



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

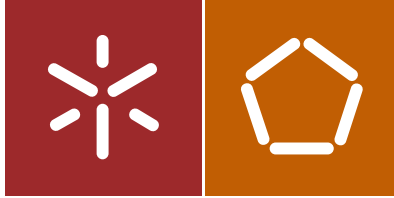
Inês Silva Cacho de Oliveira Guimarães

Análise de erosão localizada a jusante de  
uma comporta vertical de abertura inferior

Inês Silva Cacho de Oliveira Guimarães Análise de erosão localizada a jusante de  
uma comporta vertical de abertura inferior

UMinho | 2016

outubro de 2016



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Inês Silva Cacho de Oliveira Guimarães

Análise de erosão localizada a jusante de  
uma comporta vertical de abertura inferior

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

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

## **AGRADECIMENTOS**

A realização desta dissertação não teria sido possível sem o apoio direto ou indireto de algumas pessoas a quem gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos.

Em primeiro lugar, agradeço a todos que tiveram influência de forma direta no desenvolvimento desta dissertação. À minha orientadora Professora Doutora Manuela Lima, por todo o apoio, paciência e conselhos que me ajudaram a ultrapassar várias dificuldades sentidas ao longo da realização desta dissertação. Também agradeço ao Sr. Rui Oliveira, técnico de Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil, pois sem ele este trabalho não teria sido realizado, em especial por toda a paciência, por todos os conselhos, acompanhamento e auxílio que me prestou sempre que precisei.

Apesar de não terem contribuído diretamente na dissertação, quero também agradecer aos meus Pais por todo esforço que fizeram para eu chegar até aqui, por toda a paciência que tiveram comigo nos momentos mais difíceis e por acreditarem sempre nas minhas capacidades. Um agradecimento especial à minha Tia Sara, pois foi ela que me acolheu em sua casa nestes últimos 5 anos, por me ter aturado nos momentos mais difíceis da minha vida, pelo apoio que sempre me deu, por compreender e acreditar sempre em mim, foi como uma segunda Mãe para mim. A toda a minha família que me apoiou sempre e acreditou que eu seria capaz de chegar onde cheguei.

Um agradecimento muito especial ao meu namorado Agostinho por todo o apoio que me deu, pela paciência que teve comigo nos momentos mais difíceis e por ter sempre acreditado nas minhas capacidades. Mostrou-me que apesar das dificuldades eu ia conseguir concretizar a dissertação.

Quero agradecer a todos os meus amigos que sempre me apoiaram e quero agradecer a todos os meus professores que contribuíram para o meu sucesso. Um agradecimento muito especial para Fátima Pinto e Cláudia Carlos que me ajudaram a concretizar o meu sonho, sem elas eu não tinha chegado onde cheguei.

Por último, não poderia deixar de agradecer aos meus Avós que apesar de não terem estado presentes contribuíram para a pessoa que me tornei e tudo o que conquistei. Nunca deixaram de olhar por mim.

## RESUMO

O fenômeno de erosão localizada pode ocorrer junto a obstáculos ou devido à contração lateral do escoamento. Estas causas estão muitas vezes associadas aos colapsos de estruturas hidráulicas. É necessário prever qual será a máxima profundidade da cavidade de erosão localizada em torno de obstáculos como por exemplo comportas, para evitar acidentes que poderão pôr em risco vidas humanas. Na presente dissertação descreve-se o estudo experimental da erosão localizada em torno de uma comporta vertical de soleira delgada instalada em leitos móveis e leitos compostos (constituídos por um fundo fixo seguido de um fundo móvel) Utilizaram-se várias aberturas da comporta permitiram estudar os diferentes comportamentos da cavidade de erosão, da evolução do crescimento da barra e do transporte das partículas. Foi utilizada uma areia com um diâmetro médio igual a 0,328 mm, num escoamento com superfície livre e com três diferentes caudais.

Nos ensaios de fundo móvel foi possível observar que à medida que altura do colchão de água a jusante aumenta, maior é a profundidade máxima da cavidade de erosão, por outro lado para uma menor altura do colchão de água a jusante, menor é o comprimento da cavidade de erosão e por último o declive do talude a jusante da cavidade de erosão é menos acentuado.

Nos ensaios de fundo composto foi possível verificar que à medida que o comprimento da bacia de dissipação aumenta, a profundidade da cavidade de erosão diminui e por sua vez a inclinação do talude a jusante é menor. Observa-se igualmente que o ângulo do talude a jusante é mais acentuado quando o comprimento da bacia de dissipação é menor. Analisando a evolução da barra para as mesmas condições experimentais e mesmo instante de filmagem, mas com diferentes alturas do colchão de água a jusante, concluiu-se que esta evolução torna-se mais lenta para uma maior altura do colchão de água a jusante. À medida que o caudal de escoamento diminui é possível observar uma menor profundidade da cavidade de erosão e formação da barra. Por último foi possível verificar que as partículas de areia de maior diâmetro são as partículas que ficam depositadas e se concentram em toda a extensão da barra

**Palavras-chave:** Erosão Localizada; Formação da barra; Comporta; Cavidade de erosão



## **ABSTRACT**

Scour can occur next to obstacles or due to the lateral contraction of the flow. These causes are often associated with the collapse of hydraulic structures. It is necessary to predict the maximum scour depth around obstacles such as sluice gates, to avoid accidents that could endanger human lives. This dissertation describes the experimental study of the scour around a sluice gate installed in moving and compound (consisting of a fixed bottom followed by a moving bottom) beds. Diverse gate openings allow the study of different behaviours of the scour cavity, the evolution of the growth of the bar and the transport of the sand particles. A sand with a mean diameter of 0.328 mm was used in a free surface flow for three different flow rates.

In the mobile bed tests it was possible to observe that as the depth of the tailwater increases, the greater the maximum scour depth; on the other hand, for a smaller tailwater depth the smaller the length of the scour cavity and, finally, the downstream slope of the scour cavity will be less marked.

In the compound bottom tests it was possible to verify that as the length of the fixed bed increases the depth of the scour cavity decreases and in turn the downstream slope of the scour cavity is smaller. The rest angle of the downstream slope is more pronounced when the length of the fixed bed is smaller. The evolution of the bar becomes slower for a greater height of the downstream weir. As the flow rate decreases it is possible to verify a smaller scour cavity maximum depth and formation of the dune. Finally it was possible to verify that the sand particles of higher diameter are those that are deposited and are concentrated throughout the length of the bar.

**Keywords:** Local scour; bar formation; sluice gate; scour cavity





# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Enquadramento do tema .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Estrutura da Dissertação .....	3
2	Revisão Bibliográfica .....	5
2.1	Introdução .....	5
2.2	Propriedades dos Sedimentos .....	5
2.3	Movimento Incipiente das Partículas.....	7
2.3.1	Tensão crítica de arrastamento no fundo.....	9
2.3.2	Velocidade média Crítica .....	9
2.4	Origem e Transporte de Partículas.....	10
2.4.1	Tipos de Transporte .....	11
2.5	Erosão hídrica .....	13
2.5.1	Erosão natural e erosão acelerada ou antrópica.....	13
2.5.2	Tipos de erosão num leito de um rio .....	14
2.5.3	Como controlar a erosão hídrica.....	18
2.6	Configurações do fundo.....	19
2.7	Erosão a jusante de comportas de abertura inferior.....	22
3	MÉTODO EXPERIMENTAL .....	29
3.1	Introdução .....	29
3.2	Instalação Experimental.....	29
3.2.1	Estrutura hidráulica.....	30
3.3	Parâmetros Experimentais .....	31
3.3.1	Areia .....	31
3.3.2	Determinação do caudal .....	33
3.4	Condições experimentais .....	34
3.4.1	Ensaio com fundo móvel .....	34
3.4.2	Ensaio com fundo composto.....	35
3.5	Procedimento Experimental.....	38
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	43
4.1	Ensaio experimental com fundo móvel .....	43
4.1.1	Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão.....	43
4.1.2	Perfis longitudinais do leito de sedimentos a jusante da comporta .....	46
4.2	Ensaio experimental com fundo composto.....	47

4.2.1	Comportamento e formação da barra.....	48
4.2.2	Influência do Número de Froude da Comporta .....	52
4.2.3	Influência do comprimento da parte fixa do fundo composto .....	53
4.2.4	Influência da profundidade do colchão de água a jusante .....	55
4.2.5	Previsão da máxima profundidade de cavidade de erosão.....	57
4.3	Barra a Jusante.....	59
4.3.1	Análise temporal da barra .....	59
4.3.2	Análise do desmoronamento da barra .....	63
4.3.3	Análise das partículas coloridas que constituem a barra.....	64
5	Conclusões.....	67
5.1	Conclusões.....	67
5.2	Sugestão de trabalhos Futuros.....	69
BIBLIOGRAFIA .....		71
Anexos .....		75

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Forças atuantes sobre uma partícula de fundo móvel (Cardoso, 1998). .....	9
Figura 2 - Tipos de transporte sólidos (Colégio Vasco da Gama, 2012).....	12
Figura 3- Rios meandrizados [Lencastre e Franco, (1984) <i>apud</i> Pinheiro (2010)].....	16
Figura 4- Características de um rio meandrizados [Lencastre e Franco, (1984) <i>apud</i> Pinheiro (2010)] .....	16
Figura 5-Classificação das Configurações do Fundo (Julien, 2010).....	20
Figura 6- Desenvolvimento temporal de uma duna (Oliveto e Hager, 2014) .....	22
Figura 7- Diferentes formas de jatos (Hoffmans e Verheij, 2011).....	23
Figura 8- Diagrama de definição para erosões locais devido aos jatos horizontais 2D (Melville e Lim, 2014) .....	24
Figura 9-Influência do número de Froude na comporta em relação à cavidade de erosão (Melville e Lim, 2014) .....	24
Figura 10-Influência da profundidade do comprimento do fundo fixo em relação à cavidade de erosão (Melville e Lim, 2014) .....	25
Figura 11-Influência da profundidade do colchão de água a jusante em relação à cavidade de erosão (Melville e Lim, 2014) .....	25
Figura 12- Relação entre a máxima profundidade da cavidade de erosão prevista e a máxima profundidade da cavidade de erosão medida (Melville e Lim, 2014) .....	27
Figura 13- Esquema da configuração experimental do fundo fixo (Dey e Sarkar,2016).....	28
Figura 14 - Banco hidráulico Armfield e canal. ....	29
Figura 15- Comporta vertical de abertura inferior.....	30
Figura 16- Método usado para pintar areia.....	32
Figura 17- Secagem da areia com ventilador .....	33
Figura 18- Mistura homogênea das areias pintadas.....	33
Figura 19- Secção de teste para os ensaios com fundo móvel.....	34
Figura 20- Diferentes posições da comporta com abertura inferior (L em cm) .....	35
Figura 21- Secção de teste para os ensaios com fundo composto .....	36
Figura 22- Segmento de reta branco desenhado para escalar a imagem com as medidas reais.....	40
Figura 23- Comando para escalar a imagem .....	40
Figura 24- Criação de linhas auxiliares e verticais para que se possa desenhar o perfil da camada de areia.....	40
Figura 25- Comando para desenhar os perfis da camada de areia.....	41
Figura 26- Desenho do perfil com o comando <i>SPLINE</i> .....	41
Figura 27- Distâncias verticais obtidas para obter o perfil.....	41
Figura 28-Comando para medir as distâncias pretendidas .....	42
Figura 29- Perfil longitudinal obtido a partir das distâncias verticais e horizontais (eixos em cm). .....	42
Figura 30- Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão da 1º experiência .....	44
Figura 31- Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão da 2º experiência .....	44
Figura 32- Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão da 3º experiência .....	45
Figura 33- Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão das três experiências .....	45
Figura 34- Perfis das três experiências para a configuração de equilíbrio atingida .....	46
Figura 35- Perfis longitudinais das experiências 1.1.1.1, 1.1.1.2 e 1.1.1.4. (b=0,9 cm, P= 1,7 cm, Q= 0,0861 Ls <sup>-1</sup> e diferentes valores de L) para a configuração de equilíbrio atingida .....	49

Figura 36- Medida da extensão da barra para a experiência 1.1.1.1 .....	50
Figura 37- Perfis longitudinais das experiências 1.1.1.1, 1.1.2.1 e 1.1.3.1 (b=0,9 cm, Q= 0,0861 Ls <sup>-1</sup> , L=0 e diferentes alturas da soleira do descarregador a jusante) para a configuração de equilíbrio atingida .....	51
Figura 38- Relação entre o número de Frb e a máxima profundidade da cavidade de erosão (b em cm).....	52
Figura 39- Relação entre Frb e Ys/b (b em cm). Análise comparativa entre o presente estudo (símbolos a cores) e o estudo de Melville e Lim (2014) (símbolos a preto e branco).....	53
Figura 40- Relação entre o comprimento fixo e KL (b em cm).....	54
Figura 41- Relação entre L/b e KL (b em cm). Análise comparativa do presente estudo (símbolos a cores) com o estudo de Melville e Lim (2014) (símbolos a preto e branco).....	55
Figura 42- Influência da altura da água a jusante da comporta na máxima profundidade da cavidade de erosão (b em cm).....	57
Figura 43- Relação entre a máxima profundidade da cavidade de erosão prevista e a máxima profundidade da cavidade de erosão medida (b em cm).....	58
Figura 44- Comparação da máxima profundidade da cavidade erosão prevista com a máxima profundidade da cavidade de erosão medida (b em cm). Análise comparativa do presente estudo (símbolos a cores) com o estudo de Melville e Lim (2014) (símbolos a preto e branco).....	58
Figura 45- Perfil da imagem para o instante t=25s para a experiência 1.1.1.1 .....	60
Figura 46- Perfil da imagem para o instante t=35s para a experiência 1.1.1.1 .....	60
Figura 47- Evolução da velocidade da crista da barra ao longo do tempo .....	62
Figura 48- Barra formada no ensaio 3.2.3.1 com caudal pequeno.....	63
Figura 49- Desmoronamento da Barra durante o esvaziamento .....	63
Figura 50- Formação da barra para o ensaio com fundo móvel.....	64
Figura 51- Formação da barra para o ensaio com fundo fixo .....	64

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Distribuição granulométrica da areia .....	31
Tabela 2- Cor atribuída consoante o peneiro em que as partículas ficam retidas .....	32
Tabela 3- Condições experimentais para ensaios com fundo móvel.....	35
Tabela 4- Condições experimentais para ensaios com fundo composto e $b=0,9$ cm .....	37
Tabela 5- Condições experimentais para ensaios com fundo composto e $b=0,6$ cm .....	37
Tabela 6- Condições experimentais para ensaios com fundo composto e $b=0,7$ cm .....	38
Tabela 7- Evolução temporal da cavidade de erosão localizada .....	44
Tabela 8- Evolução temporal da cavidade de erosão localizada com os instantes iniciais dos ensaios coincidentes .....	45
Tabela 9- Resultados das velocidades da comporta e crítica para alguns ensaios .....	48
Tabela 10- Declives dos taludes, ângulo de repouso e extensão da barra .....	50
Tabela 11- Extensão dos taludes, ângulo de repouso e extensão da barra .....	51
Tabela 12- Exemplos de valores de $KL$ para $b=0,9$ cm .....	54
Tabela 13- Exemplos de valores de $K_{yt}$ para um $b=0,9$ .....	56
Tabela 14- Máxima altura da barra das imagens da experiência 1.1.1.1.....	61
Tabela 15- Velocidades médias da crista da barra para o maior caudal estudado.....	61
Tabela 16- Cálculo das velocidades para a experiência 1.1.1.1 .....	62
Tabela 17- Cálculo das velocidades para a experiência 1.1.3.3 .....	62
Tabela 18- Ângulo de repouso do talude a montante e a jusante da cavidade de erosão .....	63



## NOMENCLATURA

b- abertura da comporta, distância entre a superfície do fundo fixo e a comporta

$D_{50}$ - Diâmetro médio dos sedimentos

$D_{50/b}$ - relação entre o diâmetro médio dos sedimentos e abertura da comporta, distância entre a superfície do fundo fixo e a comporta

$F_D$ -força de arrastamento

$F_L$ -Força de sustentação

$F_{rb}$ - número de Froude do escoamento na secção da comporta estimado com base na abertura da comporta (b)

Fr-número de Froude

H max- altura máxima da barra

KD- coeficiente que reflete a influência da dimensão dos sedimentos na erosão localizada

KL- coeficiente que reflete a influência do comprimento do leito fixo a jusante na erosão localizada

$K_s$ - coeficiente de Shields

$K_{yt}$ - coeficiente que reflete a influência da altura do colchão da água a jusante na erosão localizada

$K_{\sigma}$  -coeficiente que reflete a influência do coeficiente de graduação da curva granulométrica dos sedimentos

L- comprimento do fundo Fixo a partir da comporta

L/b- relação entre o comprimento do fundo fixo e abertura da comporta

L/ $Y_t$ - relação entre o comprimento do fundo fixo e altura do colchão de água a jusante da comporta

P- altura da superfície da areia até a abertura do descarregador a jusante do canal

Q- caudal

S- rácio da submersão

s-densidade do material do fundo

U- velocidade de escoamento

$U_c$ - velocidade crítica

W-Peso submerso

$Y_j$  (calculado) - altura do colchão de água a jusante de um salto livre

$Y_s$ - profundidade da cavidade de erosão

$Y_s/b$ - relação entre a profundidade da cavidade de erosão e abertura da comporta

$Y_t$ - altura do colchão de água a jusante da comporta

$Y_t/b$ - relação entre altura do colchão de água a jusante da comporta e abertura da comporta

$\sigma_g$ - coeficiente de graduação da curva granulométrica do sedimento



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento do tema

A Hidráulica Fluvial é o ramo da engenharia que estuda o fenómeno de erosão hídrica, dos escoamentos em rios com leitos de sedimentos suscetíveis de serem transportados pela água, isto é, com leitos móveis e das obras realizáveis nesses rios. A Hidráulica Fluvial tem como principais objetivos solucionar diversos problemas, tais como: erosão hídrica e conservação do solo, cheias, transporte e deposição de sedimentos (Cardoso, 1998).

O transporte de partículas sólidas varia consoante as características do rio, ou seja, com o seu declive e com a velocidade média de escoamento (Rebelo, 2015). O estudo deste fenómeno tem uma elevada importância porque, para analisar e estudar a erosão hídrica, é necessário ter conhecimentos avançados sobre o transporte sólido (Cardoso, 1998). Um dos fatores que influenciam a erosão é a colocação de obstáculos no leito, provocando cavidades de erosão (Euler e Herget, 2009).

As partículas sólidas podem ser transportadas por suspensão ou arrastamento devido à ação das forças hidrodinâmicas do escoamento. O transporte das partículas por arrastamento depende das características hidrodinâmicas do escoamento, das características sedimentológicas do leito de escoamento, das configurações do fundo, rugosidade, origem, granulometria e outras propriedades dos sedimentos. Quando este transporte é feito em suspensão, o movimento depende da duração do deslocamento no sentido de escoamento, pois as partículas ficam dependentes da ação aleatória dos turbilhões (Souza, 2010). Alguns autores referem um terceiro tipo de transporte, denominado por saltação, em que a partícula é removida pelo movimento de ascensão vertical. Se o seu peso superar as forças hidrodinâmicas nas zonas de fraca turbulência, então estas partículas voltam outra vez ao fundo do canal (Paiva, 2007).

Os sedimentos transportados pelo escoamento estão sujeitos a fenómenos de erosão e sedimentação, as suas propriedades e origem podem influenciar o escoamento e a forma como estes se moldam ao longo dos leitos. Os grãos que se encontram nos leitos mostram grandes irregularidades de formas, o que leva a algumas dificuldades na definição das respetivas

dimensões. Esta característica influencia a velocidade de transporte nos leitos fluviais, a velocidade de queda ou sedimentação. No que diz respeito à densidade, esta varia consoante a sua composição granulométrica (Ferreira, 2014).

Em relação ao escoamento, quando não existe qualquer obstáculo no leito a velocidade do escoamento diminui à medida que a profundidade do leito aumenta (Rebelo, 2015). Ao inserir um obstáculo, por exemplo um pilar, as condições de escoamento vão sofrer alterações. Segundo Rebelo (2015) o escoamento quando se aproxima do pilar cria um jato descendente que levará à erosão do solo de fundação da estrutura, até que a cavidade de erosão atinja o estado de equilíbrio. O estado de equilíbrio irá depender das características do material dos sedimentos. No que diz respeito à profundidade máxima de erosão, esta vai depender das características geométricas do pilar, das características do escoamento, das propriedades do fluido, das características geométricas do canal, das propriedades dos sedimentos e do tempo (Rebelo, 2015).

As partículas podem ser erodidas por diferentes processos, sendo de seguida transportadas, até se depositarem onde a velocidade de escoamento já não é suficiente para as transportar. A perda de solo por erosão hídrica está relacionada com a precipitação devido à capacidade de transporte das gotas da chuva e também pela sua contribuição para escoamento sobre o terreno (Álvares e Pimenta, 1998).

Assim, pode-se ver a elevada importância do estudo de transporte de sólidos em escoamentos de superfície livre, pois pretende-se prever as alterações que ocorrem no leito de sedimentos não coesivos, quando é inserida uma perturbação no escoamento. Esta dissertação debruça-se sobre a problemática da erosão localizada e consequente transporte sólido em escoamentos com superfície livre.

## **1.2 Objetivos**

Com a elaboração desta dissertação pretende-se estudar o transporte das partículas, a formação da barra e o fenómeno da cavidade de erosão a jusante de uma comporta vertical de abertura inferior, através da utilização de um canal hidráulico instalado num banco didático *Armfield*. Para a realização desta dissertação é fundamental o cumprimento dos seguintes objetivos:

- Realização dos ensaios experimentais em escoamentos de superfície livre, que irá permitir estudar a formação da barra, a sua evolução temporal, a evolução temporal da cavidade de erosão e a profundidade máxima da cavidade de erosão. Os ensaios irão ter diferentes condições experimentais que serão apresentadas ao longo desta dissertação. Para a realização dos ensaios considerou-se dois tipos de fundo, fundo móvel e fundo composto estudando os parâmetros acima mencionados e fazendo uma comparação entre os fundos.
- Realização de filmagens para que se através do processamento de imagem se possa retirar a informação necessária sobre os parâmetros envolvidos na dinâmica de sedimentos.

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. Este primeiro capítulo tem como finalidade apresentar o tema desta dissertação, definir os principais objetivos e apresentar a estruturação da dissertação.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica, baseada numa pesquisa bibliográfica que teve como objetivo recolher informações provenientes de publicações relativas aos diversos temas relacionados com o transporte sólido.

O capítulo três descreve o método experimental adotado, os equipamentos e as condições experimentais utilizadas para a realização dos ensaios experimentais.

No capítulo quatro são apresentados os resultados dos ensaios experimentais, assim como a análise e discussão dos mesmos.

Por último, no capítulo cinco apresentam-se as conclusões finais desta dissertação e sugestões de trabalhos futuros.



## **2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA**

### **2.1 Introdução**

Com este capítulo pretende-se apresentar uma síntese da bibliografia relevante sobre o transporte sólido em escoamentos com superfície livre devido a erosões localizadas. Caso o leitor sinta necessidade de aprofundar alguns conhecimentos básicos sobre a hidráulica de escoamentos com superfície livre poderá consultar por exemplo Novais Barbosa (1986).

### **2.2 Propriedades dos Sedimentos**

Antes de estudar o transporte dos sedimentos do leito é importante rever conceitos sobre a sedimentologia e hidráulica (Silva, 2013).

As propriedades dos sedimentos desenvolvem um papel relevante nos processos de erosão de encostas, de transporte dos materiais erodidos e da sua deposição em lagos e albufeiras. As propriedades das partículas devem ser distinguidas em propriedades de grãos e propriedades das misturas. Em relação às primeiras, as mais importantes são a densidade, a dimensão, a forma e a velocidade de queda ou de sedimentação. Quanto às segundas, é importante considerar a curva de distribuição granulométrica, a porosidade, o peso volúmico, o ângulo de atrito interno e o ângulo de suporte (Cardoso, 1998).

**Dimensões e a construção da curva granulométrica.** Para a determinação das dimensões dos sedimentos o método mais usual é a peneiração, utilizado para classificar os materiais não coesivos de diâmetros superiores a 0,0625 mm, que corresponde à mínima dimensão para que um sedimento possa ser classificado como areia. A passagem dos sedimentos da mistura por diversos peneiros com diferentes aberturas vai permitir a construção da curva granulométrica, ou seja, o diâmetro das partículas estará diretamente relacionado com as dimensões dos peneiros (Silva, 2013).

**Forma e densidade.** A forma das partículas tem uma elevada importância, pois influencia a velocidade de transporte nos leitos fluviais, a velocidade de queda ou sedimentação, a estabilidade de taludes e, por último, o próprio caudal sólido (Cardoso, 1998).

O parâmetro da forma mais relevante é a esfericidade, que é definida como a razão entre a área da superfície de uma esfera de volume igual ao de uma partícula e a área da superfície dessa partícula. As partículas esféricas apresentam esfericidade igual a 1, enquanto que as restantes partículas tem esfericidade inferior à unidade (Cardoso, 1998).

A densidade dos sedimentos depende da sua composição mineralógica. Normalmente, os sedimentos originados pela erosão hídrica são o feldspato e o quartzo que possuem uma densidade de 2,65. Considera-se frequentemente este valor de densidade das partículas sem qualquer verificação, o que pode originar a erros (Cardoso, 1998).

**Velocidade de queda ou sedimentação.** Uma partícula em queda que esteja num meio líquido em repouso está sujeita a uma força igual à pela diferença entre o seu peso submerso, isto é, o peso próprio subtraído da impulsão, e a força de arrastamento ou resistência que resulta das forças elementares de atrito e de pressão que se desenvolvem na sua superfície.

**Porosidade e peso volúmico aparente seco.** A porosidade é a percentagem de vazios num dado volume de sedimentos secos e é influenciada pela distribuição granulométrica, pela forma dos sedimentos e pela sua arrumação. Existem dois tipos de porosidade, designadas por porosidade total e porosidade efetiva. A porosidade total corresponde a todos os vazios, incluindo aqueles que se situam no interior dos grãos, enquanto que a porosidade efetiva considera apenas os vazios interligados de forma a constituírem canalículos (Cardoso, 1998).

O peso volúmico do grão de um dado material é obtido pela multiplicação da densidade pelo peso volúmico da água. Por sua vez, o peso volúmico aparente seco de uma mistura granulométrica é o peso seco por unidade de volume dessa mistura (Cardoso, 1998).

**Ângulo de atrito interno e ângulo de suporte.** O ângulo de atrito é aquele cuja tangente é igual à razão entre forças tangenciais e normais numa situação de deslizamento iminente de uma camada de sedimentos sobre a outra (Cardoso, 1998). Em Hidráulica Fluvial, quando as forças

de contacto entre grãos são fracas, este ângulo coincide praticamente com o ângulo de repouso ou ângulo de talude natural,  $\theta_r$ .

Os taludes de enrocamento sujeitos à ação do escoamento estão sujeitos a problemas de tensão tangencial crítica, acima da qual se dá o arrastamento dos blocos, e têm sido estudados por vários autores, pois estes consideram o ângulo de repouso como uma variável importante (Samora, 1993). O ângulo de repouso é o limite de estabilidade estático e acima deste ocorre o deslizamento de camadas inteiras, umas sobre as outras (Cardoso, 1998). No entanto, a resistência de um talude de enrocamento à erosão é essencialmente provocada pela estabilidade dos blocos individuais, aqueles que se encontram encastrados no talude e que se apoiam lateralmente nos blocos vizinhos, o que origina um efeito de imbricamento. Aqueles blocos que não estão em posições estáveis têm a tendência de rolar isoladamente e não em deslizar ao mesmo tempo que os outros (Cardoso, 1998).

### **2.3 Movimento Incipiente das Partículas**

Para o estudo da acumulação de sedimentos e erosão num curso de água é necessário saber em que condições e situações ocorre o início do movimento das partículas (Souza, 2010). O conhecimento das condições do movimento incipiente das partículas sólidas tem uma elevada importância na Hidráulica Fluvial, principalmente, em canais estáveis sem movimento de material sólido (Carvalho, 2012).

Segundo Cardoso (1998) num canal com fundo móvel constituído por material não coesivo sujeito a caudais pequenos, inicialmente o escoamento não irá originar a movimentação do material comportando-se como um fundo fixo. Contudo, à medida que o caudal vai aumentando, pode observar-se o movimento aleatório das partículas isoladas, que, devido a um aumento da velocidade as partículas, começam a ser destacadas e arrastadas. Estas condições de escoamento designam-se por condições de movimento incipiente ou condições críticas do início de transporte sólido. No entanto, a maior dificuldade no estudo do movimento incipiente das partículas está na caracterização das condições críticas para as quais ocorre o início do movimento do material sólido (Souza, 2010).

Existem diversos métodos para definir as condições do movimento incipiente tendo-se optado no presente documento por referir os métodos relatados por Buffington e Montgomery (1997) e Carvalho (2012).

Segundo Buffington e Montgomery (1997) há quatro principais métodos para definir as condições do movimento incipiente, que são: a extrapolação, a observação visual, as relações de competência e por último o cálculo teórico. No que diz respeito à extrapolação, são as tensões de atrito críticas que definem as condições de equilíbrio que, por sua vez, são obtidas em escoamento onde as taxas de transporte do material do leito se anulam ou são inferiores ao um valor estabelecido. O segundo método é realizado através da leitura visual, porém tem como desvantagem depender da sensibilidade de cada observador em definir as taxas de transporte que constituem o início do movimento. As relações de competência constituem um método onde se utiliza a relação entre a tensão média de atrito e os maiores diâmetros dos grãos colocados em movimento. Destas relações pode-se então obter a tensão de atrito crítica necessária para colocar um grão de sedimento com um determinado diâmetro em movimento. Por último, o quarto critério considera que o equilíbrio das forças atuantes na partícula isolada é a condição crítica para definir o seu movimento inicial. Este método é sensível no que diz respeito aos parâmetros do sedimento, como por exemplo, a variação granulométrica, a forma e o ângulo de atrito.

Os dois primeiros métodos, a extrapolação e observação visual são os mais utilizados.

A caracterização do início do movimento incipiente é feita por diferentes critérios, sendo os mais utilizados a tensão crítica de arrastamento e a velocidade média crítica. O primeiro critério baseia-se na tensão de arrastamento do fundo, enquanto o segundo baseia-se na determinação da velocidade média crítica (Carvalho, 2012).

Segundo Carvalho (2012) um dos primeiros critérios relacionado com a tensão crítica de arrastamento foi apresentado por Shields e o seu trabalho é considerado uma grande referência no estudo do início do movimento das partículas. Para além deste, posteriormente, foram surgindo critérios similares como por exemplo o de Schocklist, em 1937. Em relação aos critérios de velocidades média crítica refere-se, por exemplo, o critério de Hjulström, em 1935. Estes critérios, que utilizam grandezas médias, têm como vantagem ser de fácil aplicação, principalmente os baseados na velocidade média crítica. No entanto esta utilização pode ser



posta em causa, visto que é utilizada uma variável média que não tem em conta a interação entre o escoamento e o leito. A tensão de arrastamento pode ser mais interessante para caracterizar o início do movimento, pois esta tem em conta a interação entre o escoamento e o leito, contudo tem como desvantagem ser um critério mais complicado de determinar (Carvalho, 2012).

### 2.3.1 Tensão crítica de arrastamento no fundo

Segundo Cardoso (1998) as partículas que se encontram na superfície do fundo de um canal estão sujeitas à ação das forças hidrodinâmicas do escoamento e ao seu peso submerso. Com isto, pode-se referir que o início do movimento da partícula é feito quando forças solicitadas (forças hidrodinâmicas) são superiores às forças resistentes (peso submerso,  $W$ , das partículas) (Cardoso, 1998). Para que seja atingido o equilíbrio estático é necessário que no movimento incipiente as forças solificadoras e resistentes sejam praticamente iguais. Em condições de equilíbrio de forças, conclui-se que as solicitações são a força de arrastamento ( $F_D$ ) que atuam na direção e sentido do escoamento, e a força de sustentação hidrodinâmica ( $F_L$ ), normal à força de arrastamento (Figura 1).

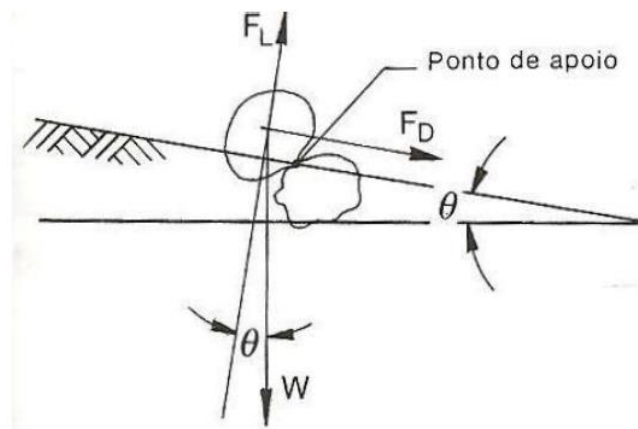


Figura 1 – Forças atuantes sobre uma partícula de fundo móvel (Cardoso, 1998).

### 2.3.2 Velocidade média Crítica

Como já foi referido anteriormente, a velocidade média crítica é um método para a caracterização do movimento incipiente. No entanto a velocidade que deveria ser suposto considerar era a velocidade junto ao fundo, mas na prática nem sempre é possível determinar

com rigor esta velocidade, por isso é frequentemente utilizada a velocidade média crítica do escoamento (Lopes, 2012).

A velocidade média crítica ( $U_c$ ) é a máxima velocidade média do escoamento que não origina erosão do fundo nem das margens. Este conceito, na verdade, não é novo e é de destacar que, ao longo dos tempos, foram surgindo vários critérios e fórmulas que nos ajudam a determinar a velocidade média crítica (Lopes, 2012). Na presente dissertação adotou-se a equação 1, proposta por Richardson e Davies (2001), em que  $K_s$  é o coeficiente de Shields,  $D_{50}$  é o diâmetro médio dos sedimentos,  $s$  a densidade do material de fundo e o  $h$  é a altura de água do escoamento.

$$U_c = \frac{\sqrt{K_s \times (s - 1) \times D_{50} \times h^{1/3}}}{0,041 \times D_{50}^{1/6}} \quad (1)$$

## 2.4 Origem e Transporte de Partículas

Os sedimentos que são transportados numa linha de água têm origem, essencialmente, na erosão laminar nas encostas das bacias hidrográficas e na erosão localizada que existe nos próprios canais de escoamento. O transporte sólido de um rio irá depender das características do escoamento, do canal e das características dos sedimentos (Álvares e Pimenta, 1998).

Os sedimentos provenientes do leito do rio são deslocados ao longo deste e da margem do rio devido à ação das forças de escoamento. Podem ser transportados por arraste ou em suspensão devido à ação das forças de advecção e difusão turbulenta. Geralmente, o transporte de sedimentos está relacionado com caudal do escoamento (Paiva, 2007). Para além destes transportes, este tipo de sedimento também pode ser transportado por saltação, normalmente dependendo das dimensões do salto. Para o efeito de cálculo o transporte dos sedimentos, este tipo de transporte é considerado como transporte por arraste (Paiva, 2007).

Geralmente, os sedimentos com origem na bacia hidrográfica possuem uma granulometria mais fina, quando comparados com os que são transportados num curso de água (Paiva, 2007). Segundo Paiva (2007), alguns autores dizem que a ordem de grandeza dos diâmetros destes

sedimentos é inferior ao diâmetro  $D_{10}$  do material do leito, sendo estes sedimentos constituídos essencialmente por silte e argila e transportados maioritariamente em suspensão.

Powell e Khan (2012) estudaram a erosão localizada a montante de um orifício circular sob uma carga constante, com o objetivo identificar o mecanismo de transporte, a extensão e a forma da zona a partir do qual existe remoção de sedimentos que ocorre para erosão localizada sem transporte generalizado.

O transporte sólido nos canais de fundo móveis pode ser classificado em função de duas origens dos materiais: o transporte do material do fundo, que corresponde às partículas cuja granulometria se encontra no fundo e o transporte do material de lavagem, designado por *wash-load*, este tipo de materiais contêm dimensões inferiores em relação ao material anterior e é de origem exterior ao leito do trecho que estamos a considerar (Cardoso, 1998).

O estudo do transporte de sólidos a partir do processamento de imagem de Radice *et al.* (2005) focou-se essencialmente na camada de sedimentos vista de cima. São usadas duas técnicas de processamento de imagem que, aplicadas em conjunto, permitem a medição automática de fluxos sólidos num leito granular com a ausência de contraste artificial entre os grãos em movimento e o fundo.

