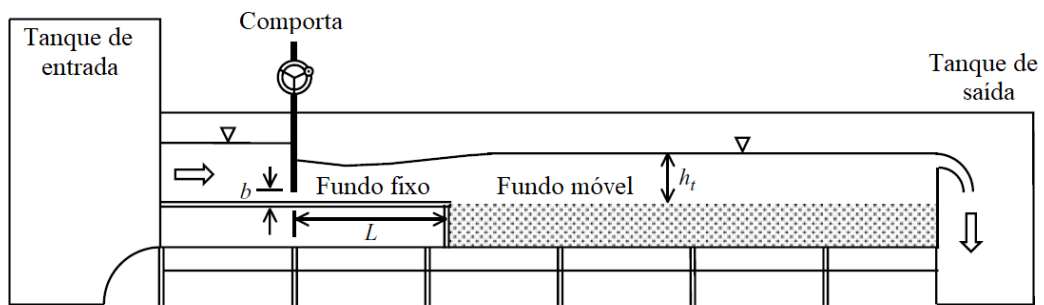


Figura 2.6 - Esquema da configuração experimental do fundo fixo (Dey e Sarkar, 2006)

Dey e Sarkar (2016) estudaram a colocação de um material com dimensões maiores imediatamente a jusante do fundo fixo e concluíram que há uma redução da profundidade máxima de erosão a jusante. Na figura 2.7 apresenta-se um esquema da configuração experimental do fundo no final de um ensaio, sem a colocação do material de maiores dimensões. Na figura 2.8 e 2.9 apresenta-se um esquema da configuração experimental do fundo de material com dimensões maiores antes e no final do ensaio.

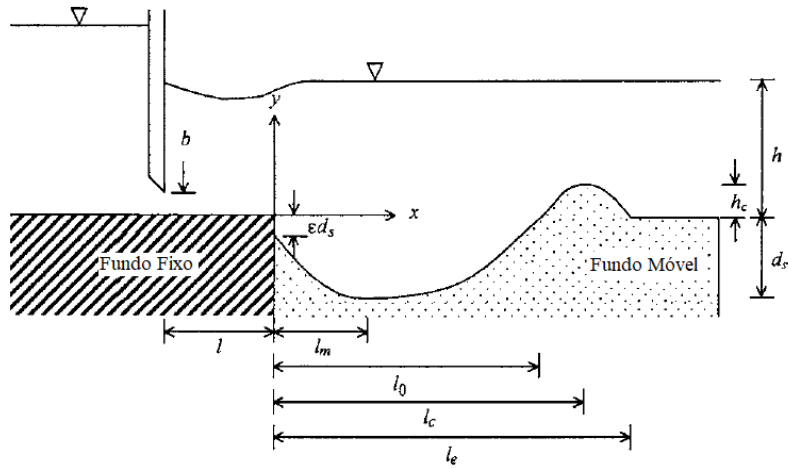


Figura 2.7 - Esquema da configuração experimental do fundo depois de sofrer erosão (Dey e Sarkar, 2006)

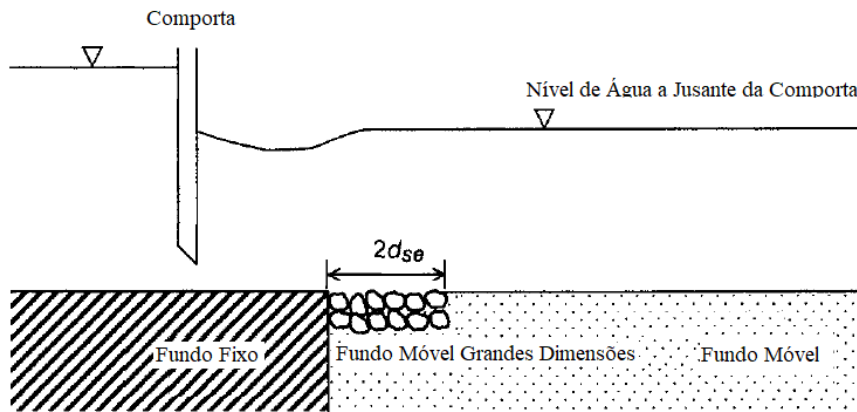


Figura 2.8 - Esquema da configuração experimental do fundo antes do ensaio (Dey e Sarkar, 2006)

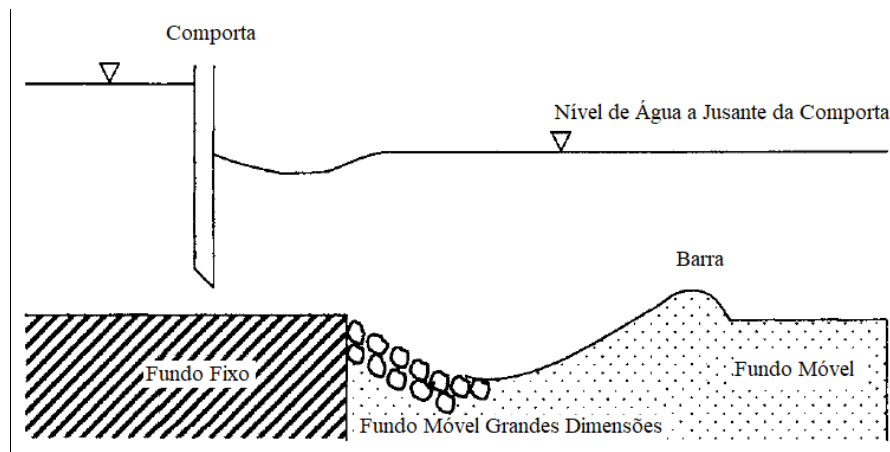


Figura 2.9 - Esquema da configuração experimental do fundo depois do ensaio (Dey e Sarkar, 2016)

As conclusões daqui extraídas levaram a estudar a redução da profundidade de erosão devido à colocação de material de maiores dimensões imediatamente a jusante do fundo

rígido; a redução média foi de 39%, com um máximo de 57,3% e um mínimo de 16,2% (Dey e Sarkar, 2016).

O estudo realizado por Faruque et al. (2006) aborda o escoamento proveniente de uma secção transversal quadrada provocando um jato direcionado para uma câmara de areia em formato tridimensional. As experiências foram realizadas para diversas condições experimentais, definidas por diferentes valores da dimensão da secção transversal, do caudal escoado e do número do Froude densimétrico. Na figura 2.10 apresentam-se as vistas em planta e em corte de um exemplo de ensaio e todos os parâmetros envolvidos. A interação do escoamento com o leito origina a movimentação dos sedimentos de areia para jusante com velocidade superior à velocidade de expansão na direção lateral. A forma da escavação e da deposição das partículas é apresentada na figura 2.10 com a vista em plano e em secção. Os resultados indicam que o número de Froude densimétrico, o caudal e o índice do tamanho dos sedimentos influenciam coletivamente a extensão de erosão causada por jatos 3D.

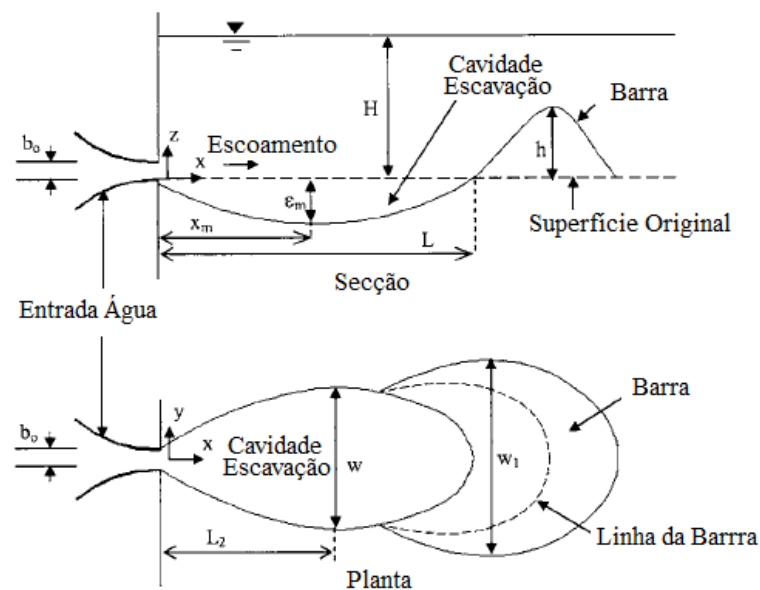


Figura 2.10 – Definição de parâmetro de erosão com vista da secção e do plano (adaptado de Faruque et al. (2006))

Dargahi (2010) desenvolveu estudos experimentais num descarregador de cheias com bacia de dissipação visível na secção de teste da figura 2.11. O autor observou a erosão a jusante do descarregador e detetou escoamentos secundários derivados de um sistema de

vórtice induzido por um ressalto hidráulico. O autor percebeu que a formação da cavidade de erosão está relacionada com o material do fundo e com o caudal descarregado. Neste sentido, a variação temporal do leito originou alterações consideráveis na fronteira, que geraram padrões de transporte complicados que abrangiam todos os meios de transporte (Dargahi, 2010).

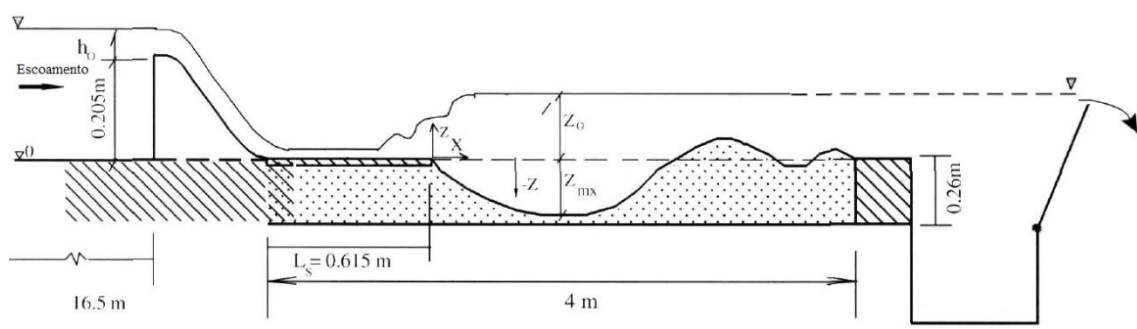


Figura 2.11 – Seção de teste descarregador de soleira (Dargahi, 2010)

De acordo com Melville e Lim (2014) o principal dano às estruturas hidráulicas fluviais ocorre durante as inundações, sendo a escavação do leito do rio a principal causa de estragos. A erosão é um fenômeno natural causado pelo escoamento de água nos rios e ribeiros, que ocorre quando a capacidade erosiva do escoamento excede a capacidade de resistência das partículas do leito. Assim, a erosão é mais acentuada em materiais de pequenas dimensões, mas também pode ocorrer em sedimentos e em rocha, especialmente rocha profundamente degradada.

A erosão provocada a jusante pela comporta é um exemplo de erosão provocada por jatos submersos horizontais. Esses jatos são bidimensionais (2D) quando a proporção de largura para espessura (ou profundidade) do escoamento do jato é ampla. Os jatos horizontais 2D podem ocorrer como jatos submersos e como jatos aderentes. O grau de submersão do jato e o nível de dissipação da energia associado ao mesmo, afetam a redução da capacidade de escoamento (Melville e Lim, 2014).

Na figura 2.12 apresenta-se um diagrama que define a erosão provocada por jatos horizontais 2D, ilustrando uma situação típica de uma cavidade de erosão a jusante da comporta com abertura inferior ( $y_j$ ), (Melville e Lim, 2014).

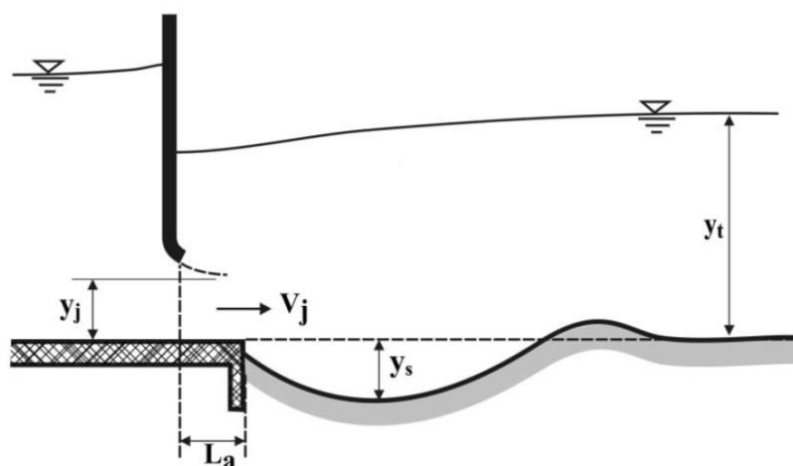


Figura 2.12 – Diagrama de definição para erosões locais provocadas por jatos horizontais 2D (Melville e Lim, 2014)

A equação 3 permite estimar a máxima profundidade de erosão (Melville e Lim, 2014),

$$\frac{y_s}{y_j} = C F r_j K_D K_{yt} K_\sigma K_L K_r \quad [3]$$

Sendo  $C$  um coeficiente e os valores  $K$  são fatores de multiplicação que expressam a influência do tamanho dos sedimentos ( $K_D$ ), caudal ( $K_{yt}$ ), graduação dos sedimentos ( $K_\sigma$ ), comprimento do fundo fixo ( $K_L$ ) e características do enrocamento ( $K_r$ ).

Foi analisada por estes autores a influência do número de Froude da comporta ( $F r_j$ ), do comprimento do fundo fixo ( $L$ ) e da altura do colchão de água ( $Y_t$ ) em relação à cavidade de erosão ( $Y_s$ ).

Segundo Aamir e Ahmad (2016), o fenómeno da escavação perto de estruturas hidráulicas atraiu a atenção de muitos investigadores devido à sua importância em garantir a segurança das estruturas hidráulicas. Neste sentido, o escoamento constante pode levar à exposição das fundações das estruturas, causando assim uma ameaça à sua estabilidade. O escoamento a jusante de um fundo rígido sob jatos de parede submersos provoca movimento dos sedimentos que ocorre quando a capacidade erosiva do jato excede o limite de atrito do leito. Na figura 2.13 apresenta-se um esquema da definição de parâmetros segundo Aamir e Ahmad (2016).

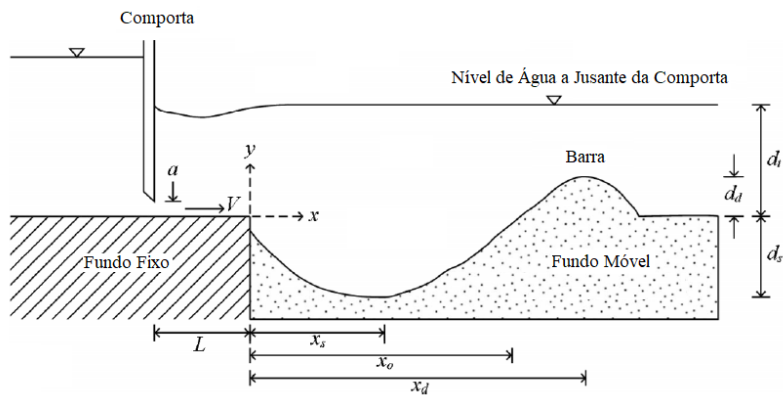


Figura 2.13 – Definição de parâmetros (adaptado de Aamir e Ahmad, 2016)

O trabalho de Aamir e Ahmad (2016) tem como principal objetivo conhecer e compreender as investigações realizadas anteriormente sobre o tema, tendo como finalidade a comparação dos resultados dos diferentes investigadores. Desta maneira foi possível a estes autores determinar o efeito de diferentes parâmetros no estudo da máxima profundidade de erosão.

#### A - Efeito do tamanho das partículas e da graduação dos sedimentos

Ali e Neyshaboury (1991), citado em Aamir e Ahmad (2016), relataram que, para uma altura e velocidade constante do jato, o volume da cavidade de erosão num determinado instante aumenta com a diminuição do tamanho dos sedimentos que é apresentado na figura 2.14.

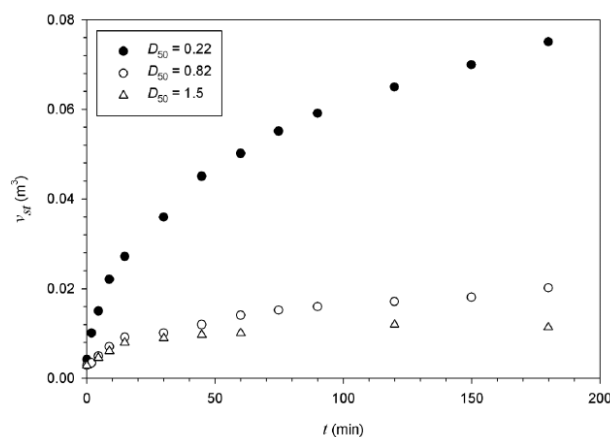


Figura 2.14 – Variação do volume da cavidade de erosão com o tempo para diferentes tamanhos de sedimentos, Ali e Neyshaboury, (citado em Aamir e Ahmad, 2016)

## B – Efeito do nível de água imediatamente a jusante da comporta

Rajaratnam e Macdougall (1998), citado em Aamir e Ahmad (2016), estudaram a erosão por jatos de parede com um caudal mínimo ( $d_t=a$ ), considerando  $d_t$  altura da água imediatamente a jusante da comporta, suficiente apenas para preencher a abertura da comporta e um caudal maior ( $d_t>a$ ) que coloca o jato profundamente submerso. Foi constatado pelos autores que nos ensaios com caudal menor, ao contrário do que acontece com caudal maior, não se verifica a formação da barra de deposição a jusante da cavidade de erosão. A figura 2.15 mostra a variação da profundidade máxima da cavidade de erosão relativamente à abertura da comporta ( $d_s/a$ ) em função do número de Froude densimétrico ( $F_d$ ), na qual se verifica que para uma profundidade máxima de erosão corresponde igualmente um caudal maior.

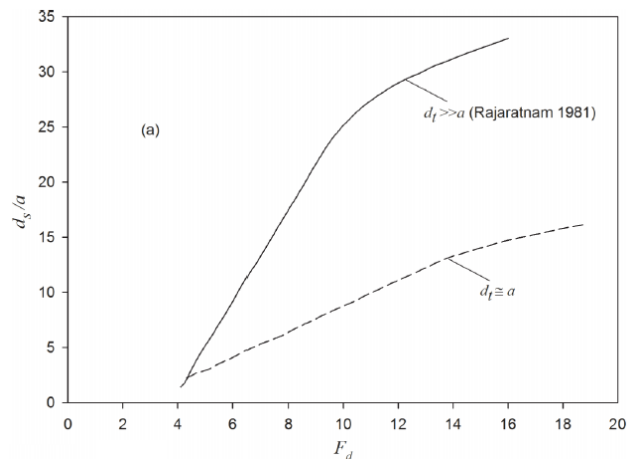


Figura 2.15 – Variação de  $d_s/a$  relativamente a  $F_d$ , Rajaratnam e Macdougall, (citado em Aamir e Ahmad, 2016)

A variação do comprimento até à crista da barra e a abertura da comporta ( $x_d/a$ ) relativamente a Froude densimétrico ( $F_d$ ) é mostrada na figura 2.16. Verifica-se que a curva para a condição mínima do caudal está um pouco acima da curva para o caudal maior, indicando que a secção máxima da profundidade de erosão está localizada mais a jusante da comporta.

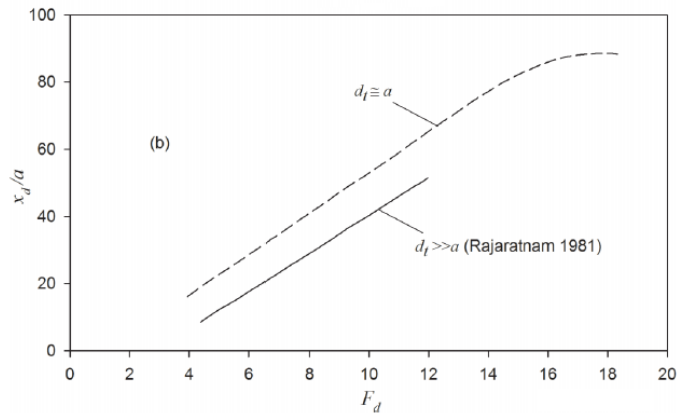


Figura 2.16 – Variação de  $x_d/a$  relativamente a  $F_d$ , Rajaratnam e Macdougall, (citado em Aamir e Ahmad, 2016)

### C - Efeito da rugosidade do fundo fixo

Ali, et. al. (2014), citado em Aamir e Ahmad (2016), estudaram o efeito de um fundo fixo com rugosidade artificial nos jatos submersos. Foram utilizados diferentes fundos fixos com rugosidade artificial, com diferentes espaçamentos, tendo sido possível analisar as diferenças, de acordo com a figura 2.17. Nesta figura,  $w$  é o comprimento de onda entre tiras,  $t'$  é a altura da tira triangular e  $b$  é a largura da base do fundo ondulado. Foi analisada a redução percentual média na profundidade máxima de erosão e no comprimento da cavidade de erosão, apresentando, para areia, valores de 63,4% e 30,2%, respectivamente. Para areia grosseira, a percentagem média encontrou-se nos valores de 44,2% e 20,6%, respetivamente para a profundidade máxima de erosão e para o comprimento. Além disso, as dimensões mínimas de escoamento ocorreram na razão de espaçamento ideal de  $w / t' = 3$ .

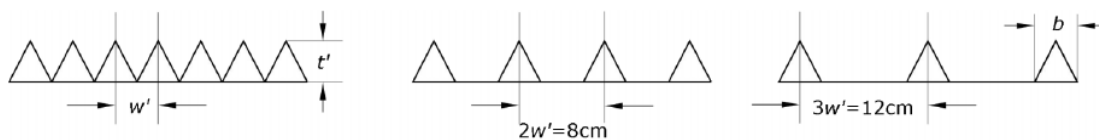


Figura 2.17 – Fundos fixos com rugosidade artificial (Ali, et. al. (2014), citado em Aamir e Ahmad (2016))



#### D - Efeito do número de Froude densimétrico

Ali e Neyshaboury (citado em Aamir e Ahmad, 2016) estudaram o efeito do número de Froude densimétrico ( $F_d$ ) e concluíram que a profundidade máxima de erosão aumenta com o aumento do número de Froude densimétrico ( $F_d$ ). Dey e Sarkar (2006) também observaram o aumento da profundidade máxima de erosão com aumento do número de Froude densimétrico ( $F_d$ ).



### 3. MÉTODO EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se a descrição da instalação experimental, das tarefas executadas em laboratório, assim como das ferramentas utilizadas no tratamento de dados.

#### 3.1 Instalação experimental

Na realização dos trabalhos experimentais foi utilizado um pequeno canal hidráulico (figura 3.1) alimentado a partir de uma bancada hidráulica *Armfield* no Laboratório de Hidráulica Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil, nas instalações da Universidade do Minho, Campus de Azurém.



Figura 3.1 – Canal hidráulico

A bancada hidráulica *Armfield* funciona em circuito fechado, ou seja, a água após ser elevada a partir de um reservatório de montante, por efeito de uma bomba centrífuga, e escoada no canal, regressa a esse mesmo reservatório, para posteriormente retomar o mesmo ciclo. O caudal pretendido no canal é estabelecido através de uma válvula instalada a jusante da bomba.

O canal, constituído por placas de vidro acrílico, tem 615 mm de comprimento, uma secção transversal com 150 mm de altura e 15 mm de largura. Do ponto de vista de análise, pode considerar-se que o escoamento que se desenvolve no interior do canal é bidimensional. No trecho inicial do canal colocou-se um fundo fixo com uma extensão de 120 mm, seguido de um fundo móvel materializado através de uma caixa de sedimentos com 62 mm de altura. Para a realização dos ensaios fez-se uso de uma placa vertical cortada em bisel, amovível e que simulou a comporta vertical de soleira delgada com abertura inferior (figura 3.2). Esta comporta podia ser colocada em diferentes posições ao longo do trecho inicial de fundo fixo do canal, simulando-se assim diferentes extensões da bacia de dissipação. De referir que foi colocada uma proteção na bancada que consiste numa rede de pequena abertura para evitar que os sedimentos (areia ou esferas de vidro), provenientes do canal, entrassem no reservatório do banco hidráulico e prejudicassem o bom funcionamento da bomba centrífuga.



