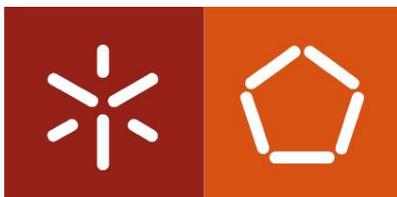


**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Mariana Leite Azevedo

**Redução da Erosão Localizada de Pilares  
de Pontes Recorrendo a Ranhuras:  
Evolução Temporal e Configuração das  
Cavidades de Erosão Localizada**



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Mariana Leite Azevedo

**Redução da Erosão Localizada de Pilares  
de Pontes Recorrendo a Ranhuras:  
Evolução Temporal e Configuração das  
Cavidades de Erosão Localizada**

Dissertação de Mestrado  
Mestrado Integrado em Engenharia Civil

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

## AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Manuela Lima, pela orientação da presente dissertação, por todas as sugestões e revisões muito atentas e construtivas, e pela oportunidade que me deu para divulgar o meu trabalho.

Ao Sr. João Rui Mendes de Oliveira, técnico do Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, sem o qual este trabalho não se teria realizado, por todo o acompanhamento e auxílio que me prestou, e pela estima que lhe devo.

Ao Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho, em particular ao Eng.º Ivo Pinto, ao João Carvalho, e ao Professor Doutor Fernando Moura Duarte pelo incansável trabalho na digitalização dos moldes.

À empresa IberCAD, particularmente ao Arquiteto Alexandre Ribeiro, pela licença de utilização temporária do aplicativo DTC-PRO para ZWCAD, sem a qual o tratamento dos moldes não seria possível.

Ao Professor Doutor José Luís da Silva Pinho, pelo interesse demonstrado no meu trabalho e pelos conselhos sempre oportunos.

À minha mãe, Helena Leite e irmã, Filipa Azevedo pelo eterno agradecimento que lhes devo.

Ao André Fernandes, meu namorado e companheiro de todas horas, pelo apoio incondicional, não só no presente trabalho, mas em tudo na minha vida.

Aos meus avós, tios e primos, por tudo o que me ensinam.

Aos meus amigos de longa data, Ana Pinto, Filipa Neves, Eva Rocha, Joana Pereira, Marta Rodrigues, Filipe Ferreira, João Pinto, Diogo Soares, Rui e André Prazeres, Wilson Dias e Hélder Ramos, pelos efusivos incentivos e por estarem sempre presentes.

A todos os colegas de curso, em especial às amigas que fiz, Marta Rodrigues, Andreia Torres, Daniela Sousa, Joana Alves, Andresa Gomes, Raquel Rocha e Susana Macedo, por me acompanharem nesta longa jornada.

Por fim, mas não menos importante, ao meu pai, Carlos Azevedo, por lhe dever a pessoa em que me tornei, por ter sido o mais orgulhoso apoiante do meu percurso académico, e por nunca lhe conseguir retribuir tudo o que de bom trouxe à minha vida.

## RESUMO

O fenómeno da erosão localizada na vizinhança de pilares de pontes é uma das causas associadas ao colapso destas estruturas. É imprescindível prever a máxima profundidade da cavidade de erosão localizada em torno dos pilares porque a estrutura poderá entrar em rotura, dando origem a acidentes que poderão colocar vidas humanas em risco.

A presente dissertação descreve um estudo experimental da erosão localizada sem transporte sólido, em torno de pilares fundados em leitos não coesivos. A implementação de uma ranhura no pilar como medida de mitigação de alteração do escoamento foi avaliada no caso de pilares circulares e alongados. Foram utilizados quatro pilares com 20 mm de dimensão transversal, sendo que num dos pilares circulares e num dos pilares alongados foi implementada uma ranhura que corresponde à medida de mitigação de alteração do escoamento.

Foram utilizadas duas areias, uma uniforme e outra não uniforme, ambas com diâmetro médio igual a 0.328 mm, num escoamento com superfície livre com profundidade de água igual a 5 cm e um caudal igual a  $12.96 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ .

A evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão foi estudada, e a topografia da cavidade de erosão foi analisada. Verificou-se que a profundidade máxima da cavidade de erosão evolui a um ritmo maior na fase inicial do processo erosivo. Pôde também verificar-se que a fase de equilíbrio é atingida mais rapidamente quando se utiliza areia não uniforme, comparando com a areia uniforme. Conclui-se que a máxima profundidade da cavidade de erosão é menor em pilares alongados do que em pilares circulares. Comparando os pilares com ranhura com os pilares simples, a profundidade da cavidade de erosão foi maior nos simples, e a medida de alteração do escoamento é mais eficaz em pilares circulares do que em pilares alongados.

Observou-se que o ângulo entre a linha de maior declive do talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia é maior a montante do pilar, quando comparado com o de jusante. Os ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia diminuem com a implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento, tanto nos pilares circulares, como nos pilares alongados.

**Palavras-chave:** Erosão localizada; Pilares de Pontes; Topografia da cavidade de erosão; Medidas de alteração do escoamento; Ranhuras em Pilares.



## ABSTRACT

One of the causes associated with the collapse of bridges is the phenomenon of scour around bridges piers. It is important to predict the maximum scour depth around the piers, because the structure may collapse, originating accidents that may put human lives at risk.

This work describes an experimental study of clear water scour around bridge piers, placed in a cohesionless bed of sediments. The use of pier slot as a flow-altering countermeasure against bridge scour is evaluated, in the case of circular and oblong piers. Four piers with 20 mm of transversal dimension were used, with one circular pier and one oblong pier that featured a slot, corresponding to a flow-altering countermeasure. Experiments were carried out with two different sands (uniform and non uniform) of equal mean diameter (0.328 mm), in a free surface flow with a water depth equal to 5 cm and a flow rate equal to  $12.96 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ .

The temporal evolution of the maximum scour depth was studied and the topography of the scour cavity was analysed. It was found that scour depth increases very rapidly during the initial period of the erosion process. Time for the equilibrium depth to be achieved is smaller in case of uniform sand beds, than in case of non uniform sand beds. It was observed that the scour hole maximum depth was smaller in case of oblong piers, when compared with circular piers. Comparing piers with slot with simple piers, the scour hole maximum depth was higher in case of the simple piers, and the flow-altering countermeasure is more efficient in circular piers when compared with oblong piers. The angle between the bed of the scour cavity and the initial sand level is higher upstream from the pier, when compared with the angle of the downstream scour cavity slope. The angles between the bottom of the bed of the scour cavity and the initial sand level decrease with the implementation of the flow-altering countermeasure, both in circular and oblong piers.

**Key-words:** Scour; Bridge Piers; Scour Cavity Topography; Flow-altering Countermeasures; Pier Slot



# ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	i
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	v
NOMENCLATURA.....	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento e interesse do tema.....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Estrutura da Dissertação .....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 Introdução .....	5
2.2 Erosão Localizada de Pilares de Pontes.....	5
2.2.1 Tipos de Erosão Localizada.....	6
2.2.2 Análise dimensional do problema .....	8
2.2.3 Previsão da profundidade máxima da cavidade de erosão .....	10
2.2.4 Efeito das variáveis que influenciam o processo erosivo .....	13
2.3 Medidas de Mitigação.....	21
2.3.1 Medidas de alteração do escoamento .....	22
2.3.2 Medidas de Proteção do leito.....	25
2.4 Estudos relativos à erosão localizada de pilares de pontes .....	27
2.4.1 Estudos Experimentais .....	27
2.4.2 Estudos Numéricos .....	30
3 MÉTODO EXPERIMENTAL .....	33
3.1 Introdução .....	33
3.2 Instalação Experimental.....	33
3.3 Secção de teste .....	34
3.4 Parâmetros Experimentais .....	35
3.4.1 Areia .....	35
3.4.2 Configuração dos pilares .....	39
3.4.3 Condições Experimentais .....	41
3.5 Procedimento Experimental.....	42
3.5.1 Preparação .....	42

3.5.2	Execução.....	43
3.5.3	Digitalização dos moldes.....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	51
4.1	Ensaio Experimentais com areia não uniforme.....	51
4.1.1	Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão localizada.....	51
4.1.2	Configuração das cavidades de erosão localizada.....	56
4.1.3	Análise e discussão dos resultados .....	64
4.2	Ensaio Experimentais com areia uniforme.....	76
4.2.1	Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão localizada.....	76
4.2.2	Configuração das cavidades de erosão localizada.....	81
4.2.3	Análise e discussão dos resultados .....	89
4.3	Conclusões .....	104
4.3.1	Ensaio Experimentais com areia não uniforme.....	104
4.3.2	Ensaio Experimentais com areia uniforme .....	106
5	CONCLUSÃO E PESPETIVAS PARA O FUTURO .....	109
5.1	Conclusões .....	109
5.2	Sugestão para trabalhos futuros .....	110
	BIBLIOGRAFIA .....	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Evolução da profundidade da cavidade de erosão localizada em fundos arenosos em função do tempo (adaptada de Richardson e Davies, 2001).....	7
Figura 2.2 Indicação da evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão (adaptado de Melville e Chiew, 1999).....	16
Figura 2.3. Variação da profundidade da cavidade de erosão ao longo do tempo e velocidade do escoamento (adaptada de Melville e Chiew, 1999).....	17
Figura 2.4 Identificação das fases do processo erosivo (adaptada de Couto e Cardoso, 2001a).....	19
Figura 2.5 Efeito da orientação de pilares de pontes na profundidade da cavidade de erosão (adaptada de Melville e Coleman, 2000; <i>apud</i> Pineiro, 2010).....	20
Figura 2.6 Medidas de alteração de escoamento: (a) cristas submersas duplas, (b) soleira no leito, (c) pilares sacrificiais transversais, (d) colar circular, (e) espiral de parafuso, e (f) ranhura. (adaptada de Tafarojnoruz <i>et al.</i> , 2012).....	22
Figura 2.7 Ilustração do caso 1 (adaptada de Dey e Raikar, 2007).....	26
Figura 2.8 Ilustração do caso 2 (adaptada de Dey e Raikar, 2007).....	26
Figura 2.9 Ilustração do caso 3 (adaptada de Dey e Raikar, 2007).....	26
Figura 3.1 Vista longitudinal do canal hidráulico (vista de montante (a); vista de jusante (b)).....	33
Figura 3.2 Instalação Experimental (a seta indica o sentido do escoamento).....	34
Figura 3.3 Cortes da Secção de Teste.....	34
Figura 3.4 Curva Granulométrica da areia utilizada no estudo de Leite (2013).....	35
Figura 3.5 Curva Granulométrica da areia utilizada no presente estudo (1ª Série).....	36
Figura 3.6 Análise comparativa das curvas granulométricas das areias utilizadas no presente estudo (1ª série) e no estudo de Leite (2013).....	37
Figura 3.7 Curvas Granulométricas das areias utilizadas no presente estudo (Série 1 e 2).....	39
Figura 3.8 Nomenclatura utilizada para as dimensões dos pilares (caso do pilar alongado).....	40
Figura 3.9. Pilares em acrílico, utilizados nos ensaios experimentais (pilar alongado com ranhura (a); pilar circular com ranhura (b); pilar alongado simples (c); pilar circular simples (d)).....	41

Figura 3.10 Resultado final da fase de preparação (Vista de jusante (a) Vista de cima (b)) .....	43
Figura 3.11 Régua milimétrica desenhada no pilar circular simples.....	44
Figura 3.12 Levantamento tridimensional do molde (Colocação da cofragem (a); Enchimento da cavidade de erosão com vaselina e parafina (b)).....	46
Figura 3.13 Resultado do levantamento tridimensional do molde da cavidade de erosão (Antes da secagem (a); Após a secagem (b)) .....	47
Figura 3.14 <i>Roland's 3D Laser Scanner LPX-600</i> .....	47
Figura 3.15 Suporte utilizado para a digitalização dos moldes .....	48
Figura 3.16 <i>Software ZW-CAD</i> com o aplicativo DTC-PRO.....	48
Figura 3.17 Esquematização da localização dos Perfis Transversais e Longitudinal ....	50
Figura 4.1 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar circular simples- 1ª Série).....	52
Figura 4.2 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar circular com ranhura- 1ª Série).....	53
Figura 4.3 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar alongado simples- 1ª Série) .....	54
Figura 4.4 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar alongado com ranhura - 1ª Série) .....	55
Figura 4.5 Curvas de nível (Pilar circular simples) – Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	57
Figura 4.6 Perfil Longitudinal (Pilar circular simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	57
Figura 4.7 Perfil Transversal 1 (Pilar circular simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm). 58	
Figura 4.8 Perfil Transversal 2 (Pilar circular simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm). 58	
Figura 4.9 Curvas de nível (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	59
Figura 4.10 Perfil Longitudinal (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	59
Figura 4.11 Perfil Transversal 1 (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm).....	60
Figura 4.12 Perfil Transversal 2 (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm).....	60

Figura 4.13 Curvas de nível (Pilar alongado simples) - Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	61
Figura 4.14 Perfil Longitudinal (Pilar alongado simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	61
Figura 4.15 Perfil Transversal 1 (Pilar alongado simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm) .....	62
Figura 4.16 Perfil Transversal 2 (Pilar alongado simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm) .....	62
Figura 4.17 Curvas de nível (Pilar alongado com ranhura) - Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	63
Figura 4.18 Perfil Longitudinal (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	63
Figura 4.19 Perfil Transversal 1 (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm).....	63
Figura 4.21 Evolução temporal da máxima profundidade d cavidade de erosão dos quatro pilares da 1ª série de ensaios experimentais .....	64
Figura 4.20 Perfil Transversal 2 (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm).....	64
Figura 4.22 Análise comparativa do presente estudo com o estudo de Leite (2013) (Pilar circular simples – 1ª Série).....	67
Figura 4.23 Análise comparativa do presente estudo com o estudo de Leite (2013) (Pilar circular com ranhura – 1ª Série) .....	67
Figura 4.24 Análise comparativa do presente estudo com o estudo de Leite (2013) (Pilar alongado simples – 1ª Série).....	67
Figura 4.25 Análise comparativa do presente estudo com o estudo de Leite (2013) (Pilar alongado com ranhura – 1ª Série).....	68
Figura 4.26 Estudo comparativo da percentagem de redução da máxima profundidade da cavidade de erosão .....	70
Figura 4.27 Esquematização dos ângulos entre as linhas de maior declive dos taludes da cavidade de erosão e o nível inicial da areia. ....	71
Figura 4.28 Esquematização dos ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal 1 (a uma distância de 2D mm da face do pilar) e a face do pilar .....	73

Figura 4.29 Esquemática dos ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal 2 (a uma distância de $D/2$ mm da face do pilar) e a face do pilar .....	73
Figura 4.30 Esquemática dos ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal 2 (a uma distância de $2D$ mm da face do pilar) e a face do pilar .....	73
Figura 4.31 Esquemática dos ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal 2 (a uma distância de $4D$ mm da face do pilar) e a face do pilar .....	74
Figura 4.32 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar circular simples - 2ª Série).....	77
Figura 4.33 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar circular com ranhura - 2ª Série).....	78
Figura 4.34 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar alongado simples - 2ª Série) .....	79
Figura 4.35 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar alongado com ranhura - 2ª Série) .....	80
Figura 4.36 Curvas de nível (Pilar circular simples) – Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	82
Figura 4.37 Perfil longitudinal (Pilar circular simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	82
Figura 4.38 Perfil transversal 1 (Pilar circular simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)	83
Figura 4.39 Perfil transversal 2 (Pilar circular simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)	83
Figura 4.40 Curvas de nível (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	84
Figura 4.41 Perfil longitudinal (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	84
Figura 4.42 Perfil transversal 1 (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm).....	85
Figura 4.43 Perfil transversal 2 (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm).....	85
Figura 4.44 Curvas de nível (Pilar alongado simples) – Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	86
Figura 4.45 Perfil longitudinal (Pilar alongado simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento) .....	86

Figura 4.46 Perfil transversal 1 (Pilar alongado simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)	87
Figura 4.47 Perfil transversal 2 (Pilar alongado simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)	87
Figura 4.48 Curvas de nível (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento)	88
Figura 4.49 Perfil longitudinal (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento)	88
Figura 4.50 Perfil transversal 1 (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)	88
Figura 4.51 Perfil transversal 2 (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)	89
Figura 4.52 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão dos quatro pilares da 2ª série de ensaios experimentais	90
Figura 4.53 Análise comparativa dos pilares circulares simples do presente estudo (1ª e 2ª Série)	92
Figura 4.54 Análise comparativa dos pilares circulares com ranhura do presente estudo (1ª e 2ª Série)	92
Figura 4.55 Análise comparativa dos pilares alongados simples do presente estudo (1ª e 2ª Série)	92
Figura 4.56 Análise comparativa dos pilares alongados com ranhura do presente estudo (1ª e 2ª Série)	93
Figura 4.57 Análise comparativa do presente estudo (2ª série) com o estudo de Grimaldi et al. (2009a)	96
Figura 4.58 Análise comparativa do presente estudo (2ª série) com o estudo de Grimaldi et al. (2009b)	97
Figura 4.59 Análise comparativa do presente estudo (2ª série) com o estudo de Tafarojnoruz et al. (2012)	98
Figura 4.60 Estudo comparativo da percentagem de redução da máxima profundidade da cavidade de erosão	100