### **2.4.1 Tipos de Transporte**

Segundo Silva (2013), existem dois tipos de transporte sólidos: transporte sólido por arrastamento e transporte sólido em suspensão. Para além destes, Cardoso (1998) e Junior (2013) consideram um terceiro tipo de transporte, transporte sólido por saltação. O transporte sólido por arrastamento é realizado por partículas que rolam e escorregam longitudinalmente sobre o fundo, estando as partículas em contacto com o leito quase permanentemente (Junior, 2013). O transporte sólido em suspensão é realizado por partículas que são suportadas por componentes verticais das velocidades do fluxo turbulento, enquanto estas são transportadas pelas componentes horizontais dessas mesmas velocidades. Apesar destas componentes horizontais serem pequenas são suficientes para que as partículas permaneçam em suspensão, podendo contactar esporadicamente com o fundo, ao contrário das anteriores. Por último, o transporte por saltação é feito pelas partículas que pulam ao longo de um curso de água devido à corrente ou mesmo ao impacto causado por outras partículas (Junior, 2013). A Figura 2 representa os três tipos de transporte sólido referidos anteriormente.

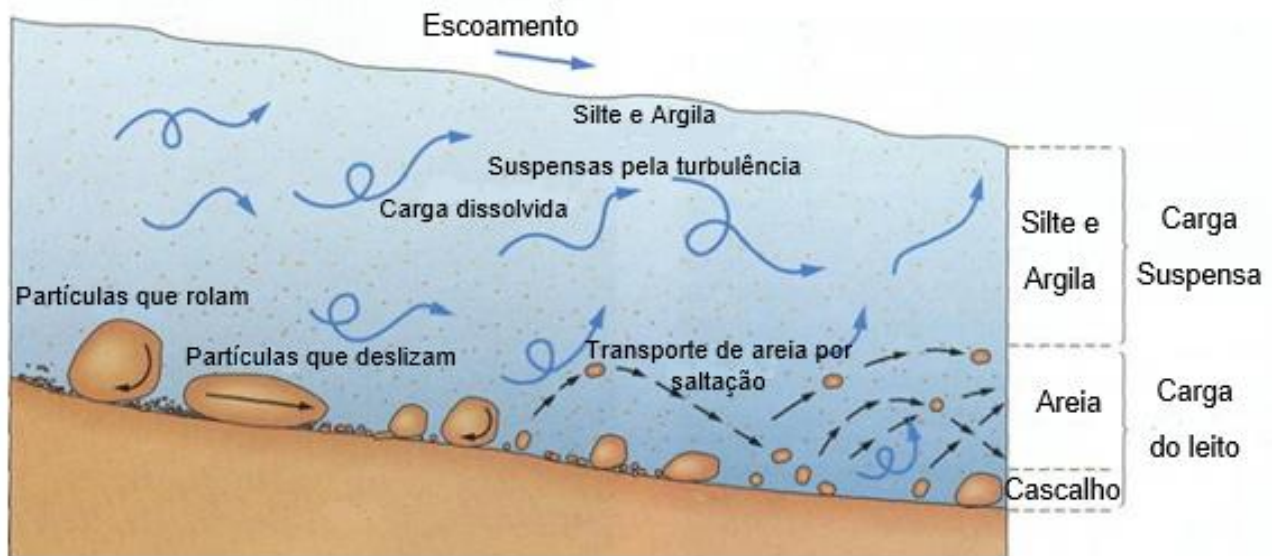


Figura 2 - Tipos de transporte sólidos (Colégio Vasco da Gama, 2012)

Contudo, não é fácil na prática distinguir quantitativamente a diferença entre o transporte sólido por arrastamento, por suspensão e por saltação. Devido a esta dificuldade, normalmente é considerado conjuntamente o caudal sólido por arrastamento e o caudal sólido por saltação. Os métodos de cálculo são as fórmulas de caudal sólido por arrastamento, que incluem as contribuições de arrastamento e da saltação; por seu lado as fórmulas de caudal sólido em suspensão registam as parcelas relativas aos materiais do fundo e de lavagem; por último, o método das fórmulas de caudal sólido total não faz distinção sobre a forma de transporte (Cardoso, 1998).

É importante referir que os métodos apresentados anteriormente são deduzidos em situações de equilíbrio, em que o caudal sólido iguala a capacidade de transporte do escoamento, isto é, a máxima quantidade de partículas sólidas que o escoamento é capaz de transportar. Ao longo do tempo, foram desenvolvidas fórmulas de transporte sólido e para uma melhor compreensão e conhecimento destas sugere-se a consulta de Cardoso (1998).

Álvares e Pimenta (1998) apresentaram um estudo sobre a erosão hídrica e transporte sólido em pequenas bacias hidrográficas, que teve como principal objetivo a comparação da produção de sedimentos, adquirida a partir de uma metodologia de cálculo de erosão hídrica e do transporte sólido que é medido numa estação sedimentológica em diferentes bacias hidrográficas. A

recolha de amostras de um rio pretende adquirir um número suficiente de dados de transporte sólido por arrastamento e em suspensão, de forma a definir o volume total de sedimentos transportados e identificar as correlações que existem entre os caudais líquido e sólido em diferentes circunstâncias (Álvares e Pimenta, 1998).

## **2.5 Erosão hídrica**

A erosão é o processo mais prejudicial para a desagregação dos solos, este processo pode causar danos ambientais graves, tais como o assoreamento e a poluição das linhas de água (Cogo *et al.*, 2003).

### **2.5.1 Erosão natural e erosão acelerada ou antrópica**

O processo de erosão hídrica pode ser desenvolvido por erosão natural ou erosão provocada pela intervenção humana, este tipo de erosão pode ser designada por acelerada ou antrópica (Cardoso, 1998).

A erosão hídrica natural ocorre devido à meteorização das rochas, estas, por sua vez, produzem uma camada de areia, silte e argila que cobre a rocha mãe, e constituem assim o esqueleto inorgânico do solo (Cardoso, 1998). A camada de argila tem um papel muito importante, pois permite a fixação dos nutrientes das plantas. A perda de solo, devido à erosão hídrica, pode ser causada por exemplo pela precipitação, pelo escoamento superficial e pelo gelo e degelo (Álvares e Pimenta, 1998). Os sedimentos originados são arrastados para as linhas de água, onde são escoados para jusante (Cardoso, 1998).

O aumento da população mundial levou a uma maior procura de alimentos e de novas áreas de cultivo, o que originou que atualmente quase não haja bacias hidrográficas naturais. A atividade humana em geral tem levado a um aumento da erosão hídrica, a este tipo de erosão chama-se antrópica ou acelerada (Cardoso, 1998).

A erosão hídrica e a consequente produção de sedimentos tem sido motivo de grande preocupação devido à gestão do uso de solo e da água. Isto é sentido principalmente nos espaços geográficos onde as condições climáticas caracterizadas por precipitações e temperaturas são

Análise de erosão localizada a jusante de uma comporta vertical de abertura inferior

variáveis, como é o caso do clima mediterrâneo. Estes casos podem ser agravados quando o solo é escasso e é pouco profundo (Álvares e Pimenta, 1998).

### **2.5.2 Tipos de erosão num leito de um rio**

Em relação à erosão do leito de um rio, pode-se distinguir dois tipos de erosão: a erosão geral e a erosão localizada. O primeiro tipo de erosão é resultado de elevados caudais, da existência de curvas ou confluências de escoamento e não depende da existência de qualquer obstáculo. Por seu lado a erosão localizada, assume a forma de erosão local, quando está junto a obstáculos e devido à contração lateral do escoamento. Além disso, pode também ocorrer quando se verifica uma diminuição da seção de escoamento, provocada por obstáculos ou até mesmo por uma diminuição natural da seção de escoamento do rio (Pinheiro, 2010).

Euler e Herget (2009) estudaram o controlo da erosão localizada e deposição provocados por obstáculos em ambientes fluviais. Este estudo teve como principais objetivos identificar as variáveis, bem como os limites de controlam as diferentes morfometrias devido ao obstáculo e incorporar as mesmas num modelo estatístico simples.

Detalha-se de seguida os vários tipos de erosões que podem ocorrer num leito de um rio.

- **Erosão geral**

Este tipo de erosão ocorre independentemente da presença de pilares ou comportas, de entre outro tipo de obstáculos, na secção de um rio, podendo resultar de fenómenos de curta e longa duração. Os exemplos mais importantes da erosão geral que ocorre no leito de um curso de água são: o assoreamento e desassoreamento natural do leito do rio, a presença de curvas na trajetória do leito do rio, a confluência de rios e a configuração dos fundos (Pinheiro, 2010).

**Assoreamento e desassoreamento do leito do rio.** O assoreamento consiste na subida generalizada do leito de um rio devido à deposição de sedimentos. Este processo pode ser causado por mudanças existentes a montante ou a jusante do local em estudo. O assoreamento é um fenómeno que pode dar a conhecer uma tendência morfológica natural de um rio. É considerado um fenómeno de longa duração, que tem como principais consequências a eventualidade de ocorrer deposições excessivas junto a estruturas hidráulicas importantes,

como por exemplo: barragem e pontes, que podem influenciar a segurança destas, devido à maior ação das forças hidrodinâmicas (Pinheiro, 2010).

O fenômeno de assoreamento são provocados por estas principais causas: o aumento do transporte de sedimentos, a deposição do material que resulta de outras atividades, a artificialização das margens e do leito, a redução do caudal e por último, a presença de obstáculos que dificultam o escoamento, por exemplo barragens (Pinheiro, 2010).

Conclui-se então que este fenômeno é um processo natural que dependerá de uma erosão, que ocorre a montante de um rio, pois são estes sedimentos resultantes desta erosão que irão provocar o assoreamento (Pinheiro, 2010).

No que diz respeito ao desassoreamento, este caracteriza-se pela descida das cotas do leito de um rio ao longo de uma dada extensão. Este fenômeno resulta de uma erosão generalizada do material do fundo do rio. É um processo natural que através do escoamento provoca uma redução da inclinação do leito de um rio, com o objetivo de atingir o equilíbrio (Pinheiro, 2010).

As principais causas do processo de desassoreamento que se realiza a jusante são: a construção de barragens e açudes, as dragagens dos sedimentos, o desvio de um curso do rio, as mudanças na ocupação dos solos da bacia hidrográfica, a ocorrência de cheia e por último a redução do tamanho dos sedimentos transportados pelo escoamento (Pinheiro, 2010).

**Erosão provocada pelas curvas no rio.** Este fenômeno ocorre em rios meandrizados, isto é, o seu trajeto visto em planta é uma sequência de curvas (Pinheiro, 2010).

Neste tipo de rios pode-se representar uma sequência de fundões e baixios alternados. Os primeiros originam-se no extradorso das curvas, provocadas pela ação de correntes secundárias formando assim zonas de maior profundidade. Os segundos são formados no intradorso da curva, onde existe tendência para depósitos, criando-se assim uma zona com menor profundidade [Lencastre e Franco, (1984) *apud* Pinheiro (2010)]. Estes fenômenos estão representados nas Figura 3 e Figura 4.

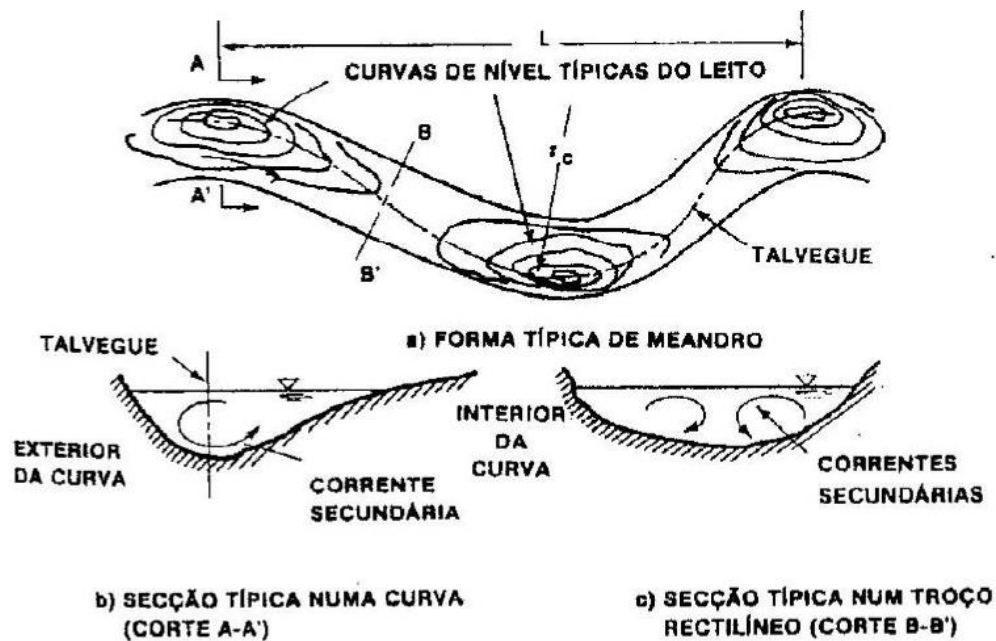


Figura 3- Rios meandrizados [Lencastre e Franco, (1984) *apud* Pinheiro (2010)]

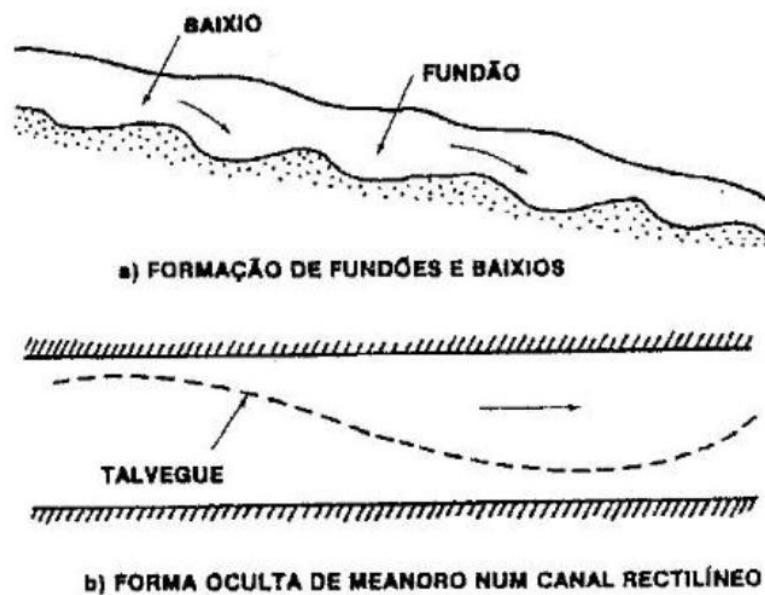


Figura 4- Características de um rio meandrizado [Lencastre e Franco, (1984) *apud* Pinheiro (2010)]

Os principais fatores que influenciam este tipo de erosão são: a geometria do canal, a inclinação deste e a sua forma da seção transversal, as forças hidrodinâmicas, o material que constitui o leito e as margens e por último os caudais de transporte sólido e líquido. Quando existem mudanças abruptas na direção do escoamento, a erosão é influenciada devido as características geométricas da curva [Melville e Coleman (2000) *apud* Pinheiro (2010)].



**Erosão na confluência de rios.** A erosão provocada pela confluência de rios ou de dois leitos do mesmo rio acontece quando o rio é entrançado ou caso exista uma barra. Este fenómeno ocorre quando há o encontro e mistura de dois escoamentos com características diferentes, nomeadamente a seção transversal, o caudal ou a quantidade de sedimentos transportados (Pinheiro, 2010). Este tipo de erosão pode ocorrer a longo prazo ou durante a ocorrência de uma cheia (Yeo,1991) *apud* (Pinheiro, 2010).

Deste modo, pode-se dizer que a confluência entre dois leitos pode aumentar o processo de erosão nos pilares de uma ponte situada a jusante desse ponto, isto deve-se ao fato de haver maior capacidade de transporte dos sedimentos provocada pela concentração de caudal (Pinheiro, 2010).

- **Erosão localizada**

A alteração normal do escoamento devido ao contacto com um obstáculo origina a remoção de sedimentos, originando cavidades de erosão. Estas erosões localizadas ocorrem essencialmente junto aos obstáculos presentes nos cursos de água, como por exemplo: esporões fluviais, detritos com uma dimensão física considerável, comportas e pilares de pontes (Pinheiro, 2010). Este tipo de erosões devem-se as modificações nos perfis de velocidades médias, de intensidade de turbulência e das tensões de Reynolds do escoamento (Azevedo, 2014).

Num escoamento a montante de um obstáculo a distribuição de velocidades aumenta desde o fundo até à superfície livre (Azevedo, 2014). Com o encontro do obstáculo a velocidade tende a anular-se, efeito designado por efeito de estagnação, o que provoca um acréscimo de pressão igual a  $[U(y)^2]/2$ , em que o U representa a velocidade média de aproximação e y representa a distância ao fundo. Na superfície livre o acréscimo de pressão é maior, onde a velocidade também é máxima, verificando um aumento da superfície livre a montante do obstáculo, e o aparecimento de uma superfície de enrolamento e de um escoamento descendente (Couto e Cardoso, 2001).

A cavidade de erosão provocada pela presença do pilar no escoamento caracteriza-se por uma elevada inclinação do talude a montante em relação ao pilar. No ponto imediatamente a montante do mesmo, encontra-se a maior profundidade da cavidade de erosão, esta é máxima quando o processo de erosão atinge o equilíbrio (Couto e Cardoso, 2001). Enquanto que a

Análise de erosão localizada a jusante de uma comporta vertical de abertura inferior

jusante do pilar, a inclinação do talude da cavidade de erosão é menor, atingindo por isso maiores extensões (Couto e Cardoso, 2001).

Azevedo (2014) estudou o fenómeno de erosão localizada nas imediações de pilares de pontes, através da utilização de um modelo laboratorial num canal hidráulico.

- **Erosão devido a contração lateral do escoamento**

Quando existe a contração lateral de escoamento, devido por exemplo à construção de um cais fluvial, pode ocorrer um aumento da velocidade média, que por sua vez vai ter como consequência o aumento das tensões de arrastamento no fundo e nas margens do rio na zona contraída. As partículas ao serem transportadas ou arrastadas em suspensão para jusante vão provocar uma diminuição da altura do leito. Ao longo deste processo a secção de erosão aumenta, provocando assim uma diminuição na velocidade média do escoamento e por consequência uma diminuição das tensões de arrastamento (Pinheiro, 2010). Pode-se dizer que a situação de equilíbrio é atingida quando o valor da tensão tangencial do fundo for inferior ao valor da tensão crítica no início do movimento ou quando se desenvolve uma camada de proteção que não permite que haja mais transporte de sedimentos para jusante (Richardson e Davis, 2001).

### **2.5.3 Como controlar a erosão hídrica**

Existem duas formas para controlar a erosão hídrica: minimizar os efeitos de impacto das gotas da chuva na superfície do solo e minimizar os caudais e velocidades do escoamento na bacia hidrográfica (Cardoso, 1998).

Existem várias técnicas que são utilizadas nas diferentes zonas da bacia, que dependem do declive, do tipo de solo ou até mesmo o coberto vegetal. Estas técnicas, por sua vez, estão divididas em quatro categorias, designadas por técnicas físicas, vegetais, de prática de conservação e de retenção de sedimentos (Cardoso, 1998).

As técnicas físicas permitem uma remodelação do terreno de modo a alterar as propriedades do escoamento superficial. Em alguns casos diminui-se o caudal e a quantidade de partículas arrastadas para jusante, construindo-se assim terraços e câmoros (são pequenas elevações de

terreno criadas para reduzir a velocidade de escoamento e promoverem a infiltração) (Cardoso, 1998).

As técnicas vegetativas dependem das plantas existentes e criação destas. Para que a existência de plantas seja eficaz é necessário que a cobertura do solo seja máxima nos períodos de chuva. A existência das plantas permite proteger o solo da erosão e garantir as produções agrícolas. Para além disto, os restos mortais das plantas são também usados para cobrir o solo protegendo-o da ação erosiva devida à precipitação (Cardoso, 1998).

As práticas da conservação permitem que a mobilidade dos solos seja controlada recorrendo-se a métodos e equipamento de lavagem que promovem a redução da velocidade do escoamento superficial (Cardoso, 1998).

Por último, a técnica da retenção de sedimentos é a mais utilizada e consiste na interceção do escoamento canalizado nas linhas de água pela construção de açudes que, por sua vez, vão reduzir a velocidade do escoamento e promover a acumulação dos sedimentos arrastados ou em suspensão (Cardoso, 1998).

## **2.6 Configurações do fundo**

Ao iniciar o transporte sólido por arrastamento, o escoamento da água interage com o fundo móvel. Esta ação leva à modelação do leito e irá dar origem a diversas configurações do fundo (Cardoso, 1998).

A classificação das configurações do fundo é influenciada pelos seguintes parâmetros: o declive da linha de energia, a profundidade de escoamento, o tamanho do grão e a velocidade de queda dos sedimentos (Puhl, 2012).

Segundo Julien (2010) estas configurações podem ser classificadas em regime inferior e regime superior, e dependerão da sua geometria, resistência de escoamento e modo como é realizado o transporte de sedimentos. Alguns autores consideram dentro das antidunas, três categorias: as ondas estacionárias, (*standing waves*), as antidunas, rápidos e fundões, (*chutes and pools*) (Cardoso, 1998). As configurações apresentadas por Julien (2010) estão apresentadas na Figura 5.

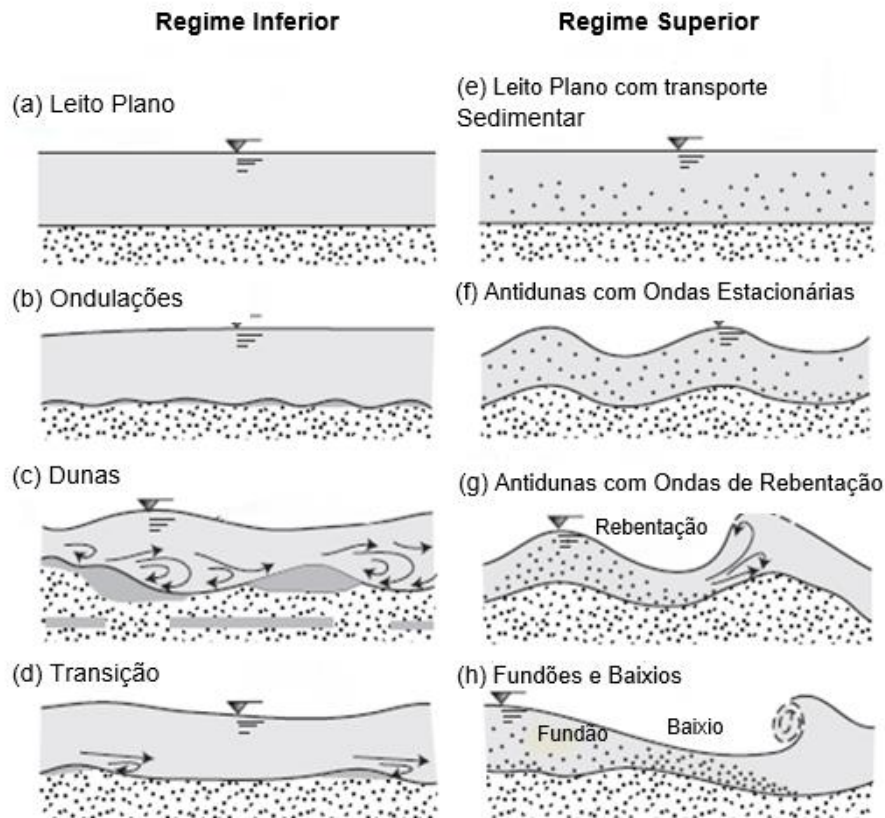


Figura 5-Classificação das Configurações do Fundo (Julien, 2010)

O leito é plano (Figura 5 (a)) quando não há transporte de sedimentos, ou seja, o leito não possui qualquer configuração de fundo (Strasser, 2008).

No regime inferior as principais configurações de fundo são as ondulações (Figura 5 (b)) e dunas (Figura 5 (c)). Estas são semelhantes nas formas, mas diferenciam-se pelas suas dimensões em relação ao escoamento. Estas configurações têm as seguintes características: as dimensões das ondulações não dependem das dimensões do escoamento enquanto no caso das dunas tal já acontece; ambas têm uma face a montante com um declive suave e a jusante possuem uma inclinação maior; tanto as dunas como as ondulações migram na mesma direção de escoamento com uma velocidade menor que a de fluxo; o transporte sedimentar é baixo, pois grande parte deste transporte é realizado por arraste junto ao fundo; a resistência provocada pelo escoamento na presença das formas de fundo é grande, pois, dependendo das suas dimensões, origina uma zona de separação do escoamento na região da cava, originando, assim, uma dissipação turbulenta (Puhl, 2012). As dunas são configurações de fundo maiores que as ondulações, que se encontram fora de fase em relação à superfície da água e na presença de

velocidades pequenas podem apresentar rugas ou pequenas dunas sobrepostas na sua face a montante (Strasser, 2008).

A transição (Figura 5 (d)) é a configuração de fundo que possui, alternadamente, condições de duna e fundo do plano com transporte de sedimentos, e que é caracterizado pela elevada taxa de partículas em suspensão (Strasser, 2008).

No regime superior formam-se as configurações de fundo designadas por antidunas (Figura 5), que possuem uma forma mais simétrica do que as ondulações e dunas. As principais características desta configuração são: as antidunas podem migrar tanto para montante como para jusante ou ainda podem ser estacionárias (Figura 5 (f)), comportamentos que dependem das condições de escoamento; a superfície livre desta configuração tem um papel muito importante na geração das formas de fundo logo será sempre deformada, neste caso em fase com as irregularidades; no que diz respeito à resistência ao escoamento, esta é baixa, no entanto a dissipação de energia pode ser grande quando há formação de ondas de rebentação estacionárias; o transporte de sedimentos é alto tanto por suspensão como por arraste junto ao fundo; à medida que a amplitude das antidunas aumenta, a deformação à superfície livre é maior, e a partir de um certo momento começam-se a formar ondas de rebentação como se pode ver na Figura 5 (g) (Puhl, 2012).

No que diz respeito às deformações do tipo fundões e baixios (Figura 5 (h)) pode-se dizer que estas formam-se em declives elevados, onde ocorre aceleração (fundões) e a desaceleração (baixios) do escoamento (Puhl, 2012).

Um dos principais parâmetros que caracteriza a transição entre as configurações de fundo do regime inferior e superior é o número de Froude ( $Fr$ ), sendo o número de Froude é a razão entre as forças de inércia e gravitacionais (Barbosa, 1986).

À medida que há um aumento da velocidade do escoamento formam-se diferentes configurações de fundo que variam com o número de Froude. Num leito plano existe apenas algum movimento das partículas por arraste e o seu  $Fr$  é inferior a 0,15; Quando o transporte das partículas em suspensão é pequeno e o transporte é feito maioritariamente por arraste tanto por rolamentos como deslizamentos formam-se as primeiras ondulações que possuem um número de Froude entre 0,15 e 0,30; as dunas começam-se a formar quando existe um aumento

gradual do transporte em suspensão e o número de Froude varia entre 0,30 e 0,60; quando os grãos da camada superior possuem um movimento quase permanente, os períodos de repouso diminuem e o leito torna-se novamente plano ou ondulado e para este tipo de configuração o Froude está entre 0,60 e 1,30; por último, quando as formas onduladas se transformam em antidunas que se propagam contra a corrente líquida, o escoamento torna-se muito turbulento e o transporte das partículas é feito maioritariamente em suspensão, para esta configuração de fundo o número de Froude é superior a 1,30 (Paiva, 2007).

O estudo de Oliveto e Hager (2014) teve como objetivo caracterizar a formação de barras ou dunas a jusante dos elementos de uma ponte usando estes como componentes do processo de erosão localizada. Os resultados deste estudo serviram para completar trabalhos realizados anteriormente (Oliveto e Hager (2002), Oliveto e Hager (2005)) e estes são relevantes para validar modelos numéricos que em geral são aplicados em pontes (Oliveto e Hager, 2014). Na Figura 6 pode-se ver um esquema do desenvolvimento temporal de uma barra.

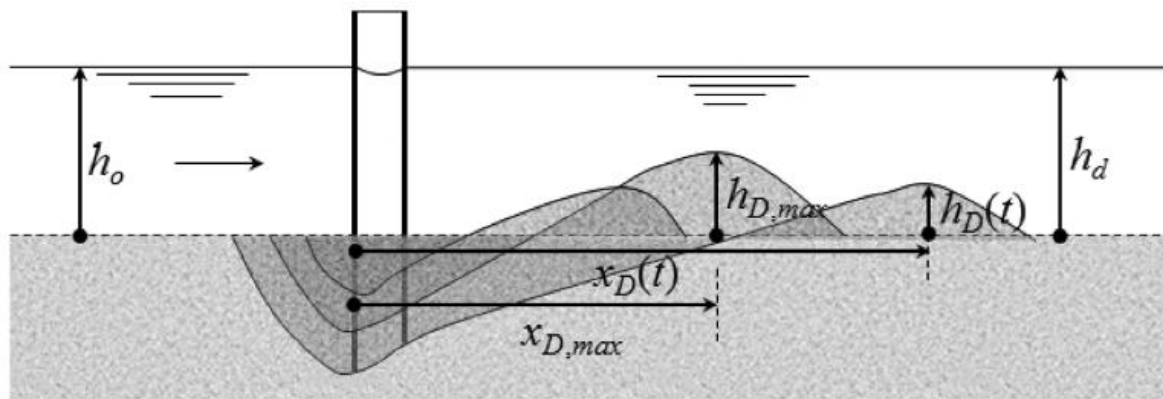


Figura 6- Desenvolvimento temporal de uma duna (Oliveto e Hager, 2014)

## 2.7 Erosão a jusante de comportas de abertura inferior.

O principal dano que atinge as estruturas hidráulicas está relacionado com a ocorrência de inundações, estas, por sua vez, vão ter como consequência a erosão no leito do rio. A erosão é um fenómeno natural causado pelo fluxo do escoamento nos rios ou ribeiros, fenómeno que ocorre quando a capacidade erosiva do escoamento excede a capacidade de resistência das partículas do leito (Melville, 2014).

As diferentes estruturas hidráulicas podem originar tipos de jatos com diferentes configurações (Fernandes e Cardoso, 2004). Os jatos podem ser por exemplo horizontais ou verticais, livres ou aderentes, bidimensionais ou tridimensionais (Fernandes e Cardoso, 2004). No artigo de Hoffmans e Verheij (2011) são apresentadas algumas formas diferente de jatos horizontais (Figura 7).

A erosão a jusante provocada por uma comporta é um exemplo de erosões devido a jatos submersos horizontais turbulentos. Este tipo de jatos é considerado bidimensional (Melville, 2014), podendo ocorrer jatos submersos ou jatos aderentes.

Um exemplo de diagrama de definição para erosões locais devido aos jatos horizontais 2D é apresentado na Figura 8 que ilustra uma situação típica de erosões localizadas a jusante de uma comporta vertical de abertura inferior  $b$  (Melville e Lim, 2014). Neste caso  $Y_j$  é a dimensão da secção contraída do jato originado pelo escoamento sob a comporta.

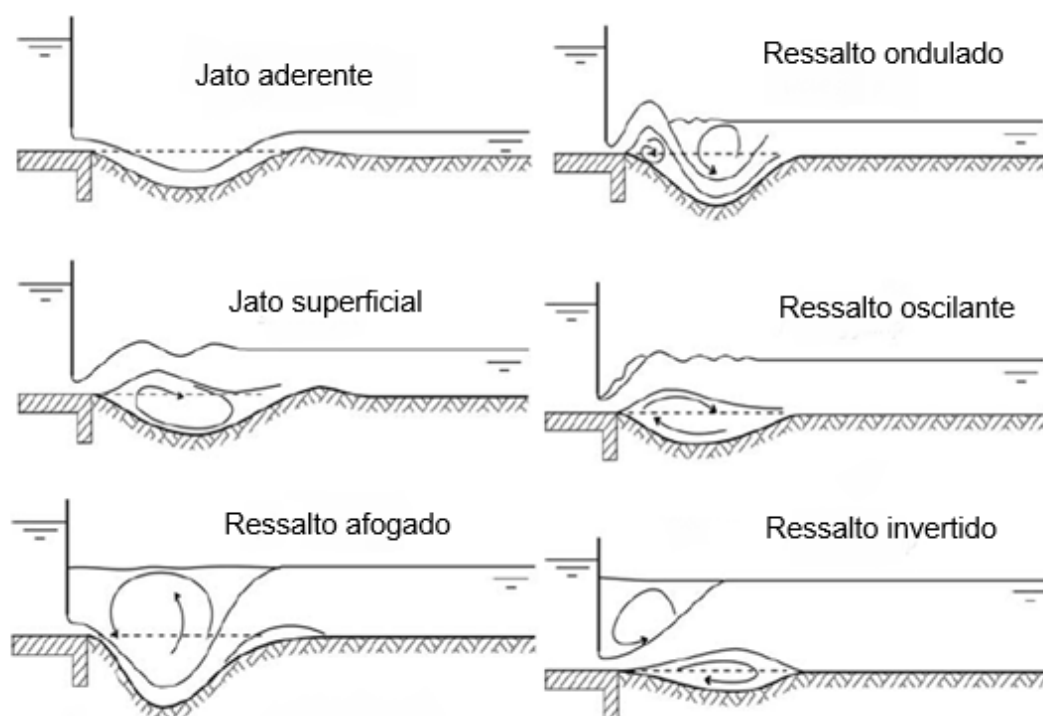


Figura 7- Diferentes formas de jatos (Hoffmans e Verheij, 2011)

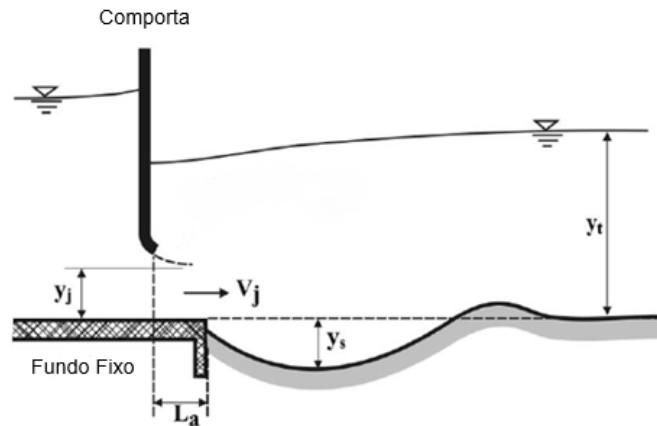


Figura 8- Diagrama de definição para erosões locais devido aos jatos horizontais 2D (Melville e Lim, 2014)

As erosões localizadas causadas por jatos horizontais 2D são afetadas pelo caudal de escoamento do jato, o tamanho e classificação do tipo de sedimento que constitui o leito, a presença de fundo fixo entre a origem do jato e os sedimentos do leito e por último podem ser afetadas pela altura do colchão de água a jusante das estruturas hidráulicas ( $Y_t$ ) (Melville e Lim, 2014). Estes autores analisaram a influência do número de Froude na comporta ( $F_j$ ) em relação à profundidade da cavidade de erosão ( $Y_s$ ), para isto construíram um gráfico com a relação entre  $Y_s/Y_j$  e  $F_j$  (Figura 9). Para além desta análise foi também realizada uma análise da influência do comprimento do fundo fixo ( $L$ ) em relação à cavidade de erosão, os dados são expressos em  $KL$ , que é a razão entre  $Y_s/Y_j$  para um determinado valor de  $L/Y_j$  e  $Y_s/Y_j$  para  $L_a/Y_j=0$  (Figura 10). Para comparar os valores dos seus ensaios representaram a curva que representava os valores teóricos de  $KL$  (estes são calculados como se mostra na equação 2).