Figura 3.2 – Comporta vertical de soleira delgada com abertura inferior

Na figura 3.3 apresenta-se um esquema com todas as variáveis experimentais e variáveis em estudo. Os valores utilizados para a realização dos ensaios apresentam-se na tabela seguinte:

Comporta de abertura inferior (b)	0,6 cm		0,9 cm	
Altura de soleira do descarregador (P)	1 cm		2,5 cm	
Caudal escoado no canal (Q)	0,055 L/s		0,0861 L/s	
Distância à linha de fronteira entre o fundo móvel e o fundo fixo (L)	0 cm	6 cm	8 cm	10 cm

Tabela 3.1 – Valores utilizados para a realização dos ensaios

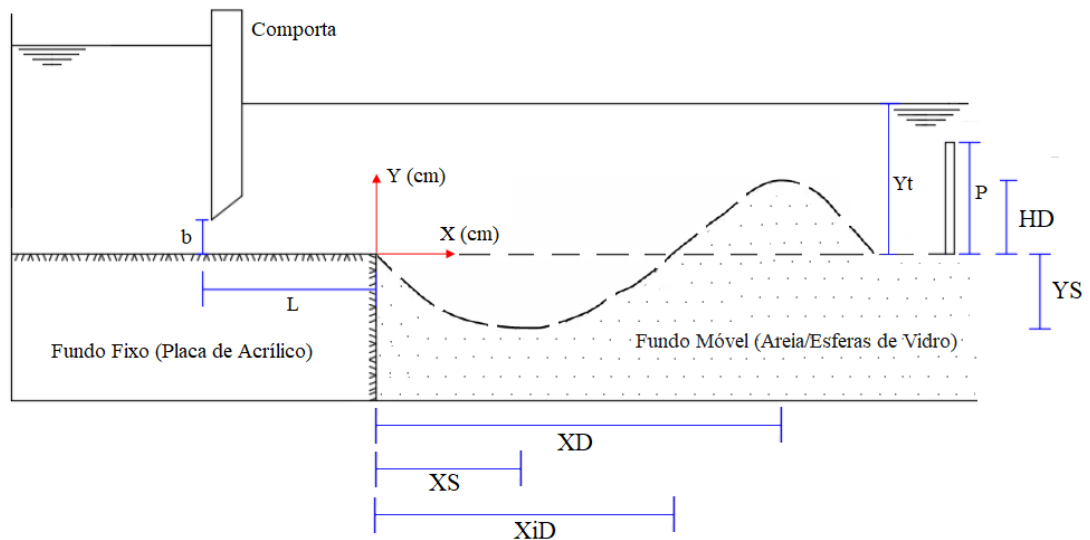


Figura 3.3 – Esquema das condições experimentais e variáveis em estudo

A realização dos ensaios permitiu o estudo da máxima altura de deposição (HD) e respetiva ordenada (XD), da máxima profundidade da cavidade de erosão (YS) e respetiva ordenada (XS) e do (XiD) correspondente à ordenada x para a posição do perfil em que  $y=0$ .

### 3.2 Parâmetros experimentais

Nesta subsecção apresentam-se os parâmetros adoptados para a realização dos ensaios, sedimentos e o caudal.

### 3.2.1 Sedimentos

Nesta subsecção caracterizam-se os diferentes sedimentos utilizados nos ensaios: areia, natural e pintada, e esferas de vidro.

- **Areia natural e areia natural pintada**

Na realização dos ensaios foi utilizada uma areia natural com diâmetro médio  $D_{50}=0,328$  mm e coeficiente de graduação da curva granulométrica  $\sigma_g=1,3$ . Os grãos de areia foram pintados com tinta em *spray*. A pintura, com diferentes cores, dos grãos de areia com diferentes diâmetros permitiu analisar o movimento dos referidos grãos ao longo do ensaio e a forma como se depositam no leito de acordo com o diâmetro. De seguida apresenta-se a tabela 3.2 com a distribuição granulométrica, da areia e as cores atribuídas a cada peneiro. A areia existente no laboratório foi peneirada recorrendo aos peneiros da figura 3.4, tendo-se obtido uma quantidade suficiente para formar 3 kg da referida areia, dividida em sacos de acordo com cada diâmetro.



Figura 3.4 – Peneiros utilizados na granulometria da areia

No que se refere à divisão da areia, foi previamente definido que, com o objetivo de obter uma análise pormenorizada do comportamento das partículas de areia, a amostra da

mesma seria dividida em três amostras, da seguinte forma: uma amostra com uma massa de 1kg para pintar em diferentes cores de acordo com cada diâmetro das partículas, outra amostra com uma massa de 1 kg não seria pintada para ver o comportamento da areia sem estar pintada e finalmente uma amostra com uma massa de 1 kg de areia que seria reservada para suprir um eventual imprevisto.

N.º Peneiro	Diâmetro das partículas (mm)	Retidos (%)	Cor
200	0,074	0,4	Vermelho
140	0,105	0,5	Preto
80	0,18	14,1	Laranja
60	0,25	80,38	Não pintada
40	0,43	4,42	Azul
20	0,85	0,2	Verde

Tabela 3.2 – Distribuição granulométrica de areia e cores atribuídas à areia retida em cada peneiro

Depois de obtida a quantidade exata em cada saco, correspondente a cada peneiro, introduziu-se o *spray* no saco e descarregou-se uma pequena quantidade de tinta. De seguida envolveu-se muito bem as partículas com a tinta colocada no saco, de forma a evitar a colagem entre partículas enquanto a pintura ia secando (figura 3.5).



Figura 3.5 – Mistura das areias pintadas

Com a finalidade de acelerar a fase de secagem das partículas foi utilizado um ventilador, que estimula a circulação do ar dentro do saco e, paralelamente, movimentam-se as partículas manualmente (figura 3.6).



Figura 3.6 – Secagem e movimentação das areias

Seguidamente, tendo sido garantido que a areia estava bem seca, sem partículas coladas e devidamente dividida por granulometria (figura 3.7), procedeu-se à mistura da areia num só saco, perfazendo assim 1 kg de areia pintada. Importa mencionar que existiu o cuidado de misturar todo este material da melhor forma possível, para assim evitar a concentração de areia do mesmo peneiro e garantir que ficava bem misturada, através da agitação permanente do saco de areia durante um determinado período de tempo.



Figura 3.7 – Individualização da granulometria das areias por areia retida em cada peneiro



- **Esferas de vidro**

Na realização dos ensaios foram utilizadas esferas de vidro (figura 3.8), com um diâmetro de 2 mm, conforme ilustrado na figura 3.9.



Figura 3.8 – Esferas de vidro



Figura 3.9 – Paquímetro digital

### 3.2.2 Caudal

Para a calibração do caudal, em cada ensaio foi utilizada uma proveta com 500 mL de capacidade máxima e 1 mL de resolução, e um cronómetro digital manual, adoptando-se

como tempo de referência 10 s. Previamente, foi calculado o tempo necessário para encher a referida proveta com o caudal pretendido. Assim, foi-se ajustando a válvula por tentativa-erro até acertar o volume exato de água presente na proveta, ao fim de 10 s. Realizaram-se medições do caudal durante o ensaio para aferir a constância do mesmo.

### 3.3 Procedimento experimental

Na primeira fase do trabalho de laboratório foram realizados vários ensaios experimentais, com o objetivo de melhorar a qualidade dos mesmos, bem como as condições de filmagem. Primeiramente foi definido o local do laboratório para colocar o banco didático *Armfield*, tendo existido o cuidado de garantir que, ao longo da fase de realização dos ensaios mantivesse a sua posição. Seguidamente, colocou-se um fundo branco por trás do canal para garantir a qualidade das filmagens, bem como a colagem de uma escala na parte inferior do canal, para auxiliar no decorrer do tratamento de dados dos ensaios. Para apoiar a máquina de filmar (Sony HDR-XR105E Full HD 1080), foi colocado no chão do laboratório um tripé e, marcada a sua posição para que não se alterasse ao longo dos vários ensaios.

Na imagem da figura 3.10 é possível confirmar a montagem do cenário dos ensaios nesta fase.



Figura 3.10 – Canal com o tripé e câmara de filmar

Durante a execução dos testes preliminares percebeu-se a necessidade fazer alguns ajustes para garantir o bom desenvolvimento do trabalho nomeadamente a instalação de um foco de luz acima da câmara de filmar, direcionado para o canal, melhorando significativamente a quantidade e qualidade da luz. Atendendo à instabilidade demonstrada pelo tripé, colocou-se uma barra em aço apoiada em dois lados, um deles na banca do laboratório e o outro numa estante, o que garantiu o nivelamento da respetiva barra. Finalmente para garantir uma qualidade mínima nas imagens para posterior análise, a solução passou por aumentar o *zoom* e definir duas posições para colocar a câmara de filmar. Desta forma, resolveu-se subdividir o ensaio em duas partes, isto é, num primeiro momento fez-se o ensaio em que se filmou a primeira parte do canal. Num segundo momento, fez-se um novo ensaio em que se filmou a segunda parte do canal. Na figura 3.11 é possível observar as alterações preconizadas.



Figura 3.11 – Canal com as condições de luz e captação de imagem ideais

No caso das esferas de vidro e para garantir o contraste e uma correta identificação do leito, colocou-se uma cartolina preta atrás da secção de teste como mostra a figura 3.12.

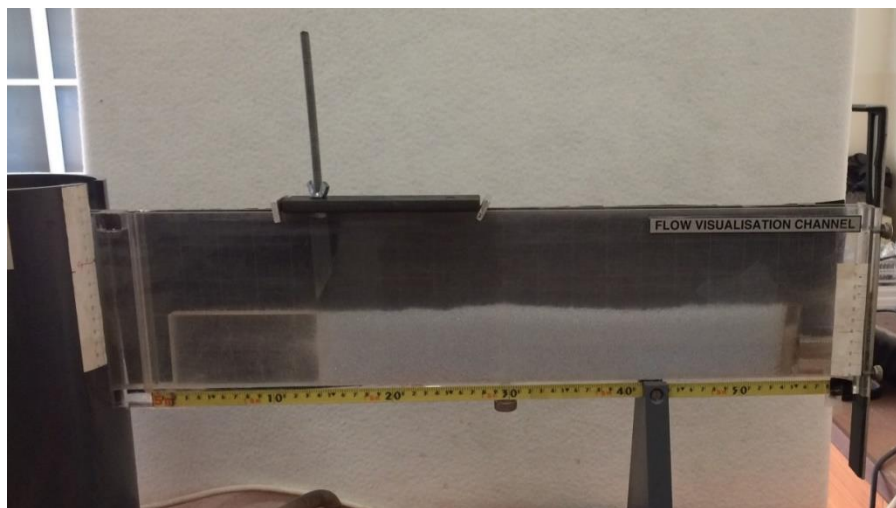


Figura 3.12 – Canal hidráulico com fundo preto

Com o sistema completamente mecanizado e com os procedimentos iniciais de cada ensaio acertados, efetua-se o nivelamento da superfície do material em análise antes da abertura da válvula que permite iniciar a circulação da água. Uma vez estabelecida a condição experimental a estudar, a válvula é aberta e permite-se ao caudal estabilizar, medindo-se e acertando-se o caudal se necessário. Inicia-se o registo vídeo do ensaio, e o instante em que o ensaio começa (instante 0 segundos) é aquele em que se coloca a comporta na posição definida para o ensaio.

No decorrer dos ensaios, que podem ter durações muito diferentes entre um valor mínimo de 60 segundos e um valor máximo 16 minutos, regista-se novamente o caudal para maior confiança no método experimental. Considera-se que o ensaio termina quando se observa que os sedimentos estão a sair na extremidade de jusante do canal ou quando o perfil longitudinal do leito de sedimentos não apresenta alterações visíveis a olho nu. Para finalizar, retira-se a comporta e recomeça-se o ciclo para um novo ensaio. De salientar que nos ensaios de areia, de três em três ciclos de ensaios é necessário retirar toda a areia, misturar a mesma fora do canal e voltar a colocar, para assim garantir uma distribuição de todas as dimensões das partículas de areia em toda a profundidade e extensão do canal.

### 3.4 Condições experimentais

Foram realizados um total de 60 ensaios com areia natural pintada, areia natural e esferas de vidro onde os mesmos estão apresentados nas tabelas das subsecções seguintes,

onde mostram os valores do caudal (Q), valores do comprimento da bacia de dissipação (L), valores da abertura da comporta (b), valores da altura da soleira do descarregador a jusante (P) que condiciona a altura do colchão de água a jusante, bem como a indicação do valor da medição do caudal registado durante a realização dos ensaios (Qi), os dados da experiência com a nomenclatura de cada ensaio e respetiva duração e por fim a referência, se assim for o caso da repetição de um ensaio.

São calculados três valores do número de Froude em que o primeiro é calculado em função da abertura na secção da comporta b (Frb).

$$Frb = \frac{U}{\sqrt{gb}} \quad [4]$$

O segundo é calculado em função da altura da água na secção a jusante (Frp).

$$Frp = \frac{U}{\sqrt{g Yt}} \quad [5]$$

O terceiro é designado Froude densimétrico (Frd).

$$Frd = \frac{U}{\sqrt{(ds - 1) g D_{50}}} \quad [6]$$

Foi considerado para efeitos de cálculo, no caso da areia pintada uma densidade  $ds=2,44$  e diâmetro  $D_{50}=0,328$  mm e no caso das esferas de vidro  $ds=2,6$  e  $D_{50}=2$  mm.

Todas as restantes variáveis das três equações dependem diretamente das condições experimentais de cada ensaio.

### **3.4.1 Fundo composto – Areia pintada**

Foram realizados um total de 38 ensaios com areia natural pintada, sendo que seis dos ensaios (ensaio nº 33, 34, 35, 36, 37 e 38) foram repetidos para testar a repetibilidade dos ensaios (tabelas 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6).

		b=0,9 cm								
		Q=0,0861 L/s = 860 mL/10s								
		L (cm)	Qi (mL/10s)	Frb	Frp	Frd	Yt (cm)	Dados Experiência		Repetição
Número	Duração									
P=1 cm	1ªParte	0	830	2,07	0,329	9,03	3,07	1.A	60 segundos	
	2ªParte		830					1.B	60 segundos	
	1ªParte	0	850	2,12	0,285	9,25	3,42	33.A	60 segundos	SIM
	2ªParte		850					33.B	60 segundos	
	1ªParte	6	800	1,99	0,273	8,71	3,38	2.A	10 minutos	
	2ªParte		800					2.B	10 minutos	
	1ªParte	8	860	2,14	0,294	9,36	3,38	17.A	6 minutos	
	2ªParte		860					17.B	6 minutos	
1ªParte	10	860	2,14	0,274	9,36	3,54	18.A	8 minutos		
2ªParte		850					18.B	8 minutos		
P=2,5 cm	1ªParte	0	790	1,97	0,166	8,60	4,69	3.A	4 minutos	
	2ªParte		790					3.B	4 minutos	
	1ªParte	6	830	2,07	0,177	9,03	4,63	4.A	8 minutos	
	2ªParte		830					4.B	8 minutos	
	1ªParte	6	810	2,02	0,154	8,81	5,00	34.A	6 minutos	SIM
	2ªParte		810					34.B	6 minutos	
	1ªParte	8	840	2,09	0,173	9,14	4,74	19.A	8 minutos	
	2ªParte		840					19.B	8 minutos	
1ªParte	10	840	2,09	0,152	9,14	5,16	20.A	8 minutos		
2ªParte		840					20.B	8 minutos		

Tabela 3.3 – Condições experimentais b=0,9 cm e Q=0,0861 L/s com P e L variáveis

		b=0,9 cm								
		Q=0,055 L/s = 550 mL/10s								
		L (cm)	Qi (mL/10s)	Frb	Frp	Frd	Yt (cm)	Dados Experiência		Repetição
Número	Duração									
P=1 cm	1ªParte	0	520	1,30	0,234	5,66	2,81	5.A	12 minutos	
	2ªParte		480					5.B	12 minutos	
	1ªParte	0	530	1,32	0,261	5,77	2,65	35.A	14 minutos	SIM
	2ªParte		530					35.B	14 minutos	
	1ªParte	6	480	1,20	0,236	5,22	2,65	6.A	6 minutos	
	2ªParte		490					6.B	6 minutos	
	1ªParte	8	530	1,32	0,231	5,77	2,88	21.A	8 minutos	
	2ªParte		530					21.B	8 minutos	
1ªParte	10	530	1,32	0,226	5,77	2,92	22.A	10 minutos		
2ªParte		530					22.B	10 minutos		
P=2,5 cm	1ªParte	0	550	1,37	0,144	5,99	4,05	7.A	16 minutos	
	2ªParte		530					7.B	16 minutos	
	1ªParte	6	550	1,37	0,145	5,99	4,02	8.A	8 minutos	
	2ªParte		550					8.B	8 minutos	
	1ªParte	8	550	1,37	0,140	5,99	4,13	23.A	14 minutos	
	2ªParte		550					23.B	14 minutos	
1ªParte	10	530	1,32	0,132	5,77	4,18	24.A	12 minutos		
2ªParte		530					24.B	12 minutos		

Tabela 3.4 – Condições experimentais b=0,9 cm e Q=0,055 L/s com P e L variáveis

		b=0,6 cm								
		Q=0,0861 L/s = 860 mL/10s								
		L (cm)	Qi (mL/10s)	Frb	Frp	Frd	Yt (cm)	Dados Experiência		Repetição
Número	Duração									
P=1 cm	1ªParte	0	750	3,43	0,341	12,24	2,80	9.A	60 segundos	
	2ªParte		760					9.B	60 segundos	
	1ªParte	6	800	3,66	0,319	13,06	3,05	10.A	12 minutos	
	2ªParte		810					10.B	12 minutos	
	1ªParte	8	860	3,94	0,294	14,04	3,38	25.A	8 minutos	
	2ªParte		850					25.B	8 minutos	
	1ªParte	10	850	3,89	0,287	13,87	3,41	26.A	10 minutos	
	2ªParte		850					26.B	10 minutos	
P=2,5 cm	1ªParte	0	800	3,66	0,169	13,06	4,66	11.A	2 minutos	
	2ªParte		800					11.B	2 minutos	
	1ªParte	6	820	3,76	0,197	13,39	4,29	12.A	6 minutos	
	2ªParte		800					12.B	6 minutos	
	1ªParte	6	840	3,85	0,184	13,71	4,55	36.A	6 minutos	SIM
	2ªParte		840					36.B	6 minutos	
	1ªParte	8	830	3,80	0,164	13,55	4,87	27.A	4 minutos	
	2ªParte		830					27.B	4 minutos	
	1ªParte	10	850	3,89	0,185	13,87	4,58	28.A	8 minutos	
	2ªParte		850					28.B	8 minutos	

Tabela 3.5 – Condições experimentais b=0,6 cm e Q=0,0861 L/s com P e L variáveis

		b=0,6 cm								
		Q=0,055 L/s = 550 mL/10s								
		L (cm)	Qi (mL/10s)	Frb	Frp	Frd	Yt (cm)	Dados Experiência		Repetição
Número	Data									
P=1 cm	1ªParte	0	530	2,43	0,237	8,65	2,83	13.A	8 minutos	
	2ªParte		530					13.B	8 minutos	
	1ªParte	0	530	2,43	0,284	8,65	2,51	37.A	6 minutos	SIM
	2ªParte		520					37.B	6 minutos	
	1ªParte	6	550	2,52	0,265	8,98	2,69	14.A	6 minutos	
	2ªParte		550					14.B	6 minutos	
	1ªParte	8	530	2,43	0,275	8,65	2,56	29.A	6 minutos	
	2ªParte		530					29.B	6 minutos	
	1ªParte	10	530	2,43	0,261	8,65	2,65	30.A	3 minutos	
	2ªParte		530					30.B	3 minutos	
P=2,5 cm	1ªParte	0	550	2,52	0,138	8,98	4,15	15.A	14 minutos	
	2ªParte		520					15.B	14 minutos	
	1ªParte	0	520	2,38	0,125	8,49	4,29	38.A	12 minutos	SIM
	2ªParte		530					38.B	12 minutos	
	1ªParte	6	550	2,52	0,136	8,98	4,21	16.A	12 minutos	
	2ªParte		520					16.B	12 minutos	
	1ªParte	8	550	2,52	0,140	8,98	4,13	31.A	6 minutos	
	2ªParte		550					31.B	6 minutos	
	1ªParte	10	530	2,43	0,126	8,65	4,31	32.A	8 minutos	
	2ªParte		530					32.B	8 minutos	

Tabela 3.6 – Condições experimentais b=0,6 cm e Q=0,055 L/s com P e L variáveis

### 3.4.2 Fundo composto – Areia

Foram realizados 2 ensaios com areia normal, com o objetivo de fazer uma comparação com os ensaios de areia pintada (tabela 3.7).

		b=0,9 cm								
		Q=0,0861 L/s = 860 mL/10s								
		L (cm)	Qi (mL/10s)	Frb	Frp	Frd	Yt (cm)	Dados Experiência		Repetição
Número	Duração									
P=1 cm	1ªParte	0	860	2,14	0,303	9,36	3,32	39.A	1:20 minutos	SIM
	2ªParte		860					39.B	1:20 minutos	
	1ªParte	0	860	2,14	0,341	9,36	3,07	40.A	60 segundos	
	2ªParte		860					40.B	60 segundos	

Tabela 3.7 – Condições experimentais b=0,9 cm, Q=0,055 L/s, P=1 cm e L=0 cm

### 3.4.3 Fundo composto – Esferas de vidro

Foram realizados um total de 18 ensaios com esferas de vidro, sendo que dois dos ensaios (ensaio nº 58 e 59) foram repetidos para testar a repetibilidade dos ensaios (tabelas 3.8 e 3.9).

		b=0,9 cm									
		Q=0,0861 L/s = 860 mL/10s									
		L (cm)	Qi (mL/10s)	Frb	Frp	Frd	Yt (cm)	Dados Experiência		Repetição	
Número	Duração										
P=1 cm	1ªParte	0	860	1,66	0,402	3,60	2,75	41.A	10 minutos	SIM	
	2ªParte		860					41.B	10 minutos		
	1ªParte	0	850	1,64	0,360	3,55	2,93	58.A	8 minutos		
	2ªParte		850					58.B	8 minutos		
	1ªParte	6	860	1,66	0,337	3,60	3,09	42.A	10 minutos		
	2ªParte		860					42.B	10 minutos		
	1ªParte	8	860	1,66	0,324	3,60	3,17	43.A	12 minutos		
	2ªParte		860					43.B	12 minutos		
	1ªParte	10	860	1,66	0,337	3,60	3,09	44.A	12 minutos		
	2ªParte		860					44.B	12 minutos		
	P=2,5 cm	1ªParte	0	860	1,66	0,179	3,60	4,71	45.A		16 minutos
		2ªParte		860					45.B		16 minutos
1ªParte		6	850	1,64	0,174	3,55	4,77	46.A	12 minutos		
2ªParte			850					46.B	12 minutos		
1ªParte		8	850	1,64	0,171	3,55	4,82	47.A	12 minutos		
2ªParte			850					47.B	12 minutos		
1ªParte		10	860	1,66	0,182	3,60	4,66	48.A	12 minutos		
2ªParte			860					48.B	12 minutos		

Tabela 3.8 – Condições experimentais b=0,9 cm e Q=0,0861 L/s com P e L variáveis



		b=0,6 cm								
		Q=0,0861 L/s = 860 mL/10s								
		L (cm)	Qi (mL/10s)	Frb	Frp	Frd	Yt (cm)	Dados Experiência		Repetição
Número	Duração									
P=1 cm	1ªParte	0	850	3,89	0,333	5,33	3,09	49.A	8 minutos	
	2ªParte		850					49.B	8 minutos	
	1ªParte	0	850	3,89	0,360	5,33	2,93	59.A	8 minutos	SIM
	2ªParte		850					59.B	8 minutos	
	1ªParte	6	850	3,89	0,386	5,33	2,80	50.A	10 minutos	
	2ªParte		850					50.B	10 minutos	
	1ªParte	8	850	3,89	0,333	5,33	3,09	51.A	12 minutos	
	2ªParte		850					51.B	12 minutos	
	1ªParte	10	850	3,89	0,316	5,33	3,20	53.A	6 minutos	
	2ªParte		850					53.B	6 minutos	
P=2,5 cm	1ªParte	0	860	3,94	0,188	5,39	4,55	54.A	14 minutos	
	2ªParte		860					54.B	14 minutos	
	1ªParte	6	860	3,94	0,173	5,39	4,82	55.A	12 minutos	
	2ªParte		860					55.B	12 minutos	
	1ªParte	8	850	3,89	0,178	5,33	4,69	56.A	10 minutos	
	2ªParte		850					56.B	10 minutos	
	1ªParte	10	860	3,94	0,162	5,39	5,03	57.A	12 minutos	
	2ªParte		860					57.B	12 minutos	

Tabela 3.9 – Condições experimentais b=0,6 cm e Q=0,0861 L/s com P e L variáveis

### 3.5 Procedimento pós realização dos ensaios

#### 3.5.1 Tratamento das imagens

Após a realização dos ensaios com as filmagens na primeira e segunda metade do canal, efetuou-se o tratamento das imagens com o auxílio do *software PMB (Picture Motion Browser)*. Este *software* permite importar para o computador os vídeos da câmara e, assim, extrair as imagens desejadas. As imagens foram extraídas dos vídeos em instantes previamente estipulados, iguais para todos os ensaios: 0 s, 5 s, 10 s, 15 s, 20 s, 25 s, 30 s, 40 s, 50 s, 60 s, 1:20 min, 1:40 min, 2:00 min, 2:30 min, 3:00 min, 4:00 min, 6:00 min, 8:00 min, 10:00 min, 12:00 min, 14:00 min e 16:00 min. De salientar que o instante 0 segundos é o instante inicial do ensaio correspondente à colocação da comporta no canal. Na fase inicial onde, por norma, existe maior interação de partículas e alterações no leito, foram definidos instantes menos espaçados e, com o passar do tempo, foi-se aumentando o espaçamento até estabilizar e ficar de 2 em 2 minutos.