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 Valores do fator de correção K1 .....	10
Tabela 2.2 Valores do fator de correção, para o ângulo, K2 (expressão 2.7).....	11
Tabela 2.3 Fator de correção K3 .....	11
Tabela 2.4 Velocidade crítica de erosão (adaptada de Gusmão Filho, 2008) .....	15
Tabela 2.5 Velocidade abaixo da qual se dá a sedimentação (adaptada de Gusmão Filho, 2008).....	16
Tabela 2.6 Resumo dos Critérios de paragem .....	18
Tabela 2.7. Coeficientes de Forma de Pilares .....	20
Tabela 3.1 Análise granulométrica das areias utilizada no presente estudo (Série 1) e no estudo de Leite (2013) .....	37
Tabela 3.2 Estudo realizado sobre as alterações a aplicar à areia da 1ª Série de ensaios experimentais.....	38
Tabela 3.3 Características das areias utilizadas no presente estudo (1ª e 2ª Séries).....	39
Tabela 3.4 Dimensões dos pilares utilizados no presente estudo .....	40
Tabela 3.5 Condições Experimentais .....	42
Tabela 3.6 Resumo dos resultados obtidos para o cálculo dos critérios de paragem ....	45
Tabela 4.1 Equações das linhas de tendência (Pilar circular simples – 1ª Série).....	52
Tabela 4.2 Duração das fases do processo erosivo (Pilar circular simples – 1ª Série)...	52
Tabela 4.3 Equações das linhas de tendência (Pilar circular com ranhura – 1ª Série) ...	53
Tabela 4.4 Duração das fases do processo erosivo (Pilar circular com ranhura – 1ª Série) .....	53
Tabela 4.5 Equações das linhas de tendência (Pilar alongado simples – 1ª Série).....	54
Tabela 4.6 Duração das fases do processo erosivo (Pilar alongado simples – 1ª Série) 54	
Tabela 4.7 Equações das linhas de tendência (Pilar alongado com ranhura – 1ª Série). 55	
Tabela 4.8 Duração das fases do processo erosivo (Pilar alongado com ranhura – 1ª Série).....	55
Tabela 4.9 Percentagem de redução da profundidade máxima da cavidade de erosão – 1ª Série .....	65
Tabela 4.10 Resumo da duração das fases do processo erosivo – 1ª Série .....	66
Tabela 4.11 Máximas profundidades das cavidades de erosão do presente estudo (1ª série) e do estudo de Leite (2012) .....	68

Tabela 4.12 Valores das profundidades máximas das cavidades de erosão (1ª Série)...	70
Tabela 4.13 Ângulos formados entre as linhas de maior declive dos taludes da cavidade de erosão e o nível inicial da areia (1ª Série).....	72
Tabela 4.14 Ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal e a face do pilar (1ª série) .....	74
Tabela 4.15 Ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal e o nível inicial da areia (1ª série) .....	75
Tabela 4.16 Equações das linhas de tendência (Pilar circular simples – 2ª Série) .....	77
Tabela 4.17 Duração das fases do processo erosivo (Pilar circular simples – 2ª Série). 77	
Tabela 4.18 Equações das linhas de tendência (Pilar circular com ranhura – 2ª Série) . 78	
Tabela 4.19 Duração das fases do processo erosivo (Pilar circular com ranhura – 2ª Série).....	78
Tabela 4.20 Equações das linhas de tendência (Pilar alongado simples – 2ª Série).....	79
Tabela 4.21 Duração das fases do processo erosivo (Pilar alongado simples – 2ª Série) .....	79
Tabela 4.22 Equações das linhas de tendência (Pilar alongado com ranhura – 2ª Série)80	
Tabela 4.23 Duração das fases do processo erosivo (Pilar alongado com ranhura – 2ª Série).....	80
Tabela 4.24 Percentagem de redução da profundidade máxima da cavidade de erosão – 2ª Série.....	90
Tabela 4.25 Resumo da duração das fases do processo erosivo – 2ª Série .....	91
Tabela 4.26 Estudo comparativo da máxima profundidade da cavidade de erosão .....	93
Tabela 4.27 Análise comparativa da duração das fases do processo erosivo.....	94
Tabela 4.28 Síntese das Condições Experimentais .....	95
Tabela 4.29 Valores das profundidades máximas das cavidades de erosão (2ª Série) . 100	
Tabela 4.30 Ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia (2ª Série) .....	101
Tabela 4.31 Ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal e a face do pilar (2ª série) .....	102
Tabela 4.32 Ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal e o nível inicial da areia (2ª série) .....	103

## NOMENCLATURA

B	Largura da secção transversal do canal
c1, c2	Coefficientes empíricos da expressão da tensão crítica de arrastamento
d	Diâmetro da partícula
D	Diâmetro do pilar
D <sub>50</sub>	Diâmetro médio dos sedimentos
F <sub>a</sub>	Força hidrodinâmica de arrastamento
F <sub>r</sub>	Número de Froude
F <sub>s</sub>	Força de sustentação
g	Aceleração da gravidade
h	Altura do escoamento
i	Declive do fundo do canal
J	Perda de carga unitária do escoamento
K1	Fator de correção da forma do nariz do pilar
K2	Fator de correção do ângulo da direção principal do pilar com o escoamento
K3	Fator de correção função da forma do leito do escoamento
K4	Fator de correção da dimensão do material do fundo
K <sub>d</sub>	Fator da dimensão dos sedimentos
K <sub>g</sub>	Coefficiente de forma da secção transversal
K <sub>h</sub>	Fator da altura do escoamento
K <sub>p</sub>	Coefficiente de forma do pilar
K <sub>s</sub>	Coefficiente de Shields
L	Comprimento do pilar
l <sub>s</sub>	Altura da ranhura
Q	Caudal
Re	Número de Reynolds
r	Eficiência

$s$	Densidade do material do fundo
$t$	Tempo
$t_e$	Tempo de Equilíbrio
$U$	Velocidade média de aproximação
$U_c$	Velocidade crítica
$u_*$	Velocidade de atrito
$U_*$	Velocidade tangencial
$W$	Peso submerso
$w_s$	Largura da ranhura
$y_s$	Profundidade da cavidade de erosão localizada
$y_{se}$	Profundidade da cavidade de erosão localizada no equilíbrio
$z_s$	Altura submersa da ranhura
$\alpha$	Ângulo formado entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia a montante do pilar
$\beta$	Ângulo formado entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia a jusante do pilar
$\varphi$	Ângulo formado entre o talude da secção transversal 1 da cavidade de erosão e a face do pilar à esquerda do pilar
$\varphi'$	Ângulo formado entre o talude da secção transversal 1 da cavidade de erosão e o nível inicial da areia à esquerda do pilar
$\gamma$	Peso específico do fluido
$\gamma_s$	Peso específico dos sedimentos
$\lambda$	Ângulo formado entre o talude da secção transversal 1 da cavidade de erosão e a face do pilar à direita do pilar
$\lambda'$	Ângulo formado entre o talude da secção transversal 1 da cavidade de erosão e o nível inicial da areia à direita do pilar
$\theta$	Ângulo de alinhamento do pilar com o escoamento
$\theta_r$	Ângulo de repouso
$\nu$	Viscosidade cinemática
$\rho, \rho_w$	Massa volúmica do fluido

$\rho_s$	Massa volúmica dos sedimentos
$\sigma_D, \sigma_g$	Coefficiente de graduação da curva granulométrica
$\tau_0$	Tensão tangencial
$\tau_c$	Tensão tangencial crítica
$\psi_c$	Parâmetro de Shields
$\omega$	Velocidade de queda da partícula
$\xi$	Ângulo formado entre o talude da secção transversal 2 da cavidade de erosão e a face do pilar à esquerda do pilar
$\xi'$	Ângulo formado entre o talude da secção transversal 2 da cavidade de erosão e o nível inicial da areia à esquerda do pilar
$\psi$	Ângulo formado entre o talude da secção transversal 2 da cavidade de erosão e a face do pilar à direita do pilar
$\psi'$	Ângulo formado entre o talude da secção transversal 2 da cavidade de erosão e o nível inicial da areia à direita do pilar



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento e interesse do tema

As erosões localizadas são a consequência da alteração normal do escoamento devido ao encontro com um obstáculo, provocando a remoção de sedimentos do leito, que por sua vez origina cavidades de erosão. Estas formam-se nas imediações dos obstáculos presentes nos cursos de água, tais como esporões fluviais, detritos de dimensão física considerável, encontros e pilares de pontes (Richardson e Davies, 2001). O fenómeno da erosão localizada é mais frequente em cenários de cheias e é o maior responsável pelo colapso de pontes, sendo por isso um tema bastante abordado pela comunidade científica ligada à área de engenharia (Lima, 2008).

Existe um extenso registo de acidentes em todo o mundo causados pela erosão localizada em pilares de pontes, sendo que em Portugal, o mais recente e trágico acidente ocorreu em 2001, na ponte que fazia a travessia sobre o rio Douro, entre Castelo de Paiva e Entre-os-Rios. Nos Estados Unidos da América, a partir de 1999 mais de 1000, de cerca de 600000 pontes entraram em rotura estrutural, sendo que cerca de 60% dos casos se deveram à erosão localizada (Khosronejad *et al.*, 2012).

Existem estudos publicados sobre esta problemática desde o final do século XX, sendo que alguns dos últimos estudos publicados na bibliografia da especialidade se focam em medidas de mitigação deste fenómeno. Salienta-se que, devido à elevada complexidade do fenómeno, os estudos realizados não são ainda totalmente fiáveis, requerendo uma análise multidisciplinar, reunindo conhecimentos ao nível não só da hidráulica, mas também da geotecnia e das estruturas. A previsão e controlo deste fenómeno passam pela estimativa da profundidade máxima da cavidade de erosão localizada e a sua evolução temporal. Devido à sua enorme complexidade, a análise mais frequente deste fenómeno é feita por via experimental (Simarro *et al.*, 2007). Desta forma, na bibliografia da especialidade pode encontrar-se uma vasta gama de análises experimentais que se focam sobretudo na previsão da profundidade máxima da cavidade de erosão e na sua evolução temporal, geralmente no caso de pilares de secção circular. No entanto muitos pilares de pontes têm secção transversal não circular (Richardson e Davies, 2001).

A solução para este problema passará pela utilização de medidas de mitigação, de forma minimizar os danos que a erosão localizada em pilares de pontes poderá causar. Segundo Tafarojnoruz *et al.* (2012), as medidas de mitigação para a erosão localizada podem classificar-se em duas categorias: medidas de alteração de escoamento e medidas de proteção do leito. O princípio de funcionamento das medidas de alteração de escoamento passa pela diminuição da intensidade do escoamento descendente e dos vórtices de ferradura, que são as principais causas da erosão localizada na vizinhança do pilar. Por outro lado, as medidas de proteção do leito consistem na criação de uma barreira física, como no caso de enrocamentos ou gabiões, contra a possível erosão localizada (Richardson e Davies, 2001). Os estudos realizados mostram que a alteração do padrão do escoamento apresenta baixa eficiência em termos de diminuição da máxima profundidade da cavidade de erosão (Tafarojnoruz *et al.*, 2012). Gaudio *et al.* (2012) elaboraram estudos experimentais em escoamentos sem transporte sólido, combinando algumas das medidas de alteração de escoamento, sendo que algumas destas combinações apresentaram significativas melhorias em termos de eficiência, mas serão de difícil aplicação prática.

Idealmente deveria caracterizar-se o campo de velocidade em torno do modelo do pilar, já que este tipo de informação possibilitaria, por exemplo a validação de modelos numéricos (Roulund *et al.*, 2005). Alternativamente, a visualização do escoamento possibilita a identificação de estruturas turbulentas (Hoyt e Sellin, 2001) e contribui significativamente para a compreensão deste fenómeno (Ettema *et al.* (2006), Kirkil *et al.* (2008) e Kirkil *et al.* (2009)). No entanto, estas abordagens exigem recursos experimentais complexos e dispendiosos, que não estão disponíveis no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos da Universidade do Minho. No entanto, o levantamento tridimensional da cavidade de erosão permite recolher informação relevante para a compreensão do fenómeno (Leite, 2013) e possibilita igualmente a validação de métodos numéricos (Roulund *et al.* (2005) e Khosronejad *et al.* (2012)).

Assim, e dada a atualidade deste tema pode concluir-se sobre a relevância do presente estudo experimental da erosão localizada nas imediações de pilares de pontes, selecionando pilares circulares e alongados, com e sem ranhuras, como casos de estudo.

## 1.2 Objetivos

Com a elaboração desta dissertação pretende-se estudar experimentalmente o fenómeno da erosão localizada das imediações de pilares de pontes, através da utilização de um modelo laboratorial num canal hidráulico. Para a realização deste objetivo, torna-se fundamental o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- Realização de ensaios experimentais de erosão localizada em escoamentos com superfície livre, que permitam estudar a evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão, com diferentes modelos de pilares;
- Levantamento tridimensional da topografia da cavidade de erosão utilizando moldes de vaselina e parafina. A análise destes moldes será realizada recorrendo a técnicas de levantamento tridimensionais, necessárias para a análise configuração da cavidade de erosão, procurando-se relacionar a mesma com a estrutura do escoamento;
- Realização de uma análise comparativa com o estudo de Leite (2013), de forma a inferir sobre a repetibilidade dos ensaios experimentais.

Com a realização dos objetivos mencionados, foi adotado um método experimental que possibilita não só identificar a máxima profundidade da cavidade de erosão, mas também analisar a sua evolução temporal. Este método experimental permite ainda o levantamento tridimensional da configuração da cavidade de erosão.

Deste modo, os trabalhos a realizar na presente dissertação para o cumprimento dos objetivos propostos foram divididas em quatro fases.

A primeira fase focou-se sobretudo na seleção dos parâmetros experimentais. Assim, procedeu-se à escolha dos pilares, da granulometria das areias e das condições experimentais (caudal, altura da água do escoamento e duração dos ensaios) com base na bibliografia da especialidade.

Seguidamente, procedeu-se ao início dos ensaios experimentais, com a realização de todas as tarefas inerentes à sua concretização. Nesta segunda fase foi possível identificar a máxima profundidade da cavidade de erosão, bem como a respetiva evolução temporal, para as diferentes geometrias de pilares selecionadas.

A terceira fase centrou-se no levantamento tridimensional da configuração da cavidade de erosão, recorrendo aos já mencionados moldes de parafina e vaselina, bem como à

respetiva análise. A última fase consistiu na análise dos resultados obtidos e escrita da presente dissertação.

### **1.3 Estrutura da Dissertação**

A presente dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos. O primeiro e presente capítulo diz respeito à introdução, aos objetivos a atingir, bem como à estruturação da dissertação. O segundo capítulo condensa a informação bibliográfica recolhida, proveniente de publicações anteriores sobre a erosão localizada nas imediações de pilares de pontes, que serviu de base à realização desta dissertação. O terceiro capítulo diz respeito ao método experimental utilizado. Nesse mesmo capítulo são identificados todos os equipamentos utilizados, condições experimentais adotadas e descritas as tarefas inerentes à realização dos ensaios laboratoriais. O quarto capítulo não só apresenta todos os resultados obtidos nos ensaios experimentais, mas também abrange a análise e discussão dos mesmos, incluindo análises comparativas com resultados identificados na bibliografia, de forma a inferir sobre a validade dos resultados obtidos. Nesse mesmo capítulo são também apresentadas breves conclusões sobre os resultados obtidos, tanto sobre a profundidade máxima da cavidade de erosão, como sobre a configuração da cavidade de erosão. No quinto e último capítulo apresentam-se as conclusões finais da presente dissertação, bem como breves sugestões para trabalhos futuros.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Introdução**

O presente capítulo desta dissertação apresenta uma síntese da bibliografia relevante relativa ao fenómeno da erosão localizada na proximidade de pilares de pontes. Optou-se por restringir esta revisão bibliográfica a este fenómeno, remetendo-se para bibliografia da especialidade caso o leitor sinta necessidade de aprofundar conhecimentos relativos à hidráulica de escoamentos com superfície livre (e.g., Novais Barbosa (1986)) ou ao transporte sólido (e.g., Cardoso, 1998).

### **2.2 Erosão Localizada de Pilares de Pontes**

A alteração normal do escoamento devido ao encontro com um obstáculo dá origem a cavidades de erosão localizada (Richardson e Davies, 2001). Assim, as erosões localizadas devem-se a modificações nos perfis de velocidades médias, de intensidade da turbulência e das tensões de Reynolds do escoamento.

No escoamento a montante de um obstáculo a distribuição de velocidades aumenta do fundo para a superfície livre. No encontro com o obstáculo, a velocidade tende a anular-se, designando-se este fenómeno de efeito de estagnação, que provoca um acréscimo de pressão igual a  $[U(y)^2]/2$ , em que o termo  $y$  representa a distância ao fundo e  $U$  a velocidade média de aproximação (Couto e Cardoso, 2001). O acréscimo de pressão é maior perto da superfície livre, onde a velocidade é máxima, verificando-se um aumento do nível da superfície livre a montante do obstáculo, e o aparecimento de uma superfície de enrolamento e de um escoamento descendente.

O escoamento descendente resulta na erosão da fundação do pilar imediatamente a montante. Com o aumento da erosão, dá-se o deslizamento dos taludes da cavidade de erosão, até que os mesmos atinjam o seu ângulo de repouso. A ação simultânea do escoamento descendente e do escoamento separado, que ocorre em consequência da alteração do campo de pressões, gera, no caso de pilares, o designado vórtice de ferradura, considerado como o primeiro responsável do processo de erosão localizada (Richardson e Davies, 2001).

Os vórtices de ferradura dissipam-se para jusante do pilar, desempenhando assim, um papel importante na escavação do leito, dado que arrastam o material do fundo (Couto e Cardoso, 2001). A jusante do pilar, verifica-se a existência de vórtices de esteira. Estes vórtices seguem o escoamento principal para jusante e apresentam sentidos de rotação alternadamente contrários ao longo do percurso, atuando no processo de erosão através de um efeito de sucção, quase vertical, das partículas do fundo (Couto e Cardoso, 2001). A cavidade de erosão gerada 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, que é máxima quando o processo erosivo atinge o equilíbrio. A jusante do pilar, a inclinação do talude da cavidade de erosão é menor, atingindo no entanto maiores extensões.

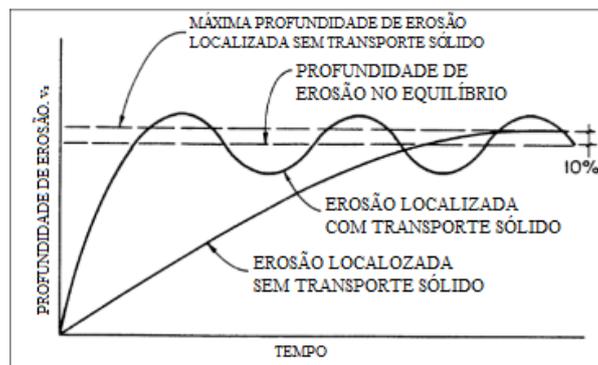
### **2.2.1 Tipos de Erosão Localizada**

Segundo Richardson e Davies (2001) e Melville e Chiew (1999), a erosão localizada é dependente do tempo e pode ocorrer sob duas condições: erosão localizada sem transporte sólido (*clean-waster scour*) e erosão localizada com transporte sólido (*live-bed scour*). Esta distinção é importante, dado que os mecanismos de desenvolvimento da cavidade de erosão são ligeiramente distintos. Passa-se a apresentar uma breve definição dos dois tipos de erosão localizada:

- Erosão localizada sem transporte sólido – Ocorre quando não existe movimento do material do fundo na zona de escoamento não perturbado, a montante do obstáculo. Nestas condições, a tensão de arrastamento no fundo é inferior ou igual à tensão crítica de arrastamento. Assim, não se verifica a reposição do material erodido, atingindo-se um valor máximo quando já não existir capacidade de remoção, sendo este valor denominado por equilíbrio estático. Estas condições são usualmente reproduzidas em modelos laboratoriais, não havendo movimento do material do leito a montante da estrutura hidráulica.
- Erosão localizada com transporte sólido – Ocorre quando se verifica a alimentação da cavidade de erosão com material proveniente de montante do leito, por arrastamento ou suspensão. Nestas condições, atinge-se um equilíbrio quando a capacidade de remoção de material é igual à capacidade de material

transportado para o seu interior, sendo este fenómeno denominado por equilíbrio dinâmico. Nesta situação, a tensão de arrastamento é superior à tensão crítica de arrastamento.