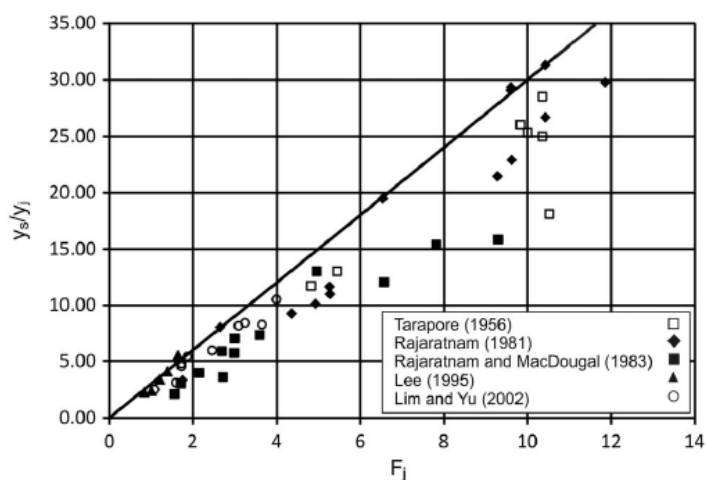


Figura 9-Influência do número de Froude na comporta em relação à cavidade de erosão (Melville e Lim, 2014)



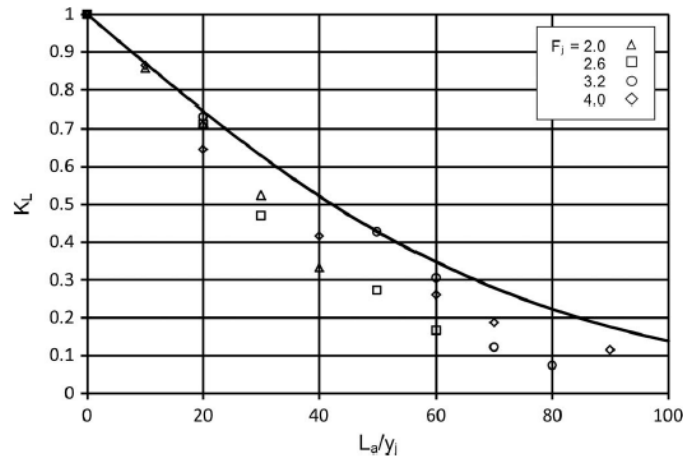


Figura 10-Influência da profundidade do comprimento do fundo fixo em relação à cavidade de erosão (Melville e Lim, 2014)

$$K_L = 1 - \tanh\left(\frac{0,013L}{b}\right) \tag{2}$$

Melville e Lim (2014) estudaram também a influência da altura do colchão de água em relação à cavidade de erosão (Figura 11). Os dados são expressos em termos de  $K_{yt}$ , este parâmetro é a razão entre  $Y_s/Y_j$  e o valor de  $Y_s/Y_j$  para o maior valor de  $Y_t/Y_j$ . Para calcular o  $K_{yt}$  teórico utilizaram duas equações, como se pode ver na equação 3.

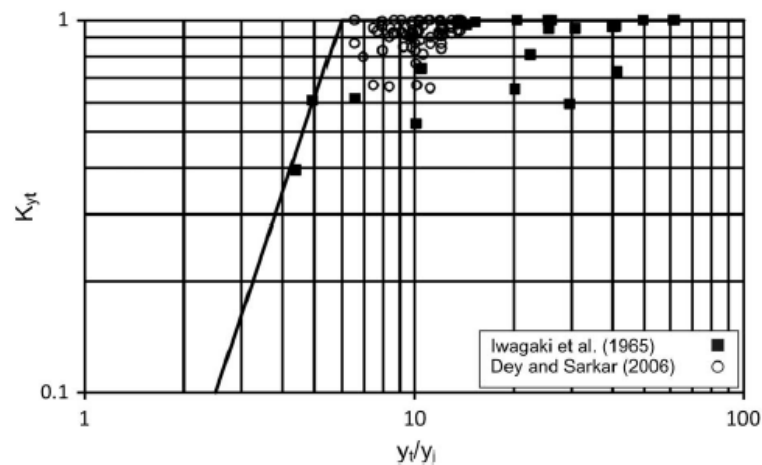


Figura 11-Influência da profundidade do colchão de água a jusante em relação à cavidade de erosão (Melville e Lim, 2014)

$$K_{yt} = 0,01 \times \left(\frac{Y_t}{b}\right)^{2,6} \text{ se } \frac{Y_t}{b} < 6 \text{ e } K_{yt} = 1 \text{ se } \frac{Y_t}{b} > 6 \tag{3}$$

Verma e Goel (2005) estudaram o fenómeno de erosão devido a um jato horizontal submerso causada por uma comporta, onde o fluido ocorre sobre um fundo fixo e um leito de partículas erodíveis. Os ensaios experimentais foram conduzidos para estudar o efeito da abertura da comporta, comprimento do fundo rígido e altura da cavidade de erosão. Para cada ensaio foram registadas as alturas de máxima erosão. As relações gráficas são desenvolvidas pelos dados da altura máxima de erosão, comprimento do fundo fixo, altura da abertura da comporta e número de Froude a jusante. À medida que há uma diminuição do comprimento do fundo fixo, a profundidade máxima de erosão aumenta. Para que haja uma diminuição da profundidade máxima de erosão e uma diminuição do número de Froude a jusante é necessário que haja uma diminuição da profundidade de submersão (Verma e Goel, 2005).

Quando as forças solicitadoras associadas ao jato são maiores que as forças resistentes dos sedimentos no interior da cavidade ocorre o arrastamento das partículas do fundo para jusante (Fernandes e Cardoso, 2004).

Para que haja o desenvolvimento das cavidades de erosão existem dois fatores essenciais, que são a capacidade que o jato tem para erodir material da cavidade e a capacidade que o escoamento possui para o transportar para jusante o material erodido. Quando um destes fatores deixa de existir, então o processo de erosão termina e geralmente é atingido o equilíbrio. Mesmo que haja erosão do material, mas o escoamento não tenha a capacidade de o transportar para jusante, o material acabar por voltar para a cavidade de erosão. Caso não ocorra erosão, a camada de sedimentos não se altera, podendo assim concluir-se que as condições hidráulicas estão relacionadas com a erosão provocada (Fernandes e Cardoso, 2004).

O processo de origem leva a que haja a formação de uma barra ou duna situada a jusante da cavidade de erosão, que por sua vez irá condicionar a profundidade e extensão da cavidade de erosão (Fernandes e Cardoso, 2004).

Melville e Lim (2014) apresentaram uma análise de todos os dados conhecidos para a profundidade das erosões localizadas desenvolvidas por jatos horizontais 2D, que levaram ao desenvolvimento de uma nova equação de previsão de máxima profundidade da cavidade de erosão (equação 4). Com isto os autores pretendiam fazer uma análise comparativa entre a máxima profundidade da cavidade de erosão prevista e máxima profundidade da cavidade de erosão medida (Figura 12).

$$\frac{Y_s}{b} = 3 \times Frb \times K_D \times K_{yt} \times K_\sigma \times K_L \quad (4)$$

sendo

$$K_D = 1,0 \text{ se } \frac{D_{50}}{b} < 0,6 \text{ e } K_D = 0,6 \times \left(\frac{D_{50}}{b}\right)^{-1} \text{ se } \frac{D_{50}}{b} \geq 0,6 \quad (5)$$

e

$$K_\sigma = 1,2 \times \sigma_g^{-0,24} \text{ se } \sigma_g > 2,2 \text{ e } K_\sigma = 1 \text{ se } \sigma_g \leq 2,2 \quad (6)$$

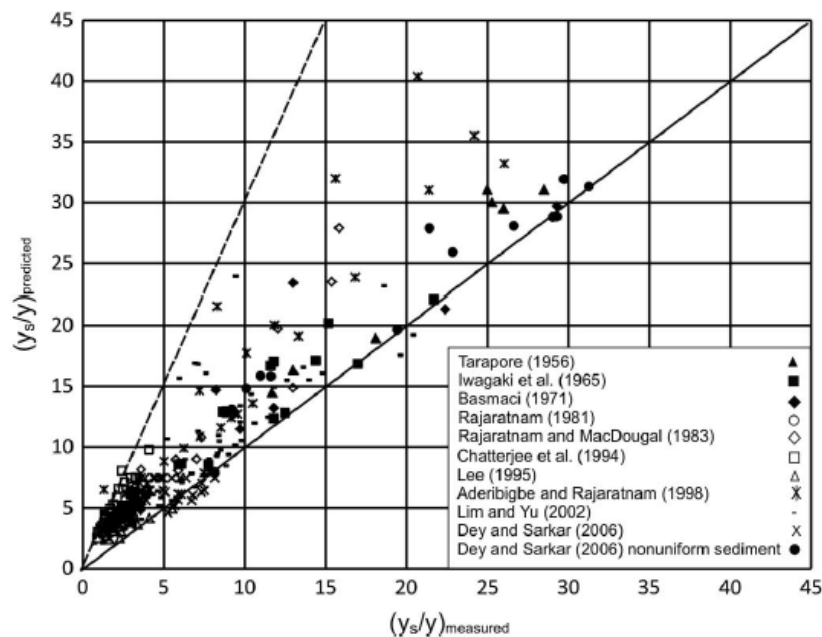


Figura 12- Relação entre a máxima profundidade da cavidade de erosão prevista e a máxima profundidade da cavidade de erosão medida (Melville e Lim, 2014)

Dey e Sarkar (2016) estudaram a velocidade e turbulência em jatos submersos. A Figura 13 representa um esquema da sua configuração experimental com fundo fixo. Estes autores apresentaram várias combinações de parâmetros experimentais para fundo composto e fundo móvel. Para o cálculo do rácio da submersão ( $S$ ) e altura do colchão de água a jusante de um salto livre ( $Y_j$  (calculado)) usaram as equações 7 e 8. Em que  $F$  é o número de Froude na comporta,  $b$  é altura da abertura da comporta e  $Y_t$  é a altura do colchão de água a jusante da estrutura hidráulica.

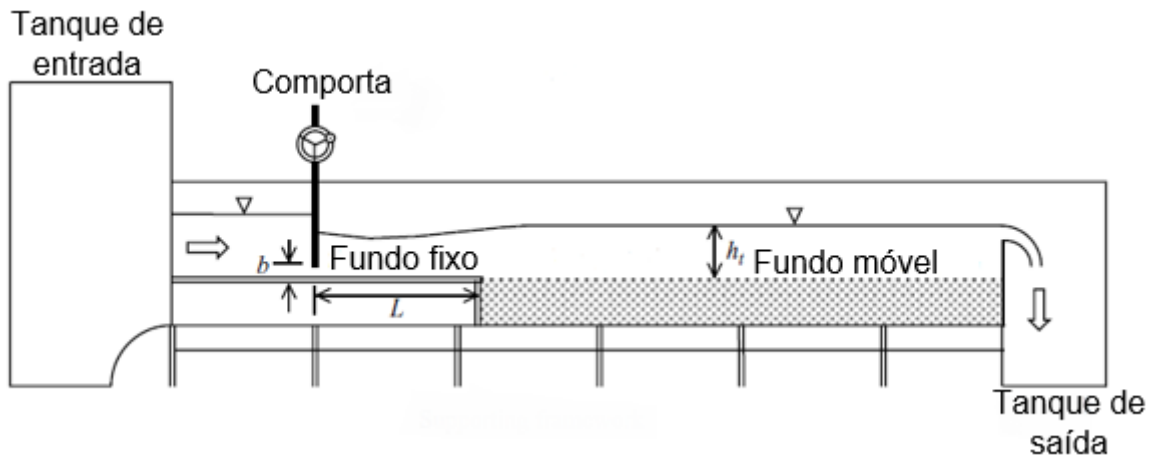


Figura 13- Esquema da configuração experimental do fundo fixo (Dey e Sarkar,2016)

$$Y_j(\text{calculado}) = 0,5 \times b \times (\sqrt{1 + 8 \times F^2} - 1) \quad (7)$$

$$S = \frac{Y_t - Y_j(\text{calculado})}{Y_j(\text{calculado})} \quad (8)$$

### 3 MÉTODO EXPERIMENTAL

#### 3.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se a instalação experimental e os parâmetros experimentais adotados. Descreve-se igualmente o procedimento experimental utilizado e o processamento de imagem adotado.

#### 3.2 Instalação Experimental

Para a realização dos ensaios experimentais foi utilizado um canal hidráulico instalado num banco didático *Armfield* no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, em Azurém.

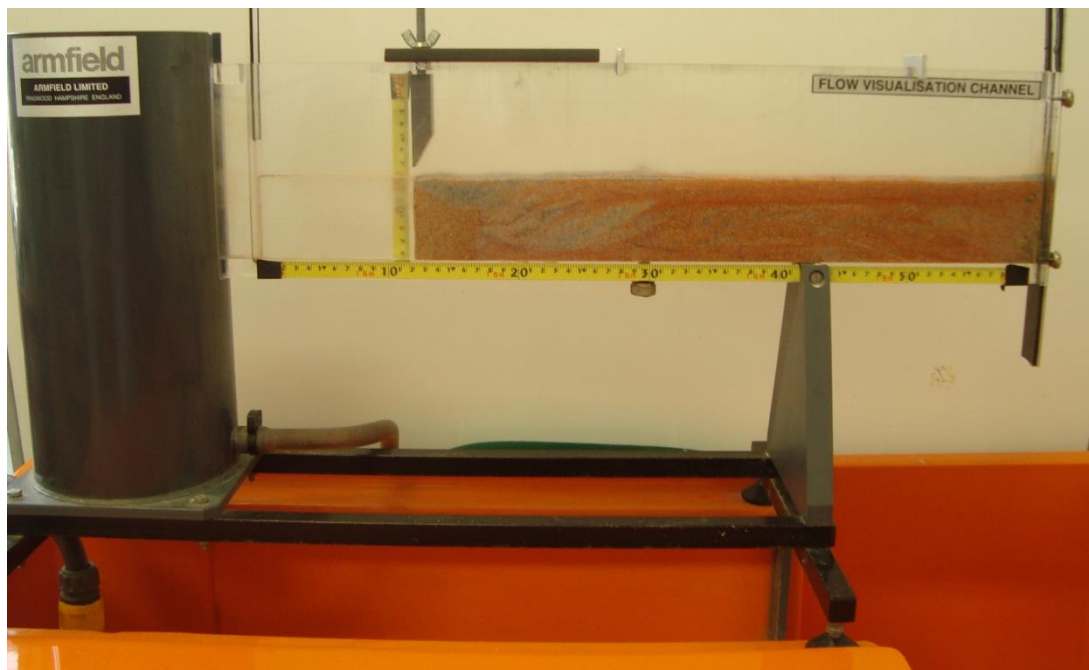


Figura 14 - Banco hidráulico Armfield e canal.

O canal *Armfield* tem uma seção transversal retangular com 150 mm de profundidade e 15 mm de largura, sendo o seu comprimento igual a 615 mm. O canal é constituído por vidro acrílico e é abastecido de água a partir do banco *Armfield* (Figura 14). Utilizou-se uma secção de teste

Análise de erosão localizada a jusante de uma comporta vertical de abertura inferior

com pequena dimensão transversal para possibilitar a visualização de escoamentos bidimensionais.

Este canal é abastecido em circuito fechado. A água entra no canal após atravessar um tanque de regularização, que tem como objetivo minimizar a turbulência. Após passar pela secção de teste, a água é recolhida no tanque superior do canal e regressa ao reservatório de recirculação a partir do qual é alimentada a bomba centrífuga do banco *Armfield*. Na bancada foi colocado um reservatório para que areia proveniente do canal não fosse desperdiçada e ao mesmo tempo para impedir o entupimento da bomba.

O nível de água no interior do canal pode ser controlado através de uma comporta a montante e de um descarregador na extremidade de jusante.

### 3.2.1 Estrutura hidráulica

Para visualizar a formação da barra e a cavidade de erosão localizada instalou-se no canal uma comporta vertical de soleira delgada e abertura inferior, como se pode ver na Figura 15.



Figura 15- Comporta vertical de abertura inferior

A comporta estava montada num varão roscado que a ligava a uma placa horizontal. Este conjunto podia então ser simplesmente pousado no topo do canal na posição em que se pretendia colocar a comporta. O varão roscado possibilitava variar a abertura da comporta, isto

é, a distância entre a extremidade inferior da comporta e a superfície superior da camada de areia.

### 3.3 Parâmetros Experimentais

Neste subcapítulo vão ser apresentados os parâmetros utilizados nos ensaios. Estes parâmetros estão diretamente relacionados com as condições de escoamento e o tipo de material que constitui o leito.

#### 3.3.1 Areia

Para a realização dos ensaios utilizou-se um sedimento não coesivo, isto é areia, com a distribuição granulométrica apresentada Tabela 1 e que tinha sido utilizado no Laboratório de Hidráulica em estudo anteriores (Leite (2011) e Azevedo (2014)). Esta areia apresenta  $D_{50} = 0,328$  mm e  $\sigma_g = 1,3$ .

Tabela 1- Distribuição granulométrica da areia

Peneiro Nº	Diâmetro das partículas (mm)	Retidos (%)
200	0,074	0,40
140	0,105	0,50
80	0,18	14,10
60	0,25	80,38
40	0,43	4,42
20	0,85	0,20
10	2	0,00

Para obter esta granulometria foi necessário peneirar a areia, para se obterem as várias dimensões de areia separadas. Posteriormente foram calculadas as massas correspondentes a cada uma das dimensões para uma amostra com uma massa global de 1 kg, como se pode ver na Tabela 2. As massas correspondentes a cada uma das dimensões foram então misturadas obtendo-se assim a granulometria pretendida.

Como o objetivo era observar o movimento dos grãos de areia e para se poder distinguir partículas de diferentes dimensões médias, optou-se por pintar os grãos da areia, tendo sendi necessário averiguar quais as possíveis técnicas para o fazer. No entanto, teve-se em conta que

Análise de erosão localizada a jusante de uma comporta vertical de abertura inferior

a tinta utilizada na areia, quando esta estivesse em contacto com a água, não se diluísse. Decidiu-se pintar uma pequena amostra com tinta-da-china e tinta de pintura de carros em spray, e verificou-se que entre as duas a mais eficaz era a tinta de pintura de carros em spray.

Apresentam-se na Tabela 2 as cores atribuídas para cada granulometria de acordo com o peneiro em que os grãos da areia ficam retidos.

Tabela 2- Cor atribuída consoante o peneiro em que as partículas ficam retidas

Peneiro Nº	Diâmetro das partículas retidas (mm)	Retidos (g)	Cor
200	0,074	4	Vermelho
140	0,105	5	Preto
80	0,18	141	Laranja
60	0,25	803,8	Não se pinta
40	0,43	44,2	Azul
20	0,85	2	Verde
10	2	0	-

Para pintar a areia adotou-se o procedimento a seguir descrito. Dentro de um saco colocou-se o spray no interior e pintou-se (Figura 16). Devido ao seu elevado tempo de secagem, optou-se por usar um ventilador (Figura 17) para que a secagem fosse mais rápida. Um dos problemas associados à pintura de pequenas partículas com tintas de spray, é que as mesmas tendem a ficar coladas umas às outras. Para evitar tal situação, foi necessário que durante a secagem as partículas fossem remexidas, para que não se colassem umas às outras.



Figura 16- Método usado para pintar areia



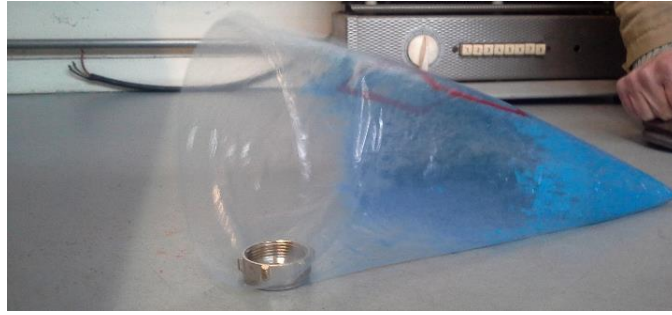


Figura 17- Secagem da areia com ventilador

Após a secagem das areias misturaram-se todas as granulometrias para obter uma amostra o mais homogénea possível (Figura 18).

Ensaio exploratório permitiram concluir que o facto de se pintar a areia não alterava a evolução temporal da máxima profundidade de erosão localizada e as configurações da cavidade de erosão e da barra a jusante.



Figura 18- Mistura homogénea das areias pintadas

### 3.3.2 Determinação do caudal

Para determinação do caudal foi registado o intervalo de tempo necessário para escoar um determinado volume de água. Para o efeito utilizou-se uma proveta com uma resolução de 5 mL e um simples cronómetro com uma resolução de 0,01 s para registar o intervalo de tempo que demora a escoar um determinado volume de água. Para que houvesse o erro menor possível,

efetuaram-se pelo menos três medições de caudal e fez-se uma média de forma a minimizar a incerteza experimental associada à determinação do caudal.

### 3.4 Condições experimentais

No total foram realizadas 138 experiências e fez-se o seu respetivo estudo. Nessas experiências procurou-se determinar a influência na cavidade de erosão e barra a jusante de parâmetros experimentais tais como: o caudal, a altura do colchão de água a jusante e a abertura inferior da comporta (b). Utilizou-se um fundo móvel (subsecção 3.4.1) e um fundo composto por uma parte fixa e uma parte móvel, que por simplicidade se passará a designar por fundo composto (subsecção 3.4.2).

#### 3.4.1 Ensaios com fundo móvel

Realizaram-se três experiências com fundo móvel constituído unicamente por areia colorida com 4 cm de espessura (Figura 19) e  $b = 0,9$  cm. A areia estava instalada no interior de uma caixa de sedimentos com o comprimento do canal, e era contida por dois tubos de silicone com uma altura de 4 cm, instalados nas extremidades de montante e jusante do canal. Utilizou-se um único caudal (Q) e fez-se variar a altura da soleira do descarregador a jusante (P) (Tabela 3). Estes três ensaios tiveram como objetivo estudar o comportamento da cavidade de erosão e a formação da barra para diferentes alturas do colchão de água ( $Y_t$ ) a jusante. As condições experimentais destes três ensaios são apresentadas na Tabela 3, sendo  $F_{rb}$  o número de Froude do escoamento estimado na secção da comporta.

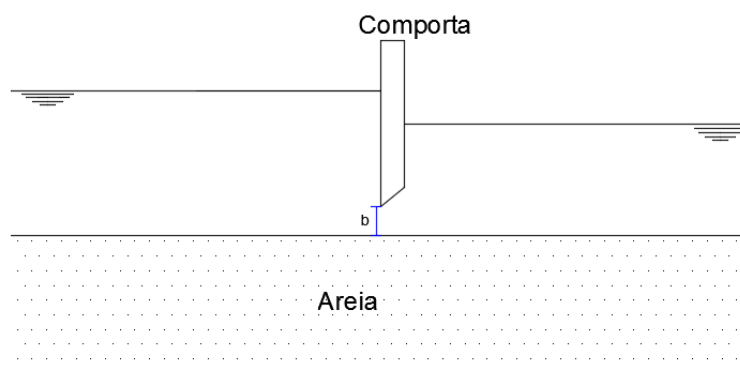


Figura 19- Secção de teste para os ensaios com fundo móvel

Tabela 3-Condições experimentais para ensaios com fundo móvel

Número da Experiência	P (cm)	b (cm)	Q (L/S)	Frb	Yt (cm)
1	1,7	0,9	0,0861	2,146	3,0765
2	1				2,5384
3	2,5				3,9918

### 3.4.2 Ensaios com fundo composto

O fundo composto era constituído por uma placa de acrílico com 12 cm de comprimento colocada no início do canal, sendo o restante comprimento do canal ocupado por uma caixa de sedimentos com 6,2 cm de espessura e cheia com a areia colorida. A comporta, em vez de ser colocada a meio do canal como nos ensaios anteriores, podia ser colocada na zona da placa de acrílico em diferentes posições, permitindo assim materializar diferentes comprimentos de uma bacia de dissipação (L) (Figura 20).

O objetivo destes ensaios foi estudar a evolução temporal da barra, ou seja, saber a velocidade a que a crista da barra evoluía ao longo tempo e estudar a variação das dimensões da cavidade de erosão em função do caudal, altura do colchão de água a jusante ( $Y_t$ ), abertura da comporta (b) e comprimento do fundo fixo (L) (Figura 17).

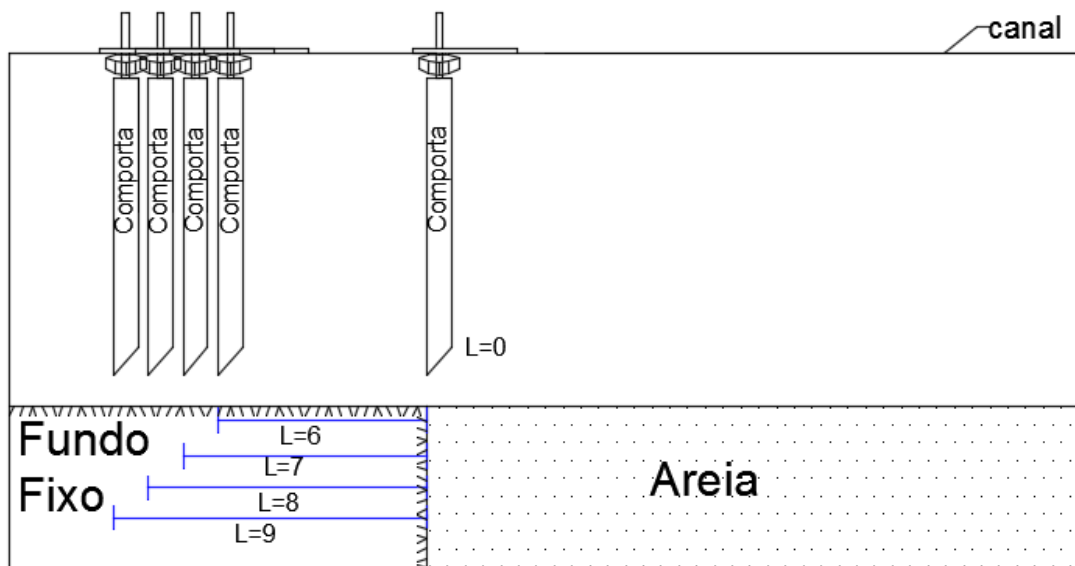


Figura 20- Diferentes posições da comporta com abertura inferior (L em cm)

## Análise de erosão localizada a jusante de uma comporta vertical de abertura inferior

Nestes ensaios utilizaram-se três aberturas inferiores da comporta:  $b= 0,9$  cm,  $b= 0,6$  cm e  $b= 0,7$  cm, sendo  $b$  a distância entre a placa de acrílico e a comporta (Figura 21).

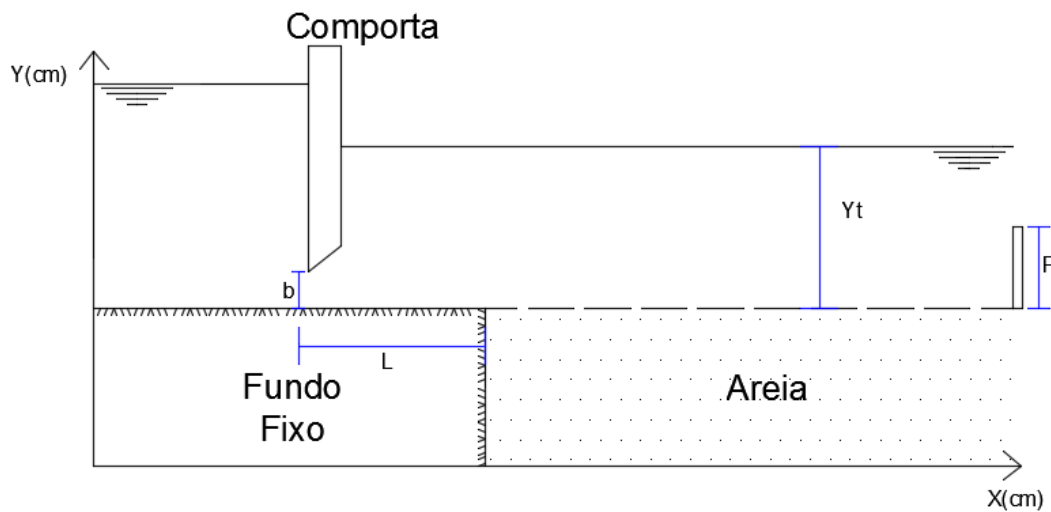


Figura 21- Secção de teste para os ensaios com fundo composto

Para cada abertura da comporta estudaram-se três caudais diferentes. Não era possível usar exatamente o mesmo valor do caudal nas séries de ensaios com diferentes aberturas da comporta, pois o banco *Armfield* não dispunha de medidor de caudal e assim o caudal era estabelecido por tentativas. Comparando as séries de ensaios correspondentes a diferentes valores da abertura da comporta, pode-se constatar que o menor caudal era aproximadamente igual a  $0,055 \text{ L s}^{-1}$ , o caudal intermédio era aproximadamente igual a  $0,064 \text{ L s}^{-1}$  e o maior caudal era aproximadamente igual a  $0,087 \text{ L s}^{-1}$ . Este maior caudal era igual ao utilizado nos ensaios com fundo móvel, possibilitando assim a comparação dos resultados. Para cada caudal diferente utilizaram-se três alturas da soleira do descarregador a jusante, iguais às definidas para os ensaios de fundo móvel (Tabela 3). A cada altura da soleira do descarregador a jusante correspondiam ainda cinco comprimentos da bacia de dissipação, como é possível observar na Figura 20. Assim pode-se concluir que para cada abertura da comporta foram realizados 45 ensaios para os três caudais. Para uma melhor compreensão das condições experimentais de cada ensaio, apresentam-se nas Tabela 4 a Tabela 5 os valores dos parâmetros experimentais adotados. A numeração das experiências (x.y.z.w) está realizada da seguinte forma: x varia de 1 a 3 consoante o  $b$ , y varia de 1 a 3 consoante o  $Q$ , z varia de 1 a 3 consoante o  $P$  e w varia de 1 a 5 consoante o  $L$ .

Tabela 4- Condições experimentais para ensaios com fundo composto e  $b=0,9$  cm

b=0,9 (cm)												
Q=0,0861 L/s					Q=0,0546 L/s				Q=0,0644 L/s			
P (cm)	Nº da Exp.	L (cm)	Frb	Yt (cm)	Nº da Exp.	L (cm)	Frb	Yt (cm)	Nº da Exp.	L (cm)	Frb	Yt (cm)
1,7	1.1.1.1	0	2,146	3,5500	1.2.1.1	0	1,361	3,1039	1.3.1.1	0	1,605	3,1590
	1.1.1.2	6	2,146	3,4800	1.2.1.2	6	1,361	2,8875	1.3.1.2	6	1,605	3,2439
	1.1.1.3	7	2,146	3,5600	1.2.1.3	7	1,361	3,0021	1.3.1.3	7	1,605	3,1608
	1.1.1.4	8	2,146	3,3400	1.2.1.4	8	1,361	2,9183	1.3.1.4	8	1,605	3,1735
	1.1.1.5	9	2,146	3,3189	1.2.1.5	9	1,361	3,1680	1.3.1.5	9	1,605	3,2843
1	1.1.2.1	0	2,146	2,6209	1.2.2.1	0	1,361	2,5527	1.3.2.1	0	1,605	2,5074
	1.1.2.2	6	2,146	2,6736	1.2.2.2	6	1,361	2,4446	1.3.2.2	6	1,605	2,5820
	1.1.2.3	7	2,146	2,7728	1.2.2.3	7	1,361	2,3496	1.3.2.3	7	1,605	2,6339
	1.1.2.4	8	2,146	2,3306	1.2.2.4	8	1,361	2,4799	1.3.2.4	8	1,605	2,5820
	1.1.2.5	9	2,146	3,0256	1.2.2.5	9	1,361	2,5251	1.3.2.5	9	1,605	2,6962
2,5	1.1.3.1	0	2,146	4,0484	1.2.3.1	0	1,361	3,9793	1.3.3.1	0	1,605	4,1628
	1.1.3.2	6	2,146	4,0343	1.2.3.2	6	1,361	3,9246	1.3.3.2	6	1,605	4,0563
	1.1.3.3	7	2,146	4,3217	1.2.3.3	7	1,361	4,0507	1.3.3.3	7	1,605	3,9804
	1.1.3.4	8	2,146	3,9922	1.2.3.4	8	1,361	4,0751	1.3.3.4	8	1,605	3,9526
	1.1.3.5	9	2,146	4,3980	1.2.3.5	9	1,361	3,9874	1.3.3.5	9	1,605	4,0225

Tabela 5- Condições experimentais para ensaios com fundo composto e  $b=0,6$  cm

b=0,6 (cm)												
Q=0,0869 L/s					Q=0,055 L/s				Q=0,0644 L/s			
P (cm)	Nº da Exp.	L (cm)	Frb	Yt (cm)	Nº da Exp.	L (cm)	Frb	Yt (cm)	Nº da Exp.	L (cm)	Frb	Yt (cm)
1,7	2.1.1.1	0	3,980	3,0630	2.2.1.1	0	2,519	3,0854	2.3.1.1	0	2,949	3,0617
	2.1.1.2	6	3,980	3,0710	2.2.1.2	6	2,519	2,9911	2.3.1.2	6	2,949	3,1950
	2.1.1.3	7	3,980	3,1537	2.2.1.3	7	2,519	3,1036	2.3.1.3	7	2,949	3,2385
	2.1.1.4	8	3,980	3,1062	2.2.1.4	8	2,519	3,0978	2.3.1.4	8	2,949	3,3116
	2.1.1.5	9	3,980	3,1757	2.2.1.5	9	2,519	3,1493	2.3.1.5	9	2,949	3,2088
1	2.1.2.1	0	3,980	2,3878	2.2.2.1	0	2,519	2,1823	2.3.2.1	0	2,949	2,2775
	2.1.2.2	6	3,980	2,7340	2.2.2.2	6	2,519	2,2086	2.3.2.2	6	2,949	2,5101
	2.1.2.3	7	3,980	2,5935	2.2.2.3	7	2,519	2,2452	2.3.2.3	7	2,949	2,6041
	2.1.2.4	8	3,980	2,8037	2.2.2.4	8	2,519	2,2021	2.3.2.4	8	2,949	2,4813
	2.1.2.5	9	3,980	2,8214	2.2.2.5	9	2,519	2,3318	2.3.2.5	9	2,949	2,5597
2,5	2.1.3.1	0	3,980	4,2320	2.2.3.1	0	2,519	3,8109	2.3.3.1	0	2,949	4,0990
	2.1.3.2	6	3,980	4,0997	2.2.3.2	6	2,519	3,8076	2.3.3.2	6	2,949	4,0329
	2.1.3.3	7	3,980	3,9963	2.2.3.3	7	2,519	3,9369	2.3.3.3	7	2,949	4,0743
	2.1.3.4	8	3,980	4,1149	2.2.3.4	8	2,519	3,7503	2.3.3.4	8	2,949	3,9380
	2.1.3.5	9	3,980	4,1060	2.2.3.5	9	2,519	3,6989	2.3.3.5	9	2,949	3,9749

Tabela 6- Condições experimentais para ensaios com fundo composto e  $b=0,7$  cm

b=0,7 (cm)												
Q=0,0870 L/s					Q=0,055 L/s				Q=0,0640 L/s			
P (cm)	Nº da Exp.	L (cm)	Frb	Yt (cm)	Nº da Exp.	L (cm)	Frb	Yt (cm)	Nº da Exp.	L (cm)	Frb	Yt (cm)
1,7	3.1.1.1	0	3,162	3,6593	3.2.1.1	0	1,999	2,9177	3.3.1.1	0	2,326	3,2050
	3.1.1.2	6	3,162	3,8393	3.2.1.2	6	1,999	2,9338	3.3.1.2	6	2,326	3,1940
	3.1.1.3	7	3,162	3,6938	3.2.1.3	7	1,999	3,0618	3.3.1.3	7	2,326	3,0645
	3.1.1.4	8	3,162	3,5154	3.2.1.4	8	1,999	3,0809	3.3.1.4	8	2,326	3,1799
	3.1.1.5	9	3,162	3,4600	3.2.1.5	9	1,999	3,1300	3.3.1.5	9	2,326	3,2406
1	3.1.2.1	0	3,162	2,7013	3.2.2.1	0	1,999	2,2495	3.3.2.1	0	2,326	2,2694
	3.1.2.2	6	3,162	2,7849	3.2.2.2	6	1,999	2,4125	3.3.2.2	6	2,326	2,5049
	3.1.2.3	7	3,162	2,9555	3.2.2.3	7	1,999	2,3383	3.3.2.3	7	2,326	2,4364
	3.1.2.4	8	3,162	2,8573	3.2.2.4	8	1,999	2,5608	3.3.2.4	8	2,326	2,6009
	3.1.2.5	9	3,162	2,7790	3.2.2.5	9	1,999	2,4726	3.3.2.5	9	2,326	2,4898
2,5	3.1.3.1	0	3,162	3,9063	3.2.3.1	0	1,999	3,8510	3.3.3.1	0	2,326	4,0250
	3.1.3.2	6	3,162	4,0190	3.2.3.2	6	1,999	3,9059	3.3.3.2	6	2,326	3,9459
	3.1.3.3	7	3,162	4,1849	3.2.3.3	7	1,999	3,6964	3.3.3.3	7	2,326	3,9114
	3.1.3.4	8	3,162	4,1126	3.2.3.4	8	1,999	3,9925	3.3.3.4	8	2,326	3,8520
	3.1.3.5	9	3,162	4,2227	3.2.3.5	9	1,999	3,6974	3.3.3.5	9	2,326	3,7896

### 3.5 Procedimento Experimental

Neste subcapítulo pretende-se descrever o procedimento utilizado em todos os ensaios experimentais, de forma a minimizar a incerteza dos resultados. Após algumas filmagens iniciais chegou-se à conclusão que por detrás do canal deveria ser colocado um fundo branco, para que pudesse haver um melhor contraste entre o fundo e as camadas de areia.