Neste sentido, foi necessário atribuir uma nomenclatura a cada imagem criada, no sentido de facilitar a sua identificação futura, assim, a forma escolhida foi a do seguinte exemplo: 1.A.1, em que o primeiro 1 identifica o número do ensaio; a letra A identifica que a imagem é referente à primeira parte do canal, quando a imagem for da segunda parte do canal é letra B; o número da terceira posição está associado ao instante do tempo, neste caso, o número 1 é referente ao segundo 0, o número 2 ao segundo 5 e assim sucessivamente, até ao minuto 16.

No par de imagens da figura que se segue (figura 3.12) apresenta-se a primeira e segunda parte do canal do ensaio de areia pintada (n.º 1) para instante 10 s. A título de exemplo apresentam-se no Anexo I a totalidade das imagens recolhidas para o ensaio n.º 1.

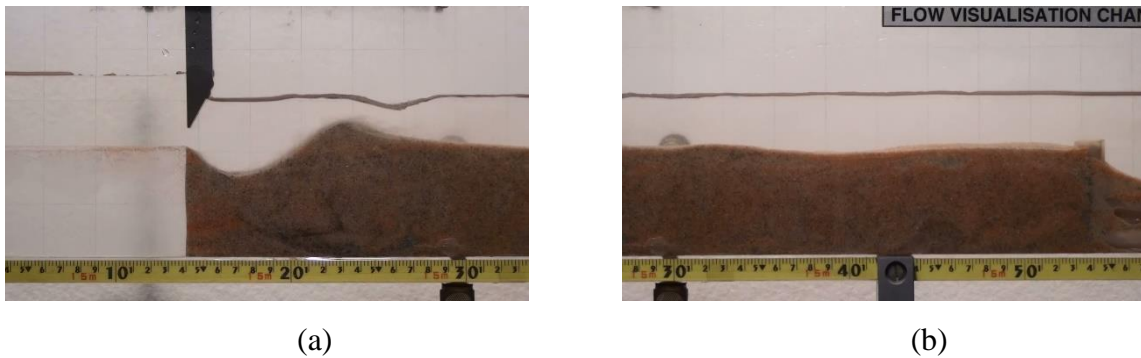


Figura 3.12 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 10 s

No par de imagens da figura que se segue (figura 3.13) apresenta-se a primeira e segunda parte do canal do ensaio de esferas de vidro (n.º 41) para instante 10 s. A título de exemplo apresentam-se no Anexo II a totalidade das imagens recolhidas para o ensaio n.º 41.

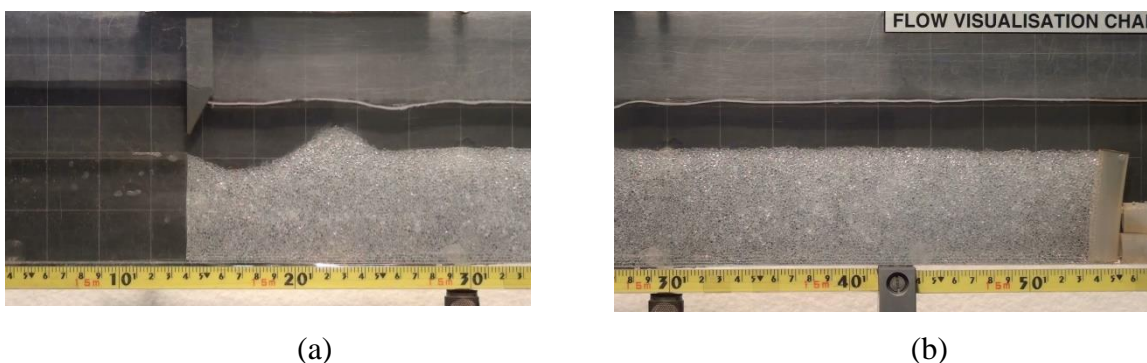


Figura 3.13 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 10 s

### 3.5.2 Procedimento Matlab e tratamento de dados Excel

Atendendo ao número de ensaios realizados e tendo em conta a necessidade de garantir uma boa qualidade dos dados para análise, utilizou-se um código Matlab, que já tinha sido desenvolvido, e que foi sendo adaptado ao longo da realização dos ensaios para a utilização neste estudo.

O código tem como principal valência, fazer o reconhecimento do leito e extrair as coordenadas para uma folha de *Excel*. Com este código Matlab é possível fazer a junção de um par de imagens sequencial, conforme exemplificado com as imagens 1.A.2 e 1.B.2, representadas na figura 3.14.

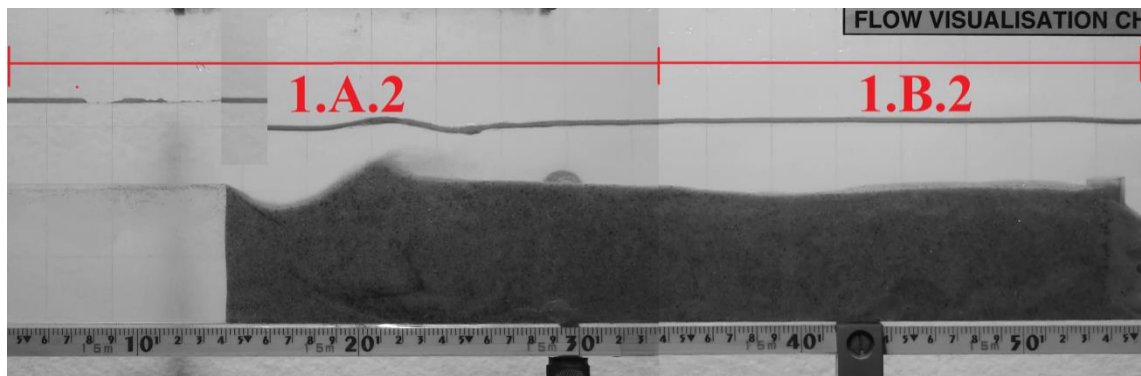


Figura 3.14 – Par de imagens em concordância

Posteriormente faz o reconhecimento da fronteira do leito, representada a vermelho na figura 3.15, com base na identificação e diferenciação das cores entre o leito e a água. As coordenadas  $x$  e  $y$  do leito eram depois exportadas para uma folha de cálculo *Excel*. Os resultados obtidos a partir do código de Matlab necessitam de um tratamento para que possa ser realizada a sua análise, nomeadamente a conversão de píxeis em centímetros. Foi elaborado um perfil  $(x,y)$  em que a coordenada  $x$  é correspondente à extensão do canal e coordenada  $y$  indica a altura de deposição e a profundidade de erosão. Foram efectuadas ainda algumas correções pontuais aos perfis obtidos, uma vez que, na fase de identificação do leito, alguns pontos detectados não correspondiam ao leito.

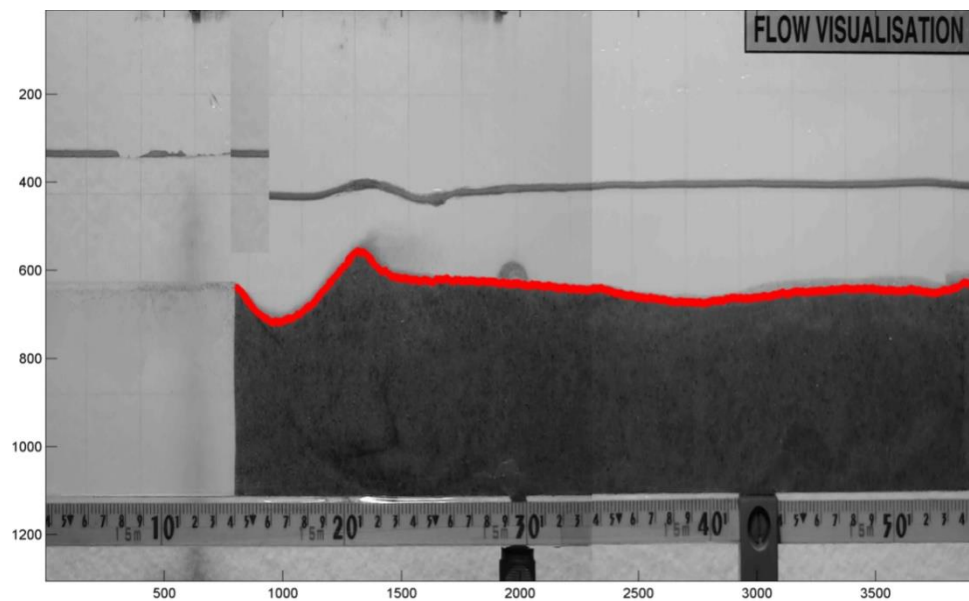


Figura 3.15 – Resultado da identificação do leito através do código desenvolvido em Matlab

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e comparados os resultados dos ensaios experimentais realizados com os diferentes leitos: areia, areia pintada e esferas de vidro. A secção 4.1 é dedicada à descrição dos ensaios, a repetibilidade e resolução do método experimental adoptado é apresentada na secção 4.2. Observou-se e analisou-se a evolução temporal do perfil longitudinal do leito de sedimentos, em especial da máxima profundidade de erosão localizada e altura de deposição obtidas para diferentes condições experimentais de ensaios com areia pintada (secção 4.3) e ensaios com esferas de vidro (secção 4.4). Foi realizada uma comparação com idêntico número de Froude densimétrico para ensaios com areia pintada e esferas de vidro (secção 4.5). Foi efetuada a comparação dos gráficos da celeridade da barra a jusante da cavidade de erosão para um ensaio com areia pintada e outro com esferas de vidro (secção 4.6).

### 4.1 Breve descrição dos ensaios

A observação dos ensaios permitiu verificar que, desde o primeiro momento da colocação da comporta, ocorre movimentação dos sedimentos (areia e esferas de vidro) com maior ou menor intensidade dependendo das condições experimentais de cada ensaio. A cavidade de erosão forma-se imediatamente a jusante do fundo fixo. A sua máxima profundidade é função do comprimento da bacia de dissipação. Por outro lado a taxa de evolução da cavidade de erosão é dependente do caudal escoado. As partículas provenientes da cavidade de erosão depositam-se de forma maioritária a jusante da mesma, formando assim a barra com as restantes partículas a depositarem-se ao longo da extensão do canal. Neste caso, o parâmetro que mais influencia a deposição é a altura do colchão de água a jusante, correspondente a uma altura de soleira do descarregador (P). Verificou-se que a altura de deposição aumenta com a altura do colchão de água a jusante.

Nos ensaios com as esferas de vidro observa-se, na zona ascendente da cavidade de erosão localizada, um constante turbilhão das partículas que apresentam dificuldades em transpor o talude de jusante da cavidade de erosão, visível na figura 4.1, para diferentes instantes de tempo (6:00 min, 8:00 min, 10:00 min e 12:00 min) do ensaio n.º 45.

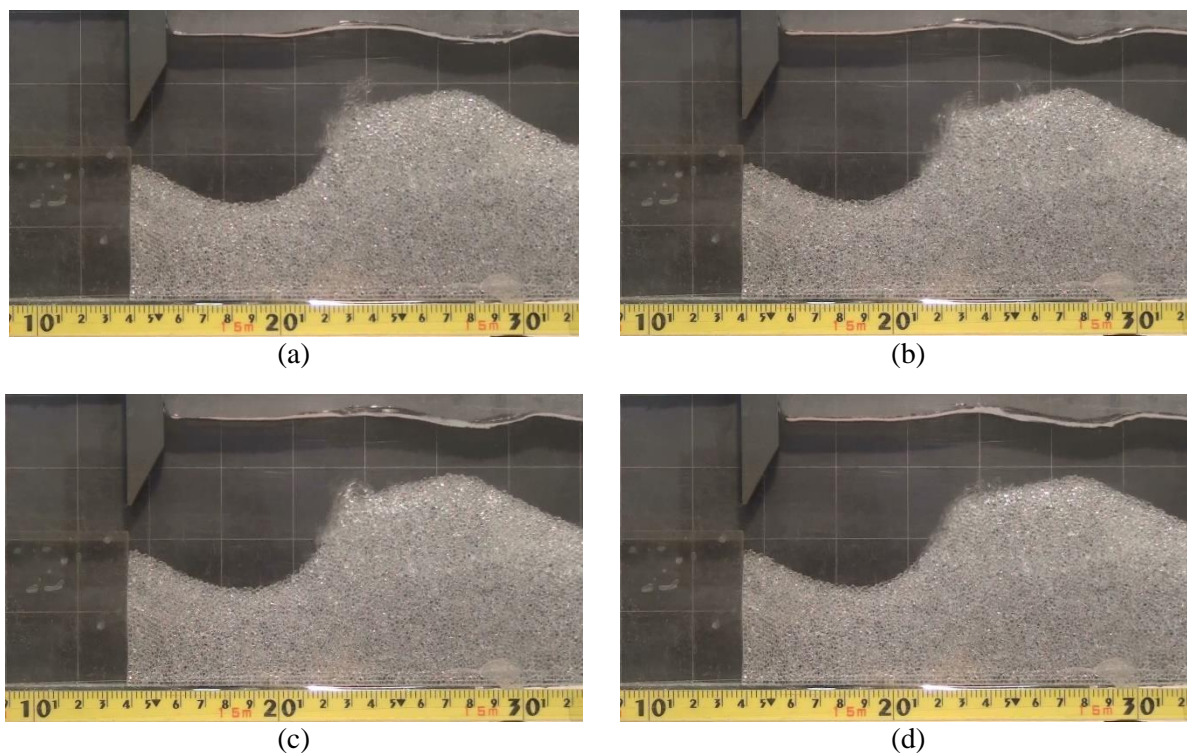


Figura 4.1 – Turbilhão das partículas de esferas de vidro, visível para diferentes instantes de tempo: (a) 6:00 min; (b) 8:00 min; (c) 10:00 min; (d) 12:00 min, ensaio n.º 45

Devido a este turbilhão observa-se que as partículas escorregam pelo talude abaixo e são novamente arrastadas para o topo, voltando a escorregar e assim sucessivamente. Este fenómeno ocorre praticamente durante todo o tempo restante do ensaio a partir de uma inclinação do talude mais acentuada, fator que diminui a deposição dessas partículas a jusante. Este fenómeno é também visível em alguns instantes nos ensaios com a areia mas de uma forma mais esporádica.

A forma geométrica da cavidade de erosão, sendo mais ou menos profunda e mais ou menos longa consoante as respetivas condições experimentais, pode considerar-se que tem aproximadamente parabólica com concavidade voltada para cima. É possível verificar, principalmente para a altura do colchão de água a jusante menor (correspondente a  $P=1$  cm), que a superfície livre está em fase com a superfície do leito de sedimentos, ou seja, quando há uma deposição observa-se uma elevação da superfície livre, e quando há uma erosão observa-se uma depressão (abaixamento) da superfície livre. Por fim, o que determina o final do ensaio é a saída abundante das partículas de material ensaiado na extremidade de jusante do canal, ou então, considera-se que o ensaio estabiliza quando, durante um intervalo de tempo de 2 minutos, não se observa o aumento da barra de deposição a jusante.

## 4.2 Aferição do Método Experimental

Com o objetivo de aferir o método experimental desenvolvido nesta dissertação, apresenta-se na subsecção 4.2.1 a análise da repetibilidade experimental, na subsecção 4.2.2 a análise da influência da pintura da areia na evolução temporal dos ensaios e conclui-se com a subsecção 4.2.3, na qual se apresenta a análise da influência de pequenas variações do caudal.

### 4.2.1 Análise da repetibilidade dos ensaios

Com o objetivo de analisar a repetibilidade do método experimental desenvolvido, foram comparados os resultados dos ensaios n.º 1 e 33, cujas imagens se apresentam nas figuras 4.2 e 4.3. Os ensaios foram realizados para as mesmas condições experimentais definidas por:  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L=0$  cm.

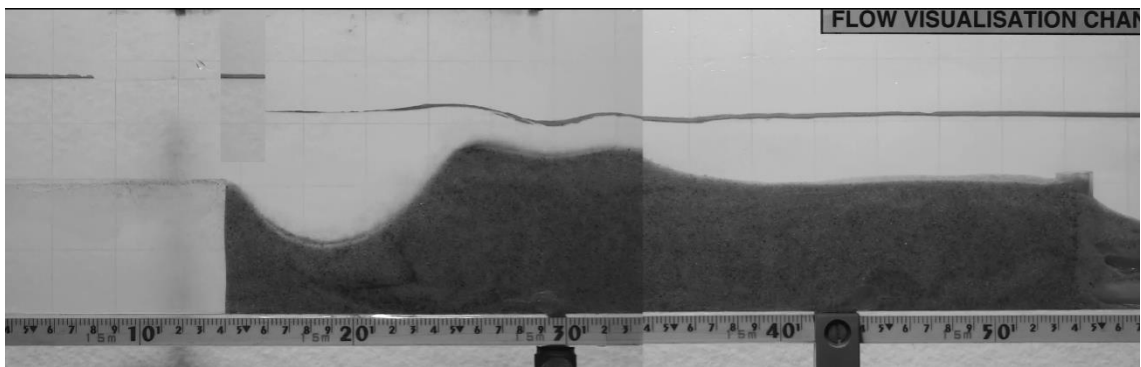


Figura 4.2 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 1), para  $t=25$  s

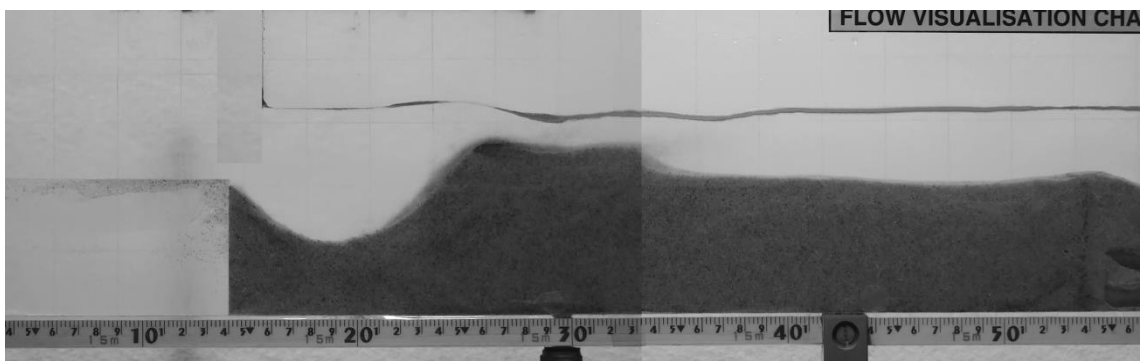


Figura 4.3 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 33), para  $t=25$  s

No gráfico da figura 4.4 apresentam-se os perfis do leito de sedimentos obtidos para as condições analisadas, respetivamente para 5 s, 30 s e 60 s. A análise da figura permite concluir que os dois ensaios se comportaram de forma idêntica, em particular na zona onde se desenvolve a cavidade de erosão, incluindo o seu talude de jusante. No gráfico da figura 4.5 pode-se confirmar que para cada instante de tempo, a coordenada x para a posição do perfil em  $y=0$  ( $X_{iD}$ ) é praticamente coincidente nos dois ensaios. Na zona da barra que se forma a jusante observam-se algumas diferenças, em especial na localização da crista da barra e no perfil longitudinal da própria barra.

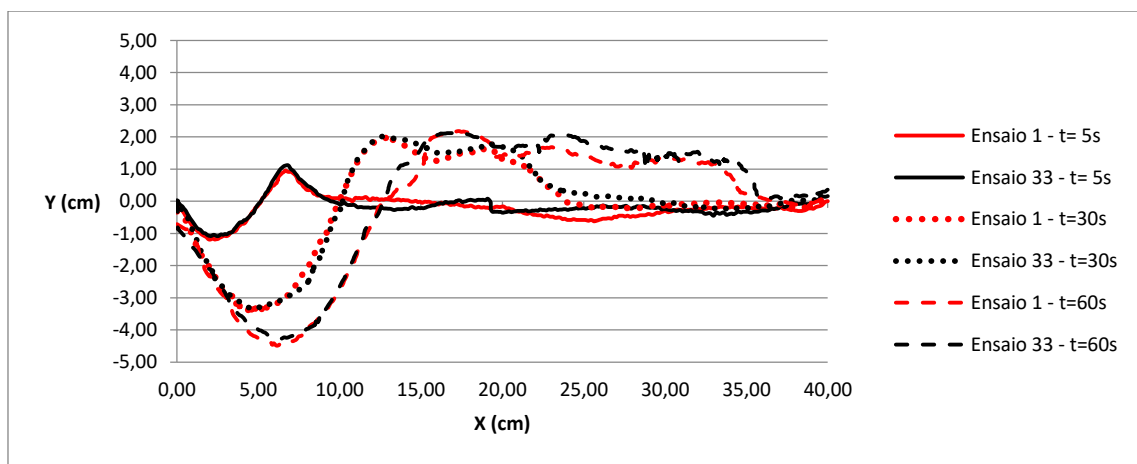


Figura 4.4 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 1 e 33), para  $t=5$  s, 30 s e 60 s

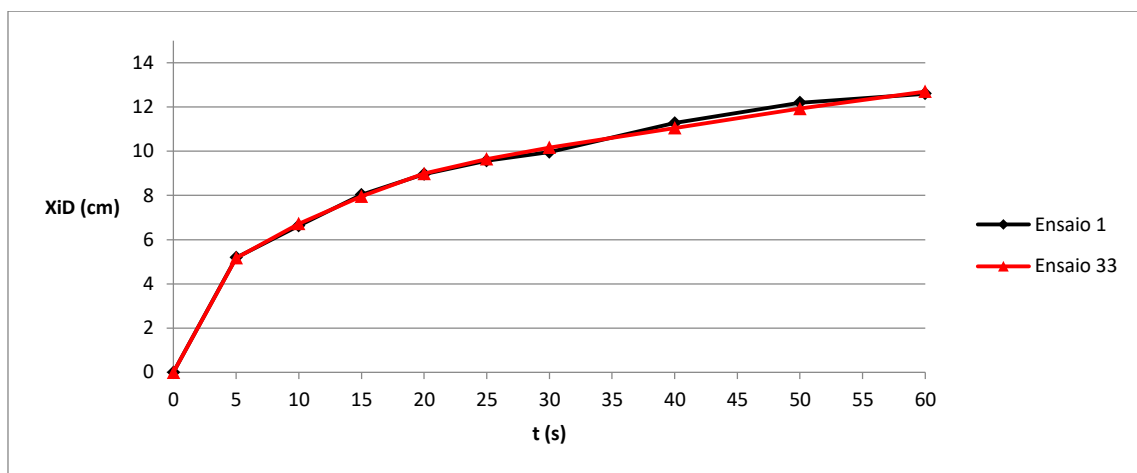


Figura 4.5 - Evolução temporal da posição longitudinal do canal com  $y=0$  cm ( $X_{iD}$ ), obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 1 e 33)



#### 4.2.2 Análise do efeito da pintura da areia

Nesta subsecção pretende-se analisar a influência da pintura da areia na evolução temporal dos perfis longitudinais do leito de sedimentos. Para tal, foram considerados dois ensaios (n.º 1 e 39), com as mesmas condições experimentais ( $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm,  $L=0$  cm), com areia e areia pintada, respetivamente.