Note-se que, no primeiro caso, a profundidade da cavidade de erosão atinge o seu valor máximo para um período mais longo do que no caso de erosão localizada com transporte sólido. Verifica-se ainda, como pode observar-se da análise da figura 2.1, que a máxima profundidade da cavidade de erosão sem transporte sólido é cerca de 10% superior à máxima profundidade de equilíbrio com transporte sólido.



**Figura 2.1** Evolução da profundidade da cavidade de erosão localizada em fundos arenosos em função do tempo (adaptada de Richardson e Davies, 2001)

Para determinar a velocidade que dita o início do movimento, são usadas equações de velocidade crítica, com o diâmetro da partícula de referência ( $D$ ) igual a  $D_{50}$ . As mesmas são utilizadas como indicadores das condições de erosão localizada a que o meio está sujeito. Se a velocidade média ( $U$ ) a montante do obstáculo for menor ou igual à velocidade crítica ( $U_c$ ) do diâmetro médio ( $D_{50}$ ) do material do leito, então a erosão localizada irá ocorrer sem transporte sólido. Por outro lado, se a razão entre a velocidade tangencial (*shear velocity*) do escoamento e a velocidade de queda da partícula do leito ( $U_*/\omega$ ) de diâmetro médio ( $D_{50}$ ) for maior que 2, então a erosão localizada poderá ser igualmente classificada como sem transporte sólido. Finalmente, a erosão localizada com transporte sólido irá ocorrer se a velocidade média for maior do que a velocidade crítica do diâmetro médio do material do leito.

### 2.2.2 Análise dimensional do problema

Vários autores, tais como Gaudio *et al.* (2012), Lima (2008) ou Melville e Chiew (1999) descrevem o tempo, a intensidade de escoamento, granulometria e uniformidade dos sedimentos, a forma e tamanho dos pilares e a direção do escoamento como sendo os principais fatores que influenciam a erosão localizada.

Na realidade, o fenómeno da erosão localizada na vizinhança de pilares de pontes é influenciado por um elevado número de parâmetros que se inserem nas seguintes categorias (Couto e Cardoso, 2001):

- a) Características geométricas: diâmetro do pilar ( $D$ ), comprimento do pilar ( $L$ ), ângulo de alinhamento do pilar com o escoamento ( $\alpha$ ), coeficiente de forma do pilar ( $K_p$ ), altura de água do escoamento ( $h$ ), largura da secção transversal do canal ( $B$ ), declive do fundo do canal ( $i$ ), coeficiente de forma da secção transversal ( $K_g$ );
- b) Características cinemáticas e dinâmicas: velocidade média de aproximação ( $U$ ), perda de carga unitária do escoamento ( $J$ ) e aceleração da gravidade ( $g$ );
- c) Propriedades do fluido: viscosidade cinemática ( $\nu$ ), massa volúmica ( $\rho$ );
- d) Propriedades dos sedimentos: massa volúmica ( $\rho_s$ ), diâmetro mediano ( $D_{50}$ ) e coeficiente de graduação da curva granulométrica ( $\sigma_D$ ).

Relacionando estes parâmetros e, sendo a profundidade da cavidade de erosão designada por  $y_s$ , dever-se-á verificar a seguinte igualdade:

$$F(D, L, \alpha, K_p, h, B, i, K_g, U, J, g, \nu, \rho, \rho_s, D_{50}, \sigma_D) = 0 \quad (2.1)$$

Segundo Melville e Chiew (1999), a equação (2.1) pode ser devidamente simplificada, aplicando-se o Teorema de Vaschy-Buckingham. Assim, a profundidade máxima da cavidade de erosão varia consoante o tempo e depende da dimensão transversal do pilar em relação ao escoamento, do quociente entre a velocidade média de aproximação e a velocidade crítica, do quociente entre a altura de água do escoamento e o diâmetro do pilar, e do coeficiente de graduação da curva granulométrica dos sedimentos, chegando-se à equação (2.2) (Lima, 2008).

$$\frac{y_s(t)}{D} = F\left(\frac{U}{U_c}, \frac{h}{D}, \frac{Ut}{h}, \sigma_D\right) \quad (2.2)$$

Assim, esta equação permite a realização de estudos experimentais voltados para a determinação da profundidade máxima da cavidade de erosão localizada, tendo em conta os restantes parâmetros. Note-se que a equação (2.2) é aplicável em escoamentos completamente estabelecidos, em que  $U_c$  representa a velocidade crítica de início do movimento do material do fundo, que se obtém pela expressão (2.3):

$$U_c = \sqrt{\psi_c(s-1)gD_{50}} \quad (2.3)$$

sendo  $\psi_c$  o parâmetro de Shields, determinado a partir do diagrama de Shields,  $s$  a densidade do material do leito,  $g$  a aceleração da gravidade e  $D_{50}$  o diâmetro médio dos sedimentos.

Pelo critério baseado na velocidade média crítica (máxima velocidade média do escoamento que não provoca erosão) a velocidade crítica pode de igual modo ser calculada através da formulação de Richardson e Davies (2001) (2.4):

$$U_c = \frac{\sqrt{\psi_c \times (s-1) \times D_{50} \times h^{1/3}}}{0.041 \times D_{50}^{1/6}} \quad (2.4)$$

onde, a  $U_c$  representa a velocidade média crítica,  $\psi_c$  o coeficiente de Shields,  $s$  a densidade do material do fundo,  $h$  a altura do escoamento e  $D_{50}$  o diâmetro médio dos sedimentos. No caso do número de Froude ser inferior a 0.8, nesta equação  $\psi_c$  assume os seguintes valores: 0.047 para  $0.065 < D_{50} < 2$  mm, 0.03 para  $2 < D_{50} < 40$  mm e 0.02 para  $D_{50} > 40$  mm.

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

Existem várias fórmulas para prever a profundidade máxima da cavidade de erosão localizada. Nos Estados Unidos da América (EUA), a estimativa da profundidade máxima da cavidade de erosão localizada em solos arenosos ( $y_s$ ) é efetuada tendo em conta as Normas Americanas (Hydraulic Engineering Circular) H.E.C. 18 (Richardson e Davies, 2001), sendo a mesma calculada através da expressão (2.5).

$$\frac{y_s}{D} = 2.0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times \left(\frac{h}{D}\right)^{0.35} \times Fr^{0.43} \quad (2.5)$$

onde Fr representa o número de Froude do escoamento a montante do pilar, sendo determinado pela expressão (2.6):

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \times h}} \quad (2.6)$$

onde U representa a velocidade média do escoamento, g representa a aceleração da gravidade e h a altura do escoamento.

Na equação (2.5), K1 representa o fator de correção para a forma do nariz do pilar (tabela 2.1), K2 o fator de correção para o ângulo ( $\theta$ ) que a direção principal dos pilares faz com as linhas de corrente (tabela 2.2), K3 o fator de correção função da forma do leito do escoamento (tabela 2.3) e K4 o fator de correção função da dimensão do material do fundo.

**Tabela 2.1** Valores do fator de correção K1

Forma da secção do pilar	K1
Nariz quadrado	1.1
Nariz redondo	1.0
Cilindro	1.0
Nariz afiado	0.9
Grupo de cilindros	0.9

**Tabela 2.2** Valores do fator de correção, para o ângulo, K2 (expressão 2.7)

Ângulo	L/a=4	L/a=8	L/a=80
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.75	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0

Sendo K2 calculada com recurso à expressão (2.7):

$$K2 = \left( \cos\theta + \frac{L}{a} \times \sin\theta \right)^{0.65} \quad (2.7)$$

**Tabela 2.3** Fator de correção K3

Condições de Leito	Altura das dunas (m)	K3
Leito fixo	-	1.1
Leito plano com anti-dunas	-	1.1
Dunas pequenas	$3 > H \geq 0.6$	1.1
Dunas médias	$9 > H \geq 3$	1.1
Dunas grandes	$H \geq 9$	1.3

O valor de K4 é calculado com recurso às seguintes condições:

$$\begin{cases} \text{Se } D_{50} < 2\text{mm ou } D_{95} < 20\text{mm} \rightarrow K4 = 1.0 \\ \text{Se } D_{50} \geq 2\text{mm ou } D_{95} \geq 20\text{mm} \rightarrow K4 = 0.4 \times u_r^{0.15} \end{cases} \quad (2.8)$$

Na bibliografia atual sobre o tema em questão, existem muitas outras formas de calcular a profundidade máxima da cavidade de erosão. Entre muitas outras salienta-se a expressão dada por Briauld *et al.* (2003), onde a evolução temporal da profundidade de escavação ( $y_s$ ) é dada por:

$$y_s = \frac{t}{\frac{1}{\dot{y}_1} + \frac{t}{y_{s\max}}} \quad (2.9)$$

onde  $t$  representa o instante (em horas),  $y_i$  é a taxa inicial de erosão e  $y_{s_{max}}$  é a máxima profundidade da cavidade de erosão estimada por:

$$y_{s_{max}} = 0.18Re^{0.635} \quad (2.10)$$

Note-se que a expressão (2.10) é válida quer para solos coesivos, quer para solos arenosos. Na mesma expressão,  $y_{s_{max}}$  é expresso em mm e  $Re$  representa o número de Reynolds e é calculado com base no diâmetro do pilar.

Salienta-se também a fórmula sugerida por Chang *et al.* (2004), onde a profundidade máxima da cavidade de erosão é estimada com recurso à expressão (2.11):

$$\frac{y_s}{D} = K_d \times K_h \left( 3.77 \times \frac{U}{U_c} - 1.13 \right); 0.3 \leq \frac{U}{U_c} \leq 1 \quad (2.11)$$

onde  $y_s$  representa a profundidade da cavidade de erosão,  $D$  o diâmetro do pilar e  $U$  e  $U_c$  as velocidades de aproximação e crítica, respetivamente.

A presente equação (2.11) depende de alguns parâmetros, tais como o diâmetro médio dos sedimentos, diâmetro do pilar e altura de escoamento. Os parâmetros  $K_d$  e  $K_h$  presentes na mesma traduzem a influência da dimensão dos sedimentos e da altura do escoamento, respetivamente, e calculam-se recorrendo às expressões (2.12) e (2.13).

$$\left\{ \begin{array}{l} K_d = 0.398 \times \ln\left(\frac{D}{d_{50}}\right) - 0.034 \left( \ln\left(\frac{D}{d_{50}}\right) \right)^2 \text{ se } 1 \leq \frac{D}{d_{50}} \leq 50 \\ K_d = 1 \text{ se } \frac{D}{d_{50}} \geq 50 \end{array} \right. \quad (2.12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} K_h = 0.738 \times \left(\frac{h}{D}\right)^{0.322} - 0.106 \text{ se } 0 \leq \frac{h}{D} \leq 3 \\ K_h = 1 \text{ se } \frac{h}{D} \geq 3 \end{array} \right. \quad (2.13)$$

### 2.2.4 Efeito das variáveis que influenciam o processo erosivo

Para que um estudo experimental seja suficientemente representativo, torna-se fundamental analisar as e reproduzir as semelhanças entre o modelo experimental e as condições reais. Assim, torna-se necessário analisar as semelhanças geométricas, cinéticas e dinâmicas.

As semelhanças geométricas relacionam-se com a aproximação do modelo reproduzido com as condições reais em termos de forma. Deve existir uma razão fixa entre dimensões homólogas no protótipo (condições reais) e no modelo experimental.

A semelhança cinemática consiste na semelhança de movimento, isto é, existe uma razão fixa entre a velocidade das partículas homólogas, que se movimentam segundo trajetórias semelhantes em direção e sentido.

A semelhança dinâmica tem a ver com a semelhança das forças e massas que constituem o fenómeno. Para que esta semelhança exista, devem verificar-se duas condições:

- As trajetórias descritas por partículas homólogas deverão ser geometricamente semelhantes;
- As forças correspondentes deverão apresentar uma razão constante entre elas.

No fenómeno da erosão localizada existem influências quer de forças viscosas do escoamento, quer de forças gravíticas. As primeiras, bem como o número de Reynolds, estão associadas ao desprendimento de vórtices, formação de esteira e formação de vórtices em ferradura. Já as segundas predominam em escoamentos com superfície livre (Lima, 2008). Em virtude destas semelhanças serem simultaneamente inaplicáveis (Novais Barbosa, 1986), é necessário optar por apenas uma. O número de Froude é o mais utilizado como representativo do escoamento (Ettema *et al.*, 1998), especialmente na caracterização da profundidade máxima da cavidade de erosão (Lima, 2008), embora o número de Reynolds também seja importante na caracterização do escoamento. Existem ainda estudos publicados que utilizando os dois números índice (Unger e Haver, 2007).

Existem variadas referências ao número de Froude nos estudos publicados, normalmente estimado em função da altura da água do escoamento a montante do pilar (Ettema *et al.*, 1998), embora seja também possível estimar o número de Froude densimétrico, baseado no  $D_{50}$  dos sedimentos e na respetiva velocidade de atrito (Unger

e Hager, 2007). O número de Reynolds pode ser aproximado com base na secção transversal do pilar (Roulund *et al.*, 2005) ou no  $D_{50}$  (Couto e Cardoso, 2001a).

Outra das questões a ter em consideração são as condições de erosão localizada em que o modelo é elaborado. Em modelos laboratoriais, as condições sem transporte sólido são reprodutíveis, embora as condições com transporte sólido sejam de difícil reprodução e exijam canais hidráulicos expressamente construídos para o efeito. O problema coloca-se porque usualmente verifica-se que em condições reais existe transporte do material do leito do escoamento a montante da estrutura hidráulica (com transporte sólido), constituindo assim uma das maiores limitações dos métodos experimentais.

Outra questão relevante, que tem suscitado alguns problemas nas reproduções laboratoriais, refere-se à dificuldade em reproduzir experimentalmente o fenómeno da erosão localizada em solos arenosos, utilizando areia com um  $D_{50}$  suficientemente pequeno, uma vez que a escala geométrica deve ser seleccionada para que o estudo corresponda na realidade a um determinado pilar e areia, e não a um enrocamento. A solução passa pela adoção de uma semelhança parcial, com base na escala (de sedimentos ou de pilares) que se considere mais relevante. Segundo Tafarojnoruz *et al.* (2012), os ensaios laboratoriais devem ser efetuados recorrendo a sedimentos uniformes, valores de intensidade do escoamento ligeiramente menores do que a condição de limite de movimento dos sedimentos ( $0.9 \leq U/U_c \leq 1$ ).

A maior parte dos estudos experimentais publicados na bibliografia atual da especialidade (Brito *et al.*, 2011; Lima, 2008; Melville e Chiew, 1999; Graf e Istiarto, 2002; entre outros), utilizam sobretudo a profundidade máxima da cavidade de erosão localizada como parâmetro para a obtenção de dados conclusivos, embora recentemente Oliveto *et al.* (2014) analisem as dimensões das dunas formadas pela migração dos sedimentos resultantes da erosão localizada, bem como as suas implicações na evolução do fenómeno de erosão localizada a montante.

#### **2.2.4.1 Efeito da velocidade média do escoamento e do tempo**

Como já foi anteriormente mencionado, quando a velocidade média supera a velocidade crítica, dá-se a erosão. Na tabela 2.4 constam as velocidades críticas de erosão de alguns tipos de materiais, bem como os seus respetivos diâmetros usuais (Gusmão Filho, 2008).

Na realidade, a velocidade do escoamento num rio varia substancialmente, dependendo das obras hidráulicas existentes no seu desenvolvimento bem como do caudal a que o mesmo está sujeito ao longo do ano.

Facilmente se depreende da tabela 2.4 que a probabilidade de ocorrer o fenómeno erosivo é maior quando a velocidade de escoamento aumenta. Por outro lado, quando a velocidade de escoamento diminui para um valor abaixo da velocidade crítica, dá-se a sedimentação das partículas em suspensão na água.

**Tabela 2.4** Velocidade crítica de erosão (adaptada de Gusmão Filho, 2008)

Material	Diâmetro Limite (mm)	Velocidade do Início do Movimento (m/s)	Velocidade Média Correspondente (m/s)
Argila coloidal	1 $\mu$ - 2 $\mu$	1,30 – 1,80	1,70 – 2,40
Argila	2 $\mu$ - 5 $\mu$	0,85 – 1,30	1,10 – 1,70
Silte fina	5 $\mu$ - 10 $\mu$	0,65 – 0,85	0,85 – 1,10
Silte grosso	10 $\mu$ - 50 $\mu$	0,35 – 0,65	0,45 – 0,85
Areia muito fina	50 $\mu$ - 100 $\mu$	0,30 – 0,35	0,40 – 0,45
Areia fina	0,10 – 0,25	0,27 – 0,30	0,35 – 0,40
Areia média	0,25 – 0,50	0,30 – 0,35	0,40 – 0,45
Areia grossa	0,50 – 1,00	0,35 – 0,50	0,45 – 0,65
Pedregulho fino	1,00– 2,00	0,50 – 0,75	0,65 – 1,00
Pedregulho médio	2,00 – 5,00	0,75 – 1,40	1,00 – 1,90
Pedregulho grosso	5,00 – 10,0	1,40 – 2,30	1,90 – 3,10

A magnitude dos fenómenos depende da velocidade de escoamento e do tamanho das partículas em questão. Na tabela 2.5 apresentam-se alguns dos exemplos de velocidades abaixo das quais a sedimentação de inicia.