Em primeiro lugar colocaram-se duas escalas (horizontal e vertical) no canal para que posteriormente fosse possível escalar a imagem com o programa *Autocad*, e medir com exatidão as distâncias necessárias.

Os ensaios iniciavam-se com o nivelamento da superfície da areia, seguindo-se a verificação das condições experimentais através da medição da abertura da comporta e da altura da soleira do descarregador a jusante. Para evitar a presença de ar na camada de areia colocada no canal ligava-se por breves instantes a bomba, introduzindo água para que a camada ficasse molhada. Antes da realização do ensaio era necessário realizar a medição do caudal pretendido.

Após a preparação do canal procedia-se à colocação da máquina de filmar (Sony HDR–XR105E Full HD 1080) em posição perpendicular ao canal. Existindo todas as condições desejadas procedia-se à realização do ensaio, ligando-se as bombas do canal *Armfield* e começando-se a filmar o ensaio desde o enchimento do canal até à estabilização da cavidade de erosão localizada e da respetiva barra a jusante. A comporta era colocada no instante em que a altura do colchão de água no canal não aumentava mais, de maneira a que com a inserção da comporta o instante inicial não fosse perturbado. A duração média dos vídeos estava compreendida entre os 2 e 7 minutos. Esta variação da duração do ensaio deve-se ao facto de se pretender que o ensaio atinja o equilíbrio. Considerava-se que o ensaio atingia a fase de equilíbrio quando a cavidade de erosão e a formação da barra não evoluía mais.

**Processamento de imagem.** Uma vez obtido o vídeo da totalidade do ensaio, ele era transformado em imagens estáticas correspondentes a diferentes instantes, recorrendo ao *software PMB (Picture Motion Browser)*. Este *software* permite exibir e importar os vídeos realizados, assim como transformar os vídeos em imagens. As imagens selecionadas não correspondiam aos mesmos instantes em todos os vídeos, pois escolheram-se imagens que ilustravam uma variação significativa na formação da duna e barra.

Após extrair as imagens necessárias utilizou-se o programa *Autocad*, para ser possível desenhar os perfis da cavidade de erosão e da duna a jusante, e medir as distâncias necessárias. Este processo no *Autocad* tem várias fases que são descritas de seguida. Em primeiro lugar, muda-se as unidades do *Autocad* para centímetros, pois será a unidade adotada para trabalhar nas imagens. De seguida, desenha-se um segmento de reta (com por exemplo 20 cm) e cola-se na imagem que se pretende (Figura 22). A partir da escala, que está representada na imagem, e do segmento de reta, que se desenhou anteriormente, escala-se a imagem com o comando “*ALIGN*” (Figura 23).

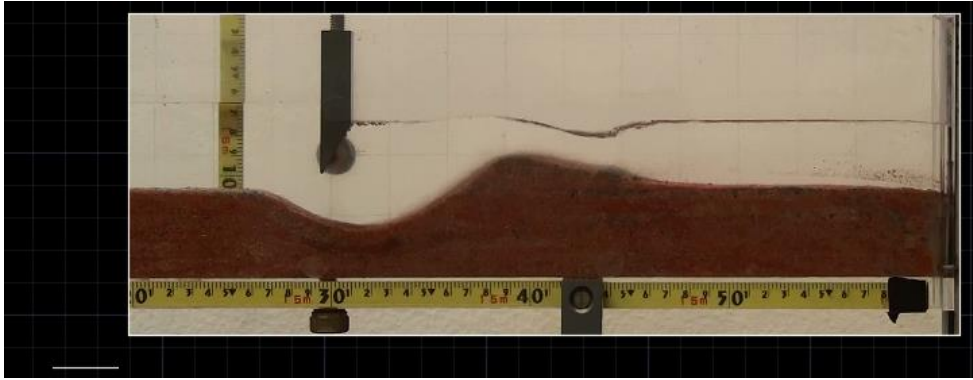


Figura 22- Segmento de reta branco desenhado para escalar a imagem com as medidas reais

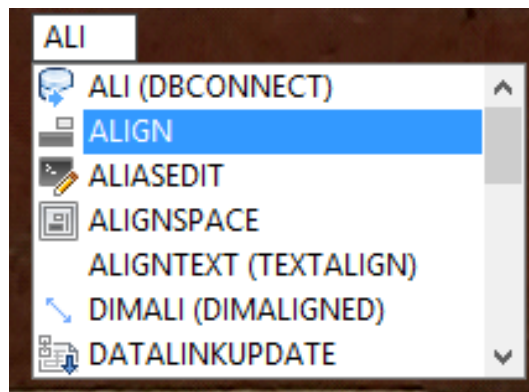


Figura 23- Comando para escalar a imagem

Para desenhar os perfis, cria-se um referencial com origem no local que se pretende e a partir daí criam-se linhas auxiliares (Figura 24). Com o comando “*SPLINE*” (Figura 25) contornava-se a forma que a camada de areia tinha (Figura 26) e obtinham-se assim os perfis (Figura 27).

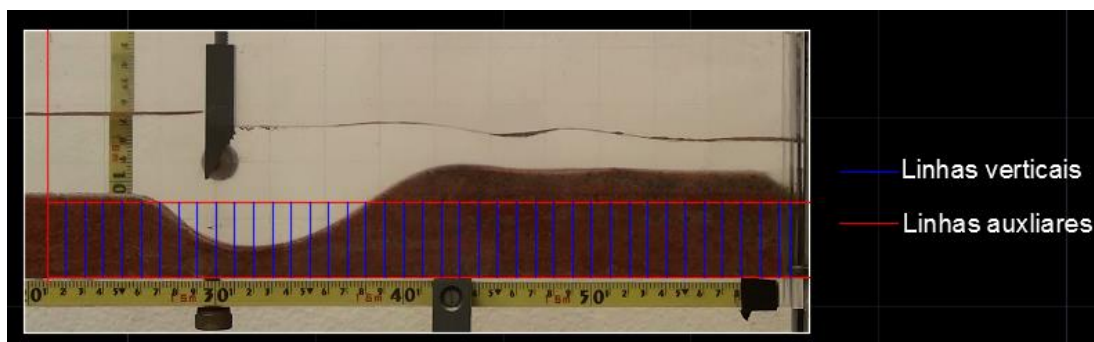


Figura 24- Criação de linhas auxiliares e verticais para que se possa desenhar o perfil da camada de areia



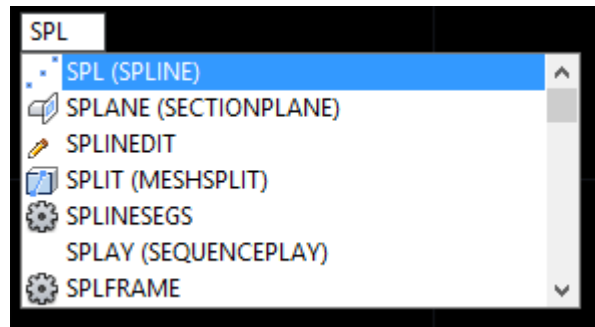


Figura 25- Comando para desenhar os perfis da camada de areia

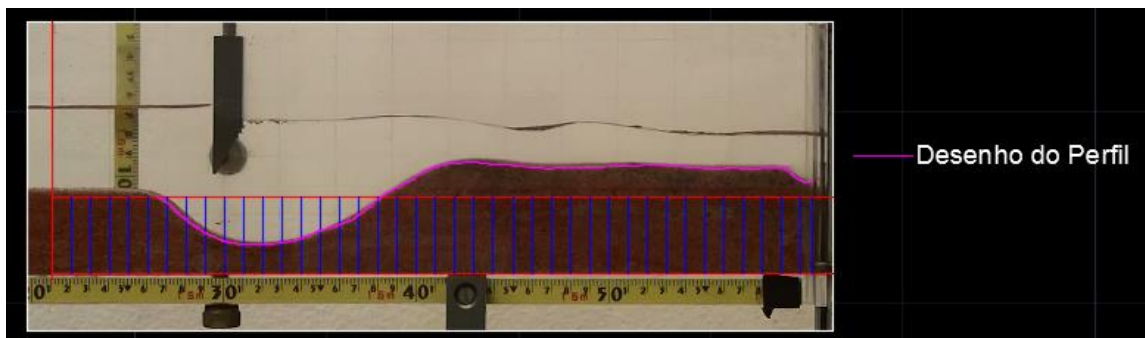


Figura 26- Desenho do perfil com o comando *SPLINE*

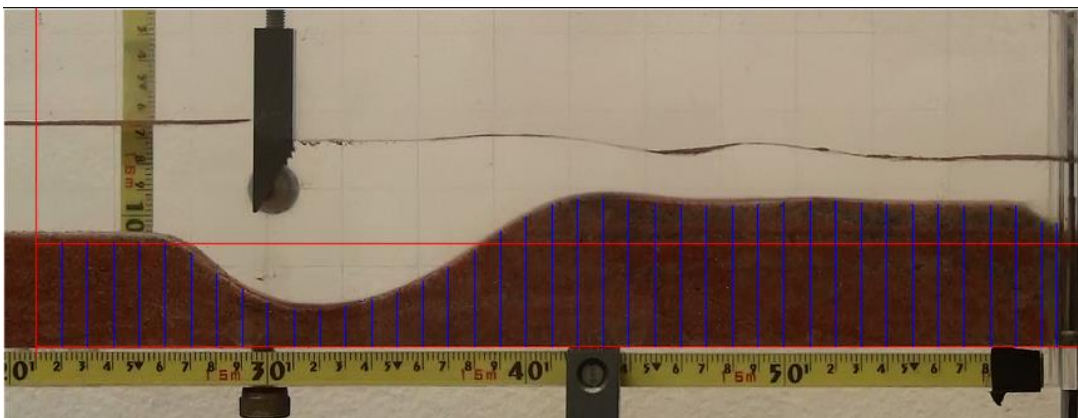


Figura 27- Distâncias verticais obtidas para obter o perfil

Com os perfis desenhados no *Autocad* pretendia-se passar toda a sua informação para uma folha de cálculo do tipo Excel. Para retirar as distâncias verticais dos perfis mais rapidamente, usou-se o comando “*LENGTHEN*” (Figura 28). Depois de tirar todas as medidas necessárias colocaram-se as distâncias horizontais e a respetivas distâncias verticais na folha de cálculo automática e por último transformaram-se estas medidas num gráfico (Figura 29), obtendo-se assim um perfil longitudinal.

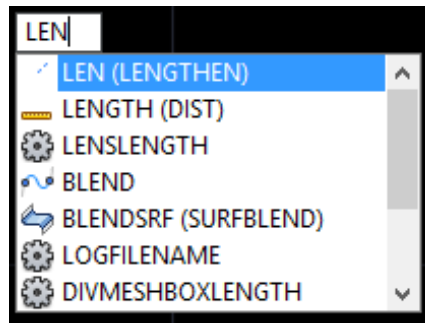


Figura 28-Comando para medir as distâncias pretendidas

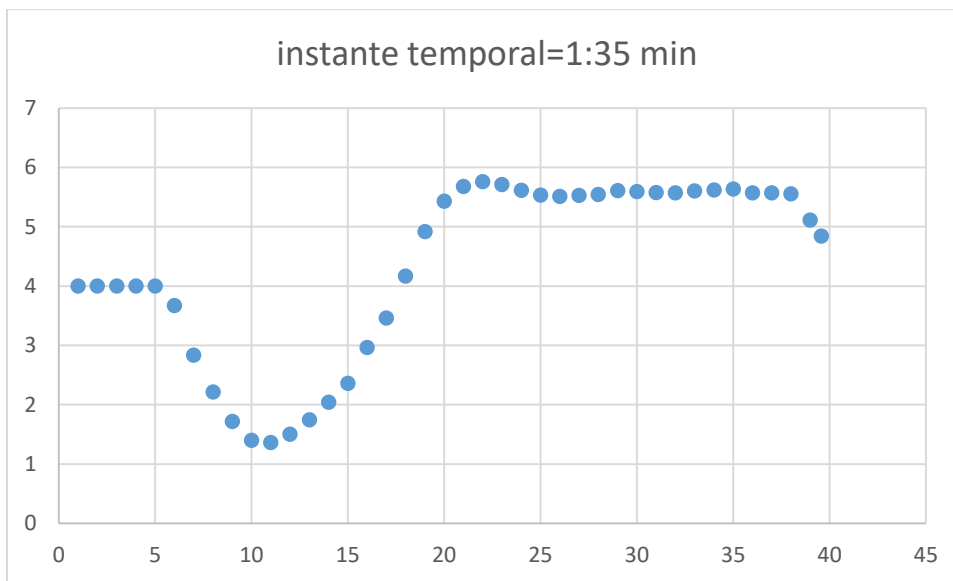


Figura 29- Perfil longitudinal obtido a partir das distâncias verticais e horizontais (eixos em cm).

## 4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se os resultados dos ensaios experimentais e analisa-se o movimento da areia, a evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão e a evolução da barra. Serão apresentados os resultados obtidos dos ensaios e serão tiradas algumas conclusões.

### 4.1 Ensaios experimentais com fundo móvel

Este subcapítulo apresenta a análise de resultados das três experiências realizadas com fundo móvel, para diferentes alturas do descarregador a jusante (Tabela 3). No anexo I apresentam-se para todos os ensaios duas imagens: uma correspondente a um instante intermédio e outra correspondente ao instante final.

**Breve descrição dos ensaios.** No início de cada ensaio, após ter inserido a comporta na posição pretendida é possível observar-se início da erosão e o transporte dos grãos de areia para jusante. Por sua vez a areia que se deposita a jusante origina uma barra, que cresce ao longo do tempo e quando a velocidade já não é suficiente para transportar partículas pode acontecer que o talude a jusante da cavidade da erosão localizada sofra erosão, isto é há o recuo das partículas.

#### 4.1.1 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão

Pretende-se com estes três ensaios observar o movimento dos grãos de areia e estudar o comportamento da cavidade da erosão, o comportamento e formação da barra para as diferentes alturas do descarregador. Na Tabela 7 é possível observar as profundidades da cavidade de erosão ao longo do tempo. Para uma melhor análise de resultados decidiu-se representar graficamente cada experiência, como se pode ver nas Figura 30 a Figura 32. De seguida decidiu-se juntar os três gráficos para se ver a diferença entre eles, como se pode ver na Figura 33 e Tabela 8. Nesta figura fizeram-se coincidir os instantes iniciais dos ensaios, de maneira a facilitar a sua comparação.

Tabela 7- Evolução temporal da cavidade de erosão localizada

1º EXP.		2º EXP		3º EXP	
Instante	Ys (cm)	Instante	Ys (cm)	Instante	Ys (cm)
00:26	0,0602	00:20	0,1407	00:35	0,0564
00:40	1,6971	00:40	2,0513	00:40	0,8285
00:55	2,1734	00:55	2,2971	00:55	2,1862
01:30	2,6402	01:30	2,612	01:40	2,5368
02:00	2,6474	02:00	2,6752	02:20	2,7068

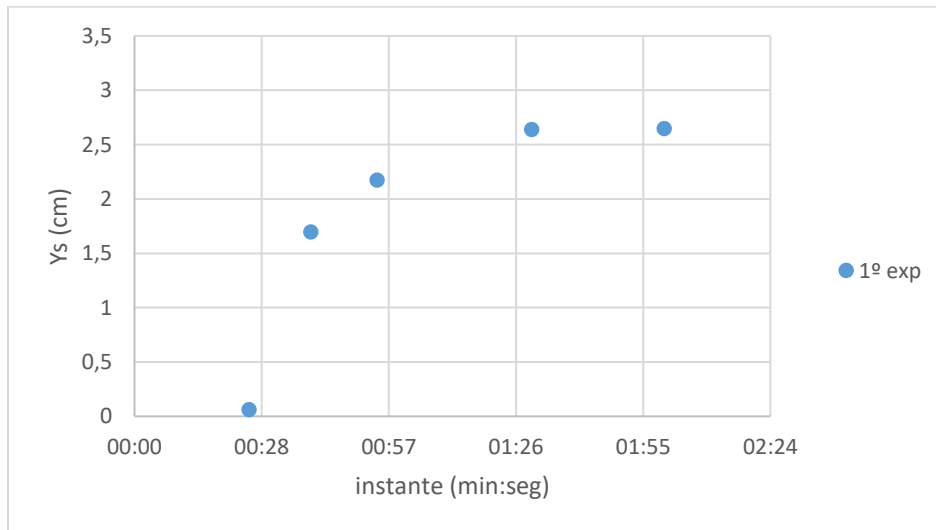


Figura 30- Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão da 1ª experiência

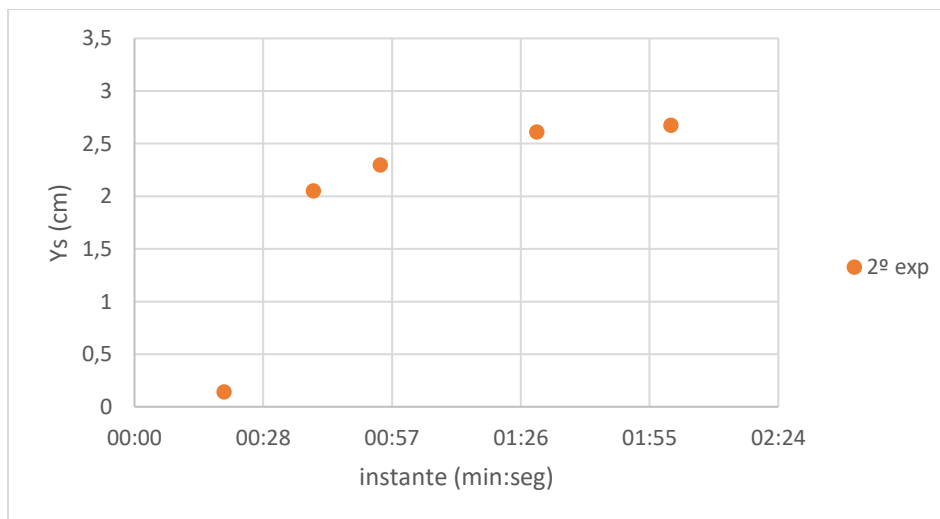


Figura 31- Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão da 2ª experiência

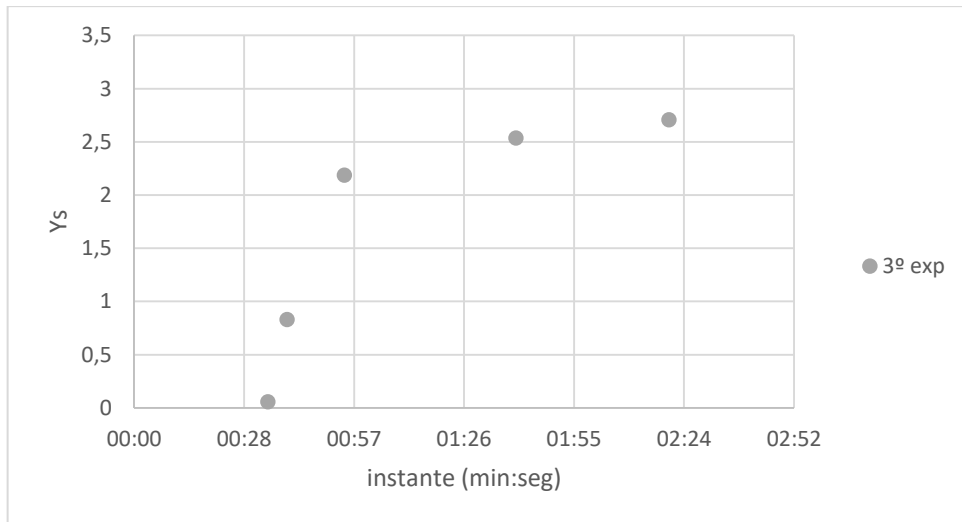


Figura 32- Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão da 3ª experiência

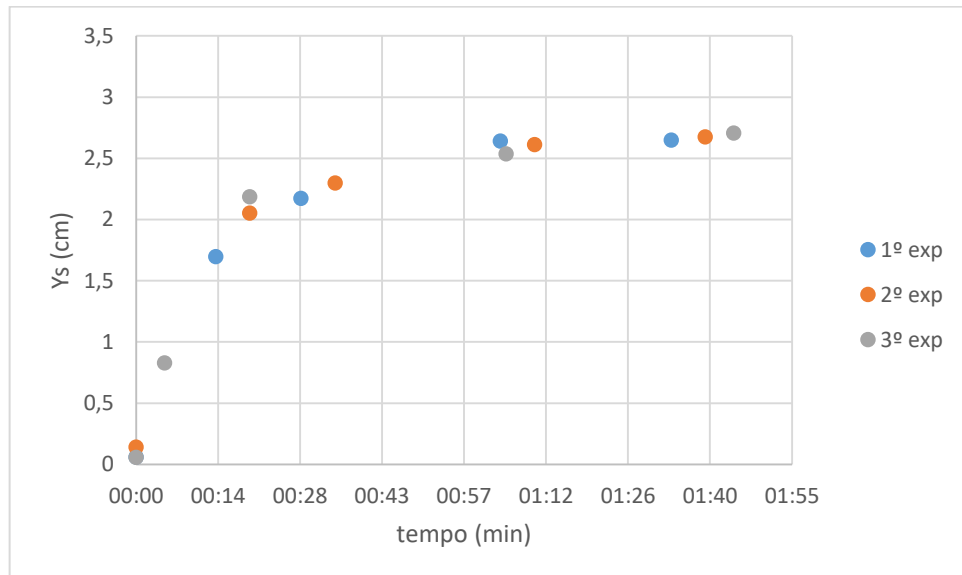


Figura 33- Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão das três experiências

Tabela 8-Evolução temporal da cavidade de erosão localizada com os instantes iniciais dos ensaios coincidentes

1º EXP.		2º EXP		3º EXP	
tempo	Ys	tempo	Ys	tempo	Ys
00:00	0,0602	00:00	0,1407	00:00	0,0564
00:14	1,6971	00:20	2,0513	00:05	0,8285
00:29	2,1734	00:35	2,2971	00:20	2,1862
01:04	2,6402	01:10	2,612	01:05	2,5368
01:34	2,6474	01:40	2,6752	01:45	2,7068

Com estes resultados verifica-se que a terceira experiência, com a maior altura do descarregador a jusante (ou seja, com a maior altura do colchão de água a jusante), possui uma profundidade máxima da cavidade de erosão maior no último instante em relação às restantes experiências, apesar da diferença entre as três experiências ser pequena, como se pode ver na Tabela 8.

#### 4.1.2 Perfis longitudinais do leito de sedimentos a jusante da comporta

Com o objetivo de analisar o comportamento e a formação da barra, a Figura 34 apresenta os perfis longitudinais para a configuração de equilíbrio atingida.

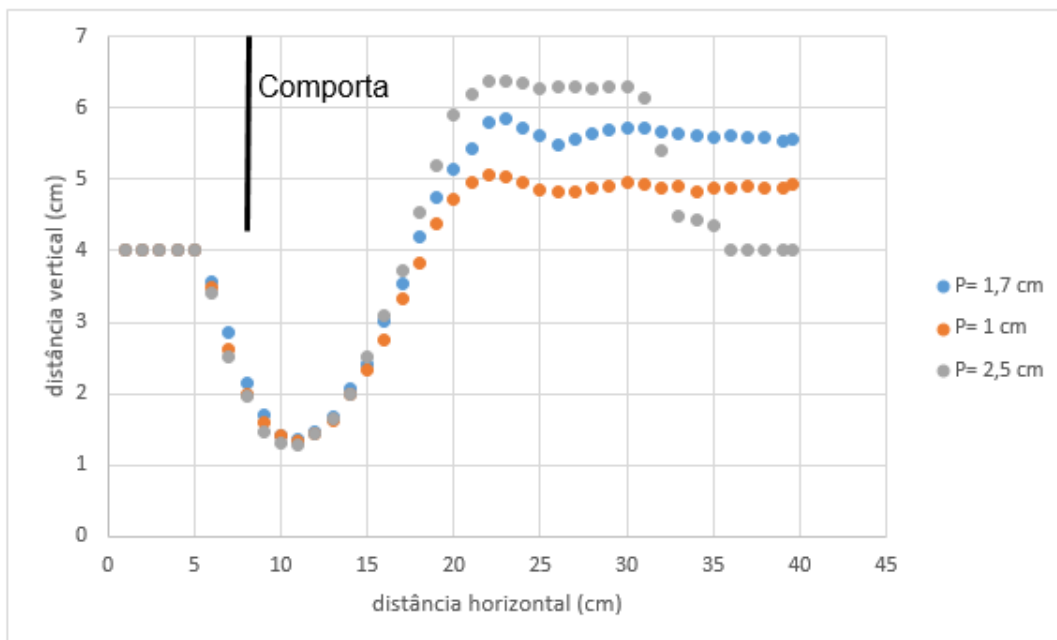


Figura 34- Perfis das três experiências para a configuração de equilíbrio atingida

Da observação da Figura 34 verifica-se que para  $P=1$  cm, ou seja a menor altura do descarregador a jusante, que corresponde a uma menor profundidade do colchão de água a jusante, a cavidade de erosão tem um comprimento maior, uma altura da barra menor e por isso o declive a jusante da cavidade de erosão é menos acentuado. No que diz respeito à experiência com  $P=2,5$  cm, ou seja, que possui maior altura do colchão de água a jusante, o comprimento da cavidade de erosão é mais curto em relação à experiência anteriormente mencionada, a altura da barra é a maior e por isso o declive desta é mais acentuado. Por último, para  $P=1,7$  cm,

como a altura do descarregador a jusante é intermédia, o perfil da barra fica situado entre os dois anteriormente referidos

Observa-se igualmente que o máximo da profundidade da cavidade de erosão ocorre nos três casos para uma distância horizontal igual a aproximadamente 11 cm. O perfil do talude de montante da cavidade de erosão é praticamente coincidentes nas três experiências.

Estes resultados permitem concluir que a altura do colchão de água a jusante não influencia a máxima profundidade da cavidade de erosão e o talude de montante da cavidade de erosão. No entanto a influência da altura do colchão de água nas características da barra a jusante é evidente. Quando a altura do colchão de água é maior (P maior) a duna pode ser maior pois a velocidade média do escoamento sobre a duna é menor o que faz com que o transporte de sedimentos e erosão da crista da duna observados sejam menores.

## **4.2 Ensaios experimentais com fundo composto**

Neste subcapítulo pretende-se fazer a análise das experiências de fundo composto, com o objetivo de comparar os resultados das presentes experiências e os resultados de Melville e Lim (2014). No anexo I apresentam-se para todos os ensaios duas imagens: uma correspondente a um instante intermédio e outra correspondente ao instante final. Na Figura 21 apresenta-se os parâmetros que foram medidos e utilizados para calcular outros parâmetros, como por exemplo aqueles que são apresentados nas fórmulas 6 e 7 apresentados na revisão bibliográfica (Anexo II). Determinou-se também a velocidade crítica, através da equação 1 apresentada na revisão bibliográfica para cada ensaio (Anexo II), com o objetivo de comparar esta velocidade com a velocidade do escoamento na secção da comporta, para isto decidiu-se apresentar na Tabela 9 alguns valores apresentados no anexo II. Foi possível verificar, como era de esperar, que as velocidades na comporta são muito superiores à velocidade crítica, e isto levará à formação da cavidade de erosão e posteriormente à formação da barra.

Tabela 9- Resultados das velocidades da comporta e crítica para alguns ensaios

	P (cm)	Nº Exp.	L (cm)	Frb	Uc (ms <sup>-1</sup> )	
Para Q1= 0,0861 L/s	1,7	1.1.1.1	0	2,146	0,250866	
		1.1.1.2	6	2,146	0,250035	
		1.1.1.3	7	2,146	0,250984	
		1.1.1.4	8	2,146	0,24833	
		1.1.1.5	9	2,146	0,248068	
	1	1	1.1.2.1	0	2,146	0,238495
			1.1.2.2	6	2,146	0,239288
			1.1.2.3	7	2,146	0,240745
			1.1.2.4	8	2,146	0,233874
			1.1.2.5	9	2,146	0,244272
	2,5	2,5	1.1.3.1	0	2,146	0,25642
			1.1.3.2	6	2,146	0,256271
			1.1.3.3	7	2,146	0,259227
			1.1.3.4	8	2,146	0,255823
			1.1.3.5	9	2,146	0,259984

**Breve descrição dos ensaios.** A evolução da cavidade da erosão para diferentes caudais e diferentes L é semelhante. É possível observar-se que o começo deste fenómeno leva a que partículas se movam por transporte por saltação, depois à medida que a barra se vai formando as partículas são transportadas por arrastamento. Quanto maior o L, menor é o comprimento da cavidade de erosão. No que diz respeito ao P, quando maior o P mais lento é o crescimento da barra. Em relação às configurações de fundo é possível observar-se que em todos ensaios existem dois tipos: as de transição que ocorre desde o início até ao estabilizar da água e após a estabilização da água é possível observar a configuração do fundo de ondulações.

#### 4.2.1 Comportamento e formação da barra

Tal como se estudou o comportamento e a formação da barra nos ensaios com fundo móvel, pretende-se também estudar este fenómeno num conjunto de ensaios com fundo composto. Deste modo, optou-se por estudar pormenorizadamente cinco ensaios.

Em primeiro lugar estudaram-se três ensaios (1.1.1.1, 1.1.1.2 e 1.1.1.4,) com  $b=0,9$  cm,  $P=1,7$  cm, caudal de  $0,0861$  Ls<sup>-1</sup> e diferentes valores de L (Tabela 4). Os perfis destas experiências estão apresentados na Figura 35.



Em segundo lugar, o segundo grupo de três ensaios (1.1.1.1, 1.1.2.1 e 1.1.3.1) estudado tem como condições experimentais (Tabela 4):  $b=0,9$  cm, caudal de  $0,0861 \text{ L s}^{-1}$ ,  $L=0$  e diferentes alturas da soleira do descarregador a jusante (P). Os perfis destas experiências estão apresentados na Figura 37.

Para além disto, mediu-se para estes dois grupos de ensaios os declives do talude a montante e a jusante da cavidade de erosão, os ângulos de repouso e por último mediu-se a extensão da barra. Estas medições foram realizadas no programa *Autocad*. Segundo Cardoso (1998) dependendo do diâmetro das partículas existe uma variação do ângulo de repouso, deste modo optou-se por  $\text{tg}(\theta_r)=0,85$  que corresponde a um ângulo de repouso ( $\theta_r$ ) igual a  $40,3^\circ$  no caso de uma areia com  $D_{50}$  igual a  $0,328$  mm. Assim, se houver algum talude com um ângulo superior a este valor terá como consequência o seu desmoronamento.

Da observação da Figura 35 verifica-se que para  $L=0$ , ou seja o menor comprimento de fundo fixo, apresenta uma maior profundidade da cavidade de erosão em relação aos outros ensaios e ainda é possível verificar-se que a inclinação do talude é maior em relação aos restantes ensaios. Como é de esperar para o comprimento do fundo fixo intermédio ( $L=6$  cm), a cavidade de erosão é maior em relação ao ensaio com  $L=9$  cm, e a inclinação do talude também é superior. Com isto pode-se concluir que à medida que o  $L$  aumenta, a máxima profundidade da cavidade de erosão é menor e por sua vez a inclinação do talude é também menor.

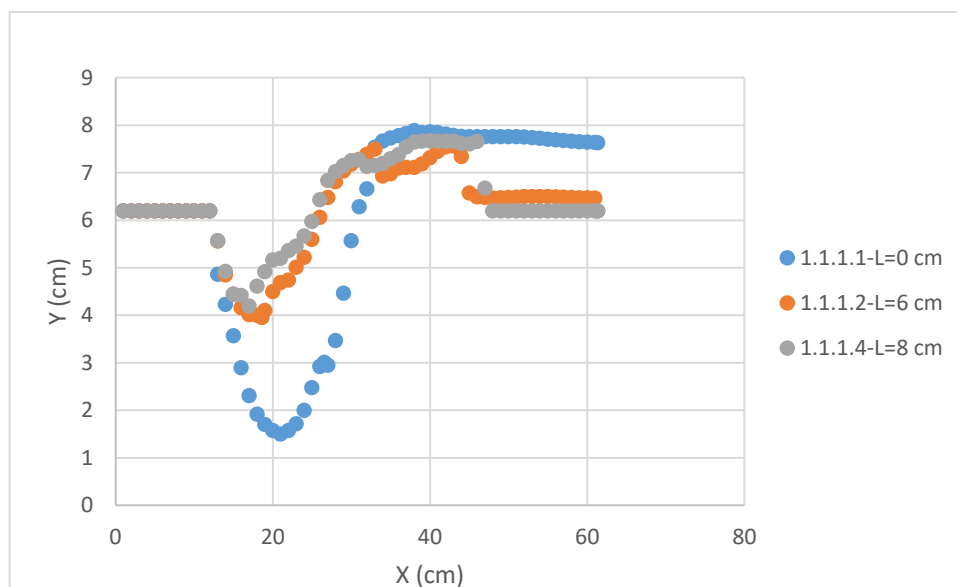


Figura 35- Perfis longitudinais das experiências 1.1.1.1, 1.1.1.2 e 1.1.1.4. ( $b=0,9$  cm,  $P=1,7$  cm,  $Q=0,0861 \text{ L s}^{-1}$  e diferentes valores de  $L$ ) para a configuração de equilíbrio atingida

## Análise de erosão localizada a jusante de uma comporta vertical de abertura inferior

Como já se referiu anteriormente mediram-se a extensão e os declives dos taludes de montante e jusante da cavidade de erosão, os respetivos ângulos dos taludes e por último a extensão da barra (Tabela 10) para cada ensaio apresentado na Figura 35., A extensão da barra era determinada (Figura 36) desenhando-se em primeiro lugar os referenciais e depois traçando uma linha auxiliar (representada a amarelo) com o comprimento da barra, determinado ao nível inicial da superfície da camada de areia.

Tabela 10-Declives dos taludes, ângulo de repouso e extensão da barra

Nº Experiência	Extensão do talude a montante da cavidade de erosão (cm)	Ângulo do talude a montante (º)	Extensão do talude a jusante da cavidade de erosão (cm)	Ângulo do talude a jusante (º)	Extensão da barra (cm)
1.1.1.1	6,34	29,97	6,9	40,13	30,59
1.1.1.2	4,53	25,84	8,43	15,02	17,76
1.1.1.4	3,02	26,01	7,81	11,66	21,44

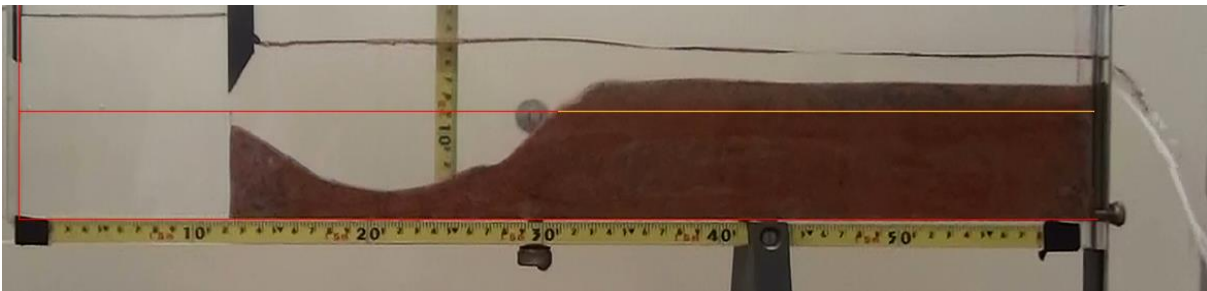


Figura 36- Medida da extensão da barra para a experiência 1.1.1.1

Da observação da Tabela 10 verifica-se que à medida que o L aumenta a extensão do talude a montante da cavidade de erosão diminui, isto significa que quando a comporta está situada a L=0 o declive do talude a montante que se forma é muito mais acentuado do que quando a comporta se situa a L=8, como era de esperar. Verifica-se também que quanto menor o L maior será o ângulo do talude a jusante.