Nas figuras 4.6 a 4.9 apresentam-se imagens dos perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para os dois ensaios, para 5 s (figuras 4.5 e 4.6) e 60 s (figuras 4.7 e 4.8). A análise das figuras permite observar que, desde o primeiro momento da colocação da comporta, ocorre um movimento das partículas de areia para jusante formando assim a cavidade de erosão e a jusante a deposição das referidas partículas de areia.



Figura 4.6 - Imagem do leito de sedimentos, obtida para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 1), para  $t=5$  s (pormenor)

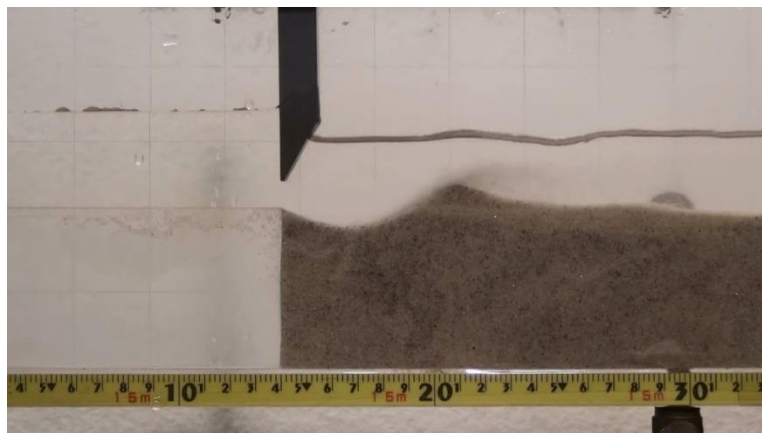


Figura 4.7 - Imagem do leito de sedimentos, obtida para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 39), para  $t=5$  s (pormenor)

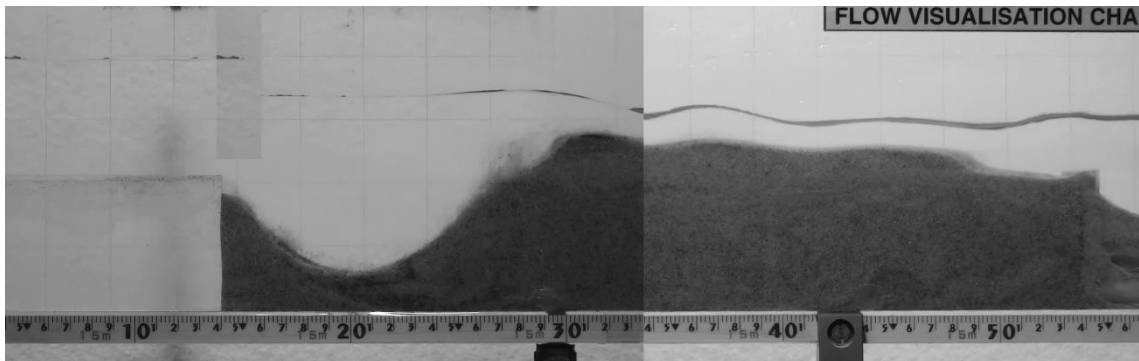


Figura 4.8 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 1), para  $t=60$  s

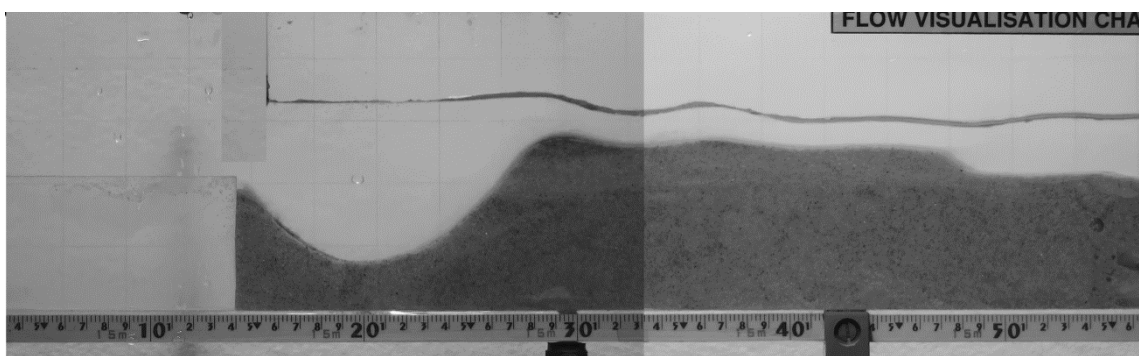


Figura 4.9 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 39), para  $t=60$  s

No gráfico da figura 4.10 representam-se os perfis longitudinais do leito de sedimentos correspondentes aos dois ensaios, obtidos para 5 s e 40 s, respetivamente. Com base na análise destes gráficos é visível uma ligeira diferença no leito ao longo dos perfis no decorrer do ensaio, principalmente na zona da cavidade de erosão. Com o objetivo de analisar estas diferenças no leito, representou-se a evolução temporal da máxima profundidade de erosão visível no gráfico da figura 4.11. Da análise da figura conclui-se que ao longo dos ensaios a diferença entre os dois perfis atinge um valor máximo da ordem dos 24% nos instantes temporais 30 e 40 s respetivamente.

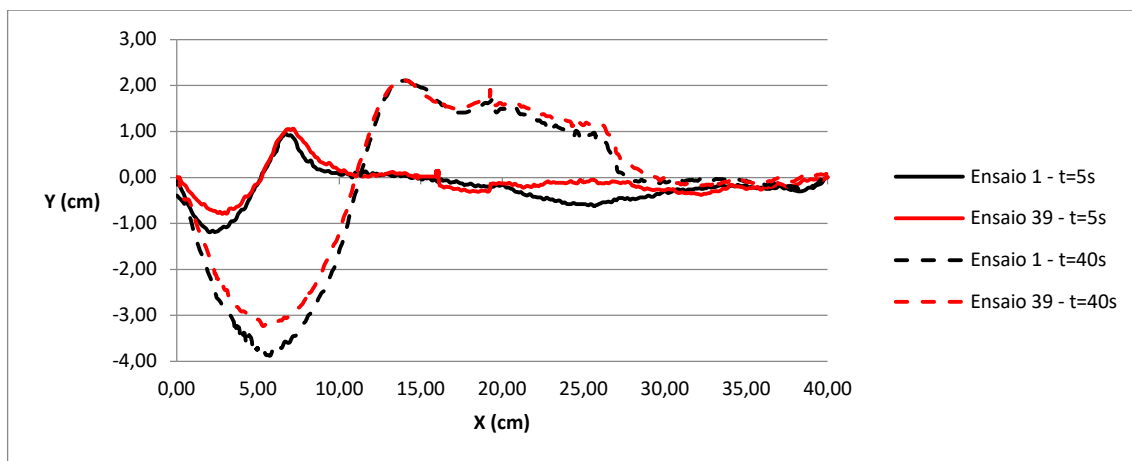


Figura 4.10 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 1 e 39), para  $t=5$  s e 40 s

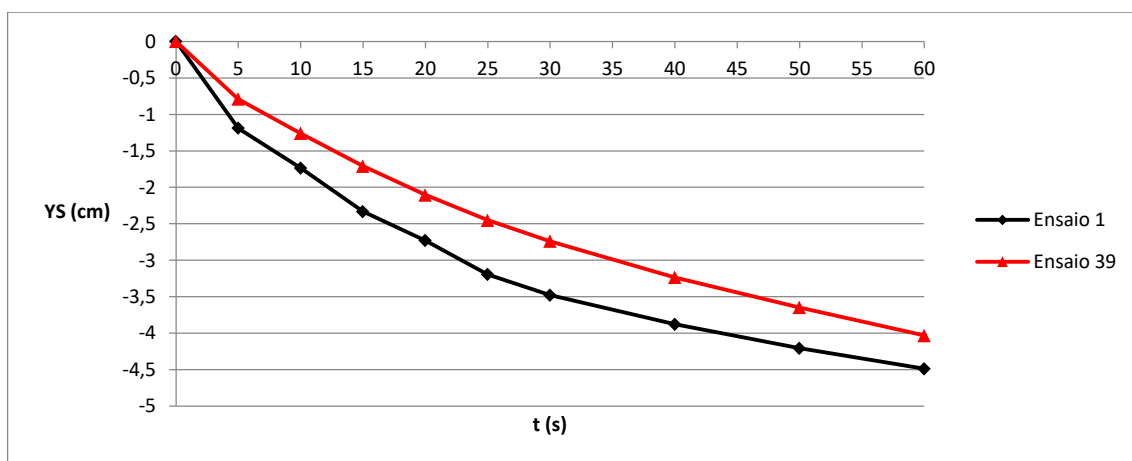


Figura 4.11 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (YS), obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 1 e 39)

Conclui-se que relativamente à areia pintada, não é possível provar que se comporta da mesma forma comparativamente à areia normal, no entanto nota-se que a taxa no aumento da profundidade máxima de erosão é semelhante nos dois ensaios.

#### 4.2.3 Análise da influência da variabilidade do caudal

Com o objetivo de analisar a influência da variabilidade do caudal, foram comparados os resultados dos ensaios n.º 15 e 38. Os ensaios foram realizados para as mesmas condições experimentais,  $Q=0,055$  L/s,  $b=0,6$  cm,  $P=2,5$  cm e  $L=0$  cm. Assiste-se a uma grande movimentação de partículas de areia no início e durante todo o ensaio. Isto acontece devido à

diminuição da abertura da comporta ( $b=0,6$  cm), aumentando assim a velocidade da água na secção da comporta. No caso do ensaio n.º 38, o caudal no início é diferente do caudal medido durante a realização do ensaio. Na medição do caudal que foi feita durante a realização do ensaio n.º 15 registaram-se 550 mL/10 s contrapondo com o valor de 520 mL/10 s medidos no ensaio n.º 38. Esta diferença no caudal foi suficiente para que o perfil longitudinal do leito de sedimentos do ensaio n.º 38 esteja sempre diferido relativamente ao do ensaio n.º 15, como se pode observar nos gráficos das figuras 4.12, 4.13, 4.14 e também no gráfico da figura 4.15, no qual se representa a evolução temporal da posição longitudinal do canal com  $y=0$  cm. Assim, se o caudal fosse igual durante a realização dos ensaios os dois perfis seriam exatamente coincidentes.

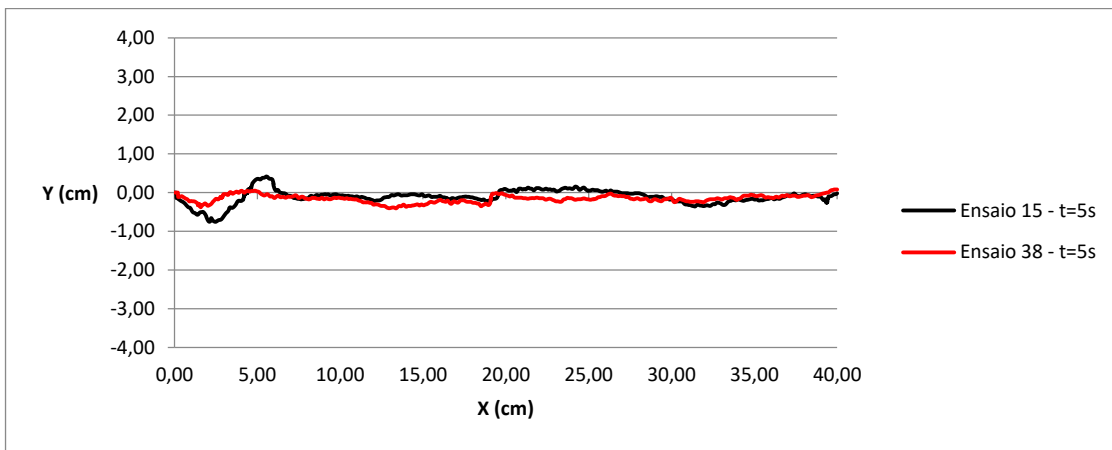


Figura 4.12 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,055$  L/s,  $b=0,6$  cm,  $P=2,5$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 15 e 38), para  $t=5$  s

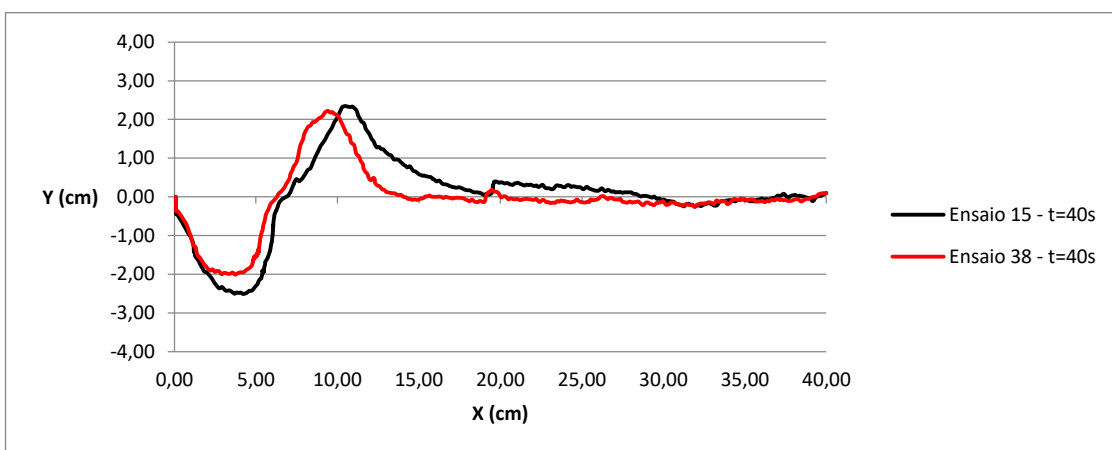


Figura 4.13 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,055$  L/s,  $b=0,6$  cm,  $P=2,5$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 15 e 38), para  $t=40$  s

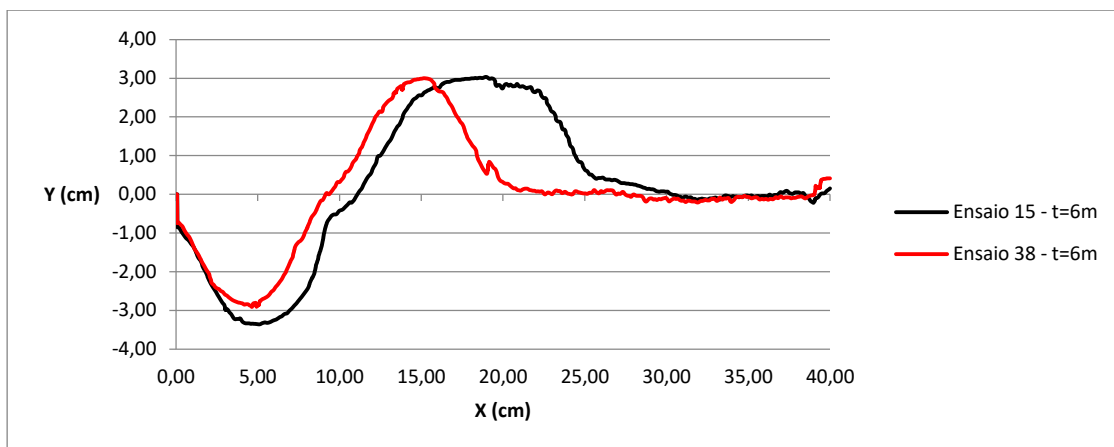


Figura 4.14 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,055$  L/s,  $b=0,6$  cm,  $P=2,5$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 15 e 38), para  $t=6$  min

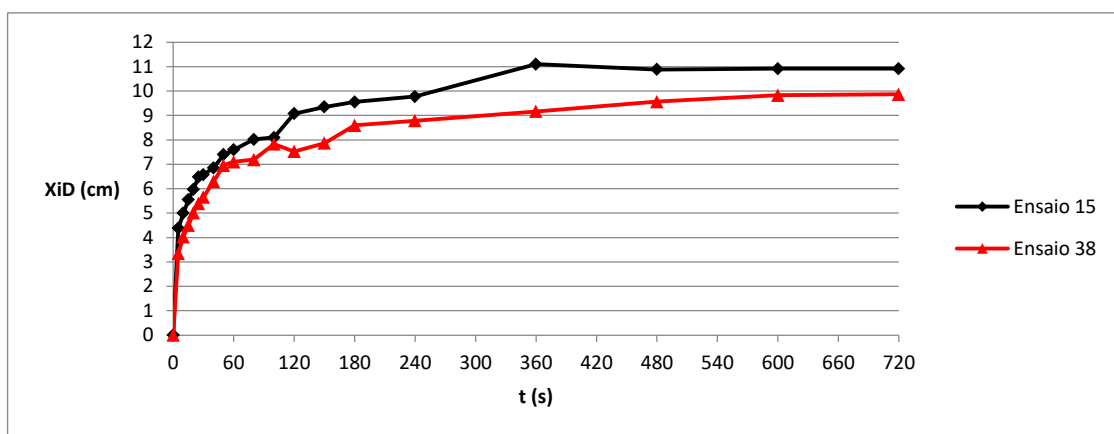


Figura 4.15 - Evolução temporal da posição longitudinal do canal com  $y=0$  cm ( $X_{iD}$ ) obtidos para  $Q=0,055$  L/s,  $b=0,6$  cm,  $P=2,5$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 15 e 38)

### 4.3 Análise dos resultados dos ensaios com areia pintada

Apresentam-se nesta secção os resultados obtidos com leito de areia pintada, analisando-se a evolução temporal do perfil longitudinal do leito de sedimentos a jusante da comporta. A influência de diferentes parâmetros é observada nomeadamente, no comprimento da bacia de dissipação (subsecção 4.3.1), no caudal (na subsecção 4.3.2), na abertura da comporta (subsecção 4.3.3) e na altura do colchão de água a jusante (subsecção 4.3.4).

### 4.3.1 Análise da influência do comprimento da bacia de dissipação na evolução temporal do perfil

Com o objetivo de analisar a influência do comprimento da bacia de dissipação,  $L$ , nos perfis longitudinais do leito de sedimentos e sua evolução temporal, foram analisados os ensaios n.º 1, 2, 17 e 18 medidos com  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L$  variável, visível no gráfico das figuras 4.16 e 4.17. Tendo em consideração os resultados apresentados conclui-se que quanto menor o comprimento da bacia, ou seja, menor o  $L$ , maior será a máxima profundidade da cavidade de erosão ( $YS$ ), tal como se pode comprovar no gráfico da figura 4.18. A máxima altura ( $HD$ ) de deposição dos sedimentos a jusante na barra é igualmente superior para menores comprimentos da bacia de dissipação, como se pode observar no gráfico da figura 4.19. A grande diferença apresentada no valor  $L=0$  cm, comparativamente aos restantes é, desde logo, a duração total do ensaio. Para  $L=0$  cm, e atendendo à rapidez da movimentação das partículas de areia para jusante, constatou-se que estas demoram cerca de 1 minuto a chegar à extremidade de jusante do canal. Para os restantes valores de  $L$  as partículas não chegam a atingir a extremidade do canal, isto porque se considerou que se atinge o equilíbrio através do critério estabelecido de não se observar progressão após 2 minutos.

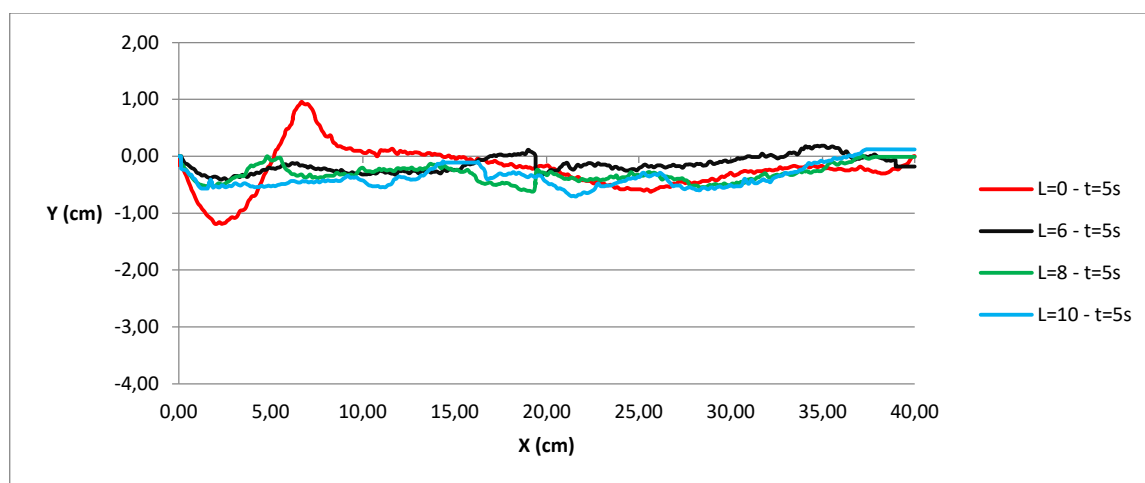


Figura 4.16 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $L$  [cm] (Ensaio n.º 1, 2, 17 e 18), para  $t=5$  s

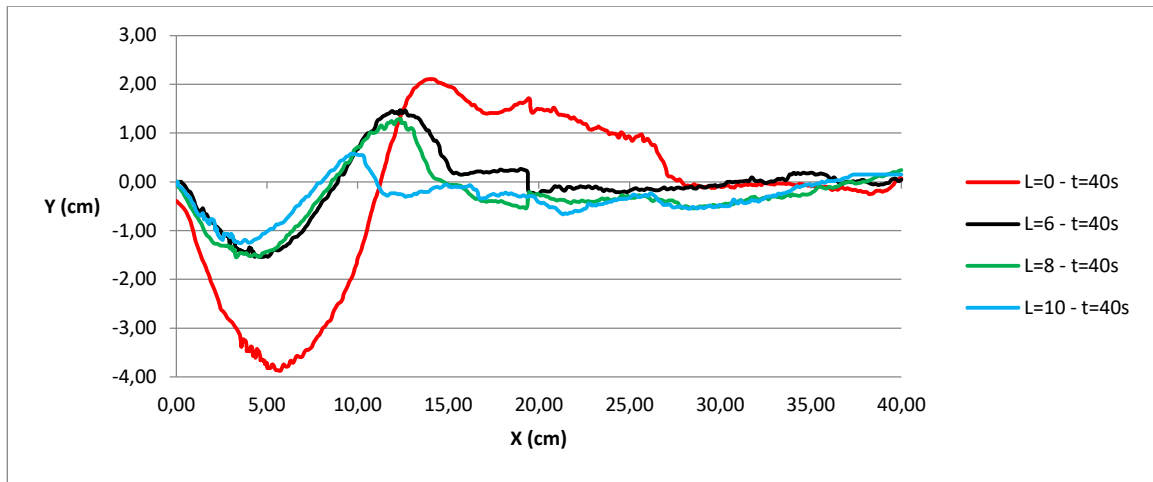


Figura 4.17 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de L [cm] (Ensaio n.º 1, 2, 17 e 18), para  $t=40$  s

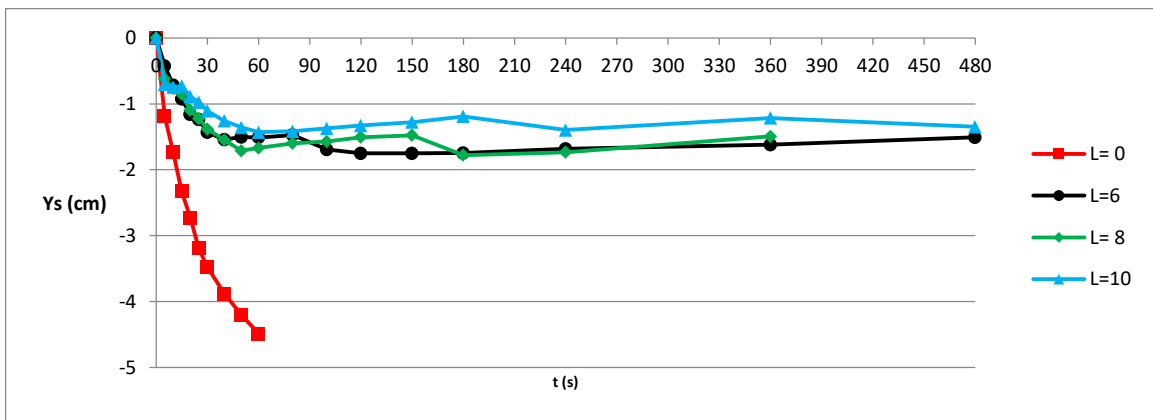


Figura 4.18 - Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Ys), obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de L [cm] (Ensaio n.º 1, 2, 17 e 18)

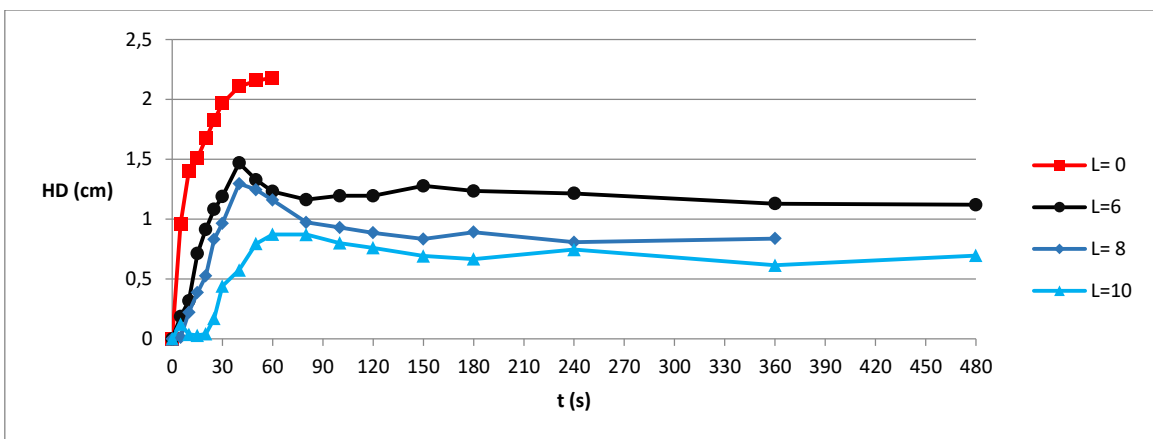


Figura 4.19 - Evolução temporal da máxima elevação da barra (HD), obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de L [cm] (Ensaio n.º 1, 2, 17 e 18)

### 4.3.2 Análise da influência do valor do caudal na evolução temporal do perfil

Para analisar a influência do valor do caudal,  $Q$ , foram selecionados os ensaios n.º 1 e 35 caracterizados por  $L=0$  cm,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm. Após a análise dos resultados obtidos dos dois ensaios com os caudais diferentes ( $Q=0,0861$  L/s e  $Q=0,055$  L/s), representados no gráfico da figura 4.20 concluiu-se que quanto maior o caudal, maior a cavidade de erosão, bem como a barra de deposição de sedimentos a jusante.