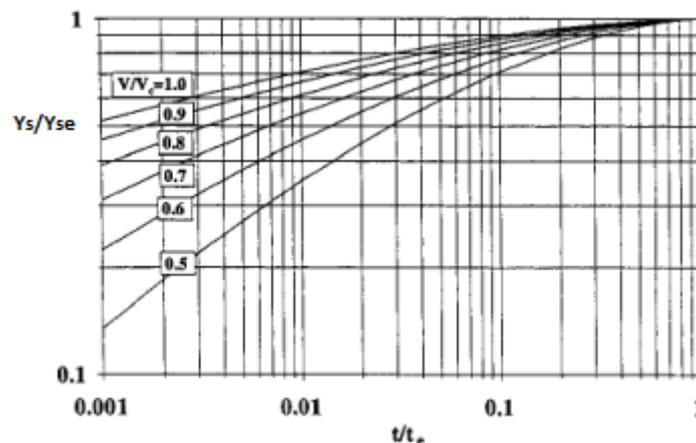
**Tabela 2.5** Velocidade abaixo da qual se dá a sedimentação (adaptada de Gusmão Filho, 2008)

Material	Velocidade (m/s)
Argila	0,080
Areia fina	0,160
Areia grossa	0,210
Pedregulho fino	0,320
Pedregulho grosso	0,650

Como já foi referido, o fenómeno de erosão localizada atinge o equilíbrio quando a quantidade de material removido da cavidade for igual à quantidade de material transportado de montante para o interior da mesma. O tempo para atingir o estado de equilíbrio depende portanto, da existência ou não de transporte sólido generalizado, que como já se referiu, é menor quando este fenómeno se verifica.

Atingir a fase equilíbrio da cavidade de erosão localizada pode demorar muito tempo, e talvez possa até nunca acontecer (Melville e Chiew, 1999). Segundo os mesmos autores, 50 % da profundidade da cavidade de erosão ( $0,5y_{se}$ ) atinge-se, dependendo do caudal, para entre 0,1% e 10% do tempo de equilíbrio ( $t_e$ ). Analogamente, 80% da profundidade da cavidade de erosão é desenvolvida com o tempo, variando de 5 a 40% do tempo de equilíbrio.

A razão entre a profundidade da cavidade de erosão e a profundidade de equilíbrio da cavidade de erosão ( $y_s/y_{se}$ ) é ilustrada na figura 2.2, para casos de condições de erosão localizada sem transporte generalizado de sedimentos.

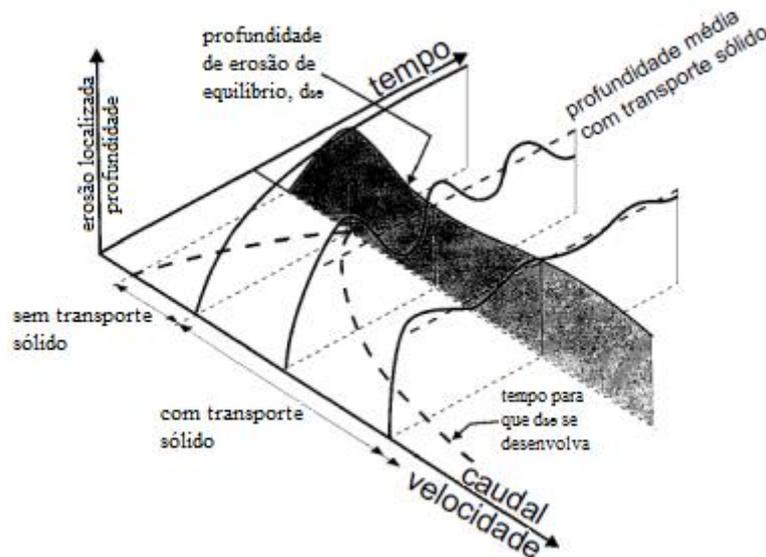
**Figura 2.2** Indicação da evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão (adaptado de Melville e Chiew, 1999)

Facilmente se depreende que a profundidade da cavidade de erosão diminui, para o mesmo valor de  $t/t_e$ , à medida que a intensidade do escoamento ( $U/U_c$ ) também diminui.

Segundo Melville e Chiew (1999), existe um equilíbrio entre a capacidade erosiva do escoamento e a resistência ao movimento dos materiais de leito, que é progressivamente alcançado.

A figura 2.3 ilustra o equilíbrio da profundidade máxima da cavidade de erosão em leitos de materiais não coesivos. Em condições sem transporte sólido, a erosão inicia-se quando  $U \leq U_c$ , já em condições com transporte sólido o processo tem início quando  $U > U_c$ . O equilíbrio da profundidade máxima da cavidade de erosão ocorre quando  $U = U_c$ .

O tempo de equilíbrio aumenta rapidamente com as velocidades do escoamento em condições sem transporte sólido, mas depois diminui em condições com transporte sólido.



**Figura 2.3.** Variação da profundidade da cavidade de erosão ao longo do tempo e velocidade do escoamento (adaptada de Melville e Chiew, 1999)

Os métodos propostos na literatura, segundo Brito *et al.* (2011), para tentar estabelecer a profundidade de equilíbrio ( $y_{se}$ ) tendo por base a evolução temporal das profundidades de erosão  $y_s(t)$  dos ensaios constitui um método baseado numa formulação de previsão do tempo de equilíbrio, estão resumidos na tabela 2.6.

Tabela 2.6 Resumo dos Critérios de paragem

Metodologia	Critério de paragem
Melville e Chiew (1999)	$y_s(t + 24h) - y_s(t) < 0.05D$
	$t_M = 30.89 \frac{D}{U} \left( \frac{U}{U_c} - 0.4 \right) \left( \frac{h}{D} \right)^{0.25}$
Fael (2007) <i>apud</i> Pinheiro (2010)	$y_s(t + 24h) - y_s(t) < 2D_{50}$

onde  $D$  representa o diâmetro do pilar,  $D_{50}$  representa o diâmetro médio do material do leito,  $U$  a velocidade média do escoamento e  $t_M$  o tempo de duração do ensaio. Note-se que as metodologias propostas visam a sua aplicação em pilares isolados.

O tempo, como já foi dito anteriormente, desempenha um papel preponderante no processo erosivo, sendo que, independentemente das condições em que a erosão localizada ocorre (com ou sem transporte sólido), é possível considerar a existência de três fases de desenvolvimento da profundidade das cavidades de erosão (Brito *et al.*, 2011):

- Fase inicial – a profundidade máxima da cavidade de erosão localizada aumenta muito rapidamente;
- Fase principal – a cavidade de erosão acentua-se em profundidade e em extensão de forma sistemática a um ritmo progressivamente descendente;
- Fase de equilíbrio – a cavidade de erosão deixa, praticamente, de evoluir.

Estas fases podem ser facilmente identificadas graficamente, representando a evolução temporal da profundidade de escavação numa escala logarítmica. As mudanças bruscas de declives correspondem às mudanças de fase (Figura 2.4).

Assim sendo, é na fase de equilíbrio que vários autores consideram obtida a designada erosão de equilíbrio. As três fases ficam facilmente identificadas, sendo que o tempo de equilíbrio ( $t_e$ ) corresponde ao início da fase de equilíbrio, que por sua vez corresponde à profundidade de equilíbrio ( $y_{se}$ ).

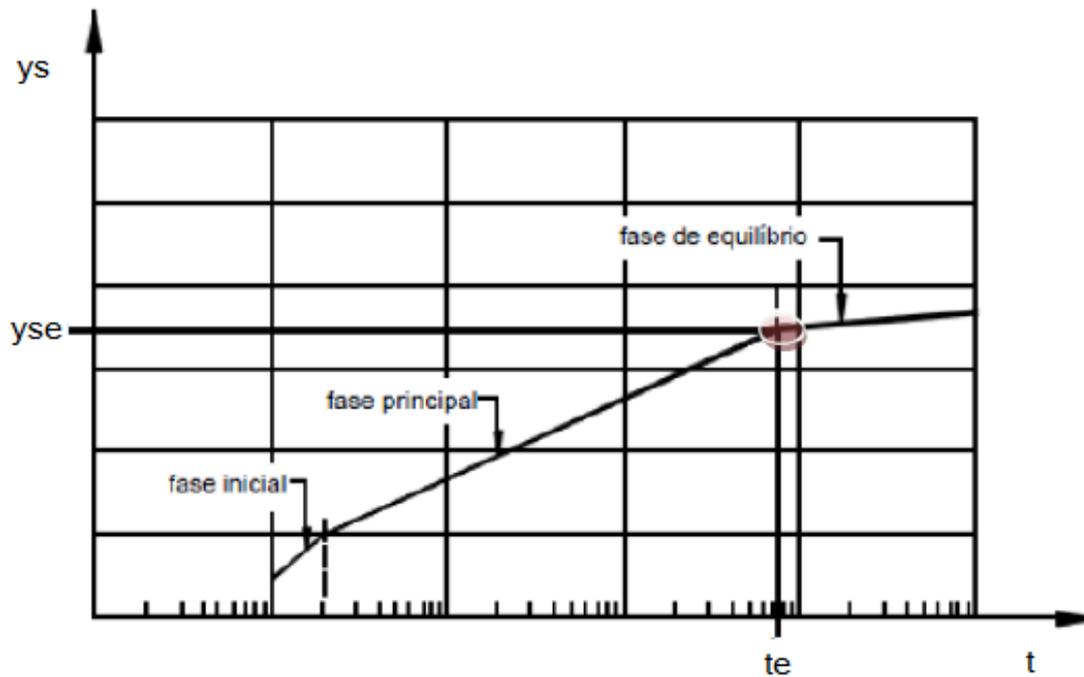


Figura 2.4 Identificação das fases do processo erosivo (adaptada de Couto e Cardoso, 2001a)

#### 2.2.4.2 Efeito da geometria do pilar

A geometria do pilar (orientação e forma) influencia diretamente a forma da cavidade de erosão que o mesmo irá originar, não apenas quanto à máxima profundidade da cavidade como também à situação dos locais de erosão e deposição de sedimentos.

Grande parte dos estudos experimentais publicados sobre o tema utilizam pilares circulares, embora configurações diferentes originem geometrias de cavidades diferentes.

Dey e Raikar (2007) efetuaram um estudo experimental, comparando cavidades de erosão localizada com pilares de secção quadrada e circular. Nas conclusões deste estudo consta que pilares quadrados geram maior turbulência no escoamento nas suas imediações, do que pilares circulares. Concluíram também que nos pilares quadrados existem maiores tensões tangenciais, levando a profundidades da cavidade de erosão igualmente superiores, inferindo-se a importância da geometria do pilar para a evolução do fenómeno da erosão localizada.

Na tabela 2.7, apresentam-se alguns fatores de forma de pilares para diferentes geometrias (Breusers e Raudkivi, 1991) *apud* (Leite, 2012).

Tabela 2.7. Coeficientes de Forma de Pilares

Forma do Pilar	$b/l$	$b'/l'$	$K_f$
Cilíndrico			1,00
Retangular	1/1		1,22
	1/3		1,08
	1/5		0,99
Retangular com as extremidades de montante semi-circulares	1/3		0,90
Retangular com as extremidades de montante semi-circulares e de jusante em dupla bisel	1/5		0,86
Retangular com os cantos chanfrados	1/4		1,01
Retangular com extremidades em dupla bisel	1/3	1/2	0,76
		1/4	0,65
Elíptico	1/2		0,83
	1/3		0,80
	1/5		0,61
Lenticular	1/2		0,80
	1/3		0,70

O efeito da orientação dos pilares em relação à direção do escoamento pode ser avaliado com base na figura 2.5. Por exemplo, a profundidade de erosão junto a pilares retangulares com  $l/b = 8$  é aproximadamente igual ao triplo para um ângulo de ataque (ângulo que o escoamento faz com a linha que define a simetria do pilar) ao pilar de  $30^\circ$ , do que para o mesmo pilar mas alinhado com o escoamento ( $\theta = 0^\circ$ ).

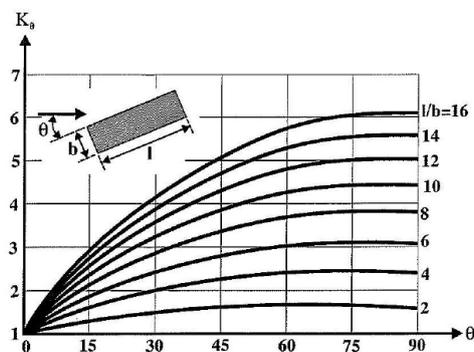


Figura 2.5 Efeito da orientação de pilares de pontes na profundidade da cavidade de erosão (adaptada de Melville e Coleman, 2000; apud Pineiro, 2010)

### 2.2.4.3 Efeito da geometria da secção transversal do escoamento

Grande parte das expressões presentes na bibliografia para o cálculo da profundidade máxima da cavidade de erosão, conduzem a resultados sobrestimados. O motivo mais citado para este acontecimento relaciona-se com o facto de, na realidade, os trechos fluviais aluvionares apresentarem secções transversais muito complexas, constituídas normalmente pelo leito principal e pelo leito de cheia, sendo que as expressões referidas foram obtidas com recurso a trabalhos experimentais realizados em canais de secção retangular. A utilização de secções suficientemente complexas, que se aproximem com maior exatidão da realidade não é habitual (Pinheiro, 2010).

Segundo Tafarojnoruz *et al.* (2012), os ensaios experimentais devem ser efetuados com relações entre a largura da secção transversal do canal e a largura do pilar não inferiores a 10 ( $B/b \geq 10$ ), de forma a diminuir a influência das paredes laterais do canal.

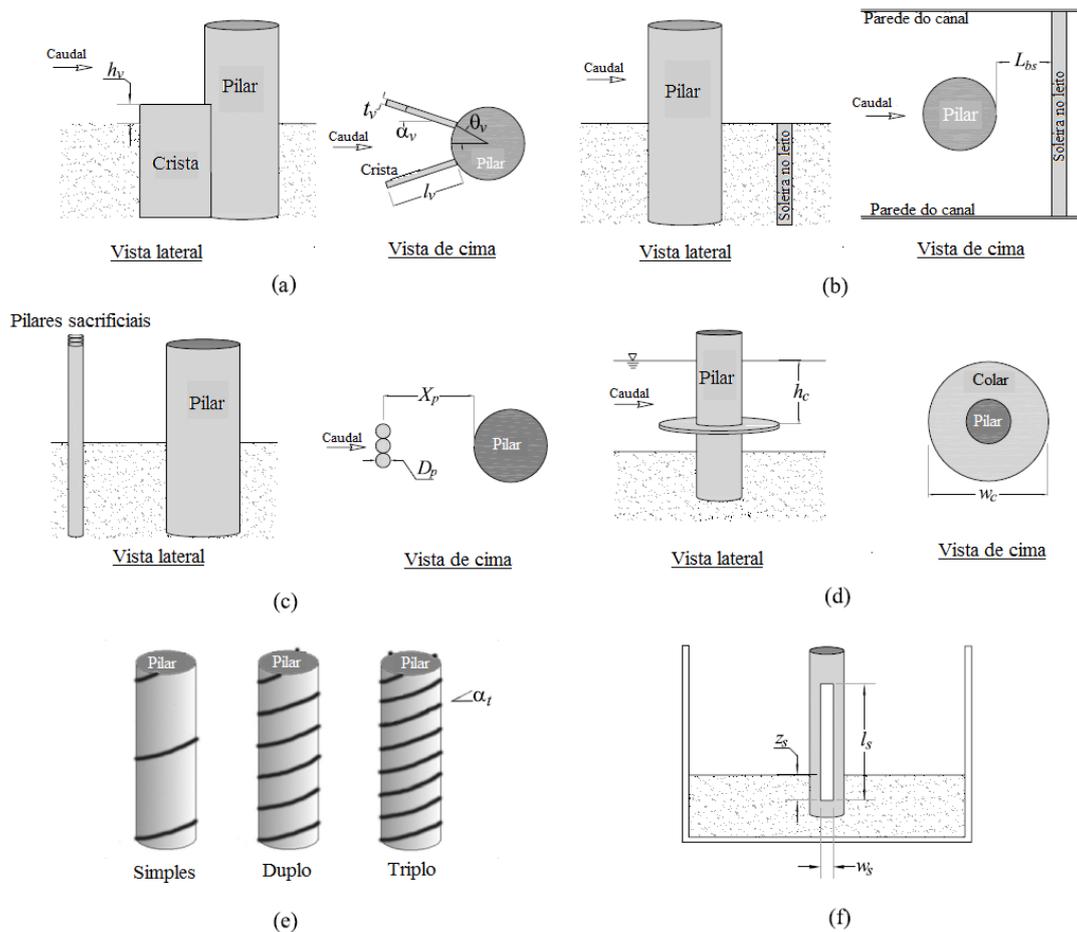
## 2.3 Medidas de Mitigação

A proteção de pilares contra a erosão localizada constitui um ponto de enorme importância na segurança das pontes, uma vez que a erosão excessiva pode comprometer a sua função estrutural, ou mesmo levar ao seu colapso. Atualmente, Gaudio *et al.* (2012) e Tafarojnoruz *et al.* (2012) mostraram que uma vasta gama de previsões sobre a erosão localizada pode ser obtida usando os vários métodos propostos na literatura. A solução passará pela utilização de medidas de mitigação, de forma minimizar os danos que a erosão localizada em pilares de pontes poderá causar.

Segundo Tafarojnoruz *et al.* (2012), as medidas de mitigação para a erosão localizada podem classificar-se em duas categorias: medidas de alteração de escoamento (*flow-altering countermeasures*) e medidas de proteção do leito (*bed-armoring countermeasures*). O princípio de funcionamento das medidas de alteração de escoamento passa pela diminuição da intensidade do escoamento descendente e dos vórtices de ferradura, que são as principais causas da erosão localizada na vizinhança do pilar. Por outro lado, as medidas de proteção do leito consistem na criação de uma barreira física (como no caso de enrocamentos, gabiões, *cable-tied blocks*, etc.) contra a possível erosão localizada.

### 2.3.1 Medidas de alteração do escoamento

Existe uma abrangente revisão de medidas de alteração de escoamento investigadas e propostas na literatura, embora algumas delas apresentem baixa eficiência no que toca à diminuição da cavidade de erosão ou possuam sérias lacunas na sua utilização prática (Tafarojnoruz *et al.*, 2012). Assim, serão apresentadas seis medidas de mitigação: (a) cristas submersas duplas, (b) soleira no leito, (c) pilares sacrificiais transversais, (d) colar circular, (e) espiral de parafuso, e (f) ranhura.