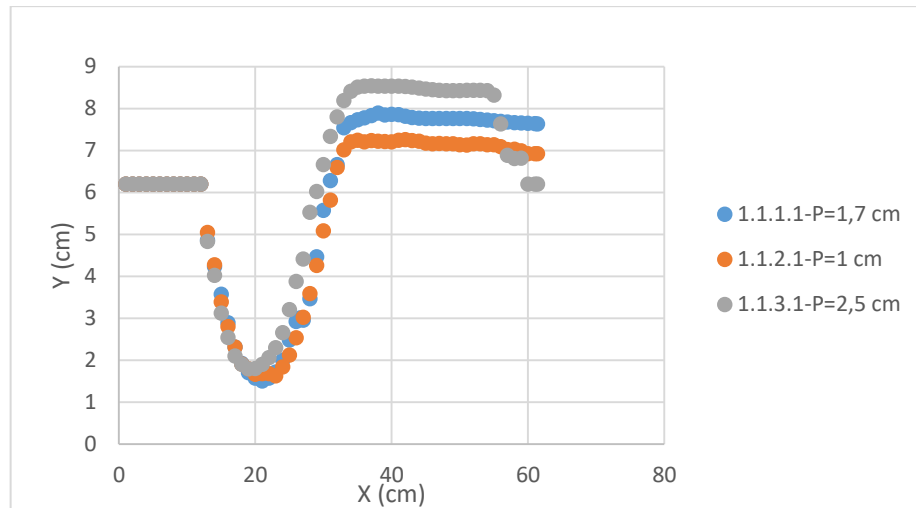


Figura 37- Perfis longitudinais das experiências 1.1.1.1, 1.1.2.1 e 1.1.3.1 ( $b=0,9$  cm,  $Q=0,0861$   $Ls^{-1}$ ,  $L=0$  e diferentes alturas da soleira do descarregador a jusante) para a configuração de equilíbrio atingida

Na Figura 37 observa-se que para um  $P=1$  cm, a altura do colchão de água será a menor, o que levará a uma menor altura da barra, a um maior comprimento da cavidade de erosão e por último a um menor declive do talude. Verifica-se como era de esperar que para o  $P$  intermédio, todos os parâmetros referidos anteriormente estão entre o  $P$  máximo e mínimo. Assim pode-se concluir que quanto maior o  $P$  maior será o colchão de água, o que tem como consequência uma maior altura da barra, mais acentuado declive do talude e por sua vez menor comprimento da cavidade de erosão.

Como já se referiu anteriormente realizou-se o estudo do declive do talude a montante e a jusante da cavidade de erosão, o ângulo de repouso e por último a extensão da barra (Tabela 11) para cada ensaio apresentado na Figura 37.

Tabela 11-Extensão dos taludes, ângulo de repouso e extensão da barra

Nº Experiência	Extensão do talude a montante da cavidade de erosão (cm)	Ângulo do talude a montante (°)	Extensão do talude a jusante da cavidade de erosão (cm)	Ângulo do talude a jusante (°)	Extensão da barra (cm)
1.1.1.1	6,34	29,97	6,9	40,13	30,59
1.1.2.1	6,05	34,12	7,9	32,2	29,46
1.1.3.1	6,2	32,76	10	33,07	26,76

Da observação da Tabela 11 verifica-se como era previsto que para o mesmo  $L$ , apesar de diferentes  $P$ , a extensão do talude a montante da cavidade de erosão é muito semelhante pois a

comporta está situada no mesmo local. Por outro lado verifica-se também que quanto maior o  $P$ , maior será a altura do colchão de água que levará a que o declive do talude a jusante da cavidade de erosão seja mais acentuado. A extensão da barra para o mesmo instante é possível verificar que é maior quando o  $P$  é menor como era de esperar, isto significa que à medida que o  $P$  aumenta a evolução do crescimento da barra é mais lenta.

Comparando os resultados da figura 32 (fundo fixo com  $L=0$ ) e da figura 30 (fundo móvel) observa-se que o facto de se introduzir um fundo fixo aumenta a máxima profundidade da cavidade de erosão. Em ambos os ensaios é possível verificar que a erosão nunca alcançou o fundo da camada de areia. O facto de haver uma maior erosão no leito fixo deve-se à velocidade na comporta ser maior durante todo o ensaio. O mesmo já não acontece no leito de fundo móvel pois ao escavar a velocidade vai diminuindo na comporta durante o ensaio.

#### 4.2.2 Influência do Número de Froude da Comporta

Em primeiro lugar pretende-se analisar a influência do número de  $Fr$  da comporta ( $Fr_b$ ) em relação à cavidade de erosão. Para isto foi necessário construir um gráfico com a relação entre  $Y_s/b$  e  $Fr_b$  com os resultados obtidos pelos 135 ensaios. Para uma melhor compreensão são apresentados na Figura 38 os resultados das experiências referidas anteriormente e as tabelas apresentadas no Anexo III. Para fazer uma análise comparativa dos resultados das 135 experiências com o estudo realizado por Melville e Lim (2014) optou-se por fazer a sobreposição dos dois gráficos. Na Figura 39 apresenta-se os resultados obtidos e de seguida apresenta-se a análise dos mesmos.

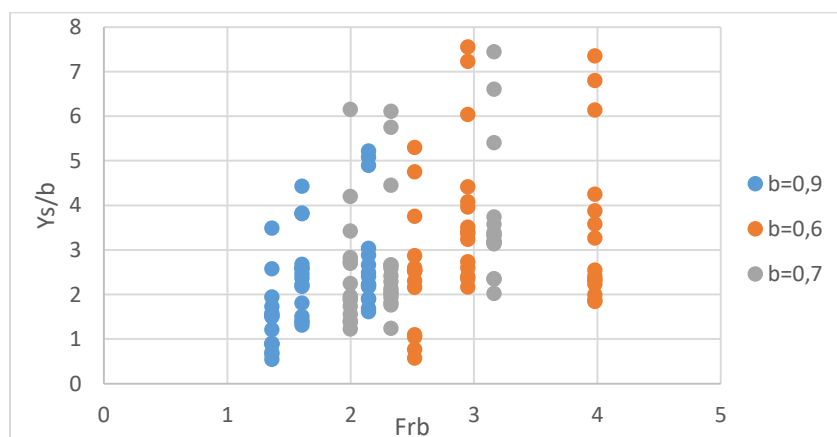


Figura 38- Relação entre o número de  $Fr_b$  e a máxima profundidade da cavidade de erosão ( $b$  em cm)

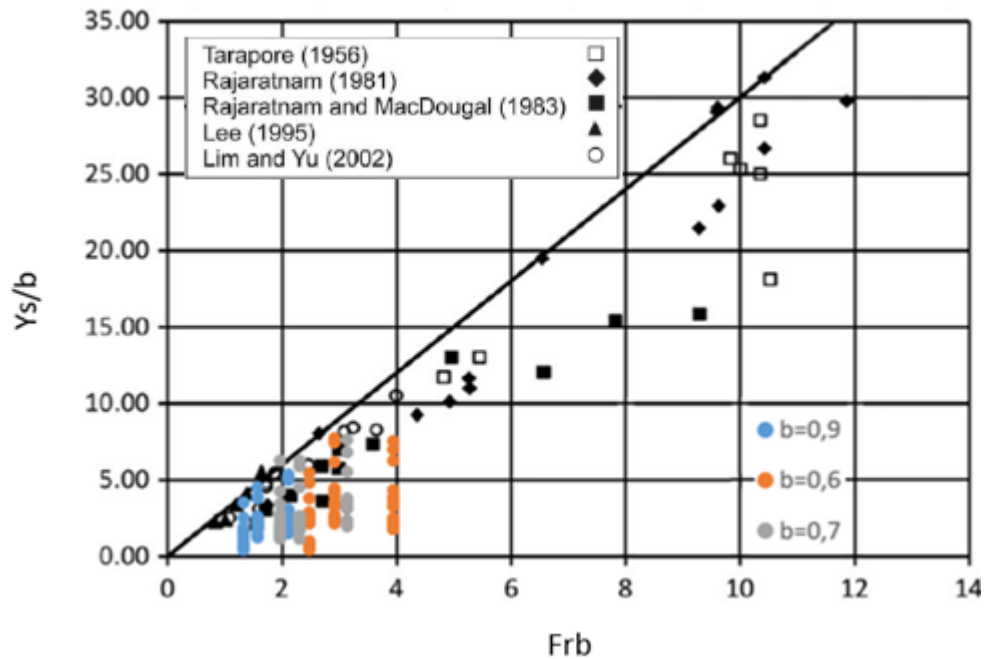


Figura 39- Relação entre  $F_{rb}$  e  $Y_s/b$  ( $b$  em cm). Análise comparativa entre o presente estudo (símbolos a cores) e o estudo de Melville e Lim (2014) (símbolos a preto e branco)

Como se pode ver na Figura 39, os resultados obtidos das presentes experiências são idênticos aos de Melville e Lim (2014). Pode-se observar que as profundidades dos estudos de Melville e Lim (2014) são superiores ao presente estudo. Enquanto no presente estudo a relação  $Y_s/b$  não ultrapassa os 10, no estudo de Melville e Lim (2014) esta razão atinge valores entre 30 e 35. Isto deve-se ao facto das condições experimentais serem diferentes, o que levará a que os parâmetros atinjam maiores valores. Também é possível observar que à medida que a abertura da comporta aumenta, a relação entre  $F_{rb}$  e  $Y_s/b$  aproxima-se da reta, isto é, aproxima-se do valor teórico. O valor teórico é dado pela relação linear  $y=3F_{rb}$  (Melville e Lim, 2014). Para além disto, verifica-se que as experiências com menor abertura da comporta atingem maiores valores de  $Y_s/b$  em relação às outras aberturas. Isto deve-se ao facto de quanto menor for a abertura da comporta, maior será a velocidade do escoamento e como consequência terá uma maior profundidade máxima da cavidade de erosão.

### 4.2.3 Influência do comprimento da parte fixa do fundo composto

Em segundo lugar pretende-se analisar a influência do comprimento da parte fixa do fundo composto em relação à cavidade de erosão. Os dados são expressos em função de  $KL$ , que é a razão entre  $Y_s/b$  para um determinado valor de  $L/b$  e  $Y_s/b$  para  $L/b=0$ . Para uma melhor

compreensão apresenta-se de seguida um exemplo de dados na tabela para calcular o valor de KL.

Tabela 12- Exemplos de valores de KL para b=0,9 cm

	P(cm)	Número de experiência	L (cm)	L/b	Ys/b	KL
Q=0,0861L/s	1,7	1.1.1.1	0	0	5,217	1,000
		1.1.1.2	6	6,667	2,491	0,477
		1.1.1.3	7	7,778	2,176	0,417
		1.1.1.4	8	8,889	2,223	0,426
		1.1.1.5	9	10	2,217	0,425

Assim, por exemplo para a experiência 1.1.1.2:

$$KL = \frac{2,491}{5,217} = 0,477 \quad (9)$$

Construi-se assim um gráfico com a relação entre o comprimento do fundo fixo e a profundidade máxima da cavidade de erosão, como se apresenta na Figura 40, estando as tabelas do mesmo apresentadas no Anexo IV.

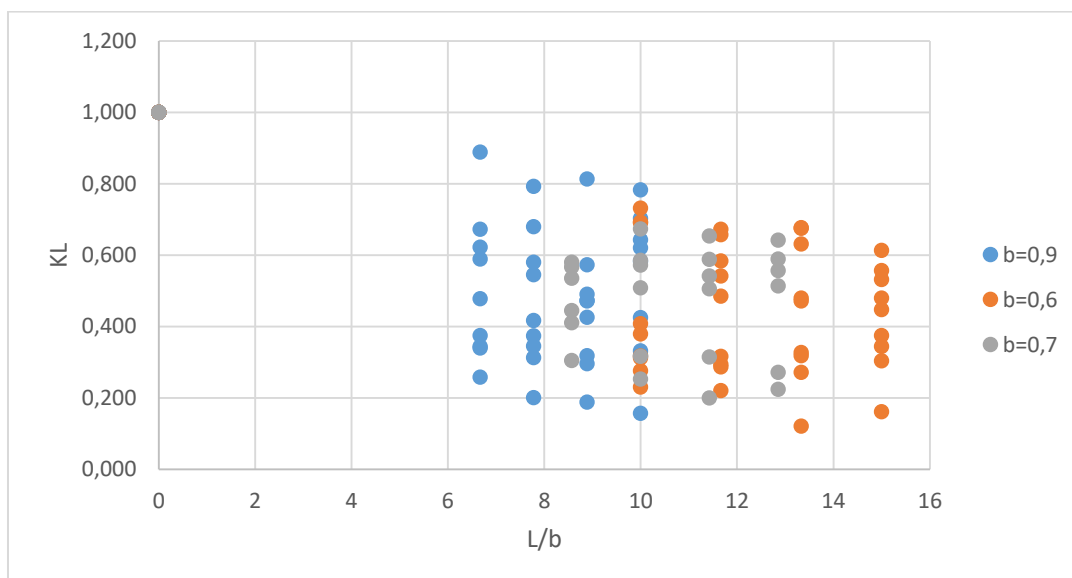


Figura 40- Relação entre o comprimento fixo e KL (b em cm)

Para fazer uma análise comparativa entre o estudo presente e o estudo apresentado por Melville e Lim (2014), fez-se a sobreposição dos gráficos, como se pode ver na Figura 41.

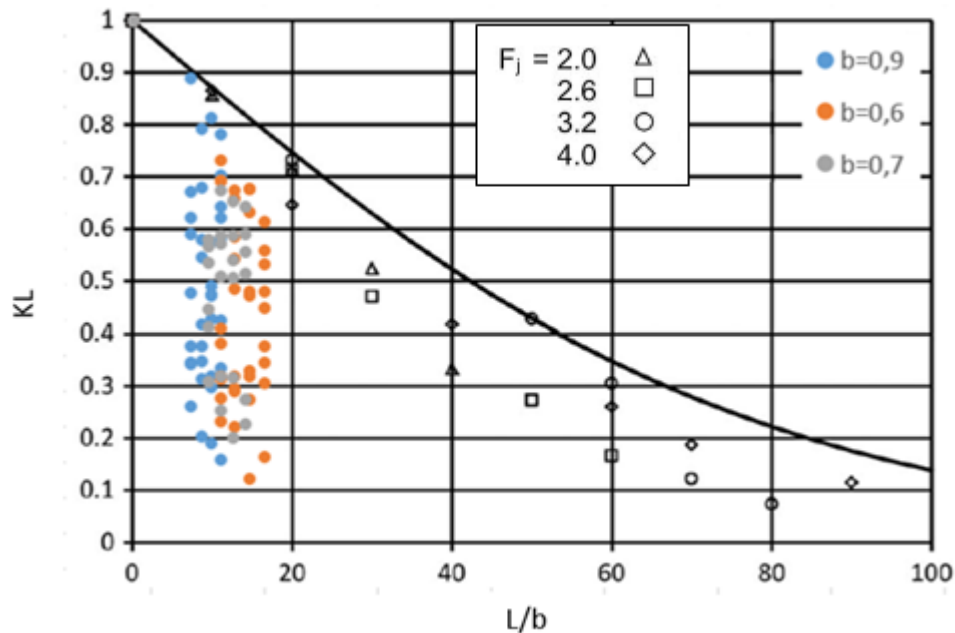


Figura 41- Relação entre  $L/b$  e  $KL$  ( $b$  em cm). Análise comparativa do presente estudo (símbolos a cores) com o estudo de Melville e Lim (2014) (símbolos a preto e branco)

Como se pode ver na Figura 41, os resultados obtidos nas presentes experiências apresentam o mesmo comportamento dos resultados de Melville e Lim (2014), isto é, todos os resultados tanto das 135 experiências como os estudos apresentados por Melville e Lim (2014) estão abaixo dos valores teóricos representados pela curva (equação 1 apresentado na revisão bibliográfica). Como se verifica na Figura 41 os resultados do presente estudo estão muito concentrados, por isso existe uma maior dificuldade para analisar as diferenças para os diferentes  $b$ . No entanto na Figura 40 é possível verificar-se que quanto menor o  $b$ , maior é a relação do valor de  $L/b$  que por consequência tem um menor  $KL$ .

#### 4.2.4 Influência da profundidade do colchão de água a jusante

Em terceiro lugar, pretende-se estudar a influência de  $Y_t$  em  $Y_s$ . Os dados são expressos em termos de  $K_{yt}$ , este parâmetro é a razão entre  $Y_s/b$  para um dado valor de  $Y_t/b$  e o valor de  $Y_s/b$  para o maior valor de  $Y_t/b$ . Para uma melhor compreensão decidiu-se apresentar um exemplo de dados na tabela para calcular  $K_{yt}$  (Anexo V).

Tabela 13-Exemplos de valores de Kyt para um b=0,9

	P(cm)	Número de experiência	L (cm)	Yt/b	Ys/b	Kyt	Kyt teórico
Q=0,0861L/s	1,7	1.1.1.1	0	3,944	5,217	1,720	0,354
		1.1.1.2	6	3,867	2,491	0,821	0,337
		1.1.1.3	7	3,956	2,176	0,717	0,357
		1.1.1.4	8	3,711	2,223	0,733	0,302
		1.1.1.5	9	3,688	2,217	0,731	0,298
	1	1.1.2.1	0	2,912	5,085	1,676	0,161
		1.1.2.2	6	2,971	1,904	0,628	0,170
		1.1.2.3	7	3,081	1,899	0,626	0,186
		1.1.2.4	8	2,590	1,617	0,533	0,119
		1.1.2.5	9	3,362	1,687	0,556	0,234
	2,5	1.1.3.1	0	4,498	4,892	1,613	0,499
		1.1.3.2	6	4,483	2,883	0,951	0,494
		1.1.3.3	7	4,802	2,665	0,878	0,591
		1.1.3.4	8	4,436	2,401	0,792	0,481
		1.1.3.5	9	4,887	3,033	1,000	0,619

Para calcular o Kyt de qualquer experiência primeiro será necessário ver qual será o maior valor de Yt/b de todas as experiências para b=0,9 cm referentes à tabela do Anexo V. Na Tabela 13 é apresentada uma parte dessa tabela, e esse valor máximo está assinalado a amarelo. De seguida, para calcular o Kyt, por exemplo da experiência 1.1.1.4, faz-se da seguinte maneira:

$$Kyt = \frac{2,223}{3,033} = 0,733 \quad (10)$$

Para calcular o Kyt teórico utilizaram-se duas equações, como se pode ver na equação 3 apresentada na revisão bibliográfica.

Após calcular os valores de Kyt de todas as experiências dos diferentes b, constrói-se um gráfico como se pode ver na Figura 42 e nas tabelas do Anexo V.



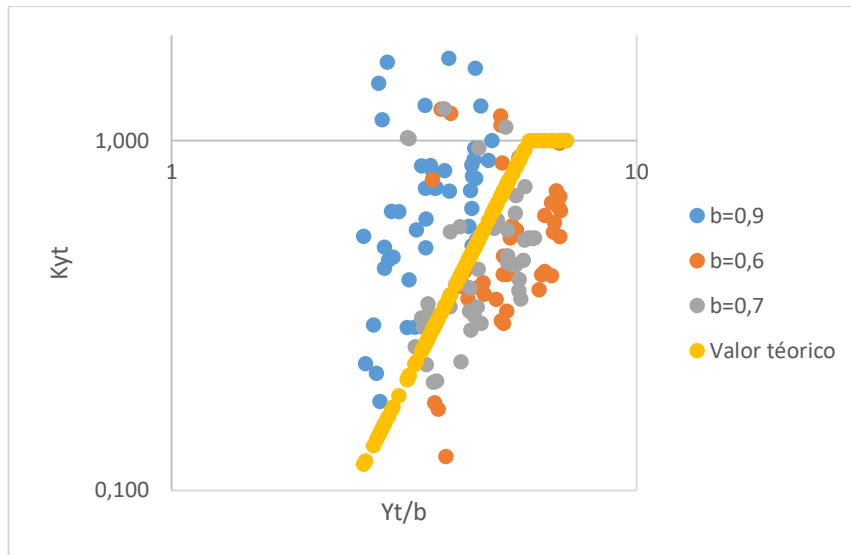


Figura 42- Influência da altura da água a jusante da comporta na máxima profundidade da cavidade de erosão ( $b$  em cm)

Não é possível realizar análise comparativa porque a gama de valores dos eixos dos  $x$  e  $y$  do presente estudo está fora do estudo apresentado por Melville e Lim (2014), como se pode ver na Figura 11 apresentada na revisão bibliográfica.

No entanto, verifica-se que a maioria dos valores para  $b=0,6$  cm e  $0,7$  cm estão próximos dos valores teóricos. Os valores determinados para  $b=0,7$  cm são os que apresentam melhores resultados, comparativamente com os outros.

#### 4.2.5 Previsão da máxima profundidade de cavidade de erosão

Por último, apresenta-se uma análise comparativa entre a máxima profundidade da cavidade de erosão prevista e máxima profundidade da cavidade de erosão medida. A máxima profundidade da cavidade erosão prevista foi estimada pela equação 4 apresentada na revisão bibliográfica.

Este estudo é feito unicamente para ensaios com  $L=0$ . Na Figura 43 apresenta-se a construção do gráfico do estudo presente com o auxílio de tabelas apresentadas no Anexo VI.

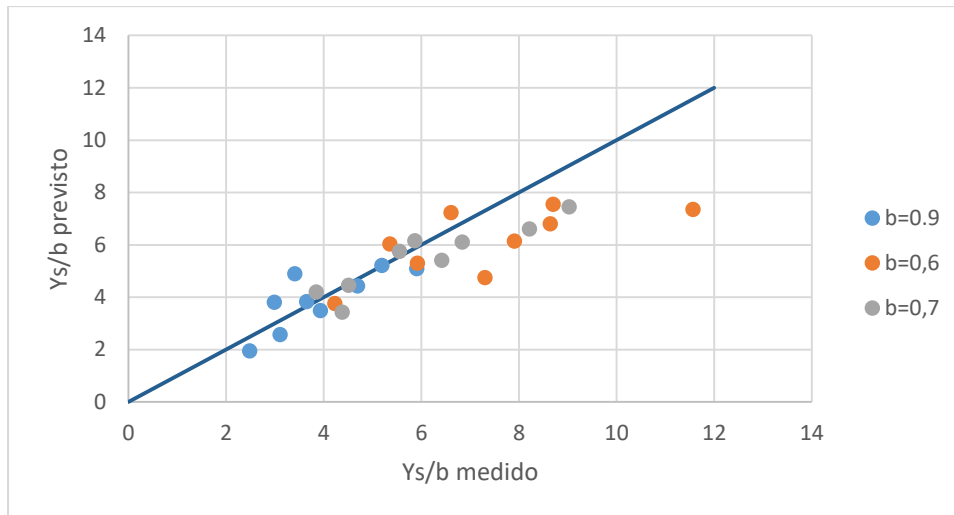


Figura 43- Relação entre a máxima profundidade da cavidade de erosão prevista e a máxima profundidade da cavidade de erosão medida (b em cm)

Realizou-se igualmente uma análise comparativa do estudo presente com o estudo realizado por Melville e Lim (2014). Para isto fez-se a sobreposição dos gráficos, como se pode ver na Figura 44.

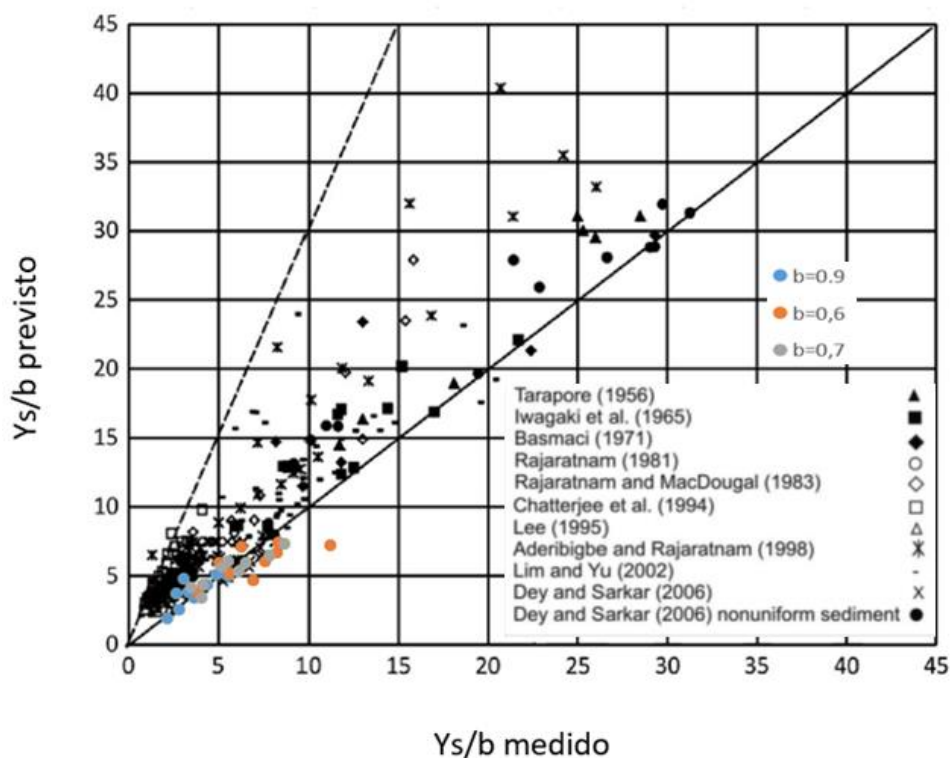


Figura 44- Comparação da máxima profundidade da cavidade erosão prevista com a máxima profundidade da cavidade de erosão medida (b em cm). Análise comparativa do presente estudo (símbolos a cores) com o estudo de Melville e Lim (2014) (símbolos a preto e branco)

Como se pode ver na Figura 44, os resultados obtidos pelo presente estudo são idênticos aos de Melville e Lim (2014). No presente estudo é possível verificar que a estimativa da máxima profundidade da cavidade de erosão através da equação (8) é muito semelhante aos valores obtidos experimentalmente, pois os valores encontram-se muito próximos dos valores teóricos (reta a 45°). Ao comparar a máxima profundidade da cavidade de erosão prevista com a máxima profundidade da cavidade de erosão medida é possível observar que quanto maior a abertura da comporta, menor é a diferença entre valores teóricos.

## 4.3 Barra a Jusante

### 4.3.1 Análise temporal da barra

A análise temporal tem como objetivo saber como evolui a velocidade da crista da barra ao longo do tempo. Para o efeito selecionaram-se os ensaios com  $b=0,9$  cm (Tabela 4). Em primeiro lugar estimou-se a velocidade média para cada experiência, considerando para o efeito a primeira e a última imagem de cada ensaio. Optou-se igualmente por analisar as experiências com maior caudal, apresentando-se na Tabela 15 todas as velocidades médias dessas experiências. As velocidades médias são calculadas da seguinte forma:

$$U = \frac{X_2 - X_1}{t_2 - t_1} \quad (11)$$

em que  $X_1$  e  $X_2$  representam as distâncias horizontais onde a crista da barra está situada na imagem 1 e 2 respetivamente. O  $t_1$  e  $t_2$  são os instantes em que a imagem 1 e 2 são retiradas, respetivamente.

Das experiências apresentadas na Tabela 15, escolheram-se duas, a de maior velocidade média e outra com menor, correspondente às experiências 1.1.1.1 e 1.1.3.3. Para calcular a evolução temporal da velocidade da crista da barra das duas experiências calcularam-se as velocidades com base em duas imagens consecutivas, sendo o intervalo de tempo entre estas imagens variável e dependente da identificação visual que a crista da duna se tinha movimentado para jusante (Tabela 16 e Tabela 17). Para calcular esta velocidade adotou o seguinte método, por exemplo para a experiência 1.1.1.1 entre a figura 3 e 5 analisou se os dois perfis das imagens

como de pode ver nas Figura 45 e Figura 46, após analisar estes perfis mediu-se qual era distâncias horizontais para a maior altura da barra (Tabela 14) e partir dai determinou-se a distância que a crista da barra se tinha movimentado, calculando-se aa velocidade. A fórmula usada para o cálculo das velocidades de imagens consecutivas é igual à equação (11).

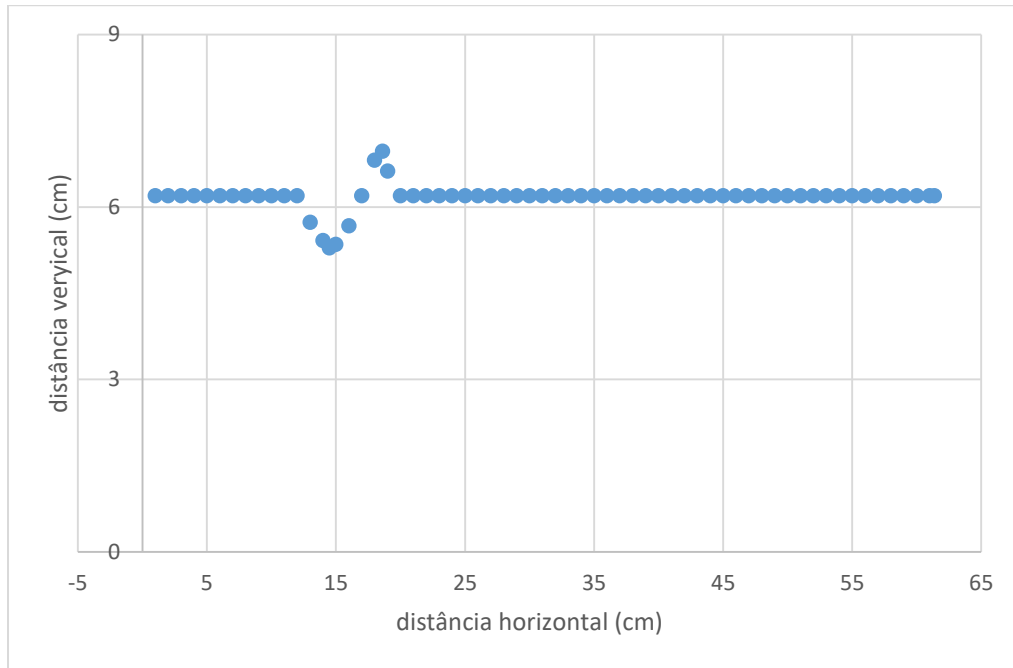


Figura 45- Perfil da imagem para o instante t=25s para a experiência 1.1.1.1

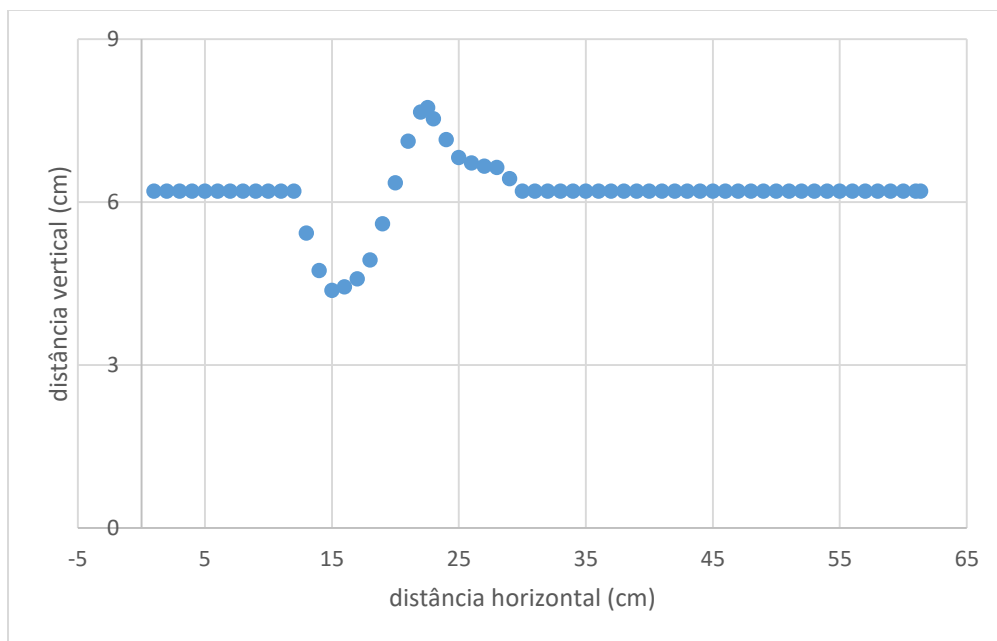


Figura 46- Perfil da imagem para o instante t=35s para a experiência 1.1.1.1

Tabela 14- Máxima altura da barra das imagens da experiência 1.1.1.1

	Instante (s)	Vertical	Horizontal
Máxima altura da barra	25	6,9712	18,61
	35	7,7404	22,54

Tabela 15- Velocidades médias da crista da barra para o maior caudal estudado

	Nº Experiência	Imagem	X (m)	t (s)	U (m/s)
Q=0,0861 L/s	1.1.1.1	1	0,1861	25	0,000703
		2	0,38	301	
	1.1.1.2	1	0,2	30	0,000627
		2	0,43	397	
	1.1.1.3	1	0,22	30	0,000379
		2	0,37	426	
	1.1.1.4	1	0,1835	30	0,00054
		2	0,4	431	
	1.1.1.5	1	0,19	30	0,0004
		2	0,35	430	
	1.1.2.1	1	0,195	25	0,000672
		2	0,42	360	
	1.1.2.2	1	0,1975	30	0,000492
		2	0,36	360	
	1.1.2.3	1	0,19	30	0,000522
		2	0,37	375	
	1.1.2.4	1	0,19	30	0,000494
		2	0,36	374	
	1.1.2.5	1	0,21	40	0,000289
		2	0,32	420	
1.1.3.1	1	0,1856	30	0,00055	
	2	0,37	365		
1.1.3.2	1	0,197	35	0,000367	
	2	0,32	370		
1.1.3.3	1	0,19	30	0,000358	
	2	0,31	365		
1.1.3.4	1	0,188	35	0,00043	
	2	0,33	365		
1.1.3.5	1	0,23	35	0,000465	
	2	0,41	422		

Tabela 16- Cálculo das velocidades para a experiência 1.1.1.1

Nº img	t2-t1(s)	Instante no gráfico (s)	X1 (m)	X2 (m)	U (m/s)
1-2	5	5	0,17	0,17	0
3-5	10	20	0,1861	0,2254	0,00393
7-8	5	35	0,25	0,26	0,002
11-14	15	65	0,28	0,29	0,000667
25-33	40	160	0,32	0,33	0,00025
42-44	17	269	0,36	0,38	0,001176

Tabela 17- Cálculo das velocidades para a experiência 1.1.3.3

Nº img	t2-t1(s)	Instante no gráfico (s)	X1 (m)	X2 (m)	U (m/s)
1-2	5	5	0,18	0,18	0
3-4	5	15	0,18	0,19	0,002
5-10	40	45	0,199	0,24	0,001025
15-17	50	125	0,26	0,29	0,0006
17-23	215	340	0,29	0,31	9,3E-05

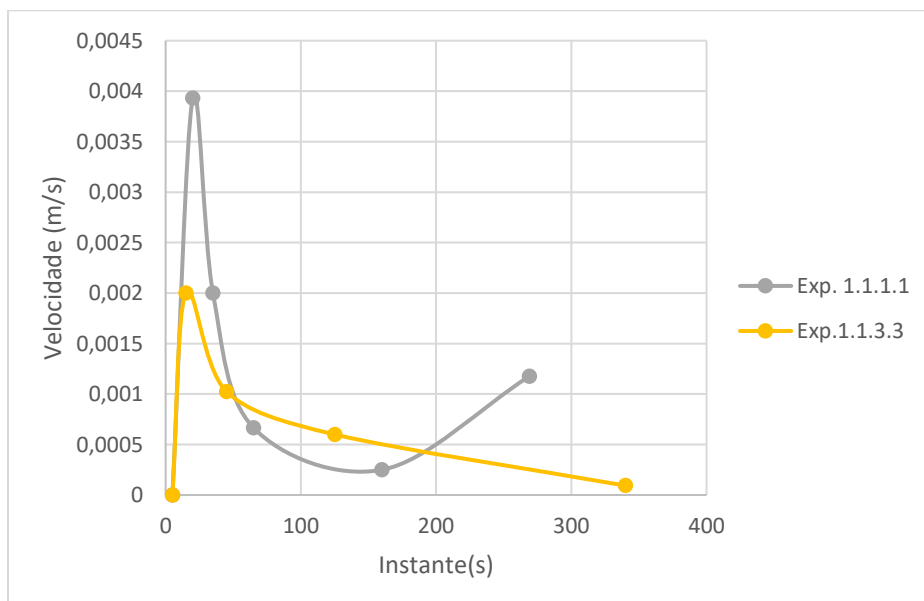


Figura 47- Evolução da velocidade da crista da barra ao longo do tempo

Na experiência 1.1.1.1 e 1.1.3.3 a velocidade da crista aumenta pois ainda não havia nenhuma formação da cavidade de erosão e da barra, a partir do momento em que se começa a formar os elementos referidos anteriormente esta velocidade começa a diminuir.