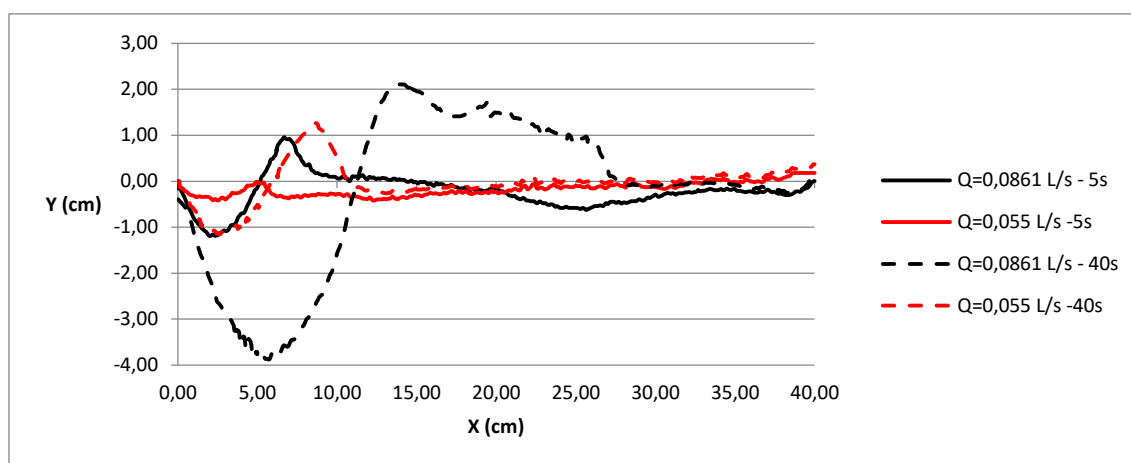


Figura 4.20 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $L=0$  cm,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm, e diferentes valores de  $Q$  [L/s] (Ensaio n.º 1 e 35), para  $t=5$  s e 40 s

Pela análise do gráfico da figura 4.21, que representa a altura máxima de deposição em cada instante, é também evidente a diferença na duração total dos ensaios bem como as diferenças de altura de deposição das partículas de areia. Os ensaios correspondentes ao caudal maior (ensaio n.º 1) tiveram uma duração de sensivelmente 1 minuto, enquanto, para o caudal menor (ensaio n.º 35) a duração foi cerca de 14 minutos. Foi analisado o tempo necessário para que o caudal menor equiparasse ao caudal maior. Com base no gráfico da figura 4.22 conclui-se que para 40 segundos de duração do ensaio do caudal maior ( $Q=0,0861$  L/s), o caudal menor ( $Q=0,055$  L/s) demora sensivelmente 14 minutos a ficar com a linha do leito equivalente.



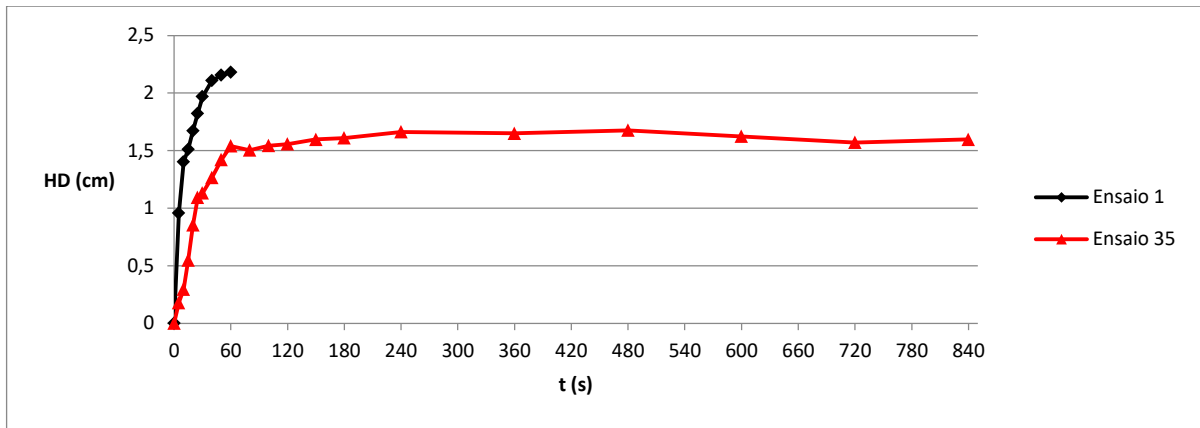


Figura 4.21 - Evolução temporal da máxima elevação da barra (HD), obtidos para  $L=0$  cm,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm, e diferentes valores de  $Q$  [L/s] (Ensaio n.º 1 e 35)

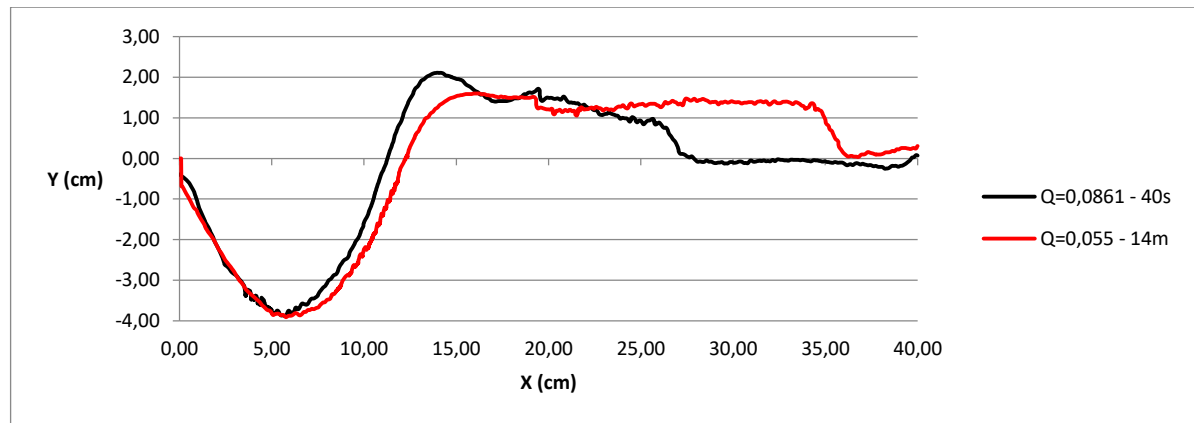


Figura 4.22 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $L=0$  cm,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $Q$  [L/s] (Ensaio n.º 1, 35), respetivamente para  $t=40$  s e  $t=14$  min

Na análise do gráfico da figura 4.22 é também possível verificar que o talude de montante da cavidade de erosão é praticamente coincidente para os dois ensaios, sendo a cavidade de erosão mais longa para o caudal menor no instante  $t=14$  min. Assim, a extensão da barra é diferente, no entanto o declive do talude a jusante da barra é praticamente igual.

### 4.3.3 Análise da influência do valor da abertura da comporta na evolução temporal do perfil

Para analisar a influência da abertura da comporta,  $b$ , na evolução temporal do perfil foram seleccionados os ensaios n.º 1 e 9, caracterizados por  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$  cm,  $P=1$  cm e  $b=0,9$  cm e  $0,6$  cm, respetivamente. No gráfico da figura 4.23, representam-se os perfis

longitudinais de erosão obtidos para os referidos ensaios, respetivamente para  $t=5$  s e  $t=60$  s. Pela análise dos resultados dos dois ensaios, não se verifica uma grande diferença entre os dois, apresentando desde logo uma duração idêntica. Aponta-se um ligeiro acréscimo da máxima profundidade da cavidade de erosão visível no gráfico da figura 4.24, para o ensaio com a abertura menor ( $b=0,6$  cm), que deverá estar relacionada com a menor abertura da comporta e conseqüente maior velocidade média do escoamento na secção da comporta, originando uma maior capacidade de transportar os sedimentos e assim o referido acréscimo.

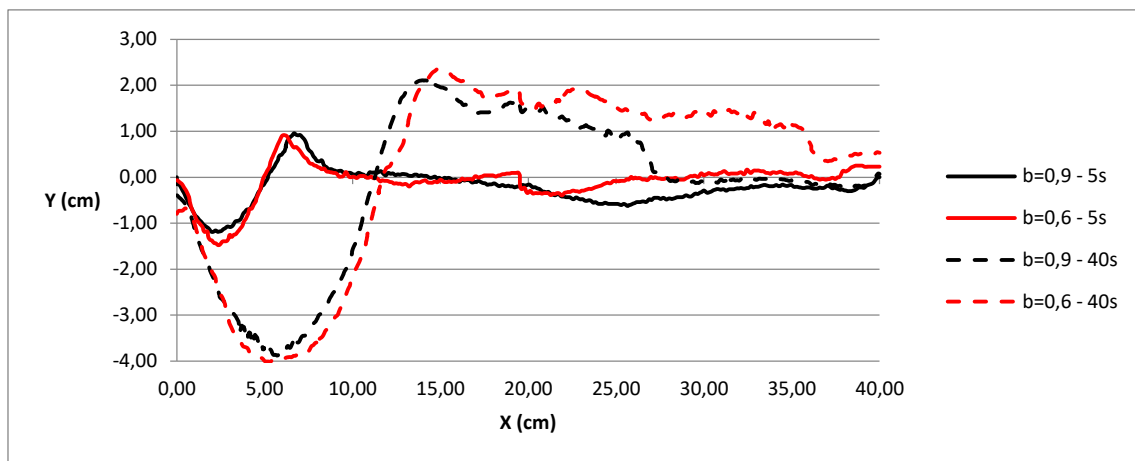


Figura 4.23 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $b$  [cm] (Ensaio n.º 1, 9), para  $t=5$  s e  $t=40$  s

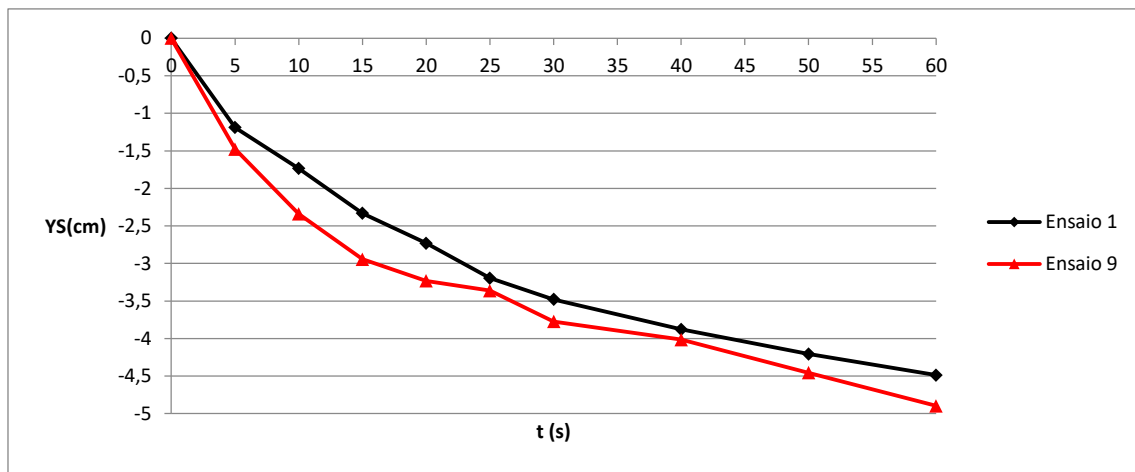


Figura 4.24 - Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão ( $Y_S$ ), obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $b$  [cm] (Ensaio n.º 1, 9)

#### 4.3.4 Análise da influência do valor da altura do colchão de água a jusante na evolução temporal do perfil

No que se refere à análise da influência do valor da altura do colchão de água a jusante, condicionada pela altura do descarregador a jusante,  $P$ , na evolução temporal do perfil, foram selecionados os ensaios n.º 1 e 3, caracterizados por  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$  cm e  $b=0,9$  cm cujos resultados são apresentados no gráfico da figura 4.25, para  $t=5$  s e  $t=40$  s. Para este parâmetro verificou-se que a evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão é idêntica em ambos os ensaios como se comprova no gráfico da figura 4.26, variando a máxima elevação da barra a jusante visível no gráfico da figura 4.27. Por um lado, no ensaio n.º 1 ( $P=1$  cm) a altura de deposição é menor e constante ao longo do canal, por outro lado, no ensaio n.º 3 ( $P=2,5$  cm) a altura de deposição é maior. Isto justifica-se pelo facto de quando o colchão de água é menor ( $P=1$  cm) o escoamento tem menor secção e consequentemente maior velocidade provocando assim um maior transporte das partículas para jusante. Por outro lado, quando a altura do colchão de água é superior ( $P=2,5$  cm) a secção transversal é maior e a velocidade média menor, diminuindo assim a capacidade de transporte comparativamente a  $P=1$  cm e proporcionando a deposição das partículas mais em altura. Os fatores anteriores têm influência direta na duração dos ensaios, registando-se uma duração mais elevada do ensaio n.º 3, com 4 minutos, relativamente ao ensaio n.º 1, com 1 minuto. No gráfico da figura 4.28 apresentam-se os valores da extensão do canal correspondente à altura máxima de deposição para cada instante de tempo. Conclui-se que os valores das extensões são idênticos, ao contrário das alturas máximas de deposição segundo o gráfico da figura 4.27.

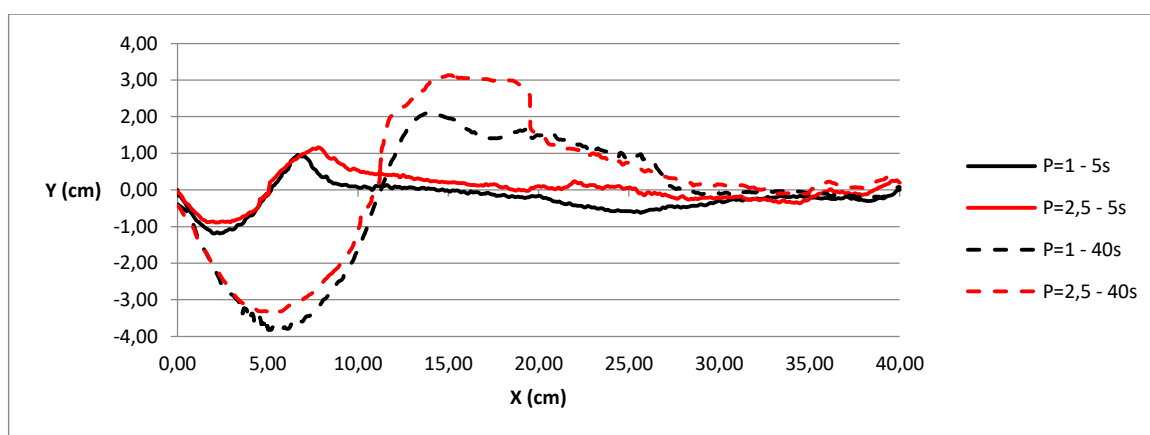


Figura 4.25 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$ L/s,  $L=0$  cm,  $b=0,9$  cm e diferentes valores de  $P$  [cm] (Ensaio n.º 1, 3), para  $t=5$  s e 40 s

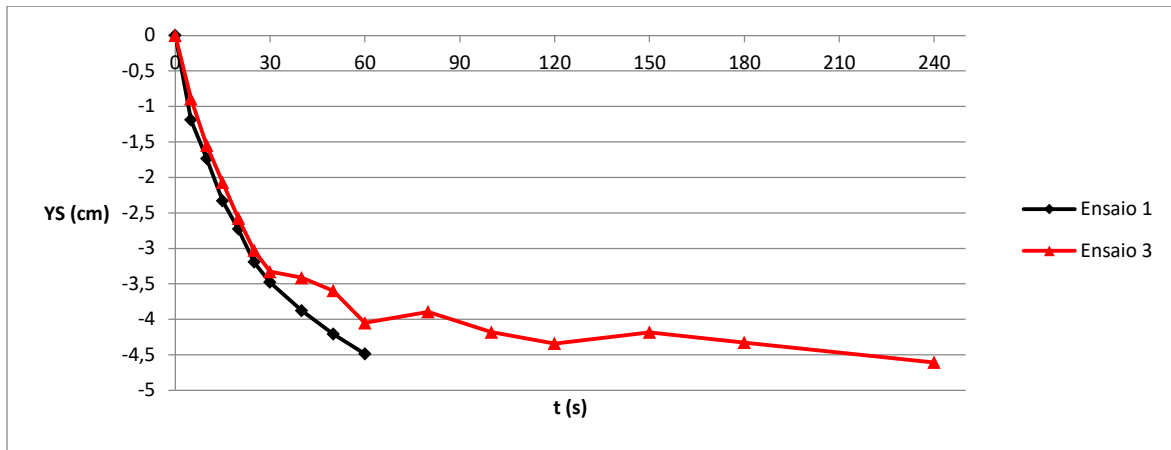


Figura 4.26 - Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (YS), obtidos para  $Q=0,0861L/s$ ,  $L=0$  cm,  $b=0,9$  cm e diferentes valores de P [cm] (Ensaio n.º 1, 3)

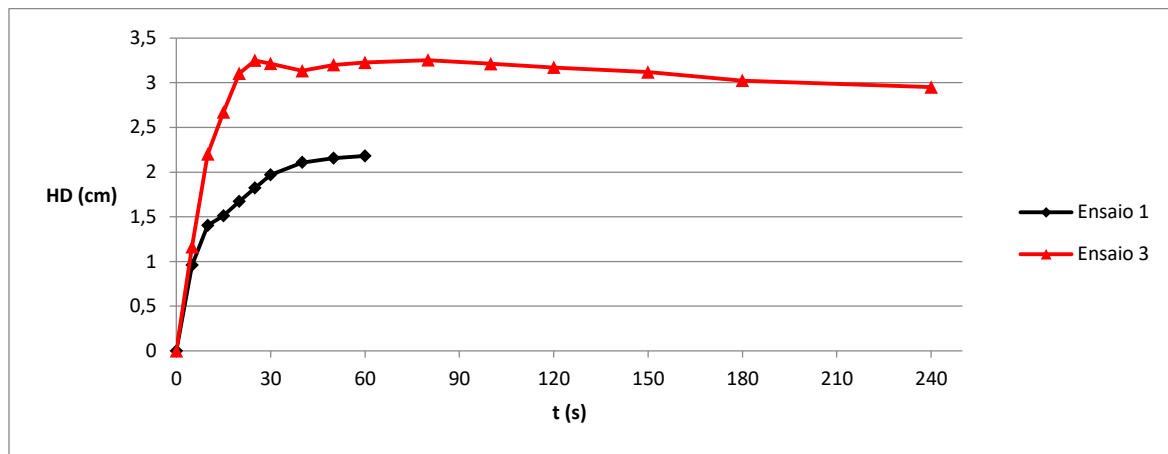


Figura 4.27 - Evolução temporal da máxima elevação da barra (HD), obtidos para  $Q=0,0861L/s$ ,  $L=0$  cm,  $b=0,9$  cm e diferentes valores de P [cm] (Ensaio n.º 1, 3)

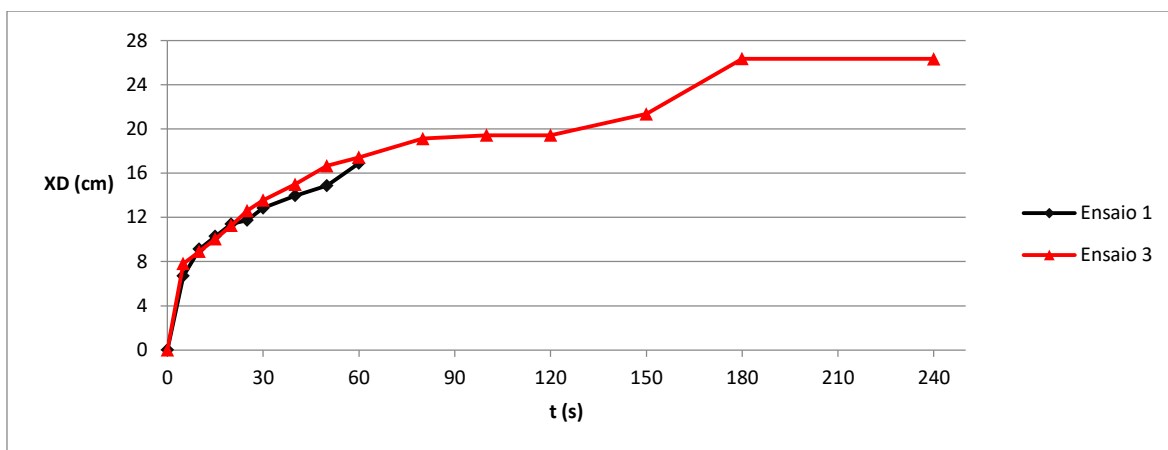


Figura 4.28 - Evolução temporal da posição longitudinal para a qual a elevação da barra é máxima (XD), obtido para  $Q=0,0861L/s$ ,  $L=0$  cm,  $b=0,9$  cm e diferentes valores de P [cm] (Ensaio n.º 1, 3)

### 4.3.5 – Análise da deposição dos diferentes diâmetros das partículas de areia pintada ao longo da extensão do canal

Com base na figura 4.29 é possível diferenciar a ordem de deposição dos sedimentos da barra ao longo da extensão do canal, identificável pelas cores conferidas pela pintura das partículas de areia de diferentes dimensões. Quando a comporta é colocada no canal e se inicia a erosão da cavidade de erosão, as primeiras partículas que são transportadas para jusante são as partículas que tem uma dimensão menor e conseqüentemente são as primeiras a depositar a jusante. Desta forma na barra de deposição as partículas superiores têm uma dimensão maior (partículas com cor azul e diâmetro de 0,43 mm) comparativamente às partículas depositadas em primeiro lugar (partículas com cor laranja e diâmetro de 0,18 mm).