**Figura 2.6** Medidas de alteração de escoamento: (a) cristas submersas duplas, (b) soleira no leito, (c) pilares sacrificiais transversais, (d) colar circular, (e) espiral de parafuso, e (f) ranhura. (adaptada de Tafarojnoruz *et al.*, 2012)

Estas medidas foram utilizadas por Tafarojnoruz *et al.* (2012) em ensaios laboratoriais, onde o principal objetivo foi comparar a profundidade máxima da cavidade de erosão localizada no equilíbrio, com e sem as medidas de mitigação aplicadas. Basicamente, foram elaborados ensaios, com todos os parâmetros devidamente controlados, com o mesmo pilar protegido e desprotegido, podendo-se assim chegar a dados conclusivos.

Como pode depreender-se do quadro de resultados publicado no estudo, todas as medidas testadas apresentaram baixa eficiência no que toca à diminuição da profundidade da cavidade de erosão localizada ou lacunas graves em termos práticos.

Deste modo, foi concluído que apenas uma medida de mitigação utilizada isoladamente, constitui uma proteção inadequada. Fica também esclarecido que, o aumento pretendido da eficiência de algumas destas medidas dependem significativamente das condições experimentais. A elevada eficiência, embora não fiável, pode ser obtida por uma conceção inadequada dos ensaios, sobretudo na presença de baixo caudal, baixa profundidade do escoamento, curta duração do ensaio e utilização de areia refinada com desenvolvimento de formas no leito.

Assim, a maior eficiência apenas pode ser atingida quando as condições de escoamento coincidirem com aquelas para as quais a medida de mitigação foi concebida. Além de tudo o que já foi enunciado, é importante salientar que qualquer uma das medidas deve ser avaliada quanto ao seu desempenho em condições de erosão com transporte sólido, antes da sua aplicação no local, uma vez que experimentalmente estas condições não são reprodutíveis.

As conclusões dos ensaios experimentais podem ser resumidas da seguinte forma:

- As eficiências a jusante da soleira no leito, das cristas submersas duplas e da espiral de parafuso são menores que 20%. No entanto, tais medidas podem obter algumas lacunas em termos de aplicação prática;
- A elevada profundidade da cavidade à frente dos pilares sacrificiais transversais, bem como possíveis problemas nas condições de fundos vivos restringe a aplicabilidade desta medida em termos práticos;
- A realização de ensaios de curta duração ou com um caudal diminuto com o colar circular, pode resultar em altas eficiências pouco fiáveis, comparando com estudos realizados por outros autores em condições experimentais adequadas
- O comprimento e localização da ranhura para a configuração ideal não podem ser apenas baseados na profundidade do caudal de aproximação. A configuração ideal com  $w_s = b/4$  apresenta uma altura de abertura de  $l_s = h/2 + 0.7y_{se}$  e uma profundidade de submersão  $z_s = 0.7y_{se}$ , atingindo assim eficiências de aproximadamente 32%.

Como as medidas de alteração de escoamento, atuando isoladamente, não levam a significativas eficiências, Gaudio *et al.* (2012) elaboraram estudos experimentais sem

transporte sólido, combinando algumas das medidas de alteração de escoamento, nas suas configurações ideais de acordo com a literatura, obtendo resultados conclusivos.

As combinações consideradas no estudo foram: (1) cristas submersas e soleira no leito, (2) ranhura e pilares sacrificiais, (3) colar e pilares sacrificiais, (4) ranhura e colar, e (5) soleira no leito e colar.

O estudo confirma que a combinação da ranhura com o colar pode prevenir que a erosão localizada atinja o pilar e, embora esta configuração apresente a maior eficiência para a redução da erosão localizada, não é aplicável em pilares de pontes já existentes e em rios onde exista elevado transporte de detritos. Além disso, a parte do pilar abaixo do colar pode ficar exposta à passagem do material do leito durante o escoamento, diminuindo a eficiência da combinação destas medidas.

A combinação do colar com a soleira no leito, na sua melhor configuração, indicou uma moderada eficiência de 68%. Esta combinação é constituída por uma soleira no leito, um colar parcialmente cortado e uma banda. A soleira no leito previne a extensão da cavidade de erosão para montante e para baixo do colar, embora diminuindo a sua eficiência. A banda protege o colar, que sem a mesma poderia entrar em colapso, se o material do leito abaixo do colar for erodido. As outras combinações não levaram a eficiências significativas.

As conclusões deste estudo levaram também a outras considerações igualmente importantes:

- A combinação da soleira no leito com cristas submersas duplas não se demonstrou eficaz na redução da profundidade da cavidade de erosão; aumentando o comprimento da crista leva também à redução da eficiência;
- A combinação de pilares sacrificiais e colar/ranhura é menos eficiente do que cada medida individual, pelo que também não é adequada;
- Quando se combina um colar com uma ranhura, a ranhura não deverá ultrapassar a cota inicial do talvegue, uma vez que resultará na extensão da cavidade de erosão abaixo do colar;
- A combinação do colar com a soleira no leito poderá prevenir a extensão da erosão à parte de montante do colar. A extensão da erosão abaixo do colar na parte de trás da soleira no leito pode ser aumentada, movendo a soleira no leito de jusante para montante do colar, no entanto, o risco de expandir a erosão para

a frente da soleira no leito diminui. A localização ideal para a combinação da soleira no leito com o colar é a montante e adjacente ao pilar.

- Se a soleira no leito não for do tamanho do canal, pode ocorrer erosão a montante da mesma, resultando em cavidades mais profundas. Ocorre menos erosão na parte de trás da soleira no leito e conseqüentemente perto do pilar.

### 2.3.2 Medidas de Proteção do leito

Este tipo de medida consiste na proteção do leito, fazendo-se sobrepor uma camada constituída por material mais grosseiro ao leito de areia nas imediações do pilar. Dey e Raikar (2007) elaboraram estudos experimentais sem transporte sólido, que testam a eficiência deste tipo de medida. Neste estudo experimental foram testados pilares de secção transversal quadrada e circular, fundados num leito de areia coberto por uma fina camada de proteção (*armor-layer*, na bibliografia estrangeira) constituída por cascalho. Foram identificados três casos diferentes de cavidades de erosão nos pilares, dependendo da largura dos pilares, da altura do escoamento, da camada de proteção e da granulometria da areia do leito.

Através da comparação dos resultados experimentais concluiu-se que a profundidade da cavidade de erosão de pilares com uma camada de proteção das partículas à superfície, é maior do que em pilares sem proteção, para os mesmos sedimentos que constituem o leito, se a camada de proteção secundária formada dentro da cavidade de erosão estiver dispersa. Por outro lado, a situação contrária, para os mesmos sedimentos que constituem o leito, verifica-se quando a camada de proteção secundária formada dentro da cavidade for compacta.

Os três casos de desenvolvimento da cavidade de erosão são expostos da seguinte forma:

- Caso 1 – A cavidade de erosão nas imediações do pilar desenvolve-se através da camada de proteção, removendo a areia do leito que se encontra por baixo da mesma. Neste caso, a camada de proteção mantém-se intacta no perímetro da cavidade de erosão, como pode verificar-se na figura 2.7.

Note-se que nas ilustrações que se seguem,  $d_g$  é o diâmetro médio do cascalho,  $d$  é o diâmetro médio da areia,  $h$  é altura do escoamento a montante e  $d_{sa}$  é profundidade da cavidade de erosão no equilíbrio num leito protegido.

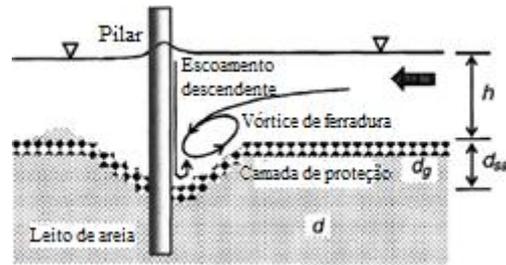


Figura 2.7 Ilustração do caso 1 (adaptada de Dey e Raikar, 2007)

- Caso 2 – A cavidade de erosão nas imediações do pilar forma-se através da camada de proteção, apresentando relativamente maior extensão a montante da mesma. A camada de proteção desintegra-se numa extensão pequena a jusante, embora permaneça intacta a montante do perímetro da cavidade, como se verifica na figura 2.8.

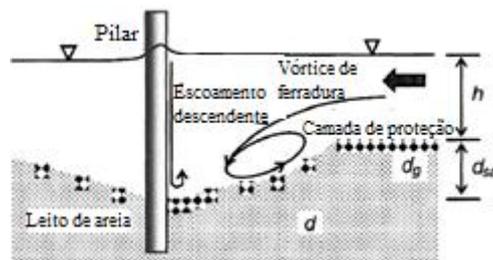


Figura 2.8 Ilustração do caso 2 (adaptada de Dey e Raikar, 2007)

- Caso 3 - A cavidade de erosão nas imediações do pilar desenvolve-se, destruindo a camada de proteção numa extensão considerável a montante do pilar. Por outro lado, verifica-se uma completa lavagem da camada de proteção a jusante. No entanto, a camada de proteção permanece intacta ao redor do perímetro da cavidade, formando um grande arco circular, tal como ilustrado na figura 2.9.

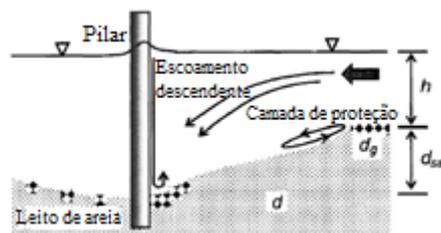


Figura 2.9 Ilustração do caso 3 (adaptada de Dey e Raikar, 2007)

O estudo publicado por Dey e Raikar (2007) obteve dados conclusivos através da comparação dos dados experimentais. Para o caso 1, a profundidade da cavidade de erosão localizada em leitos com uma camada de proteção é menor do que, nas mesmas condições, para leitos não protegidos, uma vez que a cavidade de erosão é protegida pela camada secundária constituída por cascalho. Contrariamente, no caso 3, a cavidade de erosão em leitos com proteção do que em leitos sem proteção, uma vez que, na camada secundária formada dentro da cavidade de erosão, o cascalho se encontra disperso.

## **2.4 Estudos relativos à erosão localizada de pilares de pontes**

O fenómeno da erosão localizada em pilares de pontes pode ser estudado segundo análises experimentais ou segundo simulações numéricas.

### **2.4.1 Estudos Experimentais**

Muito tem sido publicado na bibliografia da especialidade acerca de estudos experimentais realizados. Como já foi anteriormente mencionado, a maioria dos estudos experimentais focam-se sobretudo em pilares de secção circular, embora exista uma vasta gama de análises que comparam o fenómeno da erosão localizada em pilares circulares e quadrados. Existem ainda estudos experimentais com pilares complexos. Será enunciado um estudo experimental para cada uma das seguintes configurações: pilares cilíndricos, pilares alongados e pilares complexos.

#### **2.4.1.1 Pilares cilíndricos**

Um dos estudos experimentais mais relevantes em pilares de secção circular foi realizado por Melville e Chiew (1999). O presente estudo incidiu sobre a erosão localizada de pilares cilíndricos em leito de areia uniforme. As principais conclusões deste estudo foram as seguintes:

- A profundidade de equilíbrio da cavidade de erosão localizada em pilares de pontes em condições sem transporte generalizado de sedimentos pode ser traduzida assintotamente;

- As profundidades de erosão após 10% do tempo de equilíbrio variam entre cerca de 50% e 80% da profundidade de equilíbrio, dependendo da intensidade do escoamento;
- A escala temporal de equilíbrio ( $t^* = Ut_e/D$ ) para o desenvolvimento da erosão localizada num pilar de uma ponte em condições sem transporte generalizado de sedimentos, é função da intensidade do escoamento ( $U/U_c$ ), altura do escoamento ( $y/D$ ) e dimensão dos sedimentos ( $D/D_{50}$ ). A influência da intensidade do escoamento, da altura do escoamento e da dimensão dos sedimentos na escala temporal e na razão entre a profundidade de equilíbrio e o diâmetro do pilar é demonstrada, utilizando um modelo laboratorial, para serem equivalentes.

#### **2.4.1.2 Pilares alongados**

Lima e Leite (2012) efetuaram um estudo experimental da configuração das cavidades de erosão localizada originadas na proximidade de modelos de pilares de pontes com secções transversais de diferentes formas, em fundos não coesivos. Foram analisados três pilares com 4 cm de dimensão transversal e diferente desenvolvimento no sentido do escoamento: um pilar cilíndrico, e dois pilares retangulares com extremidades de montante e jusante semicirculares, de 8 e 16 cm de desenvolvimento. Os ensaios foram realizados para profundidades de água iguais a 5 e 15 cm, correspondendo a  $U/U_c = 0.9$ .

As principais conclusões do estudo experimental foram as que se seguem:

- A máxima profundidade de erosão é obtida para o pilar cilíndrico, independentemente das características do escoamento;
- A metodologia experimental adotada permitiu efetuar adequadamente a análise em modelo físico deste fenómeno;
- A cavidade de erosão a jusante do pilar é mais profunda para pilares cilíndricos, e quanto maior for o desenvolvimento do pilar, menor é o ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão a montante do pilar e a superfície livre do escoamento;

- A configuração da cavidade de erosão localizada nas imediações de pilares alongados é diferente da dos pilares cilíndricos, visto que neste se observam mais facilmente vórtices de esteira;
- A diferença de ângulos para pilares mais longos é inferior à observada para o pilar cilíndrico, uma vez que nos pilares cilíndricos o movimento do escoamento é diferente, quando comparado com pilares mais longos;
- Os ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão a montante do pilar e a superfície livre do escoamento variam entre  $28^\circ$  e  $33^\circ$ , valores próximos do ângulo de atrito de uma areia;
- A jusante do pilar o ângulo é inferior, apresentando valores entre  $18^\circ$  e  $22^\circ$ , indicação que se trata de uma região em que existe deposição de sedimentos.

#### **2.4.1.3 Pilares complexos**

No estudo experimental realizado por Brito *et al.* (2011) foram efetuados 10 ensaios com 4 estacas em linha, divididos em 2 grupos com alinhamentos de  $0^\circ$  e  $15^\circ$  com o escoamento. Nestes ensaios foram apresentados resultados consistentes:

- Nos grupos em estudo foram ensaiados 5 espaçamentos diferentes, verificando-se um ligeiro aumento da erosão máxima a medida que se alargava o espaçamento entre as estacas;
- Observou-se também que nos ensaios com  $\alpha=15^\circ$ , o terceiro pilar de montante para jusante apresentava a maior profundidade de erosão. Isto quando o expectável seria o primeiro pilar registar maior profundidade de erosão, supostamente mais exposto, tal como verificado nos ensaios cujas estacas estavam alinhadas com o escoamento;
- No caso dos ensaios onde as estacas foram dispostas paralelamente ao escoamento, verificou-se que a profundidade máxima de erosão se registava no elemento mais a montante, e era decrescente no sentido de montante para jusante, sendo o último pilar o que apresentou menor erosão;
- A equação usada para extrapolar as medições experimentais para tempo infinito demonstrou uma grande consistência em relação aos resultados, e constitui uma ferramenta fiável para estimar a profundidade de erosão de equilíbrio;

- Foram comparados os resultados experimentais com os valores de profundidade de erosão estimados por várias fórmulas, observando-se grande disparidade.
- As situações estudadas não dispunham de uma geometria clássica de um pilar complexo (pilar/maciço de encabeçamento/estacas) e assim não se aconselha o uso das metodologias em configurações idênticas às estudadas.

#### 2.4.2 Estudos Numéricos

Os estudos numéricos caracterizam-se pelo estudo do fenómeno da erosão localizada utilizando modelos hidrodinâmicos tridimensionais computadorizados (Roulund *et al.*, 2005). Normalmente, os estudos realizados com recurso a métodos numéricos são comparados e validados por métodos experimentais que, apesar das suas limitações, permitem prever, geralmente por excesso, a máxima profundidade da cavidade de erosão. Note-se que existem ainda poucos estudos numéricos sobre este assunto.

De acordo com Roulund *et al.* (2005), Hoffman e Booij (1993) aplicaram os modelos Duct Model e Sustru Model para simular o desenvolvimento da cavidade de erosão localizada. De acordo com o modelo Duct Model, as condições de escoamento estão assentes numa técnica parabólica de camadas de limitação, baseada no método dos elementos finitos. O modelo Sustru Model é utilizado para computadorizar o campo de concentração de acordo com a aproximação. No estudo mencionado, os resultados computadorizados foram ainda comparados com dados experimentais, sendo que os resultados obtidos (velocidades de escoamento, concentração de sedimentos e configurações de fundo em função do tempo) validaram o modelo computacional.

Roulund *et al.* (2005) menciona ainda outros estudos realizados sobre a matéria, salientando-se Olsen e Melaaen (1993), que simularam a erosão localizada nas imediações de um pilar circular utilizando o método SSIIM, sendo este um modelo tridimensional de transporte com superfície livre. Este modelo soluciona as tensões de Reynolds utilizando um modelo de turbulência do tipo  $k - \epsilon$ . Estes autores reportaram que existe uma concordância entre o padrão dos vórtices à frente do pilar e no modelo.

O estudo realizado por Roulund *et al.* (2005) apresenta resultados computacionais validados por resultados experimentais. Neste estudo, é utilizado um modelo hidrodinâmico tridimensional (*EllipSys3D*), incorporado com um modelo de turbulência do tipo  $k - \omega$ . O objetivo foi estudar os vórtices em ferradura e de esteira. Foram

também investigados os efeitos de três parâmetros nos vórtices em ferradura: espessura da camada limitante, número de Reynolds e a rugosidade do leito.

Note-se que, uma vez que os métodos numéricos são validados por métodos experimentais, os mesmos são passíveis de sofrer das mesmas limitações.



## 3 MÉTODO EXPERIMENTAL

### 3.1 Introdução

No presente capítulo desta dissertação pretende-se descrever as fases do procedimento experimental, bem como todos os materiais e equipamentos inerentes à sua realização.

### 3.2 Instalação Experimental

Para a realização dos ensaios experimentais foi necessária a utilização do canal hidráulico do Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, em Azurém.