No entanto, verifica-se na experiência 1.1.1.1 que quando a velocidade de escoamento já não permite o transporte das partículas, estas recuam, permitindo assim que a crista da barra avance ligeiramente o que irá provocar um aumento ligeiro da velocidade da barra.

### 4.3.2 Análise do desmoronamento da barra

Nos ensaios em que se utilizou o menor caudal verificou-se que, ao desligar a bomba e à medida que o colchão de água ia diminuindo, a barra formada nesse ensaio se ia desmoronando. Este desmoronamento deve-se ao facto do caudal ser tão pequeno que não permite que a formação dessa barra seja estável, o que levará a esta consequência. Pode-se verificar isto através das Figura 48 e Figura 49. Na Tabela 18 verifica-se que apesar do ângulo de repouso do talude a jusante ser inferior a 40 há o desmoronamento pois as partículas transportadas pelo caudal não chegam a atingir a situação de equilíbrio e quando o escoamento parar existe o desmoronamento do talude a jusante da cavidade de erosão para o interior desta.

Tabela 18- Ângulo de repouso do talude a montante e a jusante da cavidade de erosão

Ângulo do talude a montante (°)	Ângulo do talude a jusante (°)
33,37	34,12

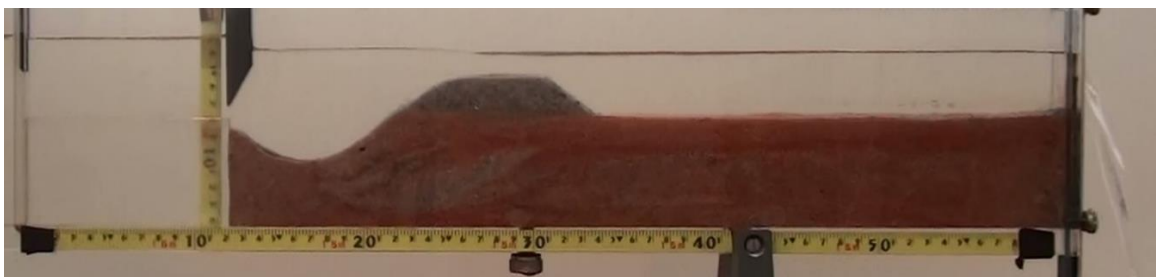


Figura 48- Barra formada no ensaio 3.2.3.1 com caudal pequeno



Figura 49- Desmoronamento da Barra durante o esvaziamento

### 4.3.3 Análise das partículas coloridas que constituem a barra

Neste capítulo pretende-se analisar as partículas coloridas que se observam após a formação da barra. Este estudo tem como objetivo verificar como as partículas se deslocam e se depositam durante a formação da barra. Na Tabela 2 apresentada anteriormente no capítulo da metodologia experimental pode-se verificar as diferentes cores que foram distribuídas pelos diferentes diâmetros das partículas. Nas Figura 50 e Figura 51 pode-se ver a formação da barra para dois ensaios com condições diferentes, a partir destas consegue-se verificar aquilo que se pretende.

A Figura 50 corresponde ao terceiro ensaio de fundo móvel (Tabela 3) e a Figura 51 representa a formação da barra da experiência 1.3.3.5 para  $b=0,9$  cm com um caudal igual a  $0,0644$  L/s e as condições experimentais apresentadas na Tabela 4 no capítulo das condições experimentais.



Figura 50- Formação da barra para o ensaio com fundo móvel

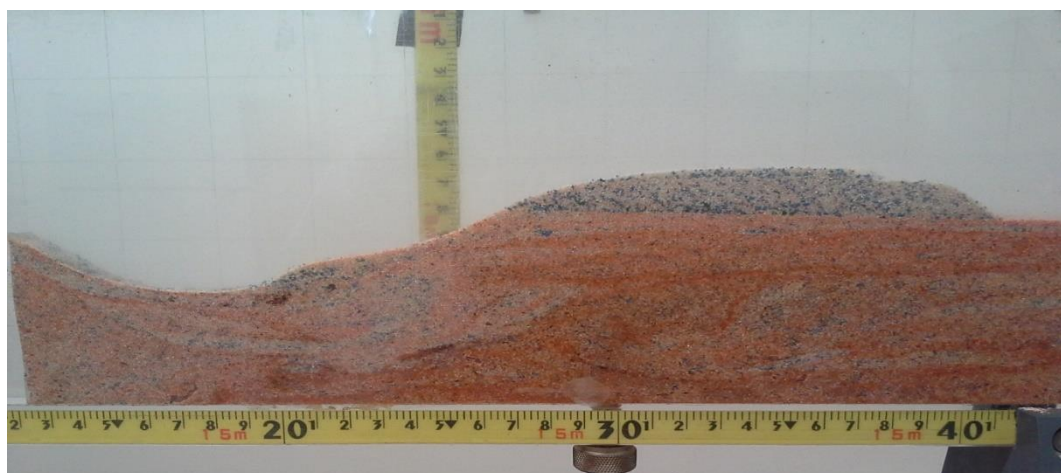


Figura 51- Formação da barra para o ensaio com fundo fixo



Em primeiro lugar, verifica-se nas duas figuras apresentadas anteriormente que as partículas azuis e verdes, isto é, as partículas com maior diâmetro são as partículas que ficam depositadas e que se concentram mais em toda a extensão da barra. Isto significa que as partículas de menor diâmetro médio são mais facilmente transportadas para jusante e não permanecem na barra. Observa-se que a barra é constituída essencialmente por grãos de areia cujos diâmetros médios estão compreendidos entre 0,25 mm e 0,85 mm, correspondentes às cores cinzenta (não se pinta), azul e verde na Tabela 2.



## 5 CONCLUSÕES

Este capítulo tem como objetivo fazer uma apresentação sintetizada das conclusões da dissertação, bem como deixar algumas propostas para trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões

O objetivo desta dissertação passou-se por estudar o transporte das partículas, a formação da barra e o fenômeno da erosão a jusante de uma comporta vertical de abertura inferior. Assim sendo, nos ensaios de fundo móvel pode concluir-se que:

- 1 À medida que altura do descarregador a jusante aumenta (ou seja, terá um maior colchão de água), a cavidade de erosão aumenta apesar de a diferença entre os ensaios estudados ser pequena é possível chegar a esta conclusão.
- 2 No que diz respeito à análise do comportamento e formação da barra (com fundo móvel) quanto menor a altura do descarregador a jusante, que corresponde a um menor colchão de água, maior será o comprimento da cavidade de erosão, a altura da barra será menor como era de esperar e por último o declive do ensaio será menos acentuado. Foi possível verificar-se que para os três ensaios realizados com fundo móvel, apesar de algumas diferenças nas condições experimentais, a profundidade máxima da cavidade de erosão ocorre na mesma distância horizontal.

Nos ensaios de fundo composto pode concluir-se que:

1. Nos ensaios de fundo composto a influência do número de Froude na comporta do presente estudo tem um comportamento semelhante ao referido por Melville e Lim (2014). Apesar de haver uma discrepância entre os valores deste estudo e os do estudo presente nesta dissertação, isto deve-se às diferentes condições experimentais a que estes dois estudos estão sujeitos.

- 2 Em relação à influência do comprimento da parte fixa do fundo composto, observou-se que o comportamento de todas as experiências realizadas é semelhante ao relatado por Melville e Lim (2014). Apesar de os resultados do presente estudo serem muito concentrados conseguiu-se concluir que para um menor  $b$ , maior é a relação  $L/b$  que por consequência tem um menor  $KL$ .
- 3 Em relação à previsão de máxima profundidade de cavidade de erosão, os resultados obtidos pelo estudo presente comportam-se da mesma forma que estudos anteriormente publicados. É possível concluir-se também que para o presente estudo os valores obtidos experimentalmente e os valores previstos são muito semelhantes pois estes encontram-se muito próximos dos valores teóricos. Foi possível concluir que quanto maior o  $b$ , menor é a diferença entre os valores teóricos.
- 4 Relativamente ao comportamento e formação da barra, à medida que o  $L$  aumenta, a profundidade da cavidade de erosão diminui e por sua vez a inclinação do talude a jusante é menor. É possível concluir-se que quando  $L$  aumenta, o declive do talude a montante diminui, ou seja para um menor  $L$  o declive é mais acentuado. No que diz respeito ao ângulo de repouso do talude a jusante observa-se que quanto menor o  $L$  maior será o ângulo.
- 5 A evolução da barra depende das condições experimentais a que esta está sujeita, observando-se que quanto maior o  $P$  a evolução do crescimento da barra é mais lenta, para as mesmas condições experimentais.
- 6 É possível verificar que à medida que se diminui o caudal do escoamento, é possível verificar-se uma menor profundidade da cavidade de erosão e da formação da barra, como era de esperar.
- 7 Na análise das partículas coloridas, as partículas de maior diâmetro são as partículas que ficam depositadas na barra a jusante da cavidade de erosão e que se concentram mais no desenvolvimento da barra.

## 5.2 Sugestão de trabalhos Futuros

- 1 Realizar novamente todos os ensaios mas agora com diferentes tipos de areia para observar-se o comportamento da cavidade de erosão, da barra para que se possa aprofundar mais informações que são possíveis de tirar a partir destes ensaios.
- 2 Analisar a possibilidade da utilização do canal de GUNT do laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do DEC para estudar a visualização do transporte das partículas, quando colocada um pilar no leito do sedimento.
- 3 Estudar experimentalmente medidas de mitigação do fenómeno de erosão localizada.
- 4 Realizar novos ensaios com o fundo composto, para valores intermédios de L entre 0 e 6 cm.
- 5 Realizar novos ensaios de fundo móvel para poder avaliar sobre a repetibilidade dos ensaios.



## BIBLIOGRAFIA

Álvares, M.T.P., Pimenta, M.T. (1998). Erosão Hídrica e Transporte Sólido em Pequenas Bacias Hidrográficas, *IV Congresso da Água*, Lisboa.

Azevedo, M.L. (2014). *Redução da Erosão Localizada de Pilares de Pontes Recorrendo a Ranhuras: Evolução Temporal e Configuração das Cavidades de Erosão Localizada*, Mestrado Integrado em Engenharia Civil Universidade do Minho, Portugal.

Barbosa, J.N. (1986). *Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral*, Portugal.

Buffington, J.M., Montgomery, D.R. (1997). A systematic analysis of eight decades of incipient motion studies, with special reference to gravel-bedded rivers, *Water Resources Research*, Vol. 33, pp. 1993-2029

Cardoso, A.H. (1998). *Hidráulica Fluvial*, Ed. Calouste Gulbenkian, Portugal.

Carvalho, E.M.d.S. (2012). *Estudo Experimental de Escoamentos em Canais com Leitões de Rugosidade Uniforme. Caracterização do Início do Movimento das Partículas.*, Dissertação para Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Portugal.

Cogo, N.P., Levien, R., Schwarz, R.A. (2003). Perdas de Solo e Água por Erosão Hídrica Influenciadas por Métodos de Preparo, Classes de Declive e Níveis de Fertilidade do Solo, pp. 743-753

Colégio Vasco da Gama (2012). *Geologia 11º ano*, Belas, Portugal; <http://www.colegiovascodagama.pt/ciencias3c/onze/geologia2.1sed.html>; Acedido em Março 2016.

Couto, L.T., Cardoso, A.H. (2001). Erosões Localizadas Junto de Encontros e Pilares de Pontes. Parte I - Caracterização da situação de referência, *Recursos Hídricos*, Vol. 22, pp. 65-74

Dey, S., 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, Cambridge University Press, Vol. 556, pp. 387-419, 10.1017/S0022112006009530.

Euler, T., Herget, J. (2009). Controls on local scour and deposition induced by obstacles in fluvial environments, *Catena*, Vol. 91, pp. 35-46

Fernandes, J.N.S., Cardoso, A.H. (2004). Erosões Localizadas a Jusante De Soleiras de Parede Delgada em Canais De Leito Móvel, pp. 1-11

Ferreira, T.J.M. (2014). *Estudo Experimental da Erosão Localizada a Jusante da Descarga de Fundo de uma Barragem*, Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal.

Hoffmans, G., Verheij, H. (2011). Jet scour, pp. 1-12

Julien, P.Y. (2010). *Erosion and Sedimentation*, Second edition ed, The United Kingdom by 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 em Ciências da Engenharia Ambiental, Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Paulo.

Leite, E. (2011). *Estudo Experimental da Erosão Localizada na Proximidade de Pilares de Pontes*, Mestrado Integrado em Engenharia Civil Universidade do Minho, Portugal.

Lopes, M.A.G. (2012). *Reconstituição da rotura da barragem das minas da Fonte Santa: análise do transporte sólido no vale a jusante*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

Melville, B.W. (2014). Scour at Various Hydraulic Structures: Sluice gates, Submerged bridges, Low weirs, 10.14264/uql.2014.10.

Melville, B.W., Coleman, S.E. (2000). *Bridge scour*, Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado.

Melville, B.W., Lim, S.-Y. (2014). Scour Caused by 2D Horizontal Jets, *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 149-155, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000807.

Oliveto, G., Hager, W.H. (2002). Shields' entrainment criterion in bridge hydraulics, *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 538-542, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:5(538).

Oliveto, G., Hager, W.H. (2005). Further results to time-dependent local scour at bridge elements, *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 97-105, 10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:2(97).

Oliveto, G., Hager, W.H. (2014). Morphological Evolution of Dune-Like Bed Forms Generated by Bridge Scour, *Journal of Hydraulic Engineering*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000853.

Paiva, L.E.D.d. (2007). *A Influência do Diâmetro Representativo do Material do Leito nas Fórmulas de Cálculo do Transporte de Sedimentos em escoamentos com Superfície Livre*, Tese Doutorado Universidade Estadual de Campinas, São Paulo-Brasil.

Pinheiro, R.M.C. (2010). *Estudo Experimental da Erosão em Pilares de Pontes*, Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, Portugal.

Powell, D.N., Khan, A.A. (2012). Scour upstream of a circular orifice under constant head, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 50, pp. 28-34, 10.1080/00221686.2011.637821.

Puhl, E. (2012). *Morfodinâmica e Condição de Equilíbrio do Leito sob a Ação de Correntes de Turbidez*, Tese de Doutorado Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

Radice, A., Malavasi, S., Ballio, F. (2005). Solid transport measurements through image processing, Vol. 41, pp. 721-734, 10.1007/s00348-006-0195-9.

Rebelo, J.M.L. (2015). *Estudo e Dimensionamento de um Canal Multi-Funções para escoamentos em Superfície Livre*, Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, Portugal.



Richardson, E.V., Davis, S.R. (2001). Evaluating Scour at Bridges, *Hydraulic Engineering Circular*, Vol. 18

Samora, M.M. (1993). *Utilização de Enrocamentos como Proteção Contra a Erosão de Canais*, Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos Instituto Superior Técnico Lisboa.

Silva, M.G.d.S.e. (2013). *Análise de Processos Hidrossedimentológicos em escoamentos com Superfície Livre: Trecho do Projeto de Irrigação Iuiú no Rio São Francisco*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Souza, A.L.R.d. (2010). *Estudo do Movimento Incipiente de Sedimentos Não-Coesivos em escoamentos com Superfície Livre*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Strasser, M.A. (2008). *Dunas Fluviais no Rio Solimões-Amazonas- Dinâmica e Transporte de Sedimentos* Tese de Doutorado Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil.

Verma, D.V.S., Goel, A. (2005). Scour Downstream of a Sluice Gate, *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. 57-65, 10.1080/09715010.2005.10514801.



## ANEXOS

- Anexo I – Imagens dos ensaios
- Anexo II – Parâmetros medidos e calculados para os diferentes b
- Anexo III – Tabela dos parâmetros necessários para relação do Frb e a cavidade de erosão
- Anexo IV – Tabela dos parâmetros necessários para a relação entre o comprimento fundo fixo e a cavidade de erosão
- Anexo V – Tabela dos parâmetros necessários para a influência da altura a jusante da comporta e da cavidade de erosão
- Anexo VI – Tabela dos parâmetros que influenciam a cavidade de erosão prevista em relação à cavidade de erosão medida



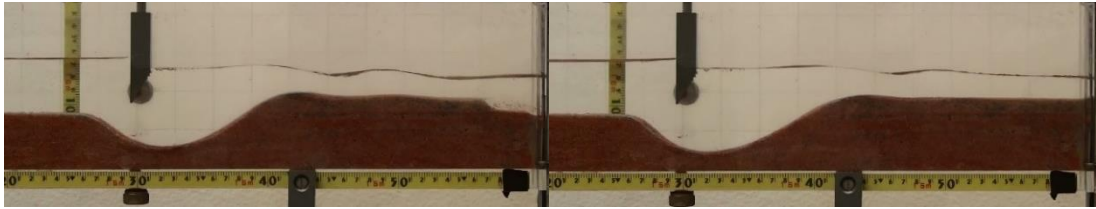
## **Anexo I**



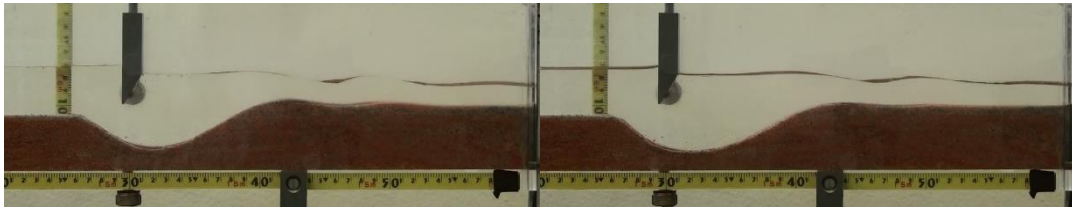
## Anexo I

### Fundo móvel

Condições para  $P$  diferentes:



a) b)  
Figura A.I 1- Perfil para  $P=1,7$  cm no instante  $t=1:10$  min e  $t=2:00$  min



a) b)  
Figura A.I 2- Perfil para  $P=1$  cm no instante  $t=1:05$  min e  $t=2:00$  min



a) b)  
Figura A.I 3- Perfil para  $P=2,5$  cm no instante  $t=2:05$  min e  $t=3:05$  min

## Fundo Fixo

Condições para L diferentes:



Figura A.I 4-Para L=0

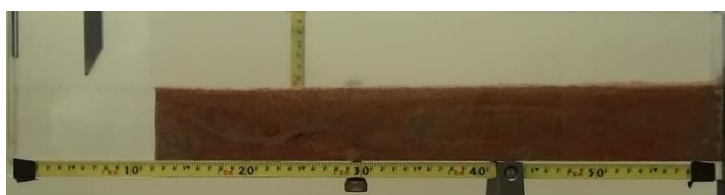


Figura A.I 5-Para L=6



Figura A.I 6-Para L=7



Figura A.I 7-Para L=8



Figura A.I 8-Para L=9

**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**



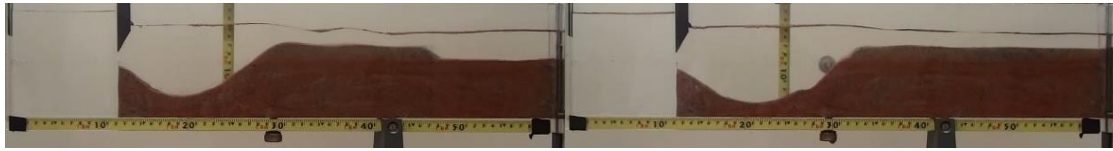
## Anexo I

### Para as diferentes condições experimentais

Para um  $b=0,9$

- $Q=0,0861$  L/s-

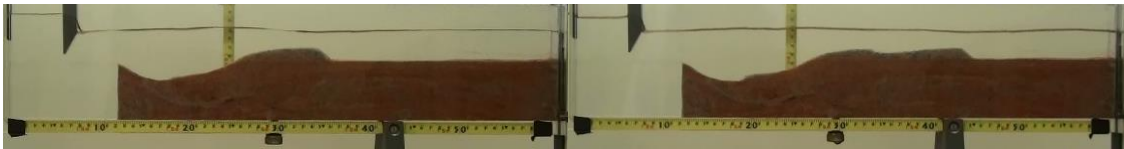
**Altura do descarregador a jusante de 1,7 cm**



a)

b)

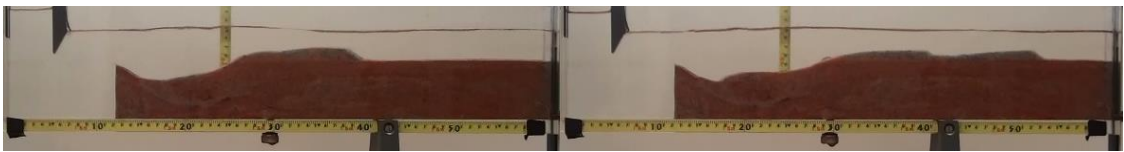
Figura A.I 9 - Perfil para  $L=0$  no instante  $t=1:50$  min (a) e  $t=5:01$  min (b)



a)

b)

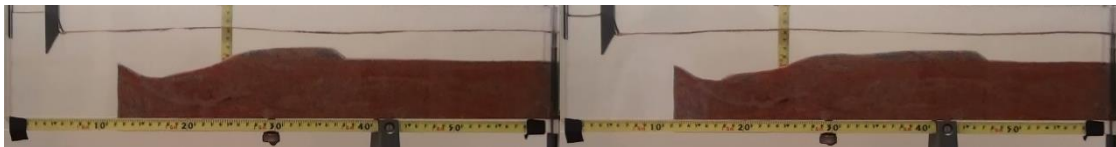
Figura A.I 10- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=2:00$  min (a) e  $t=6:37$  min (b)



a)

b)

Figura A.I 11- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=1:55$  min (a) e  $t=5:17$  min (b)



a)

b)

Figura A.I 12- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=2:00$  min (a) e  $t=7:11$  min (b)



a)

b)

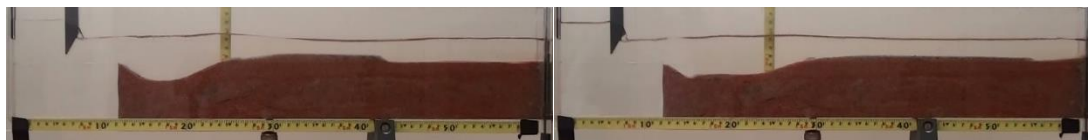
Figura A.I 13- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=2:25$  min (a) e  $t=7:10$  min (b)

### Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior

**Altura do descarregador a jusante de 1 cm**



a) b)  
 Figura A.I 14- Perfil para L=0 no instante t=1:50 min (a) e t=6:00 min



a) b)  
 Figura A.I 15- Perfil para L=6 no instante t=1:55 min (a) e t=6:00 min



a) b)  
 Figura A.I 16- Perfil para L=7 no instante t=1:55 min (a) e t=6:15 min



a) b)  
 Figura A.I 17- Perfil para L=8 no instante t=2:05 min (a) e t=6:14 min

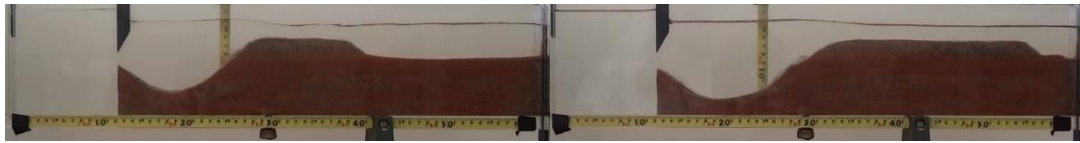


a) b)  
 Figura A.I 18- Perfil para L=9 no instante t=1:30 min (a) e t=7:00 min

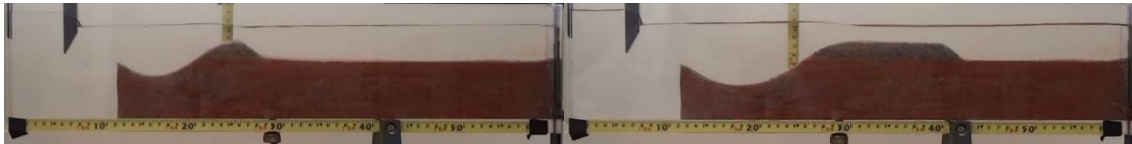
**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**

## Anexo I

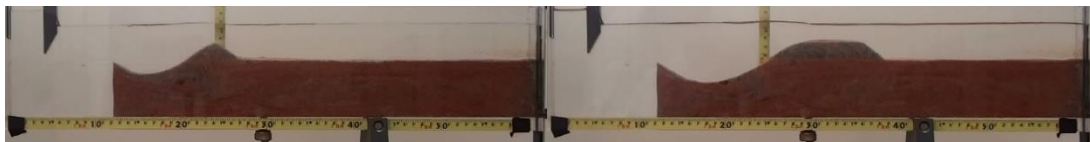
### Altura do descarregador a jusante de 2,5 cm



a) b)  
Figura A.I 19- Perfil para L=0 no instante t=1:55 min (a) e t=6:05 min



a) b)  
Figura A.I 20- Perfil para L=6 no instante t=1:10 min (a) e t=6:10 min



a) b)  
Figura A.I 21- Perfil para L=7 no instante t=1:10 min (a) e t=6:05 min



a) b)  
Figura A.I 22- Perfil para L=8 no instante t=1:10 min (a) e t=6:05 min



a) b)  
Figura A.I 23- Perfil para L=9 no instante t=1:10 min (a) e t=7:02 min

- $Q=0,0546 \text{ L/s}$

**Altura do descarregador a jusante de 1,7 cm**



a)

b)

Figura A.I 24- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=1:28 \text{ min}$  (a) e  $t=7:10 \text{ min}$



a)

b)

Figura A.I 25- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=2:26 \text{ min}$  (a) e  $t=7:16 \text{ min}$



a)

b)

Figura A.I 26- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=3:45 \text{ min}$  (a) e  $t=7:10 \text{ min}$



a)

b)

Figura A.I 27- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=2:00 \text{ min}$  (a) e  $t=7:10 \text{ min}$



a)

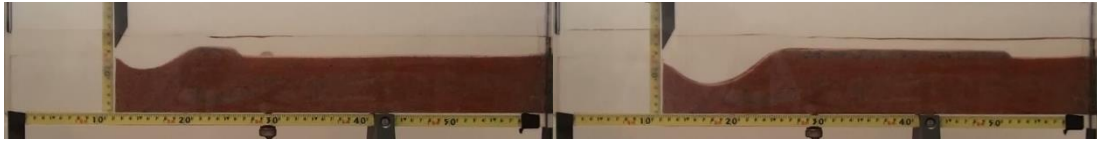
b)

Figura A.I 28- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=2:02 \text{ min}$  (a) e  $t=7:10 \text{ min}$

**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**

## Anexo I

### Altura do descarregador a jusante de 1 cm



a)

b)

Figura A.I 29- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=1:45$  min (a) e  $t=7:10$  min



a)

b)

Figura A.I 30- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=2:10$  min (a) e  $t=7:10$  min



a)

b)

Figura A.I 31- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=2:00$  min (a) e  $t=7:10$  min



a)

b)

Figura A.I 32- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=3:45$  min (a) e  $t=7:10$  min

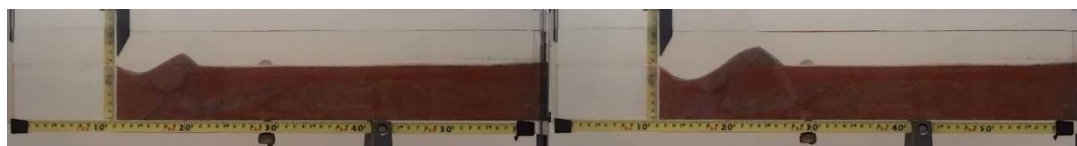


a)

b)

Figura A.I 33- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=3:30$  min (a) e  $t=7:10$  min

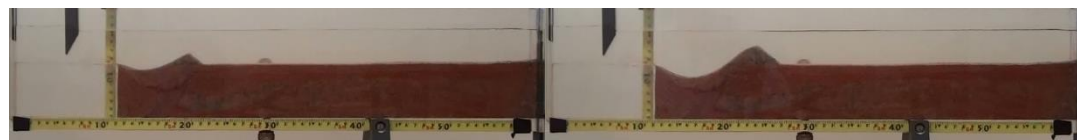
**Altura do descarregador a jusante de 2,5 cm**



a)

b)

Figura A.I 34- Perfil para L=0 no instante t=1:58 min (a) e t=7:10 min



a)

b)

Figura A.I 35- Perfil para L=6 no instante t=1:52 min (a) e t=7:10 min



a)

b)

Figura A.I 36- Perfil para L=7 no instante t=2:00 min (a) e t=7:10 min



a)

b)

Figura A.I 37- Perfil para L=8 no instante t=2:00 min (a) e t=7:10 min

**3.5-**



a)

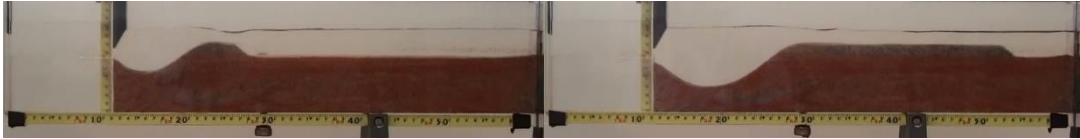
b)

Figura A.I 38- Perfil para L=9 no instante t=2:05 min (a) e t=7:10 min

## Anexo I

- $Q=0,0644 \text{ L/s}$

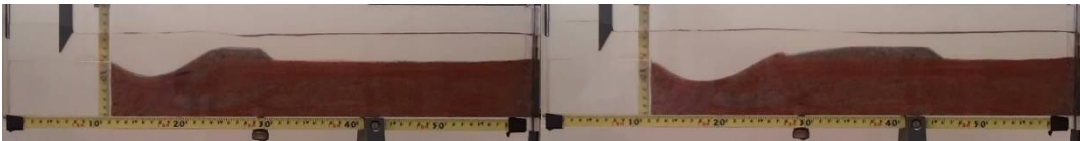
### Altura do descarregador a jusante de 1,7 cm



a)

b)

Figura A.I 39- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=1:10 \text{ min}$  (a) e  $t=7:10 \text{ min}$



a)

b)

Figura A.I 40- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=1:15 \text{ min}$  (a) e  $t=7:10 \text{ min}$



a)

b)

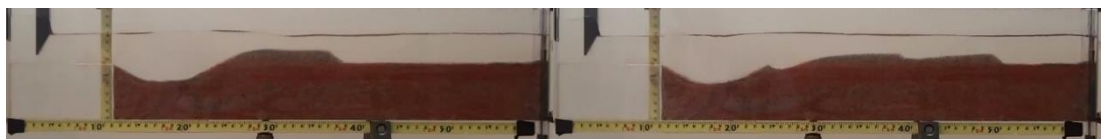
Figura A.I 41- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=1:30 \text{ min}$  (a) e  $t=7:10 \text{ min}$



a)

b)

Figura A.I 42- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=1:40 \text{ min}$  (a) e  $t=7:10 \text{ min}$



a)

b)

Figura A.I 43- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=2:10 \text{ min}$  (a) e  $t=7:10 \text{ min}$

**Altura do descarregador a jusante de 1 cm**



a)

b)

Figura A.I 44- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=1:27$  min (a) e  $t=7:10$  min



a)

b)

Figura A.I 45- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=1:00$  min (a) e  $t=7:10$  min



a)

b)

Figura A.I 46- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=1:05$  min (a) e  $t=7:10$  min



a)

b)

Figura A.I 47- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=1:00$  min (a) e  $t=7:10$  min



a)

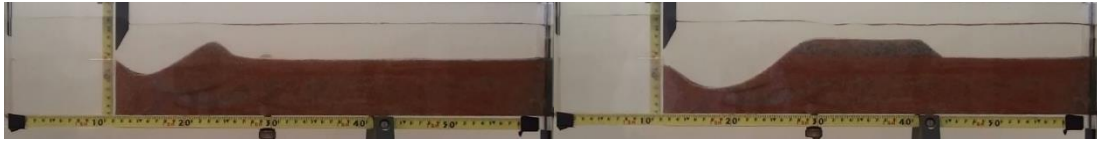
b)

Figura A.I 48- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=1:00$  min (a) e  $t=7:10$  min



## Anexo I

### Altura do descarregador a jusante de 2,5 cm



a)

b)

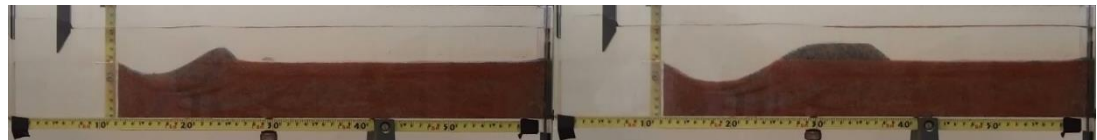
Figura A.I 49- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=1:10$  min (a) e  $t=7:10$  min



a)

b)

Figura A.I 50- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=1:20$  min (a) e  $t=7:10$  min



a)

b)

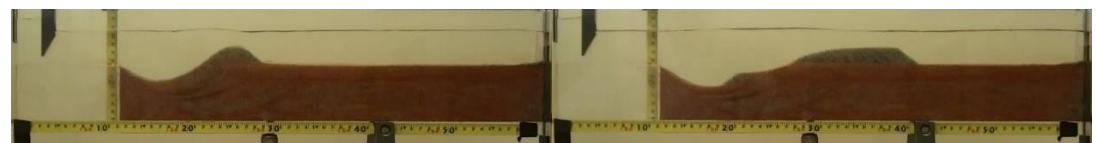
Figura A.I 51- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=1:20$  min (a) e  $t=7:10$  min



a)

b)

Figura A.I 52- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=1:30$  min (a) e  $t=7:10$  min



a)

b)

Figura A.I 53- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=1:30$  min (a) e  $t=7:00$  min

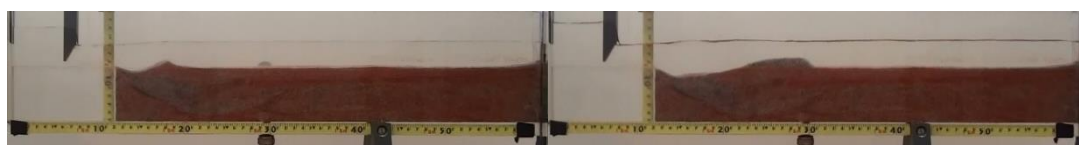
Para um  $b=0,6$

- $Q=0,0869 \text{ L/s}$

**Altura do descarregador a jusante de 1,7 cm**



a) b)  
 Figura A.I 54- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:25 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$



a) b)  
 Figura A.I 55- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=0:40 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$



a) b)  
 Figura A.I 56- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=0:43 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$



a) b)  
 Figura A.I 57- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=0:40 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$

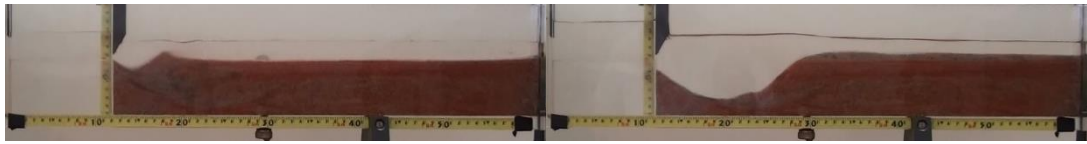


a) b)  
 Figura A.I 58- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=0:40 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$

**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**

## Anexo I

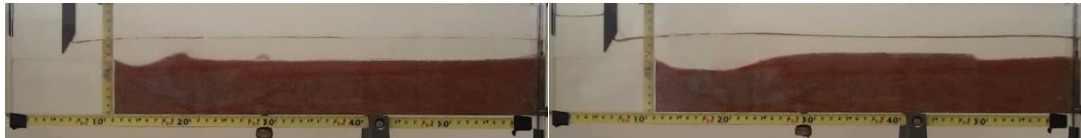
### Altura do descarregador a jusante de 1 cm



a)

b)

Figura A.I 59- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:23$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

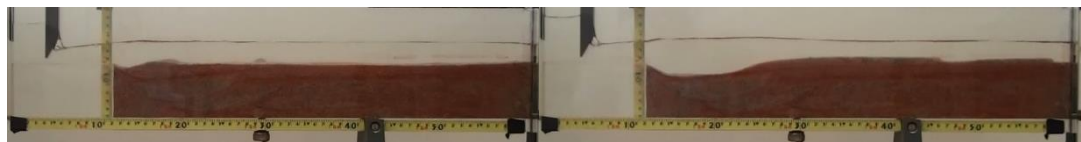
Figura A.I 60- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=0:36$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 61- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=0:37$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 62- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=0:38$  min (a) e  $t=7:00$  min