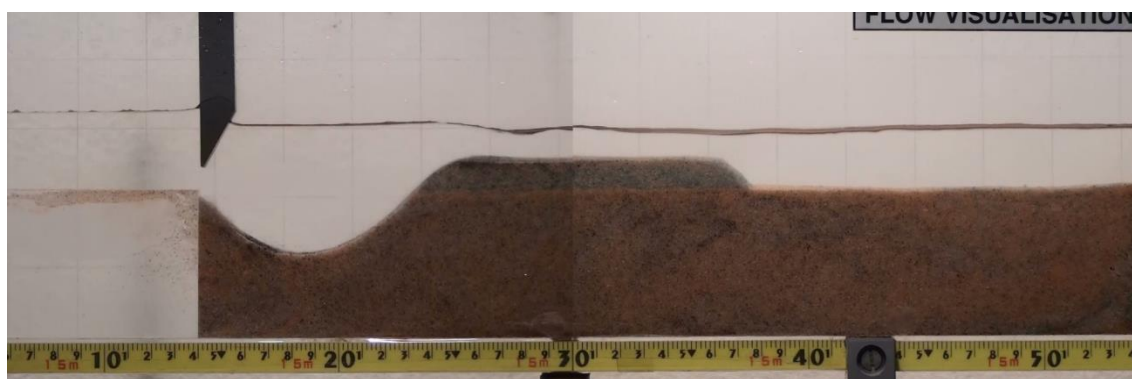


Figura 4.29 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para  $Q=0,055$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L=0$  cm (Ensaio n.º 35), para  $t=3$  min

### 4.4 Análise dos resultados dos ensaios com esferas de vidro

Apresentam-se nesta secção os resultados obtidos com um leito uniforme constituído por esferas de vidro com 2 mm de diâmetro, analisando-se a evolução temporal do perfil longitudinal do leito a jusante da comporta. Nas diferentes subsecções analisa-se a influência de diferentes parâmetros: comprimento da bacia de dissipação (subsecção 4.4.1), abertura da comporta (subsecção 4.4.2) e altura do colchão de água a jusante (subsecção 4.3.3). Atendendo ao facto de que para o leito com esferas de vidro apenas se realizaram ensaios com o caudal  $Q=0,0861$  L/s, não será feita a análise à influência da variação do mesmo.

#### 4.4.1 Análise da influência do comprimento da bacia de dissipação na evolução temporal do perfil

Com o objetivo de analisar a influência do valor do comprimento da bacia de dissipação,  $L$ , nos perfis longitudinais de erosão e sua evolução temporal, foram analisados os ensaios n.º 41, 42, 43 e 44 medidos com  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L$  variável. Nas figuras 30 e 31 observam-se as imagens dos instantes 5 s do pormenor da primeira parte do canal e 10 minutos respetivamente, correspondentes ao ensaio n.º 41.

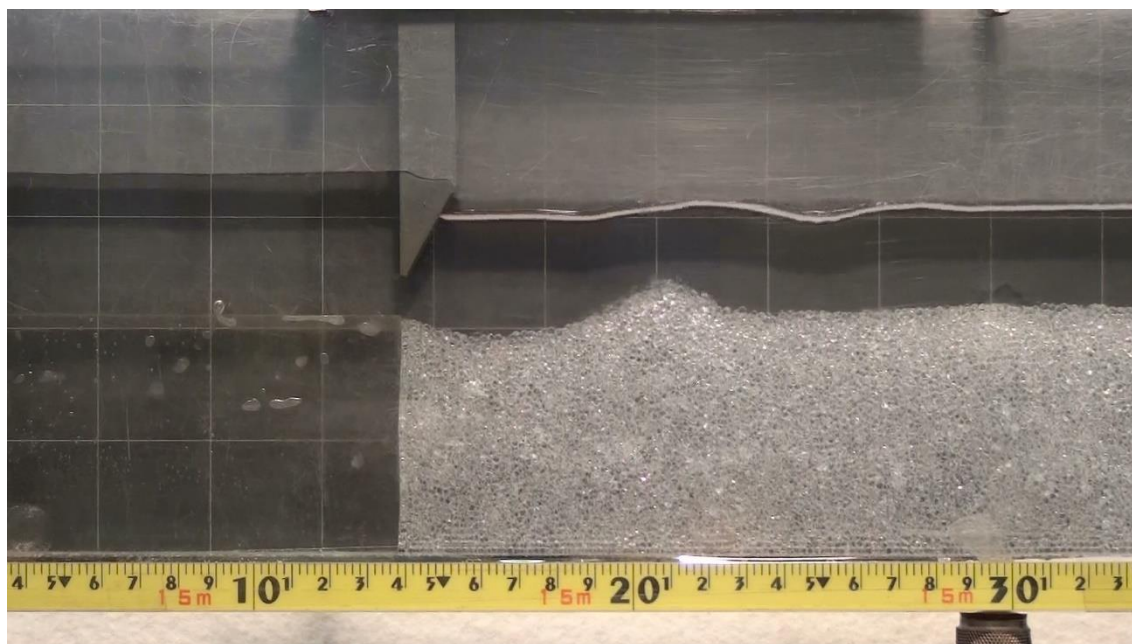


Figura 4.30 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $L$  [cm] (Ensaio n.º 41), para  $t=5$  s (pormenor)

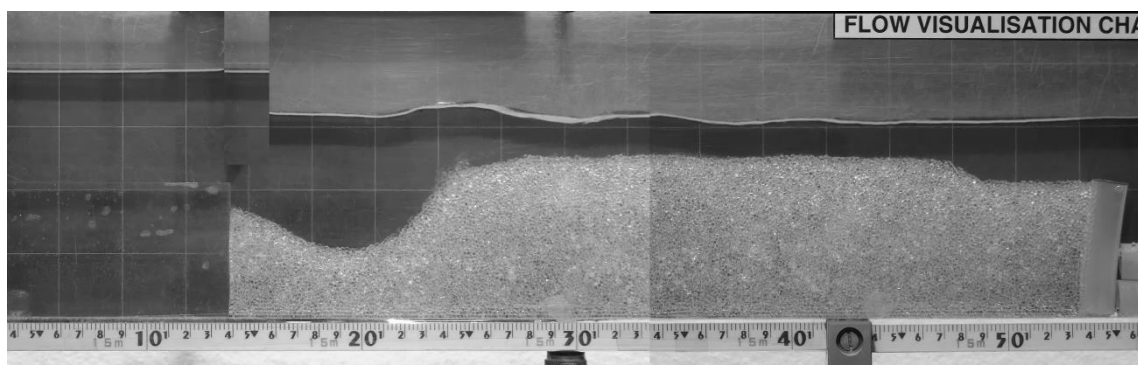


Figura 4.31 - Imagem do perfil longitudinal do leito de sedimentos, obtida para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $L$  [cm] (Ensaio n.º 41), para  $t=10$  min

Nos gráficos das figuras 4.32, 4.33 e 4.34 representam-se os perfis longitudinais de erosão dos ensaios n.º 41, 42, 43 e 44, caracterizados por  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L$  variável. Tendo por base os gráficos da figura conclui-se que desde que a comporta é colocada, o movimento das esferas de vidro é diferente para os diferentes valores de  $L$ , em particular o ensaio n.º 41 em que o  $L=0$  cm. O referido ensaio forma rapidamente a cavidade de erosão e a barra de deposição comparativamente aos restantes, que se mostram mais lentos. Conclui-se que tal como nos ensaios da areia para estas condições, quanto menor o comprimento da bacia de dissipação ( $L$ ) maior será a erosão bem como a deposição dos sedimentos a jusante, provocando assim uma barra com altura e extensão maior visível no gráfico da figura 4.35.

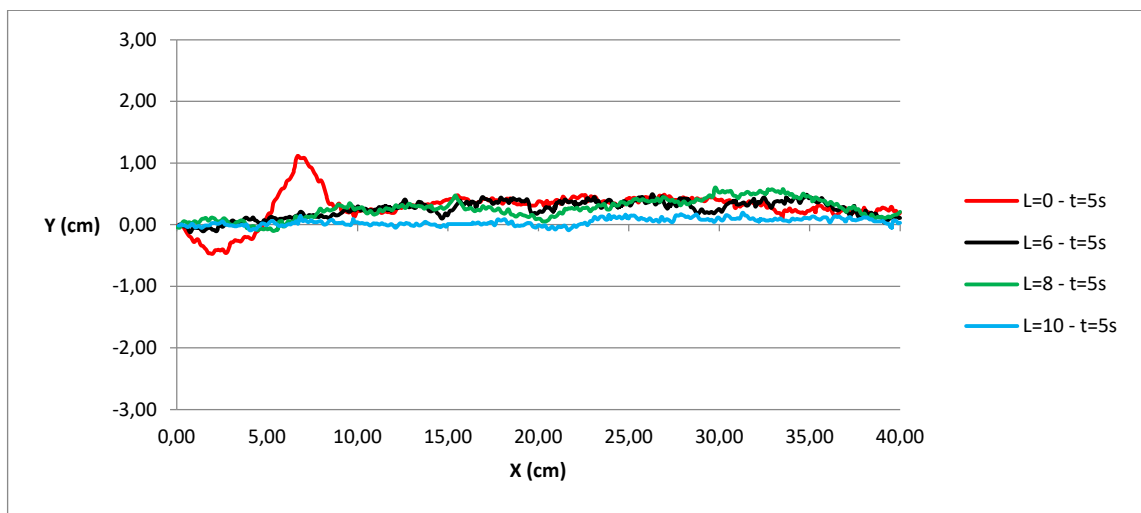


Figura 4.32 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $L$  [cm] (Ensaio n.º 41, 42, 43 e 44), para  $t=5$  s

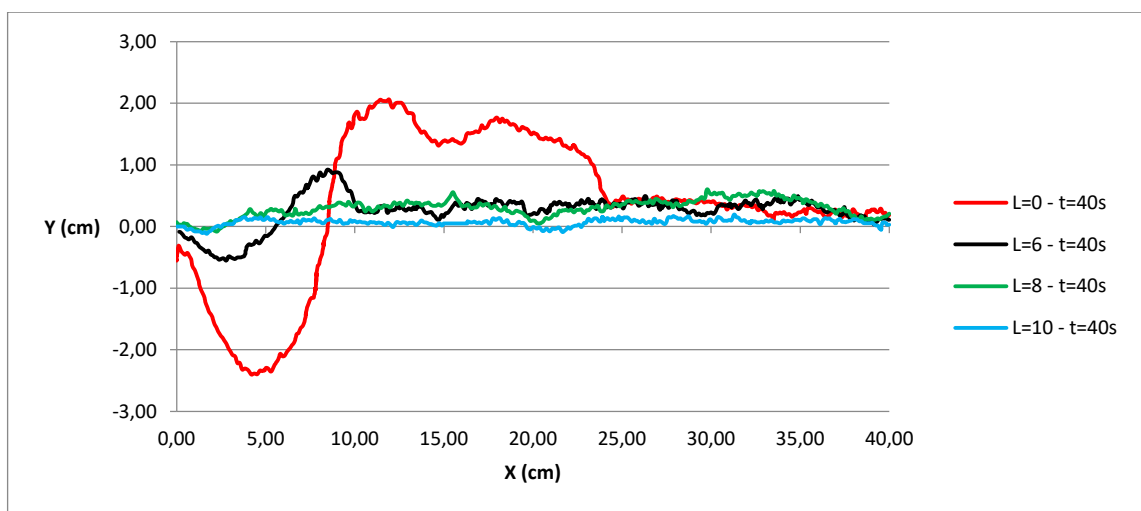


Figura 4.33 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $L$  [cm] (Ensaio n.º 41, 42, 43 e 44), para  $t=40$  s

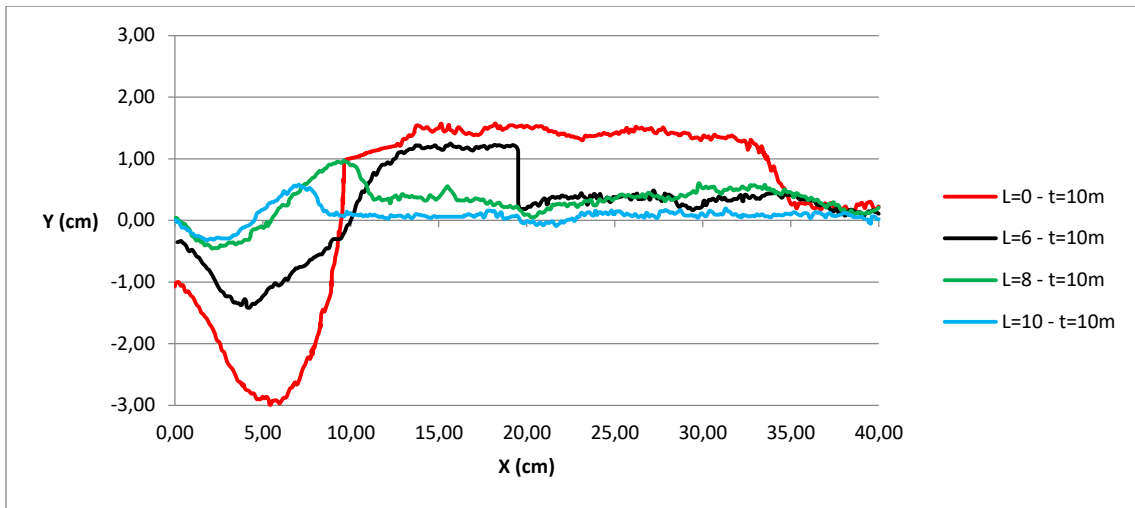


Figura 4.34 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $L$  [cm] (Ensaio n.º 41, 42, 43 e 44), para  $t=10$  min

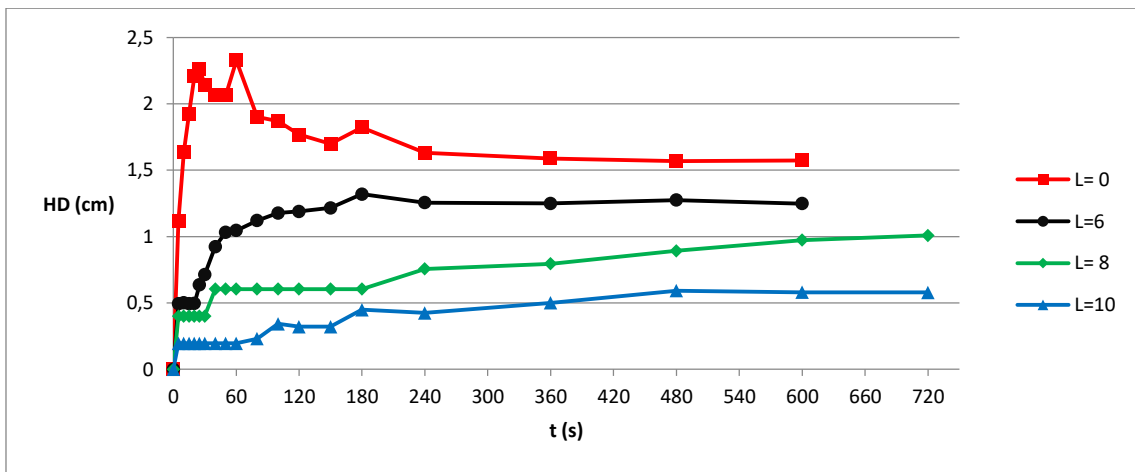


Figura 4.35 - Evolução temporal da máxima elevação da barra (HD), obtido para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $L$  [cm] (Ensaio n.º 41, 42, 43 e 44)

No gráfico da figura 4.36 e 4.37 representam-se os perfis longitudinais do leito de sedimentos obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e  $L$  variável, das esferas de vidro e areia pintada para o instante  $t=40$  s. Tendo por base os gráficos da figura conclui-se que a areia tem uma maior cavidade de erosão e barra de deposição em todos os valores de  $L$  comparativamente às esferas de vidro, vindo ao encontro do esperado. Isto acontece pois as esferas de vidro têm todas as mesmas dimensões e forma esférica, o que limita a capacidade de progredir para jusante, atendendo ao atrito entre as esferas de vidro que é mais reduzido comparativamente às partículas dos sedimentos de areia que assumem várias formas e dimensões diferentes.



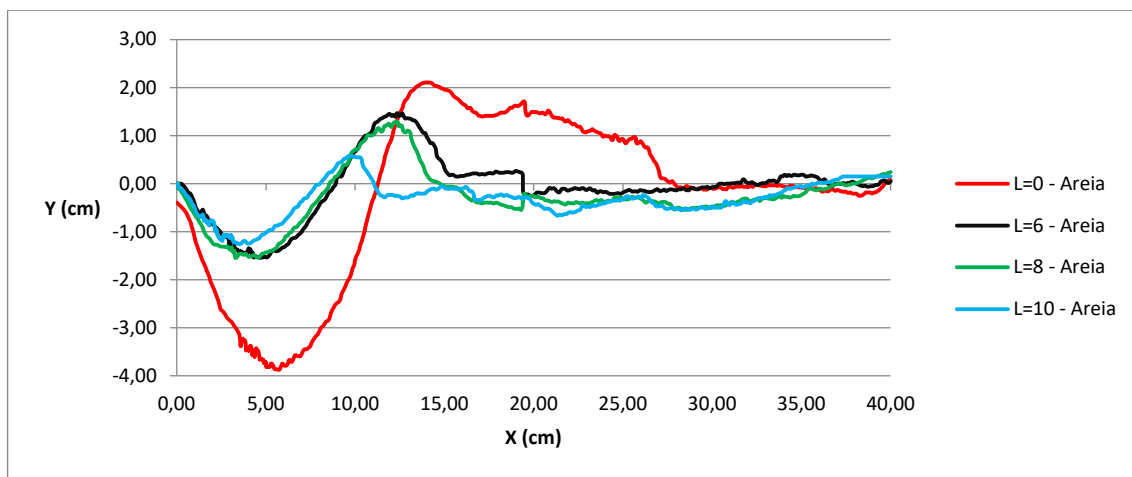


Figura 4.36 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $L$  [cm] (Ensaio n.º 1, 2, 17, 18),  $t=40$  s

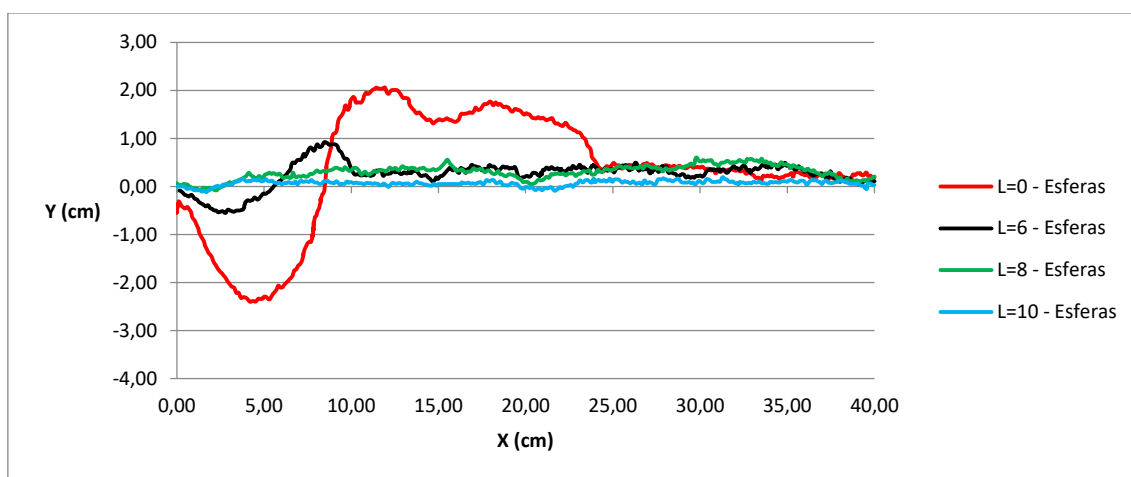


Figura 4.37 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $L$  [cm] (Ensaio n.º 41, 42, 43 e 44),  $t=40$  s

#### 4.4.2 Análise da influência do valor da abertura da comporta na evolução temporal do perfil

No que diz respeito à análise de sensibilidade temporal ao valor da abertura da comporta,  $b$ , foram seleccionados os ensaios n.º 41 e 49, caracterizados por  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$  cm,  $P=1$  cm. Comparando os dois ensaios, através dos gráficos das figuras 4.38 e 4.39, conclui-se que no primeiro instante, após ser colocada a comporta, o ensaio n.º 41, para  $b=0,6$  cm, apresenta uma maior cavidade de erosão quando comparado com o ensaio n.º 49, para  $b=0,9$  cm. No entanto, para 50 segundos, tal como podemos verificar no gráfico da figura

4.40, estes equilibram e apresentam perfis longitudinais do leito praticamente coincidentes ao longo de todo o canal até ao final do ensaio com  $t=10$  min, tendo o mesmo tempo de duração do ensaio.

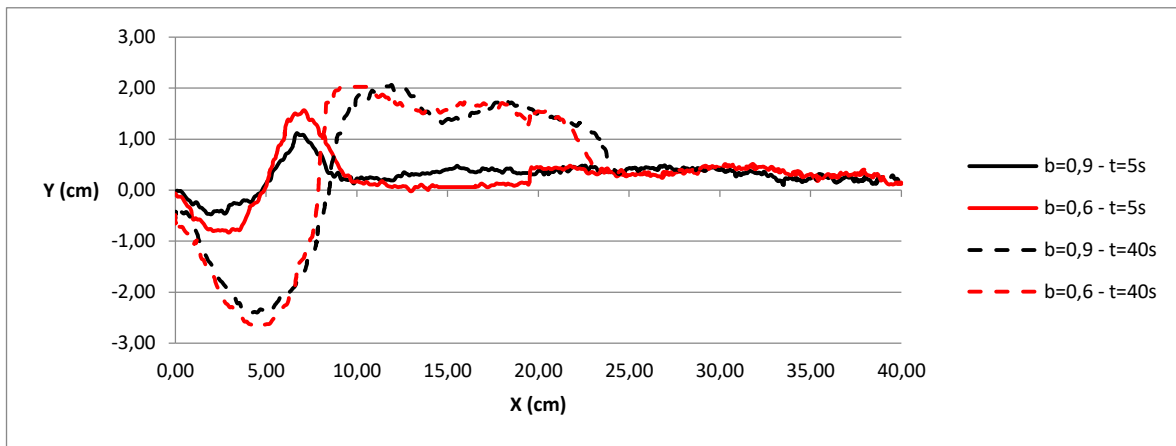


Figura 4.38 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $b$  [cm] (Ensaio n.º 41 e 49),  $t=5$  s e  $t=40$  s

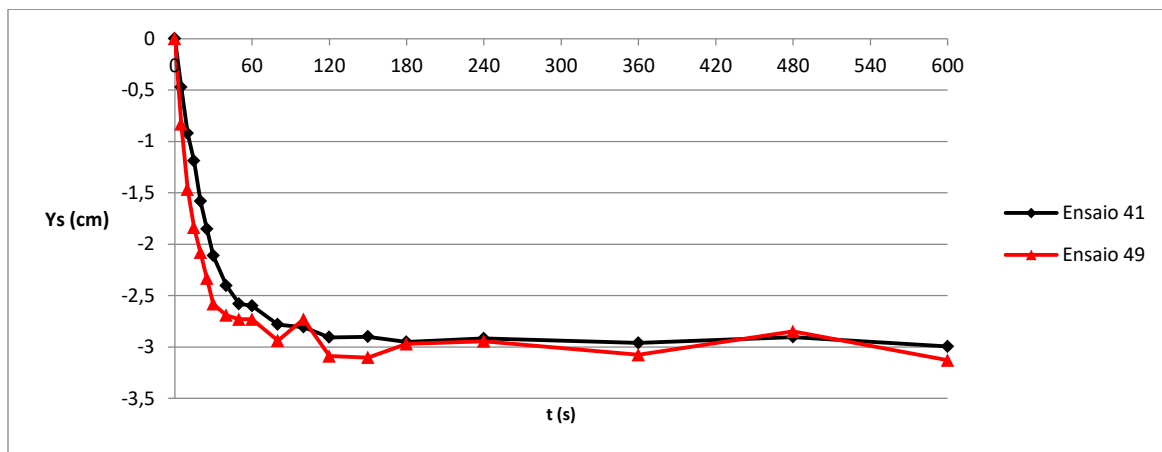


Figura 4.39 - Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão ( $Y_s$ ), obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $b$  [cm] (Ensaio n.º 41 e 49)

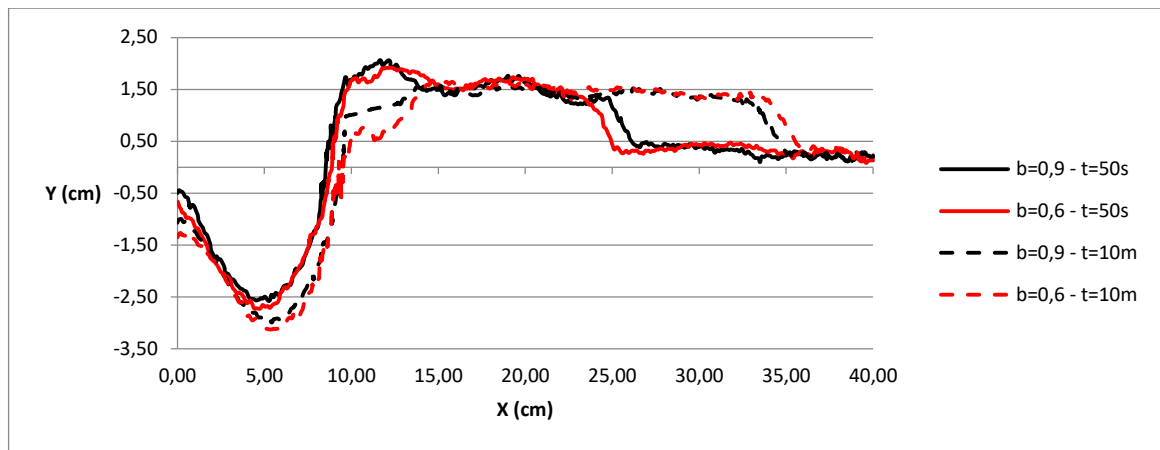


Figura 4.40 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $b$  [cm] (Ensaio n.º 41 e 49),  $t=50$  s e  $t=10$  min

No gráfico da figura 4.41 representam-se os perfis longitudinais do leito de sedimentos dos ensaios n.º 1, 9, 41 e 49 obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$ ,  $P=1$  cm e  $b$  variável, dos ensaios de esferas de vidro e areia pintada para o instante  $t=40$  s. Tendo por base o gráfico da figura comprova-se mais uma vez que, tal como na análise da sensibilidade temporal ao valor do comprimento da bacia de dissipação, a areia tem uma maior cavidade de erosão e barra de deposição relativamente às esferas de vidro. Isto deve-se ao facto das esferas de vidro terem todas a mesma forma e mesma dimensão, ao contrário da areia que tem diferentes dimensões e formas, provocando uma maior velocidade do aumento da cavidade de erosão.