**Figura 3.1** Vista longitudinal do canal hidráulico (vista de montante (a); vista de jusante (b))

O canal possui ao todo 14 metros de comprimento, dos quais 4 metros correspondem ao comprimento das secções de entrada e saída, e 10 metros correspondem a uma secção transversal com paredes de vidro de 30 cm de largura. O canal permite o transporte de um caudal máximo de  $150 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ , regulável pelo medidor de caudal, e a inclinação do canal é também ajustável, podendo a mesma variar entre  $-1/1200$  e  $1/50$ .

A alimentação do canal é feita através de três reservatórios ligados entre si, com capacidade máxima de 1000 litros cada um, permitindo a diminuição de flutuações de nível do reservatório que alimenta a bomba, com vista a manter o caudal constante.

### 3.3 Secção de teste

A secção de teste é constituída por uma caixa em acrílico, com 2 metros de comprimento e 10 cm de altura, onde é colocada a areia seleccionada para a realização dos ensaios experimentais. Note-se que estas dimensões se adequam à simulação pretendida, de forma a reproduzir o mais fielmente possível as condições reais a que o pilar fica sujeito, quando fundado num leito não coesivo. O pilar ensaiado foi sempre colocado no eixo da secção de teste, tal como indica o esquema da figura 3.2.

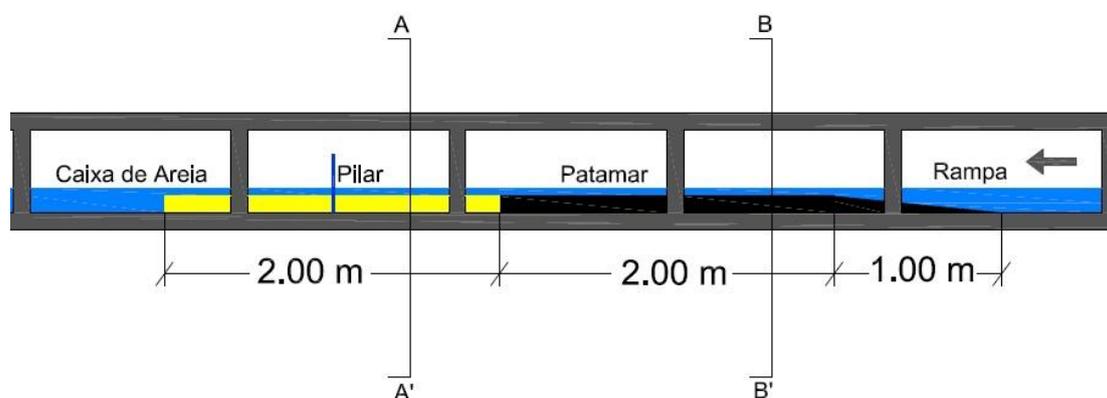
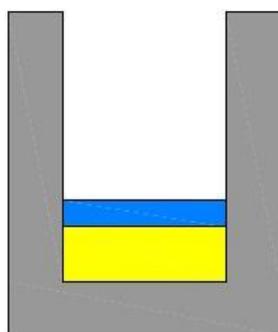


Figura 3.2 Instalação Experimental (a seta indica o sentido do escoamento)

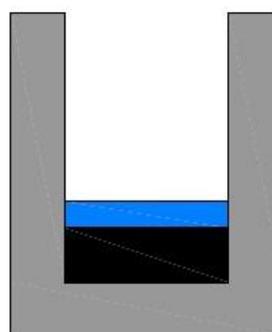
A secção de teste é precedida por um patamar e por uma rampa e com 10 cm de altura. A figura 3.3 ilustra os cortes presentes na figura 3.2.

#### Corte A-A'



Água  
Areia

#### Corte B-B'



Água  
Acrílico

Figura 3.3 Cortes da Secção de Teste

### 3.4 Parâmetros Experimentais

Nesta secção apresentam-se os parâmetros inerentes à realização dos ensaios experimentais. Estes parâmetros relacionam-se diretamente com as condições do escoamento, geometria dos pilares e dimensões do material constituinte do leito.

#### 3.4.1 Areia

Para a realização dos ensaios experimentais foram utilizadas duas areias com características diferentes. A primeira série de ensaios foi realizada com o intuito de estudar a repetibilidade dos ensaios experimentais anteriormente realizados por Leite (2013). Assim, as areias utilizadas foram sujeitas a uma análise granulométrica realizada no Laboratório de Vias de Comunicação do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, com amostras previamente secas em estufa. A areia utilizada no estudo de Leite (2013) foi sujeita a uma análise granulométrica antes da realização dos ensaios laboratoriais, que se apresenta na figura 3.4.

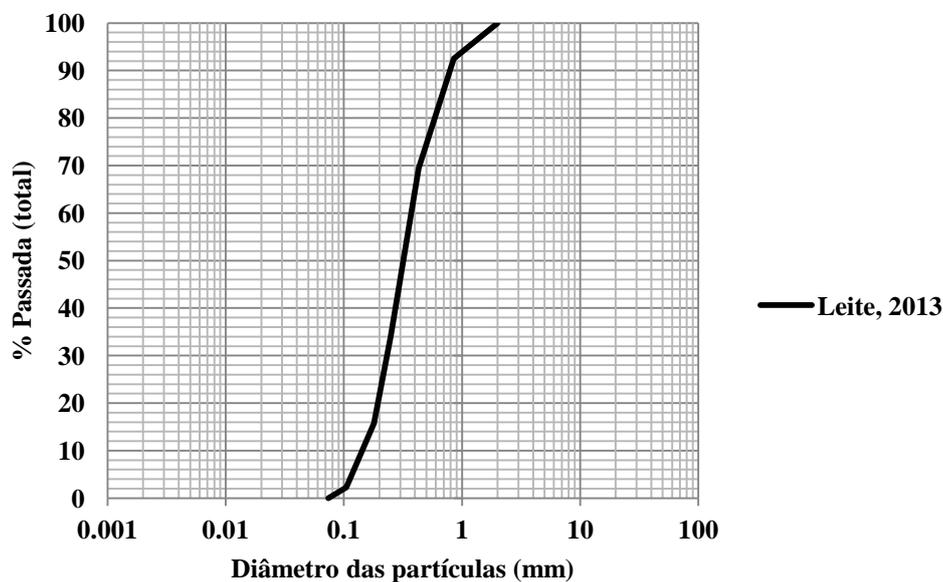


Figura 3.4 Curva Granulométrica da areia utilizada no estudo de Leite (2013)

A areia utilizada no presente estudo, na primeira série de ensaios, foi exatamente a mesma do que Leite (2013), uma vez que o objetivo será estudar a repetibilidade dos ensaios laboratoriais. A presente análise granulométrica foi, naturalmente, efetuada após

a realização dos ensaios de Leite (2013), e revelou algumas diferenças, embora pouco significativas. Apresenta-se na figura 3.5 a análise granulométrica efetuada à mesma areia, antes do início da primeira série de ensaios laboratoriais do presente estudo.

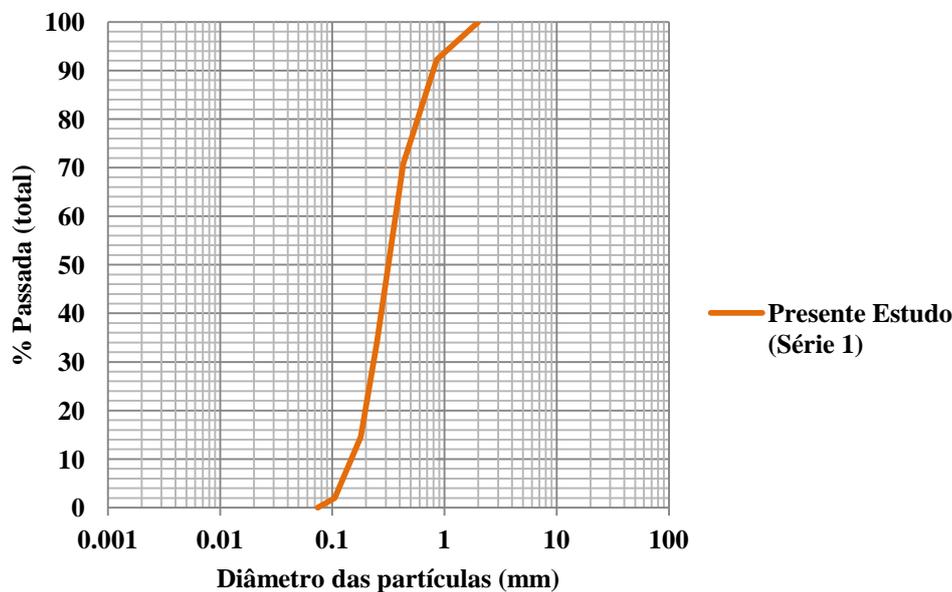
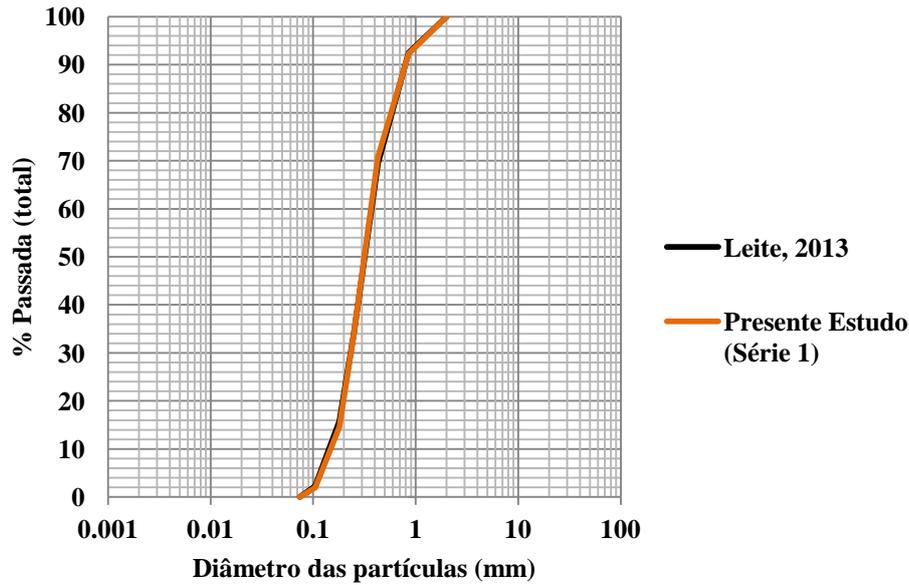


Figura 3.5 Curva Granulométrica da areia utilizada no presente estudo (1ª Série)

A análise comparativa foi efetuada sobrepondo as duas curvas granulométricas e, como se pode observar pela figura 3.6, existem de facto, algumas diferenças. Estas diferenças serão certamente devidas aos ensaios realizados por Leite (2013), uma vez que a areia foi sujeita, por numerosas vezes, a um determinado escoamento, o que originou a movimentação das partículas, e que poderá ter originado a redução das dimensões dos grãos de areia por erosão.

Apresenta-se na tabela 3.1 os valores que originaram as curvas granulométricas anteriormente discriminadas, bem como os valores correspondentes dos diâmetros médios ( $D_{50}$ ) e dos coeficientes de graduação das curvas granulométricas ( $\sigma_D$ ).

Para a segunda série de ensaios, foi utilizada uma areia com o mesmo  $D_{50}$  da primeira série de ensaios, mas procurou-se utilizar uma areia o mais uniforme possível ( $\sigma_D < 1.4$ ) (Dey e Raikar, 2007), de forma a poder concluir sobre o impacto desta alteração nos resultados obtidos. Note-se que, a maioria dos estudos presentes na bibliografia da especialidade utilizam granulometrias pouco extensas para os sedimentos, evitando a ocorrência do efeito de encouraçamento, que torna mais complexa a análise e validação dos resultados obtidos (Leite, 2010).



**Figura 3.6** Análise comparativa das curvas granulométricas das areias utilizadas no presente estudo (1ª série) e no estudo de Leite (2013)

**Tabela 3.1** Análise granulométrica das areias utilizada no presente estudo (Série 1) e no estudo de Leite (2013)

Leite, 2013				Presente Estudo (1ª Série)			
% Passados	Diâmetro das Partículas (mm)	$\sigma_D$	$D_{50}$ (mm)	% Passados	Diâmetro das Partículas (mm)	$\sigma_D$	$D_{50}$ (mm)
0	0.074	1.94	0.332	0	0.074	1.94	0.328
2.27	0.105			1.95	0.105		
15.76	0.18			14.57	0.18		
34.08	0.25			33.98	0.25		
69.49	0.43			70.77	0.43		
92.49	0.85			92.24	0.85		
100	2			100	2		

Como pode facilmente deprender-se pelos dados da tabela, verificou-se uma diminuição da percentagem passada nos peneiros com menores diâmetros e consequentemente uma ligeira diminuição do diâmetro médio.

Desta forma, foi feito um estudo iterativo com aproximações sucessivas, que resultou na granulometria que se pretendia para a segunda série de ensaios. Este estudo levou a concluir que ter-se-ia que separar manualmente a areia da primeira série de ensaios por retidos em cada peneiro, calculando-se o peso que deveria ser acrescentado ou retirado em cada peneiro, de forma a atingir os valores de  $\sigma_D$  e  $D_{50}$  desejados para a segunda

série de ensaios. Após a separação manual e cuidadosa da areia da primeira série de ensaios por material retido em cada um dos peneiros, procedeu-se à sua pesagem.

O estudo das alterações que deveriam ser aplicadas à areia da primeira série de ensaios, de forma a atingir o  $\sigma_D$  desejado apresenta-se na tabela 3.2. Apresentam-se também na figura 3.7 as curvas granulométricas das areias da primeira e segunda série de ensaios.

**Tabela 3.2** Estudo realizado sobre as alterações a aplicar à areia da 1ª Série de ensaios experimentais

Peneiro N°	Diâmetro das partículas (mm)	Retidos simples (%)		Retidos simples (kg)		Diferença (kg)
		1ª Série	2ª Série	1ª Série	2ª Série	
200	0.074	1.77	0.4	1.64	0.37	-1.27
140	0.105	12.62	0.5	11.66	0.46	-11.19
80	0.18	19.41	14.1	17.93	13.02	-4.90
60	0.25	36.79	80.38	33.98	74.24	40.26
40	0.43	21.47	4.42	19.83	4.08	-15.75
20	0.85	7.76	0.2	7.17	0.18	-6.98
10	2	0	0	0.00	0.00	0.00

Como pode verificar-se da análise da tabela 3.2, apenas no peneiro n° 60 foi necessário acrescentar material, sendo que foi necessário peneirar manualmente outra areia, que primeiro foi passada no peneiro n° 40 (de forma a excluir o material mais grosso e indesejável) e posteriormente passada pelo peneiro n° 60, para atingir a massa (40.26 kg) necessária. Concluída a fase de separação, foi necessário juntar todo o material, recorrendo a um bidão arredondado, com capacidade de 500 litros, fazendo-o deslizar pelo chão várias vezes, para que a mistura fosse o mais uniforme possível.

Assim sendo, como pode deprender-se pela análise da figura 3.7, o diâmetro médio não sofreu qualquer alteração, embora o coeficiente de graduação da curva granulométrica tenha sofrido uma drástica diminuição, como se pode verificar na tabela 3.3. Desta forma foi possível realizar ensaios com uma areia uniforme (2ª série) e igual diâmetro médio, o que possibilita a comparação dos resultados experimentais obtidos.

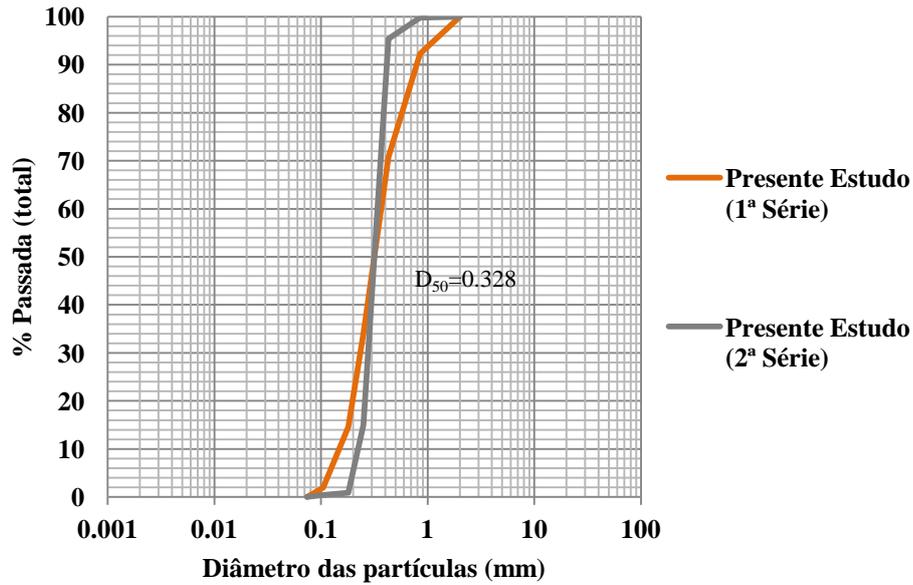


Figura 3.7 Curvas Granulométricas das areias utilizadas no presente estudo (Série 1 e 2)

Tabela 3.3 Características das areias utilizadas no presente estudo (1ª e 2ª Séries)

1ª Série				
D <sub>16</sub> (mm)	D <sub>84</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	$\sigma_D$	D <sub>g</sub> (mm)
0.185	0.689	0.328	1.936	0.357
2ª Série				
D <sub>16</sub> (mm)	D <sub>84</sub> (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	$\sigma_D$	D <sub>g</sub> (mm)
0.252	0.405	0.328	1.267	0.319

### 3.4.2 Configuração dos pilares

Como, numa primeira fase, o objetivo será inferir sobre a repetibilidade dos ensaios anteriormente realizados por Leite (2013), os pilares utilizados nos ensaios experimentais foram os mesmos utilizados nesse estudo. Foram utilizados quatro configurações diferentes de pilares para o presente estudo experimental: dois pilares circulares e dois pilares retangulares com faces semicirculares a montante e jusante, doravante denominados por pilares alongados.