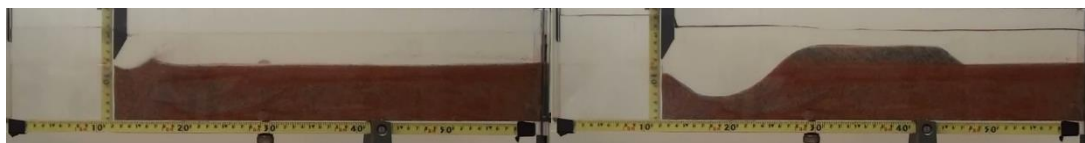


a)

b)

Figura A.I 63- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=0:34$  min (a) e  $t=7:00$  min

**Altura do descarregador a jusante de 2,5 cm**



a) b)  
 Figura A.I 64- Perfil para L=0 no instante t=0:26 min (a) e t=7:00 min



a) b)  
 Figura A.I 65- Perfil para L=6 no instante t=0:34 min (a) e t=7:00 min



a) b)  
 Figura A.I 66- Perfil para L=7 no instante t=0:36 min (a) e t=7:00 min



a) b)  
 Figura A.I 67- Perfil para L=8 no instante t=0:36 min (a) e t=7:00 min



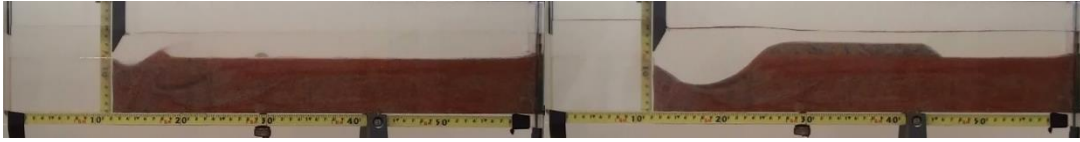
a) b)  
 Figura A.I 68- Perfil para L=9 no instante t=0:37 min (a) e t=7:00 min

**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**

## Anexo I

- $Q=0,055 \text{ L/s}$

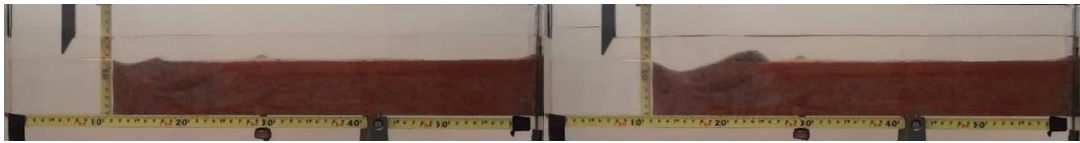
### Altura do descarregador a jusante de 1,7 cm



a)

b)

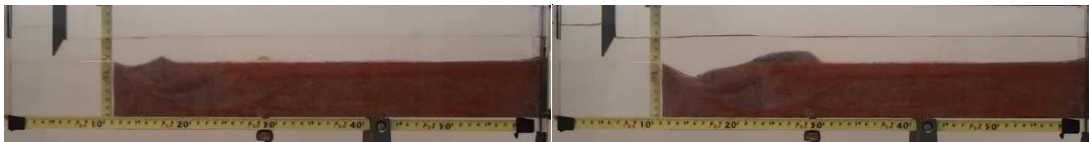
Figura A.I 69- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:31 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$



a)

b)

Figura A.I 70- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=0:51 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$



a)

b)

Figura A.I 71- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=0:48 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$



a)

b)

Figura A.I 72- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=0:48 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$

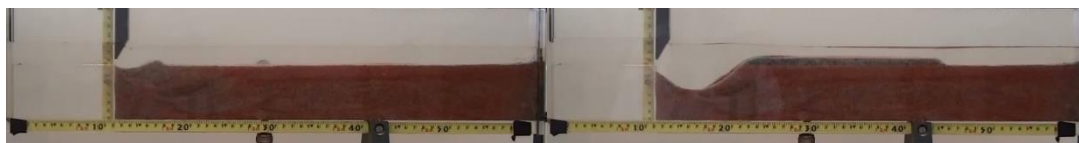


a)

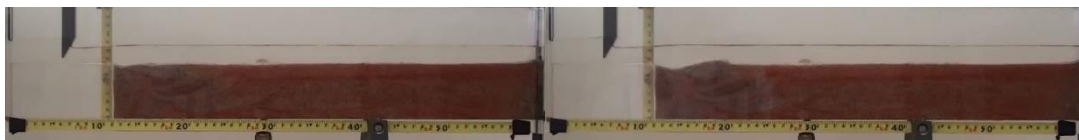
b)

Figura A.I 73- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=0:55 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$

**Altura do descarregador a jusante de 1 cm**



a) b)  
 Figura A.I 74- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:44$  min (a) e  $t=7:00$  min



a) b)  
 Figura A.I 75- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=0:55$  min (a) e  $t=7:00$  min



a) b)  
 Figura A.I 76- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=1:06$  min (a) e  $t=7:00$  min



a) b)  
 Figura A.I 77- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=2:34$  min (a) e  $t=7:00$  min



a) b)  
 Figura A.I 78- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=1:30$  min (a) e  $t=7:00$  min

**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**

## Anexo I

### Altura do descarregador a jusante de 2,5 cm



a) b)  
Figura A.I 79- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:38$  min (a) e  $t=7:00$  min



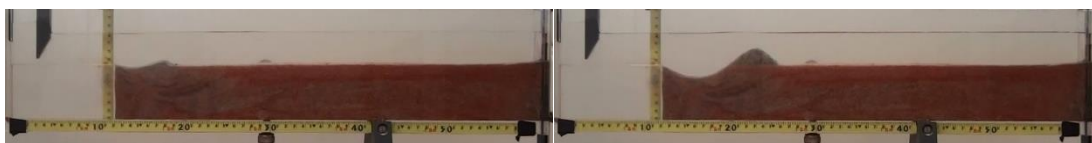
a) b)  
Figura A.I 80- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=0:52$  min (a) e  $t=7:00$  min



a) b)  
Figura A.I 81- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=0:53$  min (a) e  $t=7:00$  min



a) b)  
Figura A.I 82- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=0:58$  min (a) e  $t=7:00$  min



a) b)  
Figura A.I 83- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=1:04$  min (a) e  $t=7:00$  min

- $Q=0,0644 \text{ L/s}$

**Altura do descarregador a jusante de 1,7 cm**



a) b)  
 Figura A.I 84- Perfil para L=0 no instante t=0:21 min (a) e t=7:00 min



a) b)  
 Figura A.I 85- Perfil para L=6 no instante t=0:30min (a) e t=7:00 min



a) b)  
 Figura A.I 86- Perfil para L=7 no instante t=0:31 min (a) e t=7:00 min



a) b)  
 Figura A.I 87- Perfil para L=8 no instante t=0:34 min (a) e t=7:00 min

**1.5-t=0:34 e t=7:00**



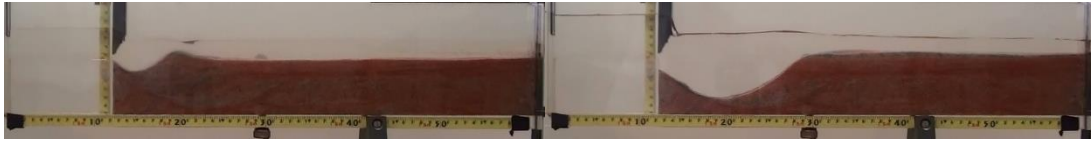
a) b)  
 Figura A.I 88- Perfil para L=9 no instante t=1:04 min (a) e t=7:00 min

**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**

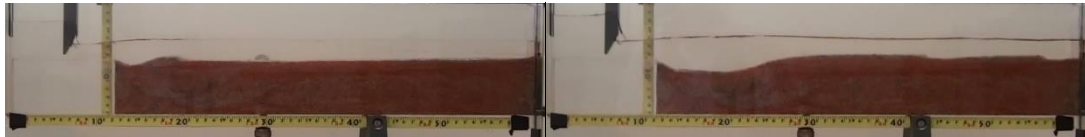


## Anexo I

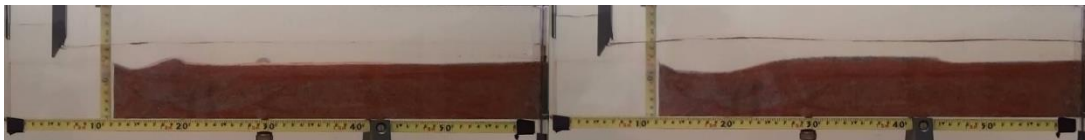
### Altura do descarregador a jusante de 1 cm



a) b)  
Figura A.I 89- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:24$  min (a) e  $t=7:00$  min



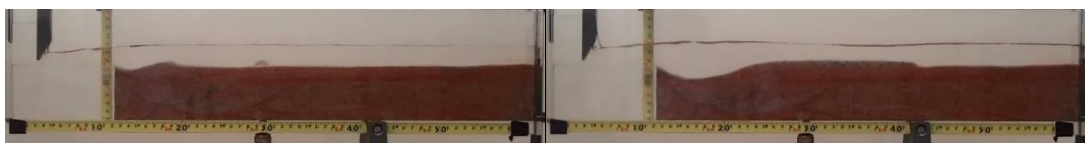
a) b)  
Figura A.I 90- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=0:28$  min (a) e  $t=7:00$  min



a) b)  
Figura A.I 91- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=0:34$  min (a) e  $t=7:00$  min



a) b)  
Figura A.I 92- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=0:34$  min (a) e  $t=7:00$  min

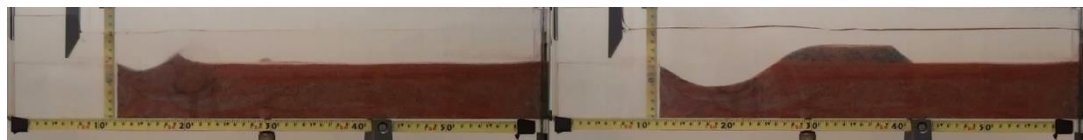


a) b)  
Figura A.I 93- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=0:37$  min (a) e  $t=7:00$  min

**Altura do descarregador a jusante de 2,5 cm**



a) b)  
 Figura A.I 94- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:25$  min (a) e  $t=7:00$  min



a) b)  
 Figura A.I 95- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=0:34$  min (a) e  $t=7:00$  min



a) b)  
 Figura A.I 96- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=0:36$  min (a) e  $t=7:00$  min



a) b)  
 Figura A.I 97- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=0:36$  min (a) e  $t=7:00$  min



a) b)  
 Figura A.I 98- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=0:38$  min (a) e  $t=7:00$  min

## Anexo I

Para um  $b=0,7$

- $Q=0,0870 \text{ L/s}$

**Altura do descarregador a jusante de 1,7 cm**



a)

b)

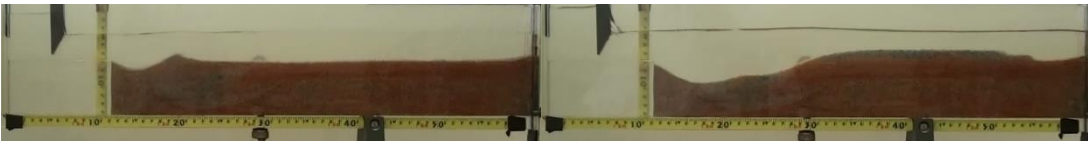
Figura A.I 99- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:22 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$



a)

b)

Figura A.I 100- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=0:27 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$



a)

b)

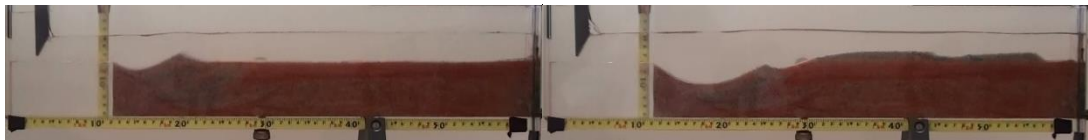
Figura A.I 101- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=0:30 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$



a)

b)

Figura A.I 102- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=0:32 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$

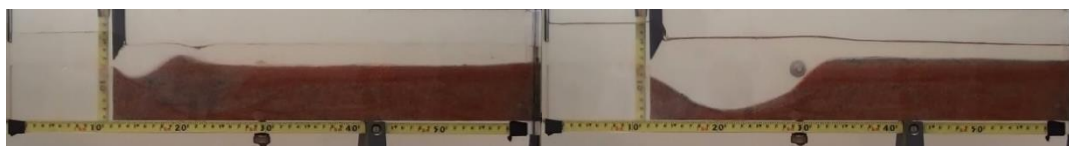


a)

b)

Figura A.I 103- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=0:31 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$

**Altura do descarregador a jusante de 1 cm**



a)

b)

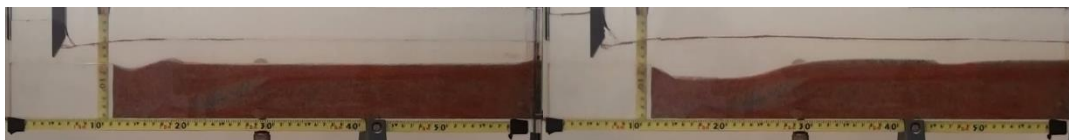
Figura A.I 104- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:24$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 105- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=0:28$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

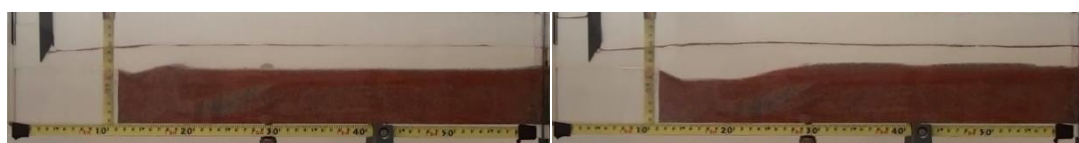
Figura A.I 106- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=0:29$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 107- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=0:38$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

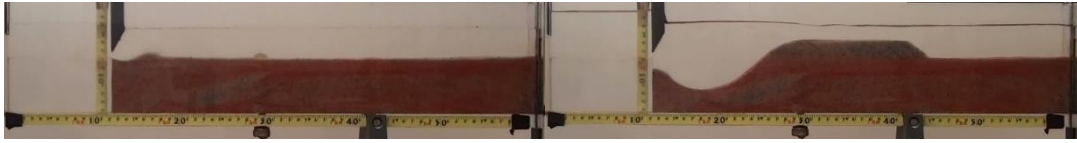
b)

Figura A.I 108- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=0:35$  min (a) e  $t=7:00$  min

**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**

## Anexo I

### Altura do descarregador a jusante de 2,5 cm



a)

b)

Figura A.I 109- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:27$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

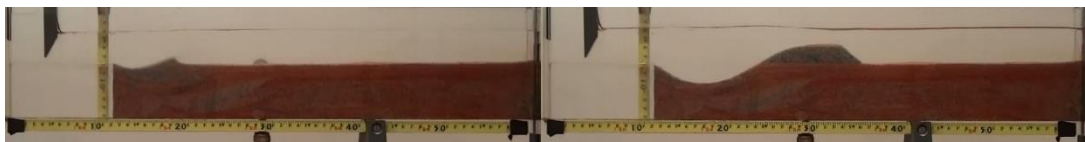
Figura A.I 110- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=0:31$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 111- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=0:35$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 112- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=0:37$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 113- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=0:33$  min (a) e  $t=7:00$  min

- $Q=0,055 \text{ L/s}$

**Altura do descarregador a jusante de 1,7 cm**



a) b)

Figura A.I 114- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:50 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$



a) b)

Figura A.I 115- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=1:00 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$



a) b)

Figura A.I 116- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=0:43 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$



a) b)

Figura A.I 117- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=0:50 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$



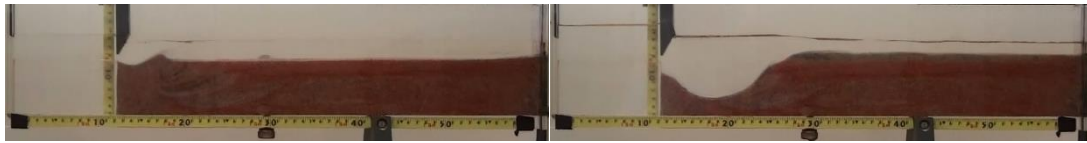
a) b)

Figura A.I 118- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=0:40 \text{ min}$  (a) e  $t=7:00 \text{ min}$

**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**

## Anexo I

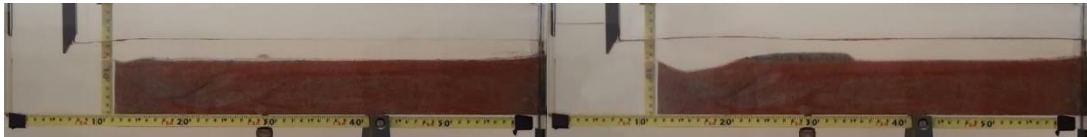
### Altura do descarregador a jusante de 1 cm



a)

b)

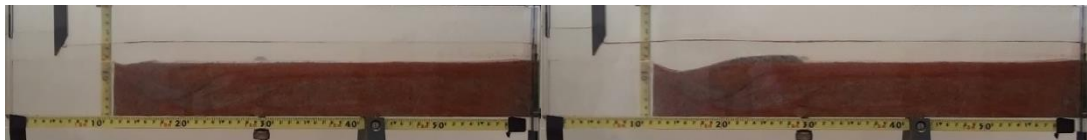
Figura A.I 119- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:30$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

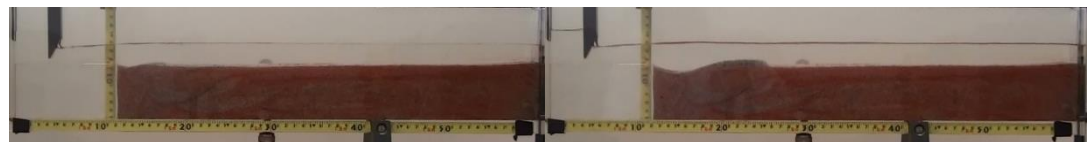
Figura A.I 120- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=0:46$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 121- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=0:50$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 122- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=0:40$  min (a) e  $t=7:00$  min

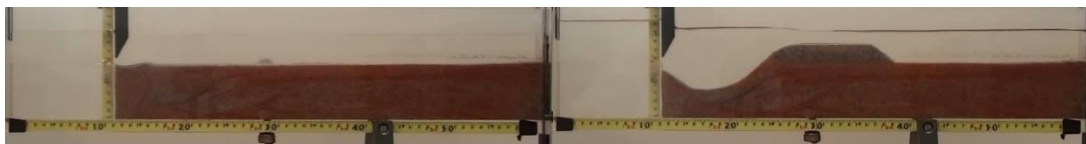


a)

b)

Figura A.I 123- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=0:44$  min (a) e  $t=7:00$  min

**Altura do descarregador a jusante de 2,5 cm**



a)

b)

Figura A.I 124- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:31$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

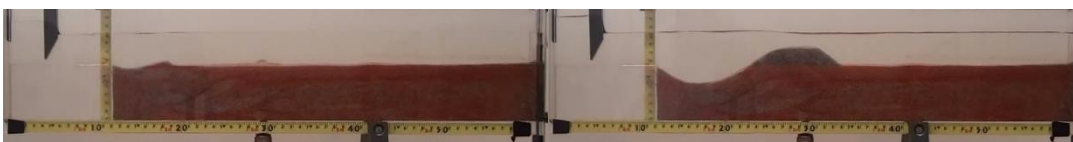
Figura A.I 125- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=0:44$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 126- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=0:47$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 127- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=0:41$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 128- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=0:42$  min (a) e  $t=7:00$  min

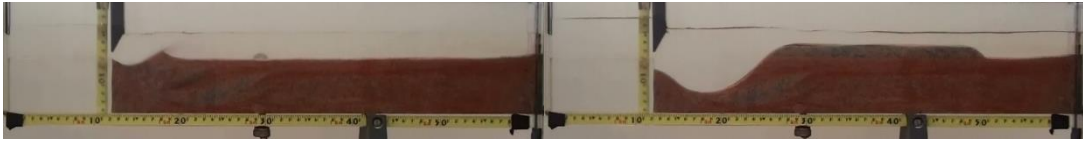
**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**



## Anexo I

- $Q=0,0640$  L/s

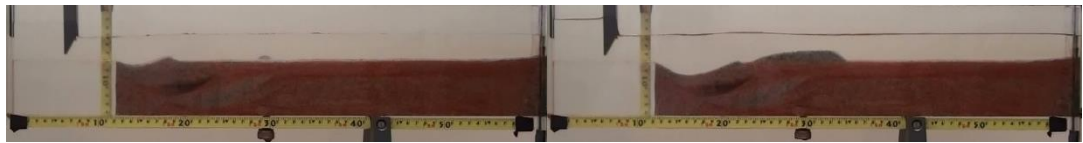
### Altura do descarregador a jusante de 1,7 cm



a)

b)

Figura A.I 129- Perfil para L=0 no instante t=0:34 min (a) e t=7:00 min



a)

b)

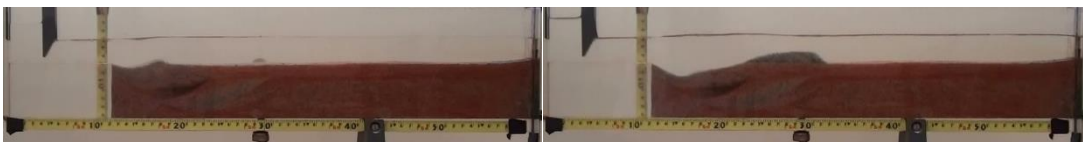
Figura A.I 130- Perfil para L=6 no instante t=0:38 min (a) e t=7:00 min



a)

b)

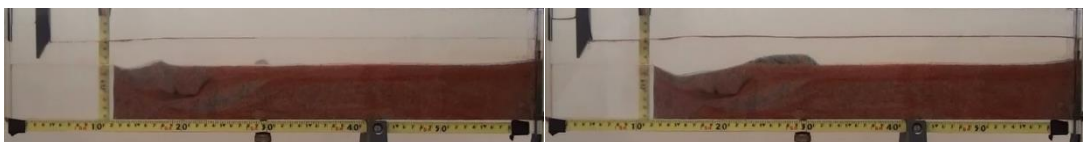
Figura A.I 131- Perfil para L=7 no instante t=0:39 min (a) e t=7:00 min



a)

b)

Figura A.I 132- Perfil para L=8 no instante t=0:40 min (a) e t=7:00 min



a)

b)

Figura A.I 133- Perfil para L=9 no instante t=0:35 min (a) e t=7:00 min

## Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior

**Altura do descarregador a jusante de 1 cm**



a)

b)

Figura A.I 134- Perfil para L=0 no instante t=0:30 min (a) e t=7:00 min



a)

b)

Figura A.I 135- Perfil para L=6 no instante t=0:39 min (a) e t=7:00 min



a)

b)

Figura A.I 136- Perfil para L=7 no instante t=0:38 min (a) e t=7:00 min



a)

b)

Figura A.I 137- Perfil para L=8 no instante t=0:46 min (a) e t=7:00 min



a)

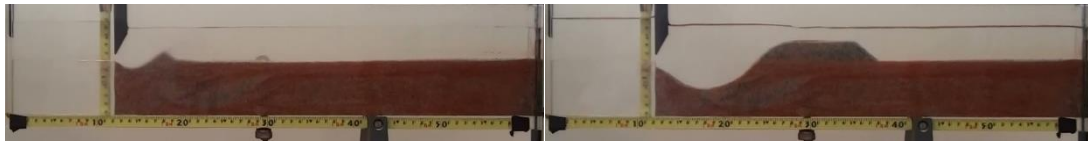
b)

Figura A.I 138- Perfil para L=9 no instante t=0:51 min (a) e t=7:00 min

**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**

## Anexo I

### Altura do descarregador a jusante de 2,5 cm



a)

b)

Figura A.I 139- Perfil para  $L=0$  no instante  $t=0:40$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 140- Perfil para  $L=6$  no instante  $t=0:50$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

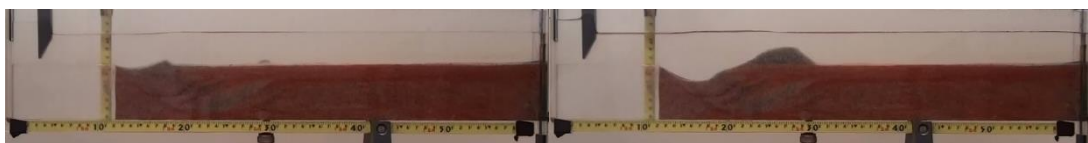
Figura A.I 141- Perfil para  $L=7$  no instante  $t=0:49$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 142- Perfil para  $L=8$  no instante  $t=0:52$  min (a) e  $t=7:00$  min



a)

b)

Figura A.I 143- Perfil para  $L=9$  no instante  $t=0:52$  min (a) e  $t=7:00$  min



## **Anexo II**



## Anexo II

$$U = \frac{Q}{\text{Área da seção}}$$

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{9,81 \times y}}$$

$$Y_j(\text{calculado}) = 0,5 \times b \times (\sqrt{1 + 8 \times F^2} - 1)$$

$$S = \frac{Y_t - Y_j(\text{calculado})}{Y_j(\text{calculado})}$$

$$U_c = \frac{\sqrt{K_s \times (s - 1) \times D_{50} \times h^{1/3}}}{0,041 \times D_{50}^{1/6}}$$

$$D_{50} = 0,328 \text{ mm}$$

$$K_s = 0,047$$

$$s = 2,44$$

Para  $b=0,9$

	P (cm)	Nº Exp.	L (cm)	Frb	Yt/b	L/b	L/Yt	Ys/b	U na comporta (m/s)	Yj (calculado em m)	Yt (m)	S	Uc
Para Q1= 0,0861 L/s	1,7	1.1.1.1	0	2,146	3,944	0	0	5,217	0,638	0,015	0,036	1,418	0,250866
		1.1.1.2	6	2,146	3,867	6,667	1,724	2,491	0,638	0,015	0,035	1,370	0,250035
		1.1.1.3	7	2,146	3,956	7,778	1,966	2,176	0,638	0,015	0,036	1,425	0,250984
		1.1.1.4	8	2,146	3,711	8,889	2,395	2,223	0,638	0,015	0,033	1,275	0,24833
		1.1.1.5	9	2,146	3,688	10	2,712	2,217	0,638	0,015	0,033	1,260	0,248068
	1	1.1.2.1	0	2,146	2,912	0	0	5,085	0,638	0,015	0,026	0,785	0,238495
		1.1.2.2	6	2,146	2,971	6,667	2,244	1,904	0,638	0,015	0,027	0,821	0,239288
		1.1.2.3	7	2,146	3,081	7,778	2,525	1,899	0,638	0,015	0,028	0,889	0,240745
		1.1.2.4	8	2,146	2,590	8,889	3,433	1,617	0,638	0,015	0,023	0,587	0,233874
		1.1.2.5	9	2,146	3,362	10	2,975	1,687	0,638	0,015	0,030	1,061	0,244272
	2,5	1.1.3.1	0	2,146	4,498	0	0	4,892	0,638	0,015	0,040	1,757	0,25642
		1.1.3.2	6	2,146	4,483	6,667	1,487	2,883	0,638	0,015	0,040	1,748	0,256271
		1.1.3.3	7	2,146	4,802	7,778	1,620	2,665	0,638	0,015	0,043	1,943	0,259227
		1.1.3.4	8	2,146	4,436	8,889	2,004	2,401	0,638	0,015	0,040	1,719	0,255823
		1.1.3.5	9	2,146	4,887	10	2,046	3,033	0,638	0,015	0,044	1,995	0,259984

	P (cm)	Nº Exp.	L (cm)	Frb	Yt/b	L/b	L/Yt	Ys/b	U na comporta (m/s)	Yj (calculado em m)	Yt (m)	S	Uc
Para Q2= 0,0546 L/s	1,7	1.2.1.1	0	1,361	3,449	0	0	2,572	0,404	0,011	0,031	1,818	0,245314
		1.2.1.2	6	1,361	3,208	6,667	2,078	0,885	0,404	0,011	0,029	1,621	0,242377
		1.2.1.3	7	1,361	3,336	7,778	2,332	0,888	0,404	0,011	0,030	1,725	0,243954
		1.2.1.4	8	1,361	3,243	8,889	2,741	1,212	0,404	0,011	0,029	1,649	0,242806
		1.2.1.5	9	1,361	3,520	10	2,841	1,498	0,404	0,011	0,032	1,876	0,246151
	1	1.2.2.1	0	1,361	2,836	0	0	3,484	0,404	0,011	0,026	1,317	0,237449
		1.2.2.2	6	1,361	2,716	6,667	2,454	0,901	0,404	0,011	0,024	1,219	0,235743
		1.2.2.3	7	1,361	2,611	7,778	2,979	0,699	0,404	0,011	0,023	1,133	0,234191
		1.2.2.4	8	1,361	2,755	8,889	3,226	0,656	0,404	0,011	0,025	1,251	0,236307
		1.2.2.5	9	1,361	2,806	10	3,564	0,545	0,404	0,011	0,025	1,292	0,237019
	2,5	1.2.3.1	0	1,361	4,421	0	0	1,942	0,404	0,011	0,040	2,612	0,255685
		1.2.3.2	6	1,361	4,361	6,667	1,529	1,726	0,404	0,011	0,039	2,563	0,255096
		1.2.3.3	7	1,361	4,501	7,778	1,728	1,540	0,404	0,011	0,041	2,677	0,256444
		1.2.3.4	8	1,361	4,528	8,889	1,963	1,579	0,404	0,011	0,041	2,699	0,256701
		1.2.3.5	9	1,361	4,430	10	2,257	1,520	0,404	0,011	0,040	2,620	0,255772

Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior

## Anexo II

	P (cm)	Nº Exp.	L (cm)	Frb	Yt/b	L/b	L/Yt	Ys/b	U na comporta (m/s)	Yj (calculado em m)	Yt (m)	S	Uc
Para Q3= 0,0644L/s	1,7	1.3.1.1	0	1,605	3,510	0	0	3,828	0,477	0,012	0,0316	1,580	0,246034
		1.3.1.2	6	1,605	3,604	6,667	1,850	2,574	0,477	0,012	0,0324	1,650	0,247124
		1.3.1.3	7	1,605	3,512	7,778	2,215	2,219	0,477	0,012	0,0316	1,582	0,246058
		1.3.1.4	8	1,605	3,526	8,889	2,521	1,811	0,477	0,012	0,0317	1,592	0,246222
		1.3.1.5	9	1,605	3,649	10	2,740	2,460	0,477	0,012	0,0328	1,683	0,247635
	1	1.3.2.1	0	1,605	2,786	0	0	4,429	0,477	0,012	0,0251	1,048	0,236742
		1.3.2.2	6	1,605	2,869	6,667	2,324	1,504	0,477	0,012	0,0258	1,109	0,237901
		1.3.2.3	7	1,605	2,927	7,778	2,658	1,384	0,477	0,012	0,0263	1,151	0,238692
		1.3.2.4	8	1,605	2,869	8,889	3,098	1,309	0,477	0,012	0,0258	1,109	0,237901
		1.3.2.5	9	1,605	2,996	10	3,338	1,409	0,477	0,012	0,0270	1,202	0,239624
	2,5	1.3.3.1	0	1,605	4,625	0	0	3,809	0,477	0,012	0,0416	2,400	0,257613
		1.3.3.2	6	1,605	4,507	6,667	1,479	2,369	0,477	0,012	0,0406	2,313	0,256503
		1.3.3.3	7	1,605	4,423	7,778	1,759	2,588	0,477	0,012	0,0398	2,251	0,255697
		1.3.3.4	8	1,605	4,392	8,889	2,024	2,183	0,477	0,012	0,0395	2,228	0,255398
		1.3.3.5	9	1,605	4,469	10	2,237	2,678	0,477	0,012	0,0402	2,286	0,256146

### Para b=0,6

	P (cm)	Nº Exp.	L (cm)	Frb	Yt/b	L/b	L/Yt	Ys/b	U na comporta (m/s)	Yj (calculado em m)	Yt (m)	S	Uc
Para Q3= 0,0869L/s	1,7	2.1.1.1	0	3,980	5,105	0	0	6,799	0,966	0,014	0,0306	1,158	0,244772
		2.1.1.2	6	3,980	5,118	10,000	1,954	1,875	0,966	0,014	0,0307	1,164	0,244879
		2.1.1.3	7	3,980	5,256	11,667	2,220	1,996	0,966	0,014	0,0315	1,222	0,245966
		2.1.1.4	8	3,980	5,177	13,333	2,575	1,845	0,966	0,014	0,0311	1,189	0,245344
		2.1.1.5	9	3,980	5,293	15	2,834	2,548	0,966	0,014	0,0318	1,238	0,246251
	1	2.1.2.1	0	3,980	3,980	0	0	7,353	0,966	0,014	0,0239	0,683	0,234821
		2.1.2.2	6	3,980	4,557	10,000	2,195	2,333	0,966	0,014	0,0273	0,926	0,24018
		2.1.2.3	7	3,980	4,323	11,667	2,699	2,326	0,966	0,014	0,0259	0,827	0,238078
		2.1.2.4	8	3,980	4,673	13,333	2,853	2,408	0,966	0,014	0,0280	0,976	0,24119
		2.1.2.5	9	3,980	4,702	15	3,190	2,233	0,966	0,014	0,0282	0,988	0,241443
	2,5	2.1.3.1	0	3,980	7,053	0	0	6,138	0,966	0,014	0,0423	1,982	0,258322
		2.1.3.2	6	3,980	6,833	10,000	1,464	4,248	0,966	0,014	0,0410	1,889	0,256958
		2.1.3.3	7	3,980	6,661	11,667	1,752	3,584	0,966	0,014	0,0400	1,816	0,255867
		2.1.3.4	8	3,980	6,858	13,333	1,944	3,872	0,966	0,014	0,0411	1,900	0,257117
		2.1.3.5	9	3,980	6,843	15	2,192	3,263	0,966	0,014	0,0411	1,893	0,257024

### Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior



## Anexo II

	P (cm)	Nº Exp.	L (cm)	Frb	Yt/b	L/b	L/Yt	Ys/b	U na comporta (m/s)	Yj (calculado em m)	Yt (m)	S	Uc
Para Q3= 0,055L/s	1,7	2.2.1.1	0	2,519	5,142	0	0	5,297	0,611	0,011	0,0309	1,858	0,24507
		2.2.1.2	6	2,519	4,985	10,000	2,006	2,160	0,611	0,011	0,0299	1,770	0,243805
		2.2.1.3	7	2,519	5,173	11,667	2,255	2,867	0,611	0,011	0,0310	1,874	0,24531
		2.2.1.4	8	2,519	5,163	13,333	2,582	2,542	0,611	0,011	0,0310	1,869	0,245234
		2.2.1.5	9	2,519	5,249	15	2,858	2,542	0,611	0,011	0,0315	1,917	0,245908
	1	2.2.2.1	0	2,519	3,637	0	0	4,751	0,611	0,011	0,0218	1,021	0,231325
		2.2.2.2	6	2,519	3,681	10,000	2,717	1,094	0,611	0,011	0,0221	1,046	0,231788
		2.2.2.3	7	2,519	3,742	11,667	3,118	1,048	0,611	0,011	0,0225	1,079	0,232424
		2.2.2.4	8	2,519	3,670	13,333	3,633	0,574	0,611	0,011	0,0220	1,040	0,231674
		2.2.2.5	9	2,519	3,886	15	3,860	0,767	0,611	0,011	0,0233	1,160	0,233894
	2,5	2.2.3.1	0	2,519	6,352	0	0	3,754	0,611	0,011	0,0381	2,530	0,253849
		2.2.3.2	6	2,519	6,346	10,000	1,576	2,595	0,611	0,011	0,0381	2,526	0,253812
		2.2.3.3	7	2,519	6,562	11,667	1,778	2,524	0,611	0,011	0,0394	2,646	0,255229
		2.2.3.4	8	2,519	6,251	13,333	2,133	2,539	0,611	0,011	0,0375	2,473	0,253172
		2.2.3.5	9	2,519	6,165	15	2,433	2,301	0,611	0,011	0,0370	2,426	0,25259