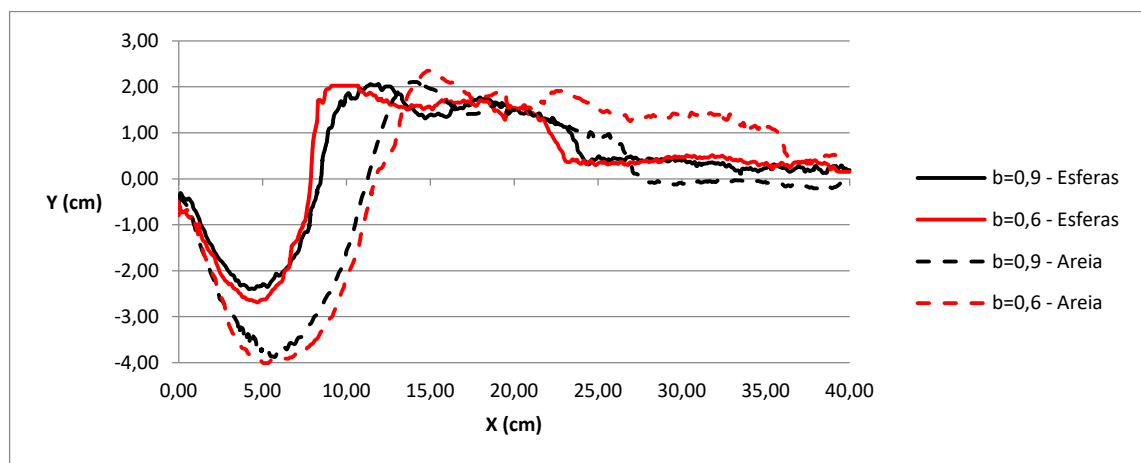


Figura 4.41 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$  cm,  $P=1$  cm e diferentes valores de  $b$  [cm] (Ensaio n.º 1, 9, 41 e 49),  $t=40$  s

#### 4.4.3 Análise da influência do valor da altura do colchão de água a jusante na evolução temporal do perfil

No que se refere à análise de sensibilidade temporal ao valor do colchão de água a jusante condicionada pela altura do descarregador a jusante,  $P$ , foram selecionados os ensaios n.º 41 e 45 caracterizados por  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$  cm,  $b=0,9$  cm. Atendendo às diferentes alturas do colchão de água a jusante, a forma como as esferas de vidro se depositam é muito diferente tal como se comprova nos gráficos da figura 4.42 e 4.43 para diferentes instantes. A deposição das esferas no caso de  $P=1$  cm apresenta uma barra que se forma imediatamente a jusante da cavidade de erosão e com uma altura constante desde o início ao fim da mesma ao longo da extensão do canal. Por sua vez, no ensaio com  $P=2,5$  cm, são também depositadas logo a jusante da cavidade de erosão com a diferença de ter uma maior altura de deposição formando uma concavidade voltada para baixo pronunciada. Este alisamento da barra a jusante foi também observado por Faruque et al. (2006) para menores alturas de água do colchão de água a jusante.

Destaca-se a profundidade de erosão idêntica numa primeira fase dos ensaios seguindo, como seria de esperar, uma maior profundidade para  $P=1$  cm, observável no gráfico da figura 4.44 tal como aconteceu nos ensaios de areia pintada nas mesmas condições.

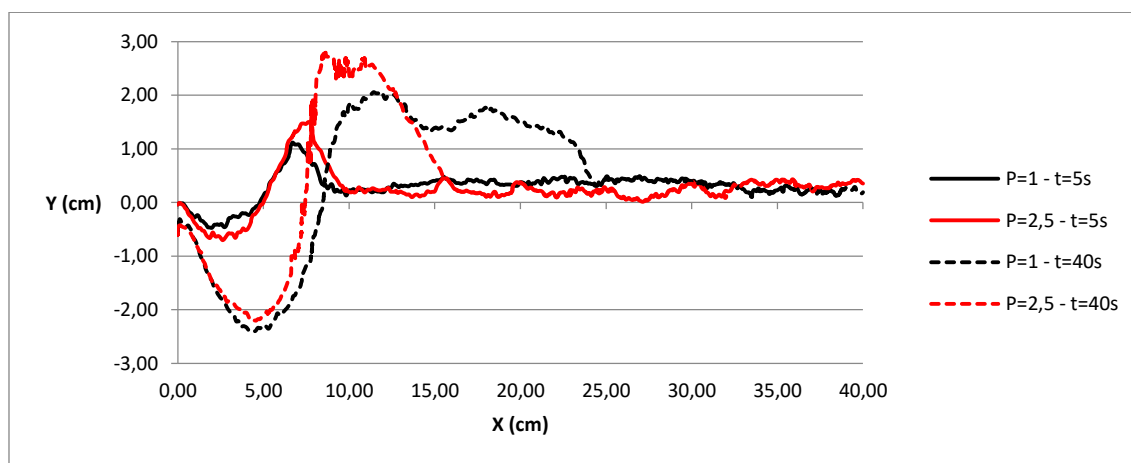


Figura 4.42 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$  cm,  $b=0,9$  cm e diferentes valores de  $P$  [cm] (Ensaio n.º 41 e 45),  $t=5$  s e  $t=40$  s

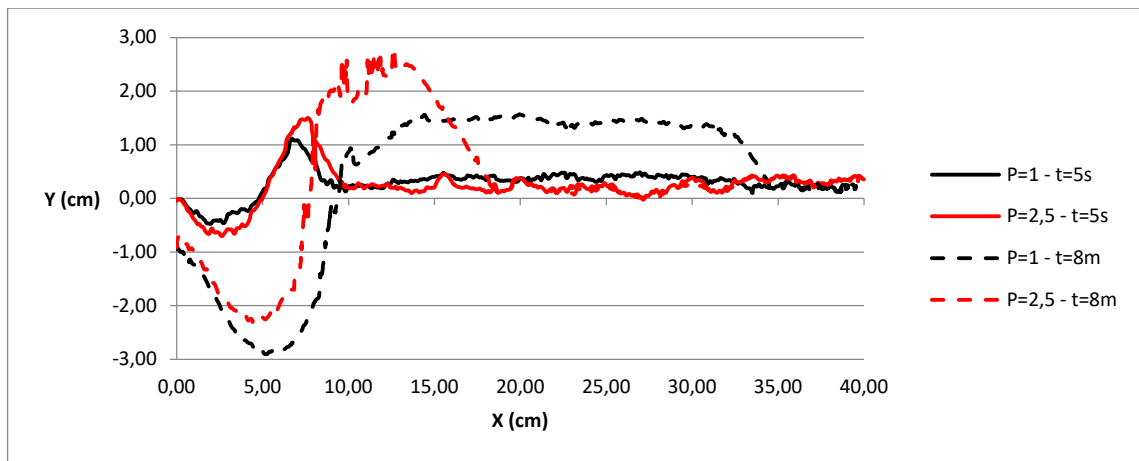


Figura 4.43 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$  cm,  $b=0,9$  cm e diferentes valores de  $P$  [cm] (Ensaio n.º 41 e 45),  $t=5$  s e  $t=8$  min

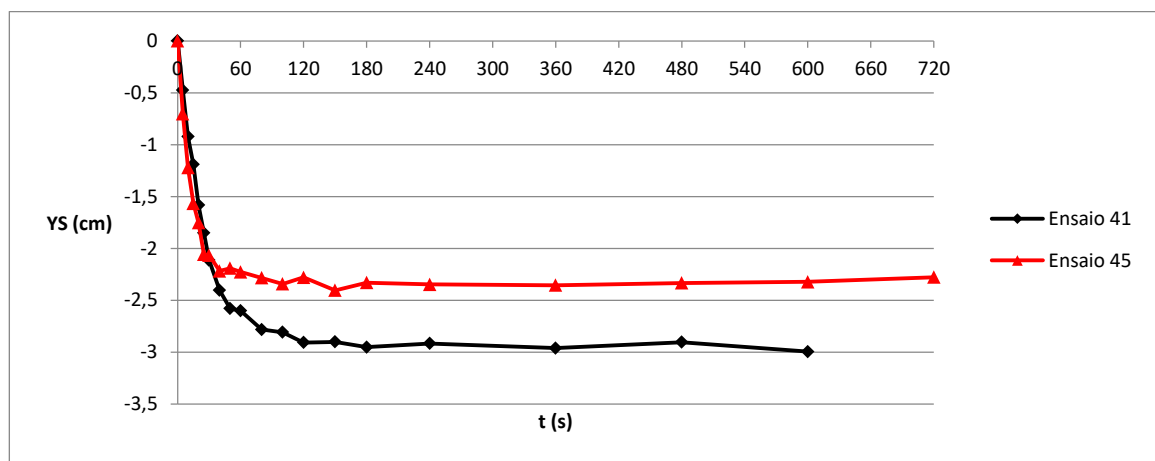


Figura 4.44 - Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão ( $Y_S$ ), obtidos para  $Q=0,0861$  L/s,  $L=0$  cm,  $b=0,9$  cm e diferentes valores de  $P$  [cm] (Ensaio n.º 41 e 45)

#### 4.5 Análise para idêntico número de Froude densimétrico

Apresenta-se nesta secção a comparação de ensaios entre areia pintada e esferas de vidro com número de Froude densimétrico da mesma ordem de grandeza. De realçar que como foi considerada a velocidade média do escoamento na secção da comporta, apenas serão analisados os ensaios com  $L=0$  cm. Depois de calcular o respetivo número de Froude para todos os ensaios, constatou-se que os ensaios que apresentam números de Froude densimétricos idênticos são: no caso da areia pintada ensaios com  $Q=0,055$  L/s,  $b=0,9$  cm e  $Fr=5,98$ ; e no caso das esferas de vidro ensaios com  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,6$  cm e  $Fr=5,39$ . No

conjunto de ensaios realizados os que se enquadram nestas condições são: (a) os ensaios n.º 35 e 49, areia pintada e esferas de vidro respetivamente, e (b) os ensaios n.º 7 e 54, areia pintada e esferas de vidro respetivamente. No primeiro conjunto de ensaios (n.º 35 e 49) foi analisado o comportamento do leito de sedimentos ao longo do decorrer do ensaio, tendo-se observado no início dos ensaios, visível no gráfico da figura 4.45, um maior deslocamento das esferas de vidro comparativamente à areia pintada, fator justificado pela diferença de caudais dos ensaios. De seguida, ao longo do decorrer do ensaio verificou-se um equilíbrio dos leitos, comprovado no gráfico da figura 4.46.

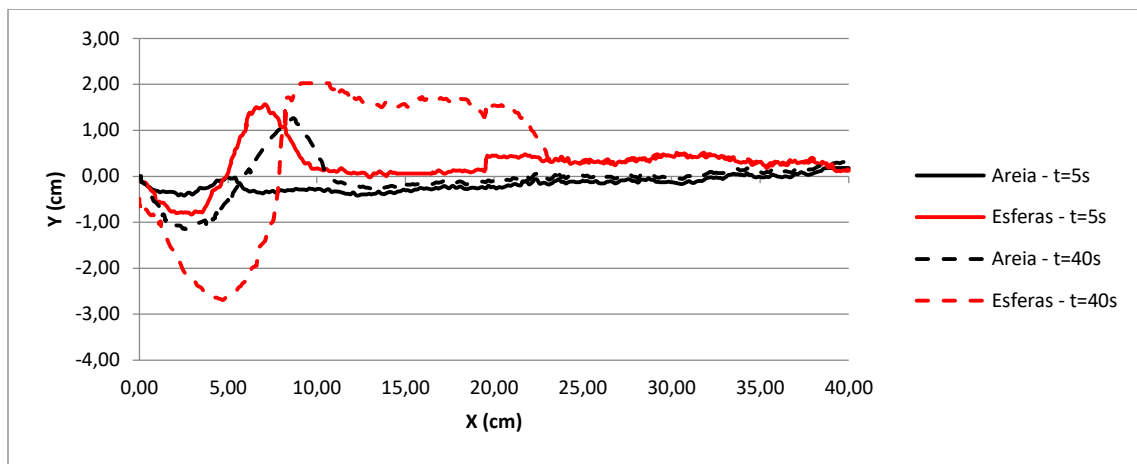


Figura 4.45 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,055$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $L=0$  cm e  $P=1$  cm (Ensaio n.º 35),  $t=5$  s e  $t=40$  s e  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,6$  cm,  $L=0$  cm e  $P=1$  cm (Ensaio n.º 49),  $t=5$  s e  $t=40$  s

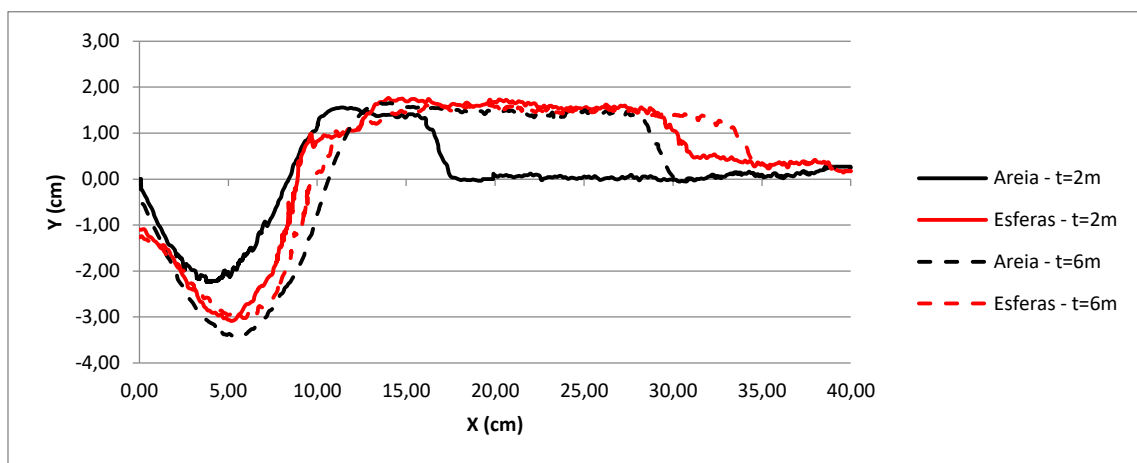


Figura 4.46 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,055$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $L=0$  cm e  $P=1$  cm (Ensaio n.º 35),  $t=2$  m e  $t=6$  m e  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,6$  cm,  $L=0$  cm e  $P=1$  cm (Ensaio n.º 49),  $t=2$  min e  $t=6$  min

No segundo conjunto de ensaios (n.º 7 e 54) foi igualmente analisado o comportamento do leito de sedimentos ao longo do decorrer do ensaio, tendo-se observado nos gráficos das figuras 4.47 e 4.48, que o comportamento ao longo do perfil é idêntico ao registado no primeiro conjunto com a única diferença associada à altura do colchão de água a jusante. Isto é semelhante ao observado em análises anteriores (secção 4.3.4 e 4.4.3) em que os ensaios com  $P=1$  cm apresentam uma maior profundidade máxima de erosão e menor altura máxima de deposição comparativamente a ensaios com  $P=2,5$  cm.

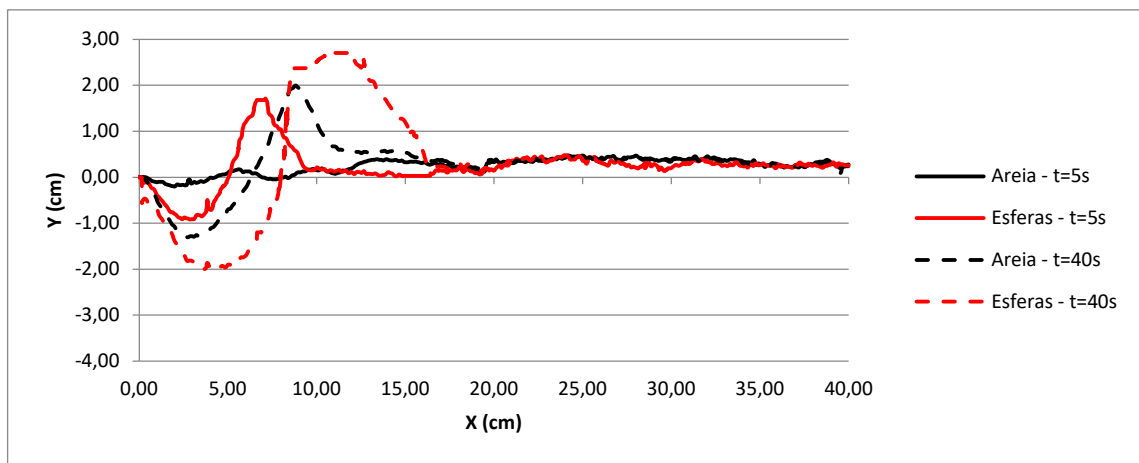


Figura 4.47 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,055$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $L=0$  cm e  $P=2,5$  cm (Ensaio n.º 7),  $t=5$  s e  $t=40$  s e  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,6$  cm,  $L=0$  cm e  $P=2,5$  cm (Ensaio n.º 54),  $t=5$  s e  $t=40$  s

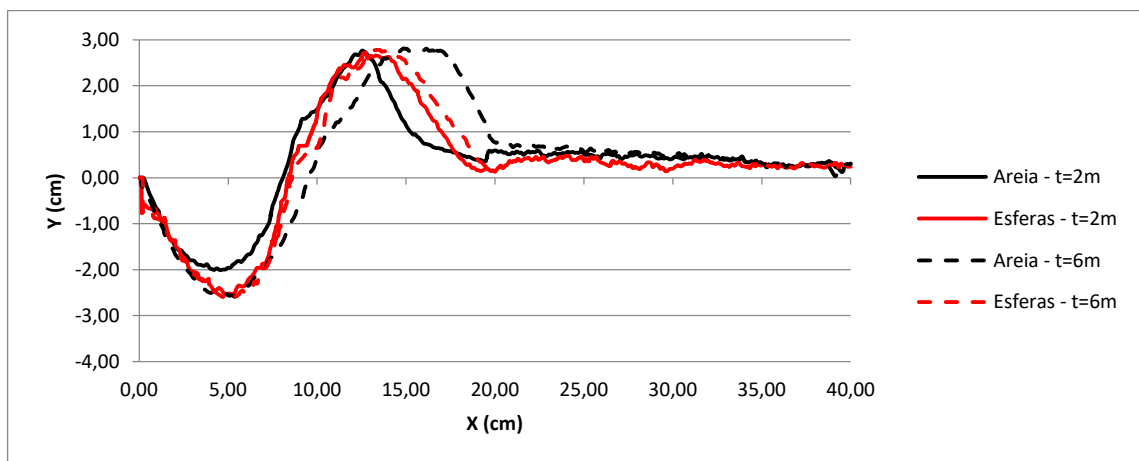


Figura 4.48 - Perfis longitudinais do leito de sedimentos, obtidos para  $Q=0,055$  L/s,  $b=0,9$  cm,  $L=0$  cm e  $P=2,5$  cm (Ensaio n.º 7),  $t=2$  m e  $t=6$  m e  $Q=0,0861$  L/s,  $b=0,6$  cm,  $L=0$  cm e  $P=2,5$  cm (Ensaio n.º 54),  $t=2$  min e  $t=6$  min

#### 4.6 Celeridade

Apresenta-se na atual secção o estudo e comparação da celeridade, que consiste na velocidade de progressão para jusante da crista da barra, dos ensaios n.º 1 e 41, para areia pintada e esferas de vidro respetivamente, estimada a partir da máxima altura de deposição (HD) e respetiva ordenada (XD) de sedimentos de areia e esferas de vidro nos diferentes instantes de tempo. Na equação 7 apresenta-se a fórmula utilizada para o cálculo da celeridade.

$$C_D = \frac{x_{D,t_i} - x_{D,t_{i-1}}}{t_i - t_{i-1}} \quad [7]$$

Apresenta-se nas figuras 4.49 e 4.50 o gráfico da evolução da celeridade dos respetivos ensaios com diferentes escalas de visualização.