No estudo de Leite (2013), o objetivo passou principalmente por testar a eficiência da implementação de uma medida de mitigação de alteração de escoamento, que consiste em adicionar uma ranhura (*pier slot* na bibliografia estrangeira), tanto nos pilares circulares, como nos alongados, bem como comparar esses resultados com o estudo de

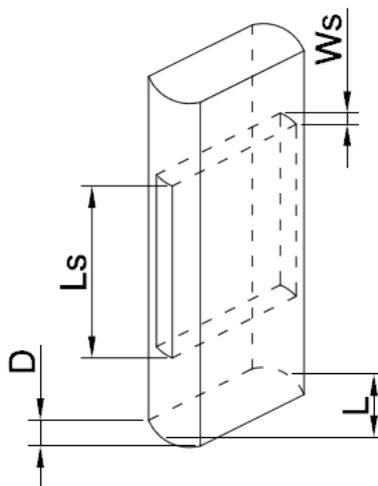
Tafarojnoruz *et al.* (2012). Os pilares sem ranhura, doravante denominados pilares simples, servem sobretudo para obter um termo de comparação, de modo a poder concluir sobre a eficiência da medida implementada.

Segundo Tafarojnoruz *et al.* (2012), a melhor configuração para a ranhura do pilar será uma largura  $w_s$  igual a  $D/4$ , uma altura  $l_s$  igual à altura de água do escoamento ( $h$ ), parcialmente enterrada a uma profundidade  $z_s$  igual a  $h/2$ , em relação ao nível inicial dos sedimentos.

Assim sendo, Leite (2013) realizou vários ensaios preliminares de forma a achar a melhor relação  $D/B$ , tendo em conta que o perímetro da cavidade de erosão não poderia atingir as paredes da secção de teste, que poderia levar a alterações significativas em termos de resultados, chegando à conclusão que  $D$  teria que ser menor ou igual a 20 mm. Deste modo, apresenta-se a tabela 3.4 que discrimina as dimensões dos pilares utilizados nos presentes ensaios laboratoriais, bem como a figura 3.8 que ilustra a correspondência da nomenclatura utilizada.

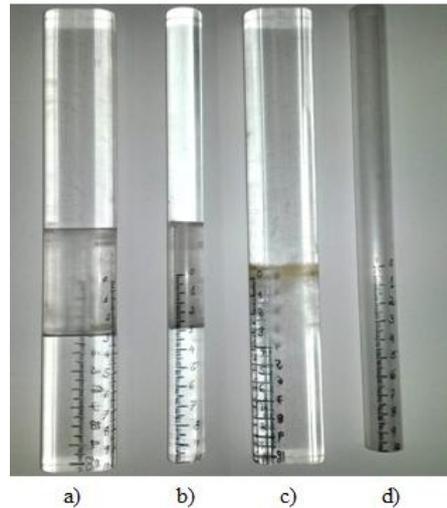
**Tabela 3.4** Dimensões dos pilares utilizados no presente estudo

Pilar	D (mm)	L (mm)	$L_s$ (mm)	$Z_s=h/2$ (mm)	$W_s=D/4$ (mm)
Circular Simples	20	20	-	-	-
Alongado Simples	20	40	-	-	-
Circular com Ranhura	20	20	50	25	5
Alongado com Ranhura	20	40	50	25	5



**Figura 3.8** Nomenclatura utilizada para as dimensões dos pilares (caso do pilar alongado)

Apresentam-se na figura 3.9 os pilares ensaiados, concebidos em acrílico para o efeito. Como se pode observar, os pilares alongados têm duas réguas desenhadas, de forma a minimizar-se os erros nas leituras. Ainda assim, a régua a considerar para efeitos de medição é a régua desenhada no ponto imediatamente a montante do pilar, sendo esta a zona onde será de se esperar a ocorrência da máxima profundidade da cavidade de erosão.



**Figura 3.9.** Pilares em acrílico, utilizados nos ensaios experimentais (pilar alongado com ranhura (a); pilar circular com ranhura (b); pilar alongado simples (c); pilar circular simples (d))

### 3.4.3 Condições Experimentais

Foram executados ao todo oito ensaios experimentais, divididos em duas séries. Inicialmente foram realizados quatro ensaios experimentais com os quatro pilares, com uma areia com um coeficiente de gradação da curva granulométrica de 1.94, correspondente à primeira série de ensaios, e posteriormente foram ensaiados novamente os quatro pilares, com uma areia com o coeficiente de gradação da curva granulométrica de 1.27, correspondendo à segunda série de ensaios. Como um dos objetivos passa por efetuar uma análise comparativa entre a primeira e a segunda série de ensaios, o único parâmetro alterado, será aquele que se pretende avaliar, ou seja, o coeficiente de gradação da curva granulométrica, sendo que todos os restantes parâmetros se mantiveram inalterados da primeira para a segunda série de ensaios.

Assim sendo, foi selecionada uma altura da água do escoamento igual a 5 cm, de maneira a evitar a ocorrência de escoamentos pouco profundos ( $h/D \geq 2.5$ ) e o aparecimento de escoamentos secundários ( $B/h \geq 5$ ) (Tafarajnoruz *et al.*, 2012).

A razão de velocidades, quociente entre a velocidade média de aproximação do escoamento e a velocidade crítica ( $U/U_c$ ) foi definida como sendo igual a 0.9. O valor da velocidade crítica foi determinado através da equação (2.4), valor que foi igualmente verificado experimentalmente. Para o efeito, a areia foi colocada no canal devidamente nivelada e, estabelecendo a altura da água pretendida, foi-se aumentado gradual e lentamente o caudal, até se observar o início do movimento das partículas do leito, tendo-se identificado uma velocidade crítica igual a  $0.27 \text{ ms}^{-1}$ . Desta forma, apresenta-se de seguida a tabela 3.5 que contempla todos os parâmetros utilizados nas duas séries de ensaios experimentais.

**Tabela 3.5** Condições Experimentais

Série	$\psi_s$	s	$D_{50}$ (mm)	$\sigma_D$	h (m)	$U_c$ (m/s)	U (m/s)	Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Q ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Fr	Re
1 <sup>a</sup>	0.047	2.44	0.328	1.94	0.05	0.27	0.24	0.0036	12.96	0.342	9169
2 <sup>a</sup>				1.27							

### 3.5 Procedimento Experimental

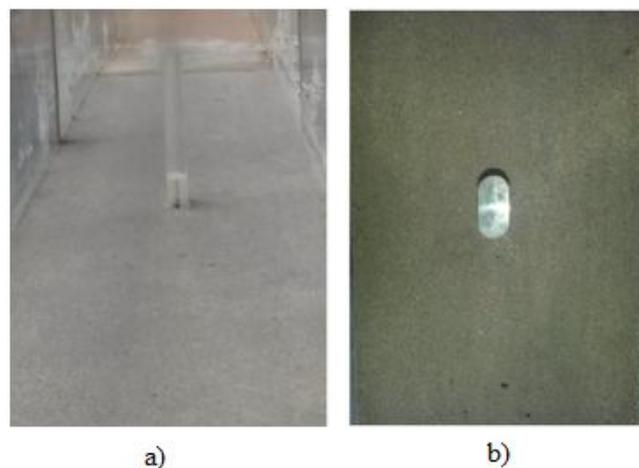
Nesta secção passa-se a descrever o procedimento utilizado em todos os ensaios experimentais. Este procedimento foi cuidadosamente repetido em todos os ensaios realizados na presente dissertação, salientando-se a importância do rigor empregue na realização de todas as tarefas de forma a minimizar a incerteza dos resultados obtidos.

#### 3.5.1 Preparação

A fase de preparação consiste sobretudo no nivelamento da areia e na colocação do pilar que se pretende analisar. Primeiramente, foi sempre necessário que a areia não estivesse demasiado molhada, uma vez que se tornava difícil de manusear. Após a secagem parcial da areia, permitindo assim que pudesse ser moldada à geometria do canal, procedeu-se ao seu nivelamento na secção de teste, recorrendo a uma régua

longitudinal, com 4 metros de comprimento. Fez-se deslizar a régua por cima da areia, removendo o excesso com uma pá. Posteriormente, fez-se deslizar um bloco de espuma de poliuretano de pequenas dimensões, com o intuito de alisar a areia e tapar eventuais imperfeições, bem como remover o excesso de areia. Todas estas etapas eram executadas com o maior rigor possível, de forma a não criar cavidades indesejáveis, que poderiam alterar a fidedignidade dos resultados.

De seguida, o pilar que se desejava ensaiar, era colocado no eixo da secção de teste, removendo a areia do local onde se pretendia colocar o pilar. Após a colocação do pilar devidamente centrado, a areia era aplicada novamente em torno do pilar e voltava-se a nivelar a areia tal como acima descrito, recorrendo a uma quantidade reduzida de água, de forma a preencher os vazios originados pela remoção da areia no local do pilar. O resultado final da fase de preparação é ilustrado pela figura 3.10.



**Figura 3.10** Resultado final da fase de preparação (Vista de jusante (a) Vista de cima (b))

### 3.5.2 Execução

A fase de execução contempla, não só o início do ensaio, mas também a medição da profundidade máxima da cavidade de erosão e o levantamento do molde da mesma.

#### 3.5.2.1 Início do ensaio

A fase de execução tem início com o enchimento do canal. Nesta fase, é necessária especial atenção, de modo a não se produzirem cavidades indesejáveis antes que as condições do escoamento atinjam os valores pretendidos. Assim sendo, o enchimento

do canal até à altura de água pretendida é feito recorrendo à bomba centrífuga incorporada no canal, funcionando em simultâneo com outra bomba a descarregar a jusante da secção de teste, para que o escoamento proveniente da bomba de jusante contrarie o efeito da bomba do canal (a montante), minimizando as perturbações do escoamento em redor do pilar, e assim evitando o aparecimento precoce da cavidade de erosão localizada. Após se ter atingido a altura de água pretendida, o caudal era aumentado lenta e gradualmente até ao valor desejado, sendo a bomba de jusante retirada. A altura de água pretendida era mantida por um descarregador localizado na secção de jusante do canal, tendo assim início o ensaio experimental.

### 3.5.2.2 Evolução da profundidade máxima da cavidade de erosão

A profundidade máxima da cavidade de erosão foi medida em intervalos de tempo gradualmente mais espaçados, tendo em conta que a profundidade evolui mais rapidamente na fase inicial do processo erosivo. Esta medição foi efetuada recorrendo a uma régua milimétrica desenhada a caneta de acetato no próprio pilar, no ponto imediatamente a montante do mesmo, onde se espera que a profundidade atinja o seu valor máximo. Na figura 3.11 apresenta-se a régua desenhada em todos os pilares, na linha de montante dos mesmos.



**Figura 3.11** Régua milimétrica desenhada no pilar circular simples

Certamente que este método não é tão preciso como se gostaria, mas em trabalhos anteriores (Leite, 2010), foi utilizada uma vara vertical ligada a uma régua graduada, que alterava a estrutura do escoamento na vizinhança do pilar, podendo alterar não só a configuração da cavidade de erosão, mas também a profundidade máxima da mesma.

Dado o método de medição da profundidade máxima da cavidade de erosão ser pouco preciso, apenas se consideraram os critérios de Melville e Chiew (1999), apresentados na tabela 2.6, para determinar o término de cada ensaio. O critério de Fael (2007) seria de difícil implementação porque a máxima profundidade de erosão era determinada com uma régua graduada em mm. Cumpridos estes critérios, assumiu-se que a profundidade máxima da cavidade de erosão atingia a fase de equilíbrio, dando-se por terminado o ensaio, sendo o canal esvaziado.

Sendo que os critérios de paragem dependem apenas de parâmetros que são comuns a todos os ensaios experimentais (diâmetro do pilar, diâmetro médio dos sedimentos do leito, velocidade média de aproximação, velocidade crítica e altura da água do escoamento), implicará que o critério de paragem se aplica a todos os ensaios experimentais realizados. Assim, a tabela 3.6 apresenta os valores calculados para todos os critérios de paragem.

**Tabela 3.6** Resumo dos resultados obtidos para o cálculo dos critérios de paragem

ENSAIOS	PILAR	Critério de Paragem		
		Melville e Chiew (1999)		
		$y_s(t + 24h) - y_s(t)$	$t_M$	$t_M$
		mm	dias	minutos
1 <sup>a</sup> e 2 <sup>a</sup> SÉRIES	Circular	1	1.62	2330.53
	Circular com ranhura			
	Alongado			
	Alongado com ranhura			

A duração total dos ensaios foi sempre inferior a  $t_M = 1.62$  dias, tendo-se optado por terminar o ensaio quando ao fim de um dia a quando a profundidade de erosão se mantinha inferior a 1mm, cumprindo assim os critérios de Melville e Chiew (1999).

Para uma correta análise dos resultados obtidos, a evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão é dada pela expressão (2.2), embora para os valores

constantes:  $U/U_c = 0.9$ ,  $h/D = 2.5$  e  $\sigma_D = 1.94$ , ou  $\sigma_D = 1.27$  (respetivamente para a primeira e segunda série de ensaios) se obtenha a expressão (3.1).

$$\frac{y_s(t)}{D} = F\left(\frac{Ut}{D}\right) \quad (3.1)$$

### 3.5.2.3 Levantamento tridimensional dos moldes

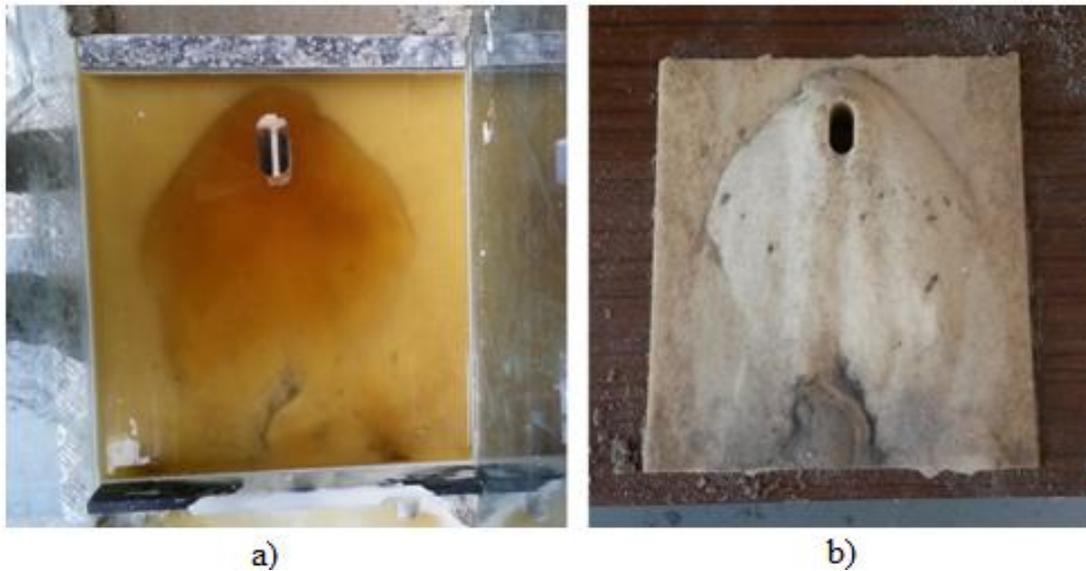
Após finalizado cada ensaio, foi feito o levantamento tridimensional do molde da cavidade de erosão. Este molde era feito de uma de uma mistura de parafina e vaselina, de forma a obter-se a topografia da cavidade de erosão, permitindo identificar as zonas de escavação e depósito de sedimentos. A mistura era despejada dentro da cavidade de erosão localizada recorrendo a uma cofragem colocada na secção pretendida, tal como se pode observar na figura 3.12, deixando-se secar cerca de duas horas.



**Figura 3.12** Levantamento tridimensional do molde (Colocação da cofragem (a); Enchimento da cavidade de erosão com vaselina e parafina (b))

O resultado final do levantamento tridimensional do molde da cavidade de erosão pode observar-se na figura 3.13.

Note-se que, esta mistura não poderia ser despejada dentro da cavidade sem que a areia secasse de forma a obter alguma consistência, caso contrário estar-se-ia a impor alterações na topografia da cavidade.



**Figura 3.13** Resultado do levantamento tridimensional do molde da cavidade de erosão (Antes da secagem (a); Após a secagem (b))

Importa também mencionar que a mistura era anteriormente aquecida em estufa, o que obriga a muito cuidado no seu manuseamento.

### 3.5.3 Digitalização dos moldes

Todos os moldes resultantes dos oito ensaios foram digitalizados em três dimensões, recorrendo à *Roland's 3D Laser Scanner LPX-600*, propriedade do Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho, que se apresenta na figura 3.14.



**Figura 3.14** *Roland's 3D Laser Scanner LPX-600*

Este equipamento está restringido a uma dimensão máxima de 406.4 mm x 254.1 mm e tem um incremento de leitura entre 0.2 mm e 20 mm. O incremento utilizado na

presente dissertação foi de 0.8 mm. A utilização de um incremento menor não permitia tratar os ficheiros quando importados para o programa informático, por excederem a dimensão máxima de armazenamento do *software*. Devido à restrição das dimensões máximas do equipamento, os moldes tiveram de ser cortados de acordo, salvaguardando-se a região mais próxima do pilar.

Note-se que, os moldes foram inseridos no *scanner* posicionados num suporte, de forma a manter o molde totalmente na vertical como mostra a figura 3.15. Só esta posição é que permite a correta determinação das coordenadas dos pontos da superfície dos moldes.



Figura 3.15 Suporte utilizado para a digitalização dos moldes

A exportação dos moldes foi feita em formato .txt que posteriormente foi importado no *software* ZW-CAD com o aplicativo DTC-PRO, que se apresenta na figura 3.16.

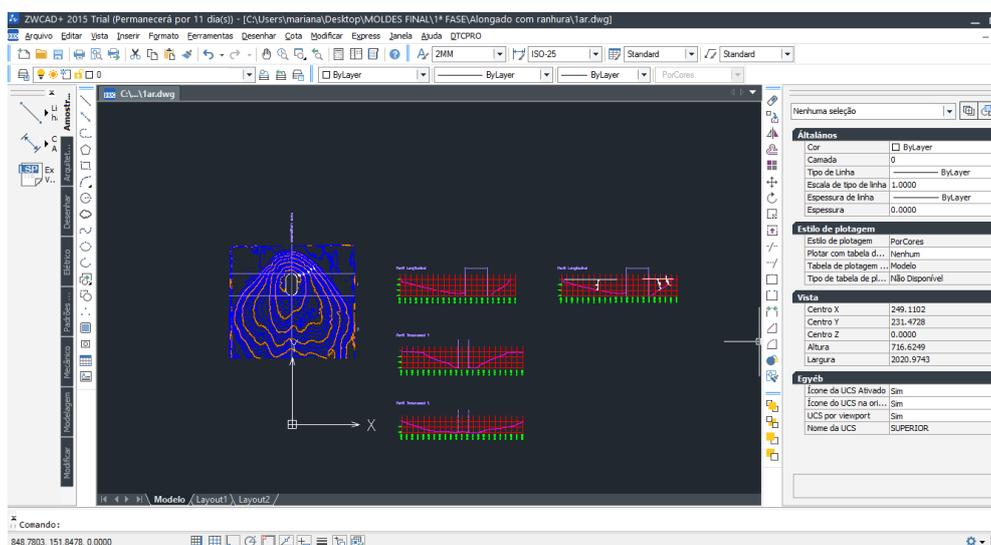
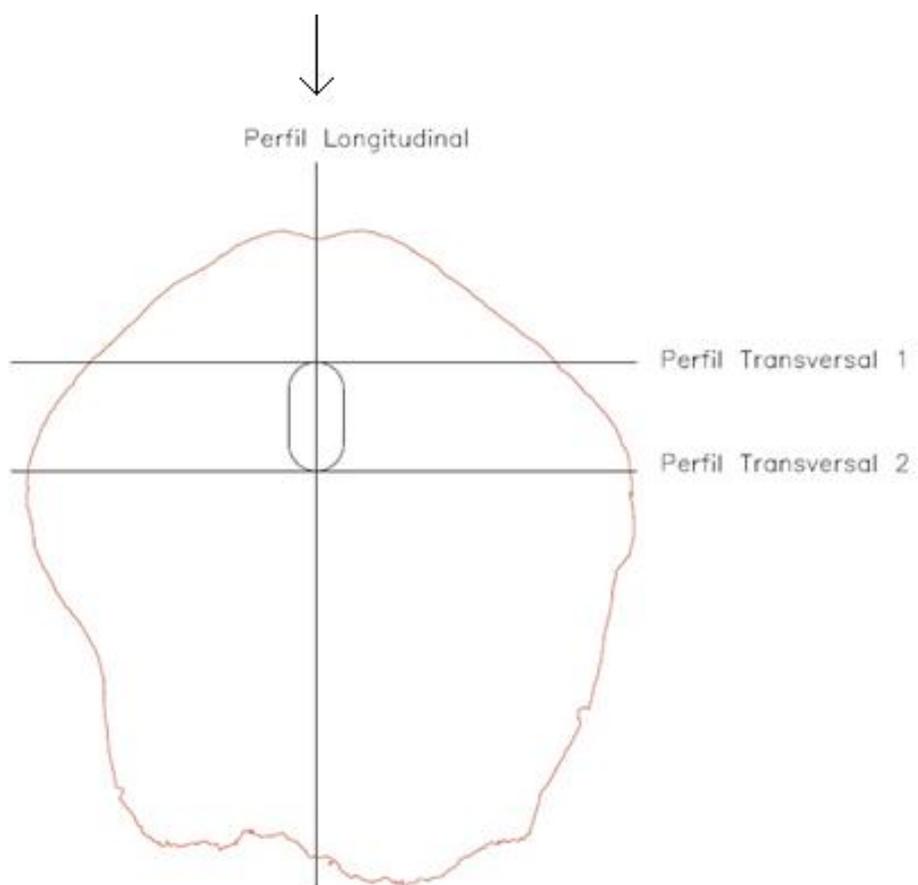


Figura 3.16 Software ZW-CAD com o aplicativo DTC-PRO

Este programa permite elaborar curvas de nível sobre o molde resultante de cada ensaio, bem como a execução de cortes longitudinais e transversais. É de salientar que com a sucessão de tarefas a executar, desde o final do ensaio até ao tratamento dos dados, existem sempre erros associados que se tentou minimizar. Tal como já foi mencionado, o canal é esvaziado e a areia tem que secar parcialmente para que se possa encher a cavidade com a mistura líquida de vaselina e parafina, existindo desde já uma incerteza associado ao aumento do volume de vazios. De seguida, ao encher a cavidade de erosão com a mistura, o contacto da mistura líquida com o leito de areia pode também provocar algumas alterações, embora pouco significativas. O equipamento de digitalização também possui uma incerteza já anteriormente mencionada. Salienta-se que o posicionamento dos moldes no suporte para a digitalização constitui uma fase de elevada importância, sendo que o molde teve de ser cuidadosamente posicionado para que a leitura das cotas seja o mais correta possível. Será também relevante mencionar que o posicionamento dos moldes segundo os eixos x e y é de igual forma importante, para não existirem desfasamentos nas cotas. Assim, todos os moldes tiveram de ser digitalizados mais que duas vezes, de forma a poder minimizar-se os erros de leitura, verificando-se sempre a concordância com as dimensões reais dos moldes.

O equipamento de digitalização modela todos os objetos que forem introduzidos no mesmo, sendo que posteriormente era necessário apagar os pontos correspondentes ao suporte e à camada inferior do molde, que corresponde sempre a cerca de 1 cm, ficando-se apenas com a superfície correspondente à cavidade. Para a devida correção das coordenadas dos pontos constituintes da superfície pretendida foi assumido que o ponto de cota nula correspondia à extremidade do molde mais a montante do pilar, na zona em que o fundo de areia não era perturbado pela presença do pilar.

Para além das curvas de nível, apresenta-se para cada um dos moldes dois cortes transversais (perpendiculares ao sentido do escoamento), retirados nas faces do pilar a montante (1) e a jusante (2), e um corte longitudinal (paralelo ao sentido do escoamento) no eixo do pilar, tal como demonstra a figura 3.17. A seta presente na figura representa o sentido do escoamento.



**Figura 3.17** Esquemática da localização dos Perfis Transversais e Longitudinal

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo da presente dissertação pretende-se analisar os ensaios experimentais realizados relativamente à evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão, bem como à configuração da cavidade de erosão localizada. Serão também apresentados e discutidos os resultados obtidos, bem como retiradas algumas conclusões.

### **4.1 Ensaios Experimentais com areia não uniforme**

Na presente secção apenas se mencionarão os ensaios e respetivas análises, referentes à primeira série de ensaios, ou seja, os ensaios experimentais realizados com areia não uniforme.

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

A presente subsecção tem como objetivo a apresentação dos resultados no que toca à evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão. A mesma foi, tal como já anteriormente mencionado, medida no ponto imediatamente a montante de cada pilar.

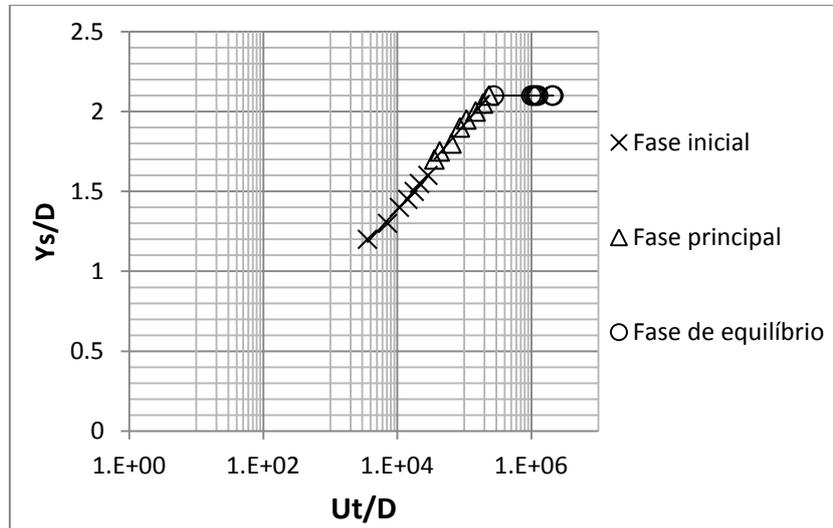
A evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão assumirá também um papel extremamente importante para que se possam definir as diferentes fases do processo erosivo. Assim, a identificação das diferentes fases do processo erosivo foi feita através de linhas de tendência. Foi gerado um sistema de tentativa e erro que engloba as três fases do processo erosivo, de modo a obter  $R^2$  aproximadamente igual a 1.

Note-se que, para determinar que a profundidade máxima da cavidade de erosão atinge a fase de equilíbrio, foram utilizados os critérios de paragem anteriormente mencionados na tabela 3.6.

Nas secções que se seguem serão apresentados os resultados obtidos relativos à primeira série de ensaios experimentais.

#### 4.1.1.1 Pilar circular simples

No caso do pilar circular apresentam-se os resultados obtidos resultantes das medições da profundidade máxima da cavidade de erosão localizada.



**Figura 4.1** Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar circular simples- 1ª Série)

Como pode depreender-se da figura 4.1, o gráfico apresenta as linhas de tendência, que na realidade representam as três fases do processo erosivo. A tabela 4.1 descreve as equações das linhas de tendência presentes no gráfico, tal como os respectivos  $R^2$ .

**Tabela 4.1** Equações das linhas de tendência (Pilar circular simples – 1ª Série)

Fase Inicial	$Y_s/D = 0.197 \ln(Ut/D) - 0.436$	$R^2 = 0.99$
Fase Principal	$Y_s/D = 0.212 \ln(Ut/D) - 0.524$	$R^2 = 0.99$
Fase Equilíbrio	$Y_s/D = 2.1$	$R^2 = 1$

Na tabela 4.2 apresenta-se o resultado das durações das fases do processo erosivo.

**Tabela 4.2** Duração das fases do processo erosivo (Pilar circular simples – 1ª Série)

	Duração (minutos)
Fase Inicial	40
Fase Principal	286
Fase Equilíbrio	2640
TOTAL	2966

#### 4.1.1.2 Pilar circular com ranhura

De igual forma, apresentam-se de seguida os resultados obtidos para o pilar circular com ranhura.

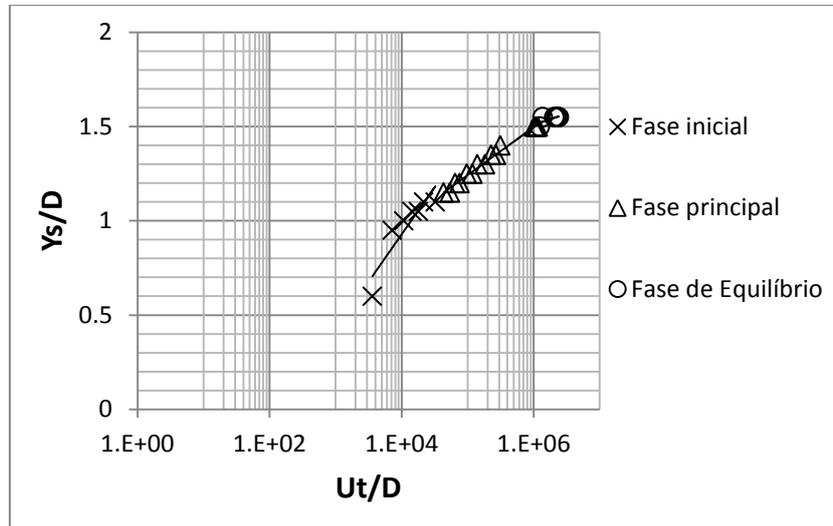


Figura 4.2 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar circular com ranhura- 1ª Série)

Tabela 4.3 Equações das linhas de tendência (Pilar circular com ranhura – 1ª Série)

Fase Inicial	$Y_s/D = 0.3363 \ln (Ut/D) - 2.5627$	$R^2 = 0.96$
Fase Principal	$Y_s/D = 0.110 \ln (Ut/D) - 0.029$	$R^2 = 0.99$
Fase Equilíbrio	$Y_s/D = 0.0501 \ln (Ut/D) + 0.8179$	$R^2 = 0.49$

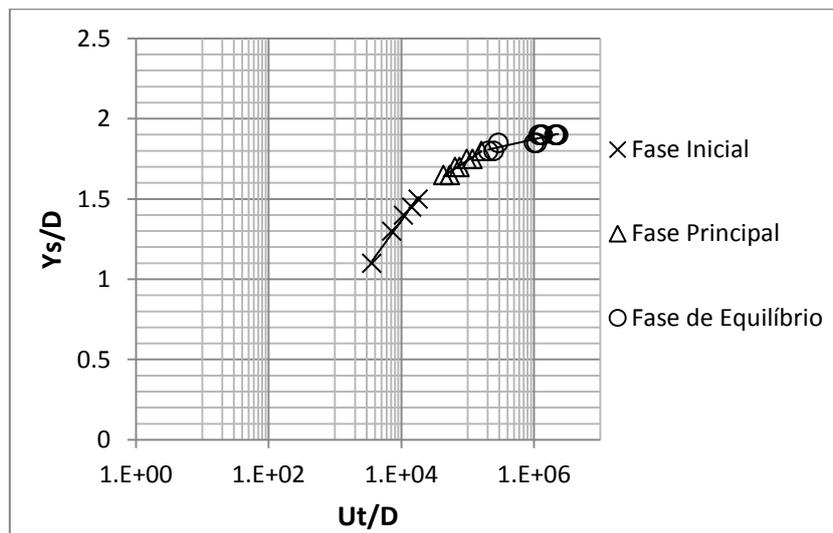
Note-se que na fase de equilíbrio, a aproximação não foi tão exata quanto se esperava, apresentando um  $R^2$  igual a 0.49, uma vez que o primeiro valor de  $Y_s/D$  da fase de equilíbrio é igual 1.5, sendo os restantes valores iguais a 1.55. Foram feitas tentativas de aproximações linear, exponencial, potencial e polinomial, sendo que, tal como seria de esperar, todas apresentaram valores menores de  $R^2$ .

Tabela 4.4 Duração das fases do processo erosivo (Pilar circular com ranhura – 1ª Série)

	Duração (minutos)
Fase Inicial	45
Fase Principal	1559
Fase Equilíbrio	1740
TOTAL	3344

### 4.1.1.3 Pilar alongado simples

De seguida apresenta-se, tal como anteriormente, a evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão relativa ao pilar alongado, bem como os dados referentes às fases do processo erosivo.



**Figura 4.3** Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar alongado simples - 1ª Série)

**Tabela 4.5** Equações das linhas de tendência (Pilar alongado simples – 1ª Série)

Fase Inicial	$Y_s/D = 0.245 \ln (Ut/D) - 0.897$	$R^2 = 0.99$
Fase Principal	$Y_s/D = 0.120 \ln (Ut/D) + 0.348$	$R^2 = 0.97$
Fase Equilíbrio	$Y_s/D = 0.040 \ln (Ut/D) + 1.315$	$R^2 = 0.81$

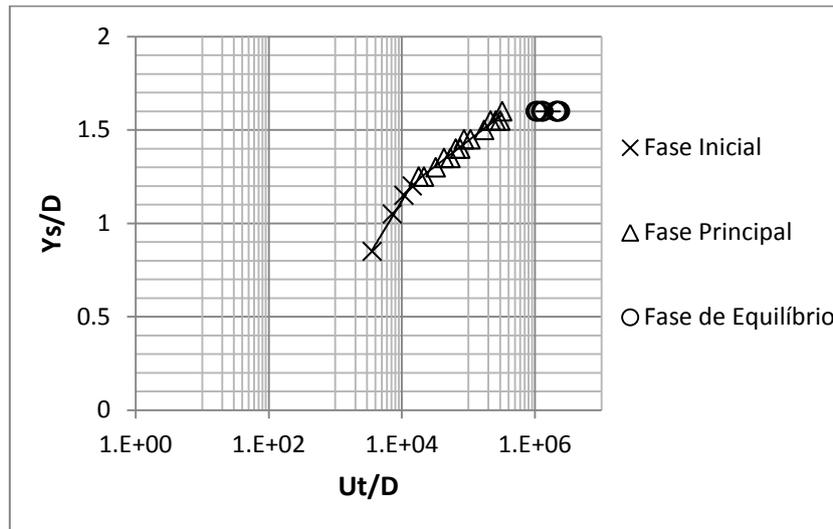
Como seria de esperar, a fase de equilíbrio apresenta um  $R^2$  um pouco inferior às restantes fases, uma vez que se verifica uma estagnação da profundidade da cavidade de erosão, sendo de esperar uma aproximação logarítmica com maior incerteza.

**Tabela 4.6** Duração das fases do processo erosivo (Pilar alongado simples – 1ª Série)

	Duração (minutos)
Fase Inicial	30
Fase Principal	195
Fase Equilíbrio	2985
TOTAL	3210

#### 4.1.1.4 Pilar alongado com ranhura

Para o pilar alongado com ranhura, passa-se a apresentar, tal como os restantes, os resultados obtidos resultantes da análise da evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão na figura 4.4, bem como as equações das linhas de tendência na tabela 4.7 e as durações das fases do processo erosivo 4.8.



**Figura 4.4** Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar alongado com ranhura - 1ª Série)

**Tabela 4.7** Equações das linhas de tendência (Pilar alongado com ranhura – 1ª Série)

Fase Inicial	$Y_s/D = 0.256 \ln (Ut/D) - 1.241$	$R^2 = 0.99$
Fase Principal	$Y_s/D = 0.119 \ln (Ut/D) + 0.070$	$R^2 = 0.98$
Fase Equilíbrio	$Y_s/D = 1.6$	$R^2 = 1$

**Tabela 4.8** Duração das fases do processo erosivo (Pilar alongado com ranhura – 1ª Série)

	Duração (minutos)
Fase Inicial	20
Fase Principal	460
Fase Equilíbrio	2820
TOTAL	3300

### **4.1.2 Configuração das cavidades de erosão localizada**

Esta subsecção da presente dissertação tem como objetivo apresentar os resultados obtidos no seguimento da análise da topografia da cavidade de erosão para cada um dos pilares ensaiados experimentalmente. Esta análise foi feita recorrendo ao tratamento dos moldes resultantes de cada um dos ensaios.

As figuras 4.5, 4.9, 4.13 e 4.17 ilustram o traçado das curvas de nível resultantes da análise e tratamento dos dados provenientes da digitalização no equipamento *Roland's 3D*. As curvas de nível são apresentadas com um espaçamento de 1 mm, e o nível  $z=0$  corresponde ao nível do leito inicial de sedimentos não perturbado. Nesta análise a profundidade de erosão será apresentada com valores negativos de  $z$ , e a deposição de sedimentos corresponderá a valores positivos de  $z$ .