	P (cm)	Nº Exp.	L (cm)	Frb	Yt/b	L/b	L/Yt	Ys/b	U na comporta (m/s)	Yj (calculado em m)	Yt (m)	S	Uc
Para Q3= 0,0644L/s	1,7	2.3.1.1	0	2,949	5,103	0	0	7,227	0,716	0,012	0,0306	1,578	0,244755
		2.3.1.2	6	2,949	5,325	10,000	1,878	2,737	0,716	0,012	0,0320	1,690	0,2465
		2.3.1.3	7	2,949	5,398	11,667	2,161	3,508	0,716	0,012	0,0324	1,726	0,247056
		2.3.1.4	8	2,949	5,519	13,333	2,416	3,405	0,716	0,012	0,0331	1,788	0,247977
		2.3.1.5	9	2,949	5,348	15	2,805	3,234	0,716	0,012	0,0321	1,701	0,246677
	1	2.3.2.1	0	2,949	3,796	0	0	7,553	0,716	0,012	0,0228	0,917	0,232978
		2.3.2.2	6	2,949	4,184	10,000	2,390	2,355	0,716	0,012	0,0251	1,113	0,236784
		2.3.2.3	7	2,949	4,340	11,667	2,688	2,169	0,716	0,012	0,0260	1,192	0,23824
		2.3.2.4	8	2,949	4,136	13,333	3,224	2,403	0,716	0,012	0,0248	1,089	0,236329
		2.3.2.5	9	2,949	4,266	15	3,516	2,597	0,716	0,012	0,0256	1,155	0,237558
	2,5	2.3.3.1	0	2,949	6,832	0	0	6,037	0,716	0,012	0,0410	2,451	0,256951
		2.3.3.2	6	2,949	6,722	10,000	1,488	4,414	0,716	0,012	0,0403	2,395	0,256256
		2.3.3.3	7	2,949	6,791	11,667	1,718	3,965	0,716	0,012	0,0407	2,430	0,256692
		2.3.3.4	8	2,949	6,563	13,333	2,031	4,077	0,716	0,012	0,0394	2,315	0,255241
		2.3.3.5	9	2,949	6,625	15	2,264	3,362	0,716	0,012	0,0397	2,346	0,255638

Para b=0,7

	P (cm)	Nº Exp.	L (cm)	Frb	Yt/b	L/b	L/Yt	Ys/b	U na comporta (m/s)	Yj (calculado em m)	Yt (m)	S	Uc
Para Q1= 0,0870L/s	1,7	3.1.1.1	0	3,162	5,228	0	0	6,601	0,829	0,014	0,0366	1,533	0,252137
		3.1.1.2	6	3,162	5,485	8,571	1,563	3,741	0,829	0,014	0,0384	1,657	0,254163
		3.1.1.3	7	3,162	5,277	10,000	1,895	3,353	0,829	0,014	0,0369	1,557	0,252532
		3.1.1.4	8	3,162	5,022	11,429	2,276	3,572	0,829	0,014	0,0352	1,433	0,250457
		3.1.1.5	9	3,162	4,943	13	2,601	3,388	0,829	0,014	0,0346	1,395	0,249795
	1	3.1.2.1	0	3,162	3,859	0	0	7,445	0,829	0,014	0,0270	0,870	0,239699
		3.1.2.2	6	3,162	3,978	8,571	2,154	3,308	0,829	0,014	0,0278	0,928	0,24092
		3.1.2.3	7	3,162	4,222	10,000	2,368	2,354	0,829	0,014	0,0296	1,046	0,243319
		3.1.2.4	8	3,162	4,082	11,429	2,800	2,343	0,829	0,014	0,0286	0,978	0,241953
		3.1.2.5	9	3,162	3,970	13	3,239	2,021	0,829	0,014	0,0278	0,924	0,240835
	2,5	3.1.3.1	0	3,162	5,580	0	0	5,405	0,829	0,014	0,0391	1,704	0,254897
		3.1.3.2	6	3,162	5,741	8,571	1,493	3,134	0,829	0,014	0,0402	1,782	0,256108
		3.1.3.3	7	3,162	5,978	10,000	1,673	3,167	0,829	0,014	0,0418	1,897	0,257841
		3.1.3.4	8	3,162	5,875	11,429	1,945	3,179	0,829	0,014	0,0411	1,847	0,257093
		3.1.3.5	9	3,162	6,032	13	2,131	3,184	0,829	0,014	0,0422	1,923	0,258228

	P (cm)	Nº Exp.	L (cm)	Frb	Yt/b	L/b	L/Yt	Ys/b	U na comporta (m/s)	Yj (calculado em m)	Yt (m)	S	Uc
Para Q2= 0,055L/s	1,7	3.1.1	0	1,999	4,168	0	0	3,427	0,524	0,011	0,0292	1,670	0,242798
		3.1.2	6	1,999	4,191	8,571	2,045	1,406	0,524	0,011	0,0293	1,685	0,24302
		3.1.3	7	1,999	4,374	10,000	2,286	1,961	0,524	0,011	0,0306	1,802	0,244756
		3.1.4	8	1,999	4,401	11,429	2,597	1,734	0,524	0,011	0,0308	1,819	0,24501
		3.1.5	9	1,999	4,471	13	2,875	1,907	0,524	0,011	0,0313	1,864	0,245657
	1	3.2.1	0	1,999	3,214	0	0	6,150	0,524	0,011	0,0225	1,059	0,232498
		3.2.2	6	1,999	3,446	8,571	2,487	1,877	0,524	0,011	0,0241	1,208	0,235224
		3.2.3	7	1,999	3,340	10,000	2,994	1,553	0,524	0,011	0,0234	1,140	0,234003
		3.2.4	8	1,999	3,658	11,429	3,124	1,229	0,524	0,011	0,0256	1,344	0,237575
		3.2.5	9	1,999	3,532	13	3,640	1,380	0,524	0,011	0,0247	1,263	0,236191
	2,5	3.3.1	0	1,999	5,501	0	0	4,201	0,524	0,011	0,0385	2,524	0,254292
		3.3.2	6	1,999	5,580	8,571	1,536	2,247	0,524	0,011	0,0391	2,575	0,254893
		3.3.3	7	1,999	5,281	10,000	1,894	2,828	0,524	0,011	0,0370	2,383	0,252562
		3.3.4	8	1,999	5,704	11,429	2,004	2,743	0,524	0,011	0,0399	2,654	0,255826
		3.3.5	9	1,999	5,282	13	2,434	2,698	0,524	0,011	0,0370	2,384	0,252573

Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior

## Anexo II

P (cm)	Nº Exp.	L (cm)	Frb	Yt/b	L/b	L/Yt	Ys/b	U na comporta (m/s)	Yj (calculado em m)	Yt (m)	S	Uc	
Para Q3= 0,064L/s	1,7	3.3.1.1	0	2,326	4,579	0	0	5,746	0,610	0,012	0,0321	1,671	0,246628
		3.3.1.2	6	2,326	4,563	8,571	1,879	2,589	0,610	0,012	0,0319	1,662	0,246487
		3.3.1.3	7	2,326	4,378	10,000	2,284	2,289	0,610	0,012	0,0306	1,554	0,244792
		3.3.1.4	8	2,326	4,543	11,429	2,516	2,019	0,610	0,012	0,0318	1,650	0,246305
		3.3.1.5	9	2,326	4,629	13	2,777	1,813	0,610	0,012	0,0324	1,701	0,247082
	1	3.3.2.1	0	2,326	3,242	0	0	6,109	0,610	0,012	0,0227	0,891	0,232839
		3.3.2.2	6	2,326	3,578	8,571	2,395	1,935	0,610	0,012	0,0250	1,088	0,236702
		3.3.2.3	7	2,326	3,481	10,000	2,873	1,762	0,610	0,012	0,0244	1,031	0,235611
		3.3.2.4	8	2,326	3,716	11,429	3,076	1,239	0,610	0,012	0,0260	1,168	0,238191
		3.3.2.5	9	2,326	3,557	13	3,615	2,061	0,610	0,012	0,0249	1,075	0,236464
	2,5	3.3.3.1	0	2,326	5,750	0	0	4,453	0,610	0,012	0,0403	2,355	0,256172
		3.3.3.2	6	2,326	5,637	8,571	1,521	2,128	0,610	0,012	0,0395	2,289	0,255326
		3.3.3.3	7	2,326	5,588	10,000	1,790	2,420	0,610	0,012	0,0391	2,260	0,254953
		3.3.3.4	8	2,326	5,503	11,429	2,077	2,663	0,610	0,012	0,0385	2,210	0,254303
		3.3.3.5	9	2,326	5,414	13	2,375	2,663	0,610	0,012	0,0379	2,158	0,253612



## **Anexo III**



**Anexo III**

		P(cm)	Número de experiencia	L (cm)	Frb	Ys/b
b=0,9	Q=0,0861L/s	1,7	1.1.1.1	0	2,146	5,217
			1.1.1.2	6	2,146	2,491
			1.1.1.3	7	2,146	2,176
			1.1.1.4	8	2,146	2,223
			1.1.1.5	9	2,146	2,217
		1	1.1.2.1	0	2,146	5,085
			1.1.2.2	6	2,146	1,904
			1.1.2.3	7	2,146	1,899
			1.1.2.4	8	2,146	1,617
			1.1.2.5	9	2,146	1,687
		2,5	1.1.3.1	0	2,146	4,892
			1.1.3.2	6	2,146	2,883
			1.1.3.3	7	2,146	2,665
			1.1.3.4	8	2,146	2,401
			1.1.3.5	9	2,146	3,033
	Q=0,0546L/s	1,7	1.2.1.1	0	1,361	2,572
			1.2.1.2	6	1,361	0,885
			1.2.1.3	7	1,361	0,888
			1.2.1.4	8	1,361	1,212
			1.2.1.5	9	1,361	1,498
		1	1.2.2.1	0	1,361	3,484
			1.2.2.2	6	1,361	0,901
			1.2.2.3	7	1,361	0,699
			1.2.2.4	8	1,361	0,656
			1.2.2.5	9	1,361	0,545
		2,5	1.2.3.1	0	1,361	1,942
			1.2.3.2	6	1,361	1,726
			1.2.3.3	7	1,361	1,540
			1.2.3.4	8	1,361	1,579
			1.2.3.5	9	1,361	1,520
	Q=0,0644L/s	1,7	1.3.1.1	0	1,605	3,828
			1.3.1.2	6	1,605	2,574
			1.3.1.3	7	1,605	2,219
			1.3.1.4	8	1,605	1,811
			1.3.1.5	9	1,605	2,460
1		1.3.2.1	0	1,605	4,429	
		1.3.2.2	6	1,605	1,504	
		1.3.2.3	7	1,605	1,384	
		1.3.2.4	8	1,605	1,309	
		1.3.2.5	9	1,605	1,409	
2,5	1.3.2.1	0	1,605	3,809		
	1.3.3.2	6	1,605	2,369		

**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**

b=0,6	Q=0,0869L/s	1,7	1.3.3.3	7	1,605	2,588	
			1.3.3.4	8	1,605	2,183	
			1.3.3.5	9	1,605	2,678	
			2.1.1.1	0	3,980	6,799	
			2.1.1.2	6	3,980	1,875	
	Q=0,0869L/s	1	2.1.1.3	7	3,980	1,996	
			2.1.1.4	8	3,980	1,845	
			2.1.1.5	9	3,980	2,548	
			2.1.2.1	0	3,980	7,353	
			2.1.2.2	6	3,980	2,333	
	Q=0,0869L/s	2,5	2.1.2.3	7	3,980	2,326	
			2.1.2.4	8	3,980	2,408	
			2.1.2.5	9	3,980	2,233	
			2.1.3.1	0	3,980	6,138	
			2.1.3.2	6	3,980	4,248	
	Q=0,055L/s	1,7	2.1.3.3	7	3,980	3,584	
			2.1.3.4	8	3,980	3,872	
			2.1.3.5	9	3,980	3,263	
			2.2.1.1	0	2,519	5,297	
			2.2.1.2	6	2,519	2,160	
		Q=0,055L/s	1	2.2.1.3	7	2,519	2,867
				2.2.1.4	8	2,519	2,542
				2.2.1.5	9	2,519	2,542
				2.2.2.1	0	2,519	4,751
				2.2.2.2	6	2,519	1,094
Q=0,055L/s		2,5	2.2.2.3	7	2,519	1,048	
			2.2.2.4	8	2,519	0,574	
			2.2.2.5	9	2,519	0,767	
			2.2.3.1	0	2,519	3,754	
			2.2.3.2	6	2,519	2,595	
Q=0,0644L/s	1,7	2.2.3.3	7	2,519	2,524		
		2.2.3.4	8	2,519	2,539		
		2.2.3.5	9	2,519	2,301		
		2.3.1.1	0	2,949	7,227		
		2.3.1.2	6	2,949	2,737		
	Q=0,0644L/s	1	2.3.1.3	7	2,949	3,508	
			2.3.1.4	8	2,949	3,405	
			2.3.1.5	9	2,949	3,234	
			2.3.2.1	0	2,949	7,553	
			2.3.2.2	6	2,949	2,355	
Q=0,0644L/s	2,5	2.3.2.3	7	2,949	2,169		
		2.3.2.4	8	2,949	2,403		
		2.3.2.5	9	2,949	2,597		
		2.3.3.1	0	2,949	6,037		

Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior



Anexo III

			2.3.3.2	6	2,949	4,414
			2.3.3.3	7	2,949	3,965
			2.3.3.4	8	2,949	4,077
			2.3.3.5	9	2,949	3,362
b=0,7	Q=0,087L/s	1,7	3.1.1.1	0	3,162	6,601
			3.1.1.2	6	3,162	3,741
			3.1.1.3	7	3,162	3,353
			3.1.1.4	8	3,162	3,572
			3.1.1.5	9	3,162	3,388
		1	3.1.2.1	0	3,162	7,445
			3.1.2.2	6	3,162	3,308
			3.1.2.3	7	3,162	2,354
			3.1.2.4	8	3,162	2,343
			3.1.2.5	9	3,162	2,021
		2,5	3.1.3.1	0	3,162	5,405
			3.1.3.2	6	3,162	3,134
			3.1.3.3	7	3,162	3,167
			3.1.3.4	8	3,162	3,179
			3.1.3.5	9	3,162	3,184
	Q=0,055L/s	1,7	3.2.1.1	0	1,999	3,427
			3.2.1.2	6	1,999	1,406
			3.2.1.3	7	1,999	1,961
			3.2.1.4	8	1,999	1,734
			3.2.1.5	9	1,999	1,907
		1	3.2.2.1	0	1,999	6,150
			3.2.2.2	6	1,999	1,877
			3.2.2.3	7	1,999	1,553
			3.2.2.4	8	1,999	1,229
			3.2.2.5	9	1,999	1,380
		2,5	3.2.3.1	0	1,999	4,201
			3.2.3.2	6	1,999	2,247
			3.2.3.3	7	1,999	2,828
			3.2.3.4	8	1,999	2,743
			3.2.3.5	9	1,999	2,698
Q=0,0640L/s	1,7	3.3.1.1	0	2,326	5,746	
		3.3.1.2	6	2,326	2,589	
		3.3.1.3	7	2,326	2,289	
		3.3.1.4	8	2,326	2,019	
		3.3.1.5	9	2,326	1,813	
	1	3.3.2.1	0	2,326	6,109	
		3.3.2.2	6	2,326	1,935	
		3.3.2.3	7	2,326	1,762	
		3.3.2.4	8	2,326	1,239	
		3.3.2.5	9	2,326	2,061	

Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior

		2,5	3.3.3.1	0	2,326	4,453
			3.3.3.2	6	2,326	2,128
			3.3.3.3	7	2,326	2,420
			3.3.3.4	8	2,326	2,663
			3.3.3.5	9	2,326	2,663

## **Anexo IV**



Anexo IV

		P(cm)	Número de experiência	L (cm)	L/b	Ys/b	KL
b=0,9	Q=0,0861L/s	1,7	1.1.1.1	0	0	5,217	1,000
			1.1.1.2	6	6,667	2,491	0,477
			1.1.1.3	7	7,778	2,176	0,417
			1.1.1.4	8	8,889	2,223	0,426
			1.1.1.5	9	10	2,217	0,425
		1	1.1.2.1	0	0	5,085	1,000
			1.1.2.2	6	6,667	1,904	0,374
			1.1.2.3	7	7,778	1,899	0,374
			1.1.2.4	8	8,889	1,617	0,318
			1.1.2.5	9	10	1,687	0,332
		2,5	1.1.3.1	0	0	4,892	1,000
			1.1.3.2	6	6,667	2,883	0,589
			1.1.3.3	7	7,778	2,665	0,545
			1.1.3.4	8	8,889	2,401	0,491
			1.1.3.5	9	10	3,033	0,620
	Q=0,0546L/s	1,7	1.2.1.1	0	0	2,572	1,000
			1.2.1.2	6	6,667	0,885	0,344
			1.2.1.3	7	7,778	0,888	0,345
			1.2.1.4	8	8,889	1,212	0,471
			1.2.1.5	9	10	1,498	0,582
		1	1.2.2.1	0	0	3,484	1,000
			1.2.2.2	6	6,667	0,901	0,258
			1.2.2.3	7	7,778	0,699	0,201
			1.2.2.4	8	8,889	0,656	0,188
			1.2.2.5	9	10	0,545	0,156
		2,5	1.2.3.1	0	0	1,942	1,000
			1.2.3.2	6	6,667	1,726	0,889
			1.2.3.3	7	7,778	1,540	0,793
			1.2.3.4	8	8,889	1,579	0,813
			1.2.3.5	9	10	1,520	0,782
	Q=0,0644L/s	1,7	1.3.1.1	0	0	3,828	1,000
			1.3.1.2	6	6,667	2,574	0,672
			1.3.1.3	7	7,778	2,219	0,580
			1.3.1.4	8	8,889	1,811	0,473
			1.3.1.5	9	10	2,460	0,643
1		1.3.2.1	0	0	4,429	1,000	
		1.3.2.2	6	6,667	1,504	0,340	
		1.3.2.3	7	7,778	1,384	0,312	
		1.3.2.4	8	8,889	1,309	0,296	
		1.3.2.5	9	10	1,409	0,318	
2,5	1.3.3.1	0	0	3,809	1,000		
	1.3.3.2	6	6,667	2,369	0,622		

Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior

b=0,6	Q=0,0869L/s	1,7	1.3.3.3	7	7,778	2,588	0,679
			1.3.3.4	8	8,889	2,183	0,573
			1.3.3.5	9	10	2,678	0,703
			2.1.1.1	0	0	6,799	1,000
			2.1.1.2	6	10,000	1,875	0,276
	2.1.1.3	7	11,667	1,996	0,294		
	2.1.1.4	8	13,333	1,845	0,271		
	2.1.1.5	9	15	2,548	0,375		
	2.1.2.1	0	0	7,353	1,000		
	2.1.2.2	6	10,000	2,333	0,317		
	2.1.2.3	7	11,667	2,326	0,316		
	2.1.2.4	8	13,333	2,408	0,327		
	2.1.2.5	9	15	2,233	0,304		
	2.1.3.1	0	0	6,138	1,000		
	2.1.3.2	6	10,000	4,248	0,692		
	2.1.3.3	7	11,667	3,584	0,584		
	2.1.3.4	8	13,333	3,872	0,631		
	2.1.3.5	9	15	3,263	0,532		
	2.2.1.1	0	0	5,297	1,000		
	2.2.1.2	6	10,000	2,160	0,408		
	2.2.1.3	7	11,667	2,867	0,541		
	2.2.1.4	8	13,333	2,542	0,480		
	2.2.1.5	9	15	2,542	0,480		
	2.2.2.1	0	0	4,751	1,000		
	2.2.2.2	6	10,000	1,094	0,230		
	2.2.2.3	7	11,667	1,048	0,221		
	2.2.2.4	8	13,333	0,574	0,121		
2.2.2.5	9	15	0,767	0,161			
2.2.3.1	0	0	3,754	1,000			
2.2.3.2	6	10,000	2,595	0,691			
2.2.3.3	7	11,667	2,524	0,673			
2.2.3.4	8	13,333	2,539	0,677			
2.2.3.5	9	15	2,301	0,613			
2.3.1.1	0	0	7,227	1,000			
2.3.1.2	6	10,000	2,737	0,379			
2.3.1.3	7	11,667	3,508	0,485			
2.3.1.4	8	13,333	3,405	0,471			
2.3.1.5	9	15	3,234	0,448			
2.3.2.1	0	0	7,553	1,000			
2.3.2.2	6	10,000	2,355	0,312			
2.3.2.3	7	11,667	2,169	0,287			
2.3.2.4	8	13,333	2,403	0,318			
2.3.2.5	9	15	2,597	0,344			
2.3.3.1	0	0	6,037	1,000			

**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**

Anexo IV

b=0,7	Q=0,087L/s	1,7	2.3.3.2	6	10,000	4,414	0,731	
			2.3.3.3	7	11,667	3,965	0,657	
			2.3.3.4	8	13,333	4,077	0,675	
			2.3.3.5	9	15	3,362	0,557	
			3.1.1.1	0	0	6,601	1,000	
	Q=0,055L/s	1,7	1	3.1.1.2	6	8,571	3,741	0,567
				3.1.1.3	7	10,000	3,353	0,508
				3.1.1.4	8	11,429	3,572	0,541
				3.1.1.5	9	13	3,388	0,513
				3.1.2.1	0	0	7,445	1,000
		1	1	3.1.2.2	6	8,571	3,308	0,444
				3.1.2.3	7	10,000	2,354	0,316
				3.1.2.4	8	11,429	2,343	0,315
				3.1.2.5	9	13	2,021	0,271
				3.1.3.1	0	0	5,405	1,000
		2,5	2,5	3.1.3.2	6	8,571	3,134	0,580
				3.1.3.3	7	10,000	3,167	0,586
				3.1.3.4	8	11,429	3,179	0,588
				3.1.3.5	9	13	3,184	0,589
				3.2.1.1	0	0	3,427	1,000
	Q=0,0640L/s	1,7	1,7	3.2.1.2	6	8,571	1,406	0,410
				3.2.1.3	7	10,000	1,961	0,572
				3.2.1.4	8	11,429	1,734	0,506
				3.2.1.5	9	13	1,907	0,556
				3.2.2.1	0	0	6,150	1,000
1		1	3.2.2.2	6	8,571	1,877	0,305	
			3.2.2.3	7	10,000	1,553	0,253	
			3.2.2.4	8	11,429	1,229	0,200	
			3.2.2.5	9	13	1,380	0,224	
			3.2.3.1	0	0	4,201	1,000	
2,5		2,5	3.2.3.2	6	8,571	2,247	0,535	
			3.2.3.3	7	10,000	2,828	0,673	
			3.2.3.4	8	11,429	2,743	0,653	
			3.2.3.5	9	13	2,698	0,642	
			3.3.1.1	0	0	5,746	1,000	
Q=0,0640L/s	1,7	1,7	3.3.1.2	6	8,571	2,589	0,451	
			3.3.1.3	7	10,000	2,289	0,398	
			3.3.1.4	8	11,429	2,019	0,351	
			3.3.1.5	9	13	1,813	0,316	
			3.3.2.1	0	0	6,109	1,000	
	1	1	3.3.2.2	6	8,571	1,935	0,317	
			3.3.2.3	7	10,000	1,762	0,288	
			3.3.2.4	8	11,429	1,239	0,203	
			3.3.2.5	9	13	2,061	0,337	

Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior

			3.3.3.1	0	0	4,453	1,000
			3.3.3.2	6	8,571	2,128	0,478
		2,5	3.3.3.3	7	10,000	2,420	0,543
			3.3.3.4	8	11,429	2,663	0,598
			3.3.3.5	9	13	2,663	0,598



## **Anexo V**



Anexo V

		P(cm)	Número de experiencia	L (cm)	Yt/b	Ys/b	Kyt	Kyt teórico
b=0,9	Q=0,0861L/s	1,7	1.1.1.1	0	3,944	5,217	1,720	0,354
			1.1.1.2	6	3,867	2,491	0,821	0,337
			1.1.1.3	7	3,956	2,176	0,717	0,357
			1.1.1.4	8	3,711	2,223	0,733	0,302
			1.1.1.5	9	3,688	2,217	0,731	0,298
		1	1.1.2.1	0	2,912	5,085	1,676	0,161
			1.1.2.2	6	2,971	1,904	0,628	0,170
			1.1.2.3	7	3,081	1,899	0,626	0,186
			1.1.2.4	8	2,590	1,617	0,533	0,119
			1.1.2.5	9	3,362	1,687	0,556	0,234
		2,5	1.1.3.1	0	4,498	4,892	1,613	0,499
			1.1.3.2	6	4,483	2,883	0,951	0,494
			1.1.3.3	7	4,802	2,665	0,878	0,591
			1.1.3.4	8	4,436	2,401	0,792	0,481
			1.1.3.5	9	4,887	3,033	1,000	0,619
	Q=0,0546L/s	1,7	1.2.1.1	0	3,449	2,572	0,848	0,250
			1.2.1.2	6	3,208	0,885	0,292	0,207
			1.2.1.3	7	3,336	0,888	0,293	0,229
			1.2.1.4	8	3,243	1,212	0,400	0,213
			1.2.1.5	9	3,520	1,498	0,494	0,264
		1	1.2.2.1	0	2,836	3,484	1,149	0,150
			1.2.2.2	6	2,716	0,901	0,297	0,134
			1.2.2.3	7	2,611	0,699	0,230	0,121
			1.2.2.4	8	2,755	0,656	0,216	0,139
			1.2.2.5	9	2,806	0,545	0,180	0,146
		2,5	1.2.3.1	0	4,421	1,942	0,640	0,477
			1.2.3.2	6	4,361	1,726	0,569	0,460
			1.2.3.3	7	4,501	1,540	0,508	0,500
			1.2.3.4	8	4,528	1,579	0,521	0,507
			1.2.3.5	9	4,430	1,520	0,501	0,479
	Q=0,0644L/s	1,7	1.3.1.1	0	3,510	3,828	1,262	0,262
			1.3.1.2	6	3,604	2,574	0,848	0,280
			1.3.1.3	7	3,512	2,219	0,731	0,262
			1.3.1.4	8	3,526	1,811	0,597	0,265
			1.3.1.5	9	3,649	2,460	0,811	0,290
1		1.3.2.1	0	2,786	4,429	1,460	0,144	
		1.3.2.2	6	2,869	1,504	0,496	0,155	
		1.3.2.3	7	2,927	1,384	0,456	0,163	
		1.3.2.4	8	2,869	1,309	0,432	0,155	
		1.3.2.5	9	2,996	1,409	0,464	0,173	
2,5	1.3.3.1	0	4,625	3,809	1,256	0,536		

Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior

b=0,6	Q=0,0869L/s	1,7	1.3.3.2	6	4,507	2,369	0,781	0,501
			1.3.3.3	7	4,423	2,588	0,853	0,477
			1.3.3.4	8	4,392	2,183	0,720	0,469
			1.3.3.5	9	4,469	2,678	0,883	0,491
			2.1.1.1	0	5,105	6,799	1,108	0,693
	2.1.1.2	6	5,118	1,875	0,305	0,698		
	2.1.1.3	7	5,256	1,996	0,325	0,748		
	2.1.1.4	8	5,177	1,845	0,301	0,719		
	2.1.1.5	9	5,293	2,548	0,415	0,761		
	1	2.1.2.1	0	3,980	7,353	1,198	0,363	
		2.1.2.2	6	4,557	2,333	0,380	0,516	
		2.1.2.3	7	4,323	2,326	0,379	0,450	
		2.1.2.4	8	4,673	2,408	0,392	0,551	
		2.1.2.5	9	4,702	2,233	0,364	0,560	
	2,5	2.1.3.1	0	7,053	6,138	1,000	1,000	
		2.1.3.2	6	6,833	4,248	0,692	1	
		2.1.3.3	7	6,661	3,584	0,584	1,000	
		2.1.3.4	8	6,858	3,872	0,631	1,000	
		2.1.3.5	9	6,843	3,263	0,532	1	
	Q=0,055L/s	1,7	2.2.1.1	0	5,142	5,297	0,863	0,706
			2.2.1.2	6	4,985	2,160	0,352	0,652
			2.2.1.3	7	5,173	2,867	0,467	0,717
			2.2.1.4	8	5,163	2,542	0,414	0,714
			2.2.1.5	9	5,249	2,542	0,414	0,745
		1	2.2.2.1	0	3,637	4,751	0,774	0,287
			2.2.2.2	6	3,681	1,094	0,178	0,296
			2.2.2.3	7	3,742	1,048	0,171	0,309
			2.2.2.4	8	3,670	0,574	0,094	0,294
			2.2.2.5	9	3,886	0,767	0,125	0,341
		2,5	2.2.3.1	0	6,352	3,754	0,612	1,000
			2.2.3.2	6	6,346	2,595	0,423	1
			2.2.3.3	7	6,562	2,524	0,411	1,000
			2.2.3.4	8	6,251	2,539	0,414	1,000
2.2.3.5			9	6,165	2,301	0,375	1	
Q=0,0644L/s	1,7	2.3.1.1	0	5,103	7,227	1,177	0,692	
		2.3.1.2	6	5,325	2,737	0,446	0,773	
		2.3.1.3	7	5,398	3,508	0,571	0,801	
		2.3.1.4	8	5,519	3,405	0,555	0,849	
		2.3.1.5	9	5,348	3,234	0,527	0,782	
	1	2.3.2.1	0	3,796	7,553	1,231	0,321	
		2.3.2.2	6	4,184	2,355	0,384	0,413	
		2.3.2.3	7	4,340	2,169	0,353	0,454	
		2.3.2.4	8	4,136	2,403	0,391	0,401	
		2.3.2.5	9	4,266	2,597	0,423	0,435	

**Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior**

Anexo V

b=0,7	Q=0,087L/s	2,5	2.3.3.1	0	6,832	6,037	0,984	1,000
			2.3.3.2	6	6,722	4,414	0,719	1
			2.3.3.3	7	6,791	3,965	0,646	1,000
			2.3.3.4	8	6,563	4,077	0,664	1,000
			2.3.3.5	9	6,625	3,362	0,548	1,000
	Q=0,055L/s	1,7	3.1.1.1	0	5,228	6,601	1,094	0,737
			3.1.1.2	6	5,485	3,741	0,620	0,835
			3.1.1.3	7	5,277	3,353	0,556	0,755
			3.1.1.4	8	5,022	3,572	0,592	0,664
			3.1.1.5	9	4,943	3,388	0,562	0,637
		1	3.1.2.1	0	3,859	7,445	1,234	0,335
			3.1.2.2	6	3,978	3,308	0,548	0,362
			3.1.2.3	7	4,222	2,354	0,390	0,423
			3.1.2.4	8	4,082	2,343	0,388	0,387
			3.1.2.5	9	3,970	2,021	0,335	0,360
		2,5	3.1.3.1	0	5,580	5,405	0,896	0,874
			3.1.3.2	6	5,741	3,134	0,520	0,941
			3.1.3.3	7	5,978	3,167	0,525	1,000
			3.1.3.4	8	5,875	3,179	0,527	0,999
			3.1.3.5	9	6,032	3,184	0,528	1
Q=0,0640L/s	1,7	3.2.1.1	0	4,168	3,427	0,568	0,409	
		3.2.1.2	6	4,191	1,406	0,233	0,415	
		3.2.1.3	7	4,374	1,961	0,325	0,464	
		3.2.1.4	8	4,401	1,734	0,287	0,471	
		3.2.1.5	9	4,471	1,907	0,316	0,491	
	1	3.2.2.1	0	3,214	6,150	1,019	0,208	
		3.2.2.2	6	3,446	1,877	0,311	0,250	
		3.2.2.3	7	3,340	1,553	0,258	0,230	
		3.2.2.4	8	3,658	1,229	0,204	0,291	
		3.2.2.5	9	3,532	1,380	0,229	0,266	
	2,5	3.2.3.1	0	5,501	4,201	0,696	0,842	
		3.2.3.2	6	5,580	2,247	0,373	0,873	
		3.2.3.3	7	5,281	2,828	0,469	0,757	
		3.2.3.4	8	5,704	2,743	0,455	0,925	
		3.2.3.5	9	5,282	2,698	0,447	0,757	
Q=0,0640L/s	1,7	3.3.1.1	0	4,579	5,746	0,952	0,522	
		3.3.1.2	6	4,563	2,589	0,429	0,518	
		3.3.1.3	7	4,378	2,289	0,379	0,465	
		3.3.1.4	8	4,543	2,019	0,335	0,512	
		3.3.1.5	9	4,629	1,813	0,301	0,537	
	1	3.3.2.1	0	3,242	6,109	1,013	0,213	
		3.3.2.2	6	3,578	1,935	0,321	0,275	
		3.3.2.3	7	3,481	1,762	0,292	0,256	
3.3.2.4	8	3,716	1,239	0,205	0,303			

Análise de Erosão localizada a Jusante de uma Comporta Vertical de Abertura Inferior

			3.3.2.5	9	3,557	2,061	0,342	0,271
		2,5	3.3.3.1	0	5,750	4,453	0,738	0,944
			3.3.3.2	6	5,637	2,128	0,353	0,897
			3.3.3.3	7	5,588	2,420	0,401	0,877
			3.3.3.4	8	5,503	2,663	0,441	0,842
			3.3.3.5	9	5,414	2,663	0,441	0,807

## **Anexo VI**





## Anexo VI

		P (cm)	Nº de exp	L (cm)	Frb	3Frb	D50/b	KD	Kyt	$K_{\sigma}$	KL	Ys/b Previsto	Ys/b medido
b=0,9	Q=0,0861L/s	1,7	1.1.1.1	0	2,146	6,438	0,036	1	0,807	1,000	1,000	5,196	5,217
		1	1.1.2.1	0	2,146	6,438	0,036	1	0,917	1,000	1,000	5,906	5,085
		2,5	1.1.3.1	0	2,146	6,438	0,036	1	0,530	1,000	1,000	3,412	4,892
	Q=0,0546L/s	1,7	1.2.1.1	0	1,361	4,083	0,036	1	0,762	1,000	1,000	3,110	2,572
		1	1.2.2.1	0	1,361	4,083	0,036	1	0,963	1,000	1,000	3,932	3,484
		2,5	1.2.3.1	0	1,361	4,083	0,036	1	0,609	1,000	1,000	2,485	1,942
	Q=0,0644L/s	1,7	1.3.1.1	0	1,605	4,816	0,036	1	0,759	1,000	1,000	3,655	3,828
		1	1.3.2.1	0	1,605	4,816	0,036	1	0,974	1,000	1,000	4,693	4,429
		2,5	1.3.2.1	0	1,605	4,816	0,036	1	0,620	1,000	1,000	2,987	3,809
b=0,6	Q=0,0869L/s	1,7	2.1.1.1	0	3,980	11,940	0,055	1	0,724	1,000	1,000	8,642	6,799
		1	2.1.2.1	0	3,980	11,940	0,055	1	0,969	1,000	1,000	11,566	7,353
		2,5	2.1.3.1	0	3,980	11,940	0,055	1	0,663	1,000	1,000	7,910	6,138
	Q=0,055L/s	1,7	2.2.1.1	0	2,519	7,557	0,055	1	0,784	1,000	1,000	5,922	5,297
		1	2.2.2.1	0	2,519	7,557	0,055	1	0,967	1,000	1,000	7,308	4,751
		2,5	2.2.3.1	0	2,519	7,557	0,055	1	0,559	1,000	1,000	4,227	3,754
	Q=0,0644L/s	1,7	2.3.1.1	0	2,949	8,848	0,055	1	0,747	1,000	1,000	6,609	7,227
		1	2.3.2.1	0	2,949	8,848	0,055	1	0,984	1,000	1,000	8,706	7,553
		2,5	2.3.3.1	0	2,949	8,848	0,055	1	0,605	1,000	1,000	5,356	6,037
b=0,7	Q=0,087L/s	1,7	3.1.1.1	0	3,162	9,486	0,047	1	0,867	1,000	1,000	8,220	6,601
		1	3.1.2.1	0	3,162	9,486	0,047	1	0,952	1,000	1,000	9,028	7,445
		2,5	3.1.3.1	0	3,162	9,486	0,047	1	0,677	1,000	1,000	6,418	5,405
	Q=0,055L/s	1,7	3.2.1.1	0	1,999	5,997	0,047	1	0,731	1,000	1,000	4,382	3,427
		1	3.2.2.1	0	1,999	5,997	0,047	1	0,978	1,000	1,000	5,867	6,150
		2,5	3.2.3.1	0	1,999	5,997	0,047	1	0,641	1,000	1,000	3,846	4,201
	Q=0,0640L/s	1,7	3.3.1.1	0	2,326	6,978	0,047	1	0,796	1,000	1,000	5,556	5,746
		1	3.3.2.1	0	2,326	6,978	0,047	1	0,980	1,000	1,000	6,841	6,109
		2,5	3.3.3.1	0	2,326	6,978	0,047	1	0,646	1,000	1,000	4,509	4,453