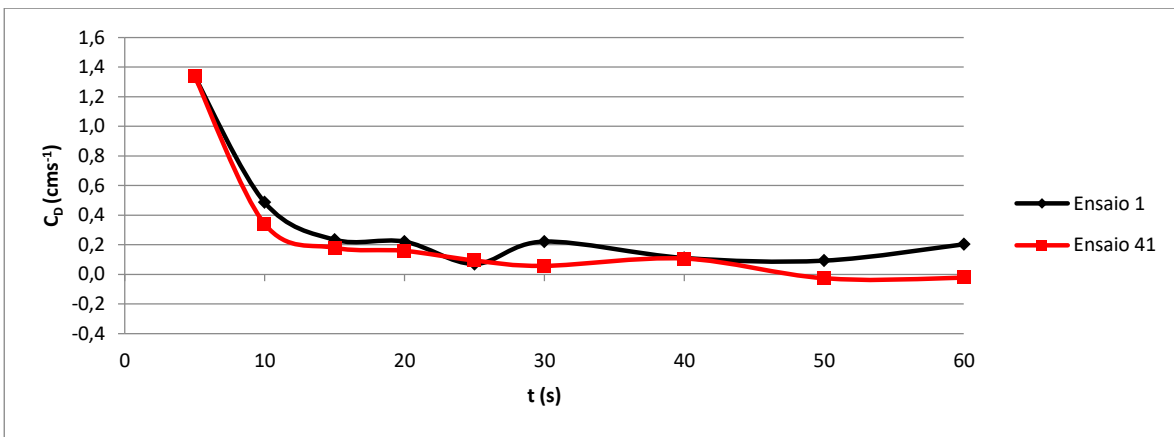


Figura 4.49 – Gráfico celeridade obtido para Q=0,0861 L/s, b=0,9 cm, L=0 cm e P=1 cm (Ensaio n.º 1), e Q=0,0861 L/s, b=0,9 cm, L=0 cm e P=1 cm (Ensaio n.º 41), instante 0 s até 60 s

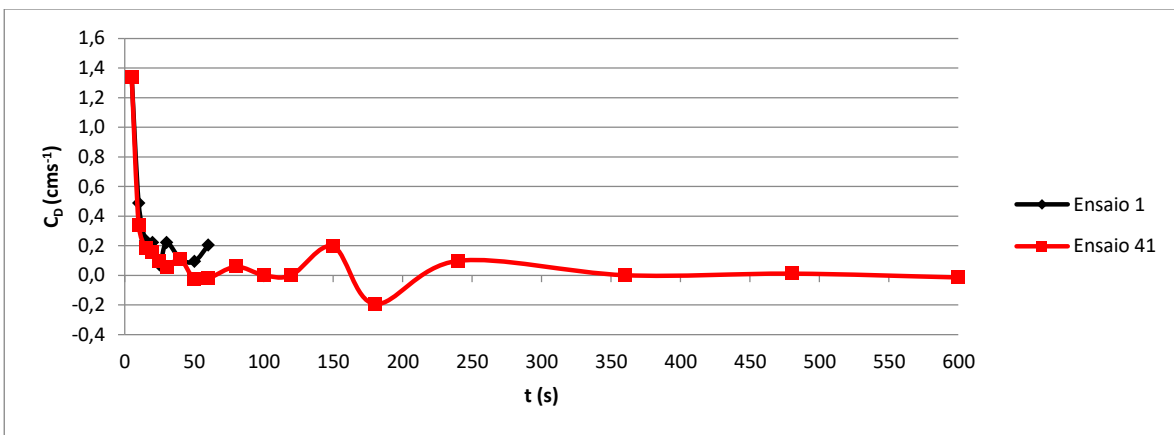


Figura 4.50 – Gráfico celeridade obtido para Q=0,0861 L/s, b=0,9 cm, L=0 cm e P=1 cm (Ensaio n.º 1), e Q=0,0861 L/s, b=0,9 cm, L=0 cm e P=1 cm (Ensaio n.º 41), instante 0 s até 10 min



Com base na análise das figuras 4.49 e 4.50 conclui-se que na fase inicial os dois ensaios tem comportamentos idênticos. No ensaio com as esferas de vidro constata-se que o gráfico fica linear ao longo da extensão na parte final do gráfico, concluindo que a barra não tem evolução atingindo a estagnação.



## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentam-se, de forma concisa, as conclusões mais relevantes de todo o trabalho desenvolvido e também algumas sugestões de propostas para trabalhos a ser desenvolvidos no futuro.

### 5.1 Conclusões gerais do trabalho

A realização da presente dissertação teve como objetivo o estudo e análise da configuração do leito de sedimentos ao longo de um canal de fundo móvel. Observou-se o transporte das partículas do fundo para jusante, originando cavidades de erosão e barras de deposição, tendo por base mais de 55 ensaios com diversas condições experimentais.

No que diz respeito à aferição do método experimental conclui-se que no caso de se manterem exatamente as mesmas condições experimentais, em particular o caudal, os leitos dos diferentes ensaios são idênticos.

No que diz respeito à análise da areia pintada, não foi possível provar que tem o mesmo comportamento relativamente à areia normal, no entanto, nota-se que a taxa no aumento da profundidade máxima de erosão é semelhante nos dois ensaios.

No que diz respeito às diferentes condições experimentais, do ponto de vista do comportamento em geral do leito é idêntico tanto na areia como nas esferas de vidro. Relativamente aos valores do comprimento da bacia de dissipação ( $L$ ), quanto menor o valor de  $L$  maior será a rapidez de deslocamento das partículas para jusante. Quanto maior o valor de caudal ( $Q$ ), maior o deslocamento das partículas. Relativamente ao valor da abertura da comporta ( $b$ ), o valor de  $b=0,6$  cm provoca uma maior profundidade de erosão comparativamente a  $b=0,9$  cm. Tal facto é justificado pela maior velocidade na comporta no caso de  $b=0,6$  cm. Relativamente ao valor da altura do colchão de água a jusante condicionada pela altura do descarregador a jusante ( $P$ ), observa-se para  $P=1$  cm uma maior profundidade de erosão e menor altura máxima de deposição, comparativamente a ensaios com  $P=2,5$  cm.

Na comparação de ensaios com idêntico número de Froude densimétrico conclui-se que as diferenças da granulometria da areia relativamente às esferas de vidro provocam diferenças no início dos ensaios mas depois a tendência é normalizar e equiparar.

Observou-se idêntica celeridade da barra para os instantes iniciais dos ensaios, no caso de se adotarem as mesmas condições experimentais para a areia e as esferas de vidro.

## **5.2 Desenvolvimento de trabalhos futuros**

Embora os enormes esforços de garantir que as condições experimentais estão conforme o previsto, por vezes podem existir falhas mecânicas que não dependem do utilizador, nomeadamente na precisão do caudal escoado no canal ao longo do ensaio. Assim, em futuros trabalhos deste tipo, a utilização de um mecanismo eletrónico que define, sem margem de erro, o caudal constante pretendido ao longo de todo o ensaio, será uma mais-valia muito grande para credibilidade dos resultados apresentados.

No que diz respeito à melhoria da qualidade das imagens para posteriormente serem processadas, uma das sugestões passaria por colocar ao mesmo tempo, no mesmo ensaio, duas câmaras de filmar em que uma filma a primeira parte do canal e a outra filma a segunda parte do canal. Desta forma, para além de garantir que as condições experimentais são exatamente as mesmas nas duas imagens, quando unidas, não existirão quaisquer diferenças.

Sugere-se igualmente a realização de ensaios em que se altere as condições experimentais, de forma a que os números de Froude sejam exatamente iguais na areia e nas esferas de vidro.

No sentido de encontrar medidas de mitigação da erosão localizada, sugere-se a colocação de sedimentos de maiores dimensões imediatamente a jusante do fundo fixo para estudar a redução da mesma.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aamir, M., e Ahmad, Z. (2016). Review of literature on local scour under plane turbulent wall jets. *Physics of Fluids*, 28, 1-20.
- Cardoso, A. H. (1998). *Hidráulica Fluvial*. Lisboa, Portugal: Editora Calouste Gulbenkian.
- Couto, L. T., e Cardoso, A. H. (2001). Erosões localizadas junto de encontros e pilares de pontes. *Parte I – Caracterização da situação de referência, recursos hídricos*, 22 (1), 65-74.
- Dargahi, B. (2010). Scour development downstream of a spillway. *Journal of Hydraulic Research*, 41 (4), 417-426.
- Dey, S., e Sarkar, A. (2006). Response of velocity and turbulence in submerged wall jets to abrupt changes from smooth to rough beds and its application to scour downstream of an apron. *Journal of Fluid Mechanics*, 556, 387-419.
- Espírito Santo, O. (2012). *Geologia 11º*. Portugal: Colégio Vasco da Gama <http://www.colegiovascodagama.pt/ciencias3c/onze/geologia2.1sed.html>. Acedido em Outubro 2017.
- Euler, T., e Herget, J. (2009). Controls on local scour and deposition induced by obstacles in fluvial environments. *Catena*, 91, 35-46.
- Faruque, M., Sarathi, P., e Balachandar, R. (2006). Clear Water Local Scour by Submerged Three-Dimensional Wall Jets: Effect of Tailwater Depth. *Journal of Hydraulic Engineering*, 575-580.
- Julien, P. Y. (2010). *Erosion and Sedimentation*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, UK.

- Junior, P. P. A. (2013). *Avaliação da Produção e Transporte de Sedimentos na Bacia Hidrográfica do Rio Itaqueri, Municípios de Itirapina e Brotas – Sp* (Dissertação de Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Melville, B.W., e Lim, S. Y. (2014). Scour Caused by 2D Horizontal Jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140 (2), 149-155.
- Oliveto, G., e Hager, W. H. (2014). Morphological Evolution of Dune-Like Bed Forms Generated by Bridge Scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140 (5), 1-6.
- Puhl, E. (2012). *Morfodinâmica e Condição de Equilíbrio do Leito sob a Ação de Correntes de Turbidez* (Dissertação de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- Rebello, J. M. L. (2015). *Estudo e Dimensionamento de um Canal Multi-Funções para Escoamentos em Superfície Livre* (Dissertação de Mestrado). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Richardson, E. V., & Davies, S. R. (2001). Evaluating Scour at Bridges. US Department of Transportation. HEC 18, FHWA-NHI-01-001.
- Silva, M. G. (2013). *Análise de Processos Hidrossedimentológicos em Escoamentos com Superfície Livre: Trecho do Projeto de Irrigação Iuiú no Rio São Francisco* (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Strasser, M. A. (2008). *Dunas Fluviais no Rio Solimões-Amazonas- Dinâmica e Transporte de Sedimentos* (Dissertação de Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

## ANEXOS

### Anexo I – Fotografias Areia Pintada

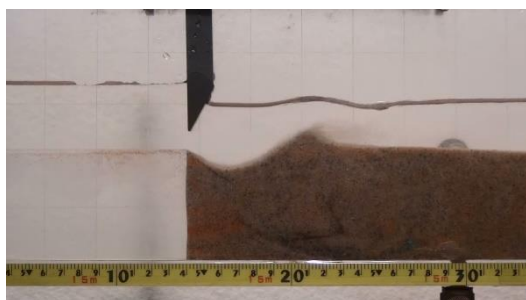


(a)



(b)

Figura A.I.1 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 0 s



(a)



(b)

Figura A.I.2 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 5 s



(a)



(b)

Figura A.I.3 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 10 s



(a)



(b)

Figura A.I.4 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 15 s



(a)



(b)

Figura A.I.5 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 20 s



(a)



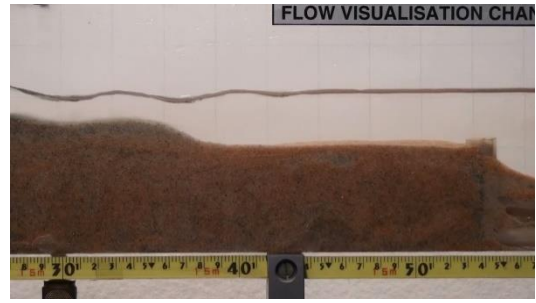
(b)

Figura A.I.6 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 25 s



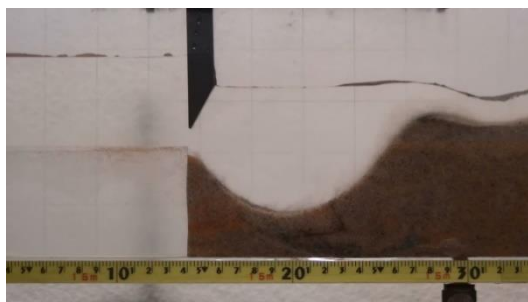


(a)



(b)

Figura A.I.7 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 30 s



(a)

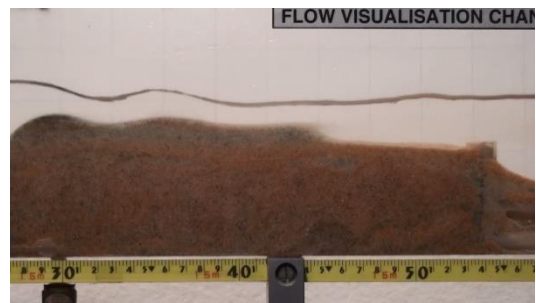


(b)

Figura A.I.8 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 40 s



(a)

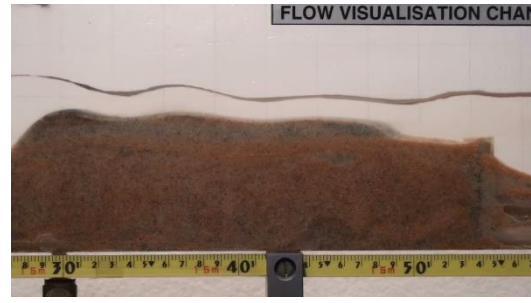


(b)

Figura A.I.9 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 50 s



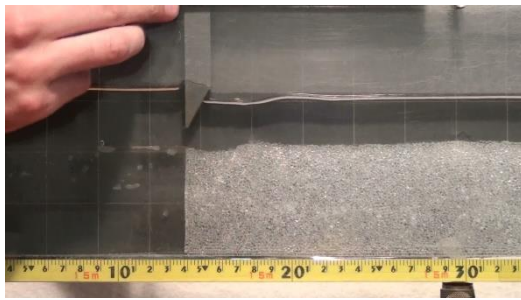
(a)



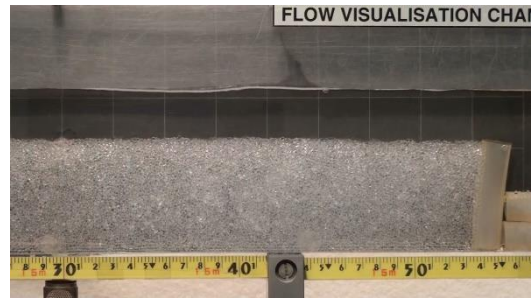
(b)

Figura A.I.10 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 1 realizado com areia pintada, no instante 1 min

## Anexo II – Fotografias Esferas de Vidro

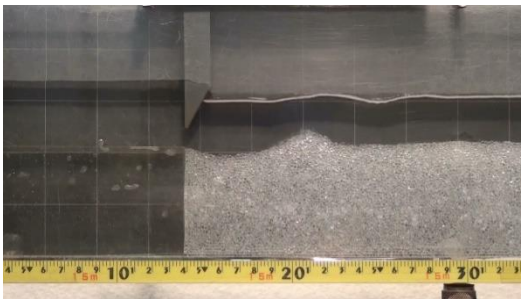


(a)



(b)

Figura A.II.1 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 0 s

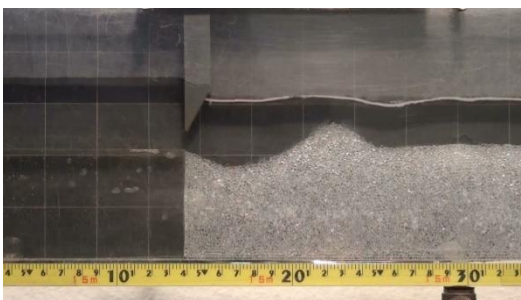


(a)



(b)

Figura A.II.2 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 5 s



(a)



(b)

Figura A.II.3 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 10 s

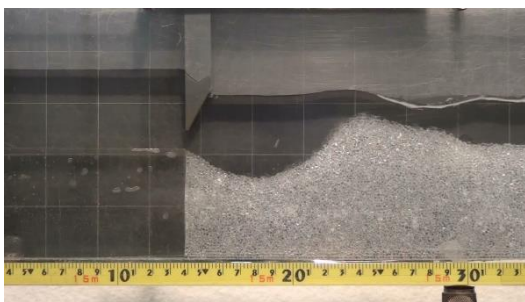


(a)



(b)

Figura A.II.4 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 15 s

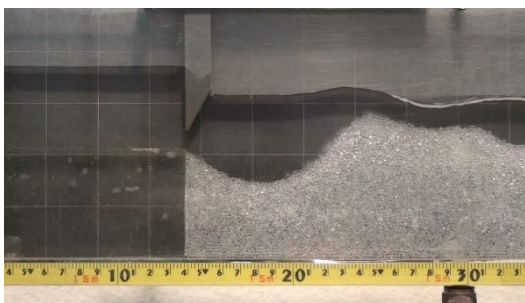


(a)

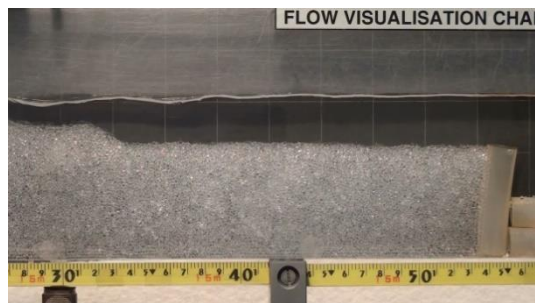


(b)

Figura A.II.5 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 20 s

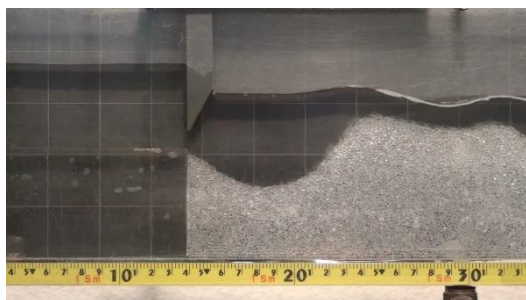


(a)



(b)

Figura A.II.6 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 25 s

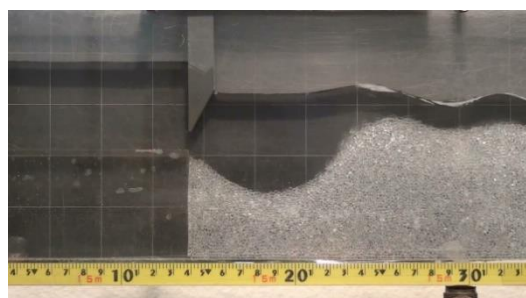


(a)



(b)

Figura A.II.7 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 30 s

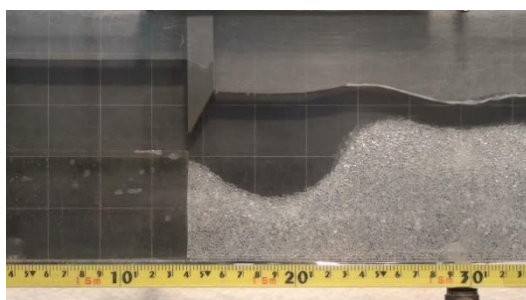


(a)



(b)

Figura A.II.8 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 40 s



(a)



(b)

Figura A.II.9 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 50 s

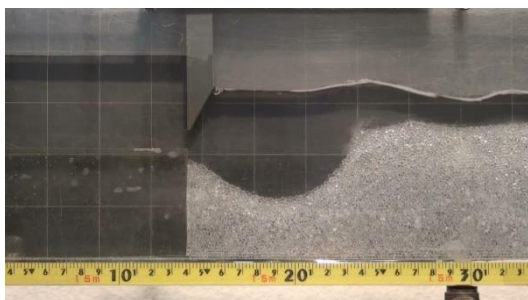


(a)



(b)

Figura A.II.10 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 1 min

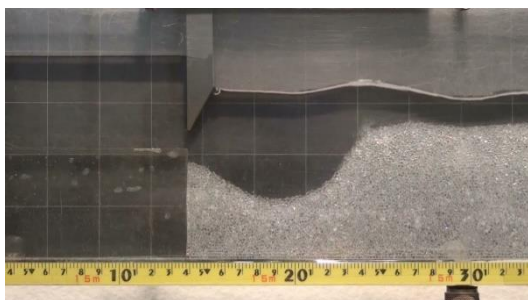


(a)



(b)

Figura A.II.11 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 1:20 min

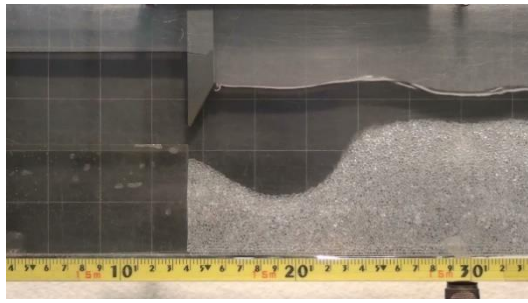


(a)

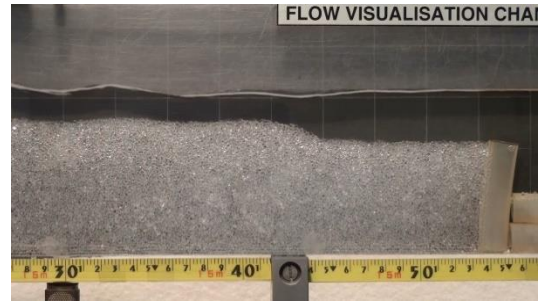


(b)

Figura A.II.12 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 1:40 min

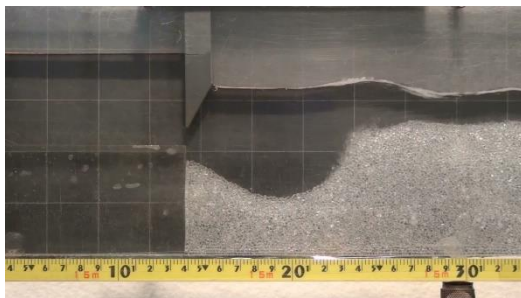


(a)



(b)

Figura A.II.13 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 2:00 min

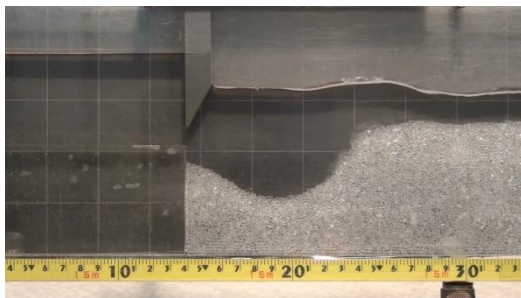


(a)



(b)

Figura A.II.14 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 2:30 min



(a)



(b)

Figura A.II.15 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 3:00 min

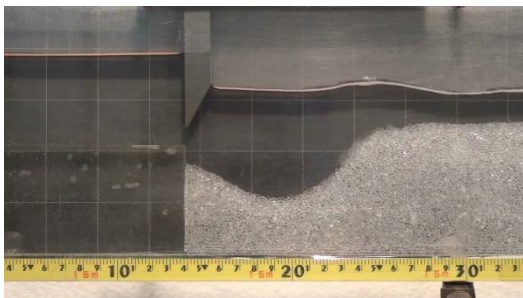


(a)

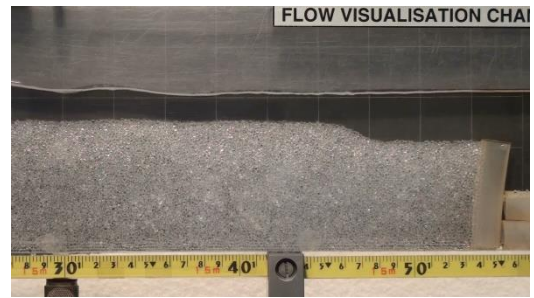


(b)

Figura A.II.16 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 4:00 min

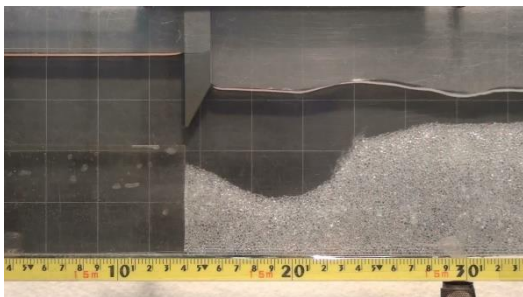


(a)



(b)

Figura A.II.17 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 6:00 min



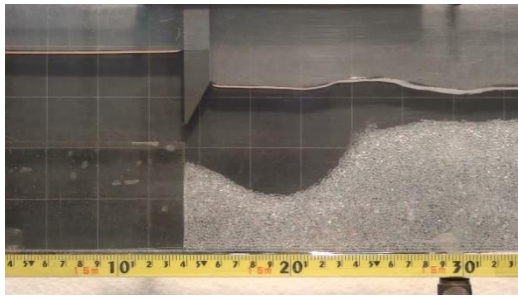
(a)



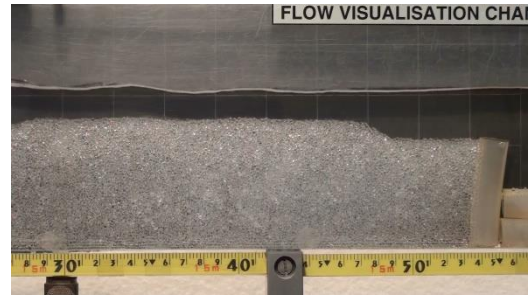
(b)

Figura A.II.18 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 8:00 min





(a)



(b)

Figura A.II.19 – Imagens da parte inicial (a) e final (b) do canal, obtidas para o ensaio n.º 41 realizado com esferas de vidro, no instante 10:00 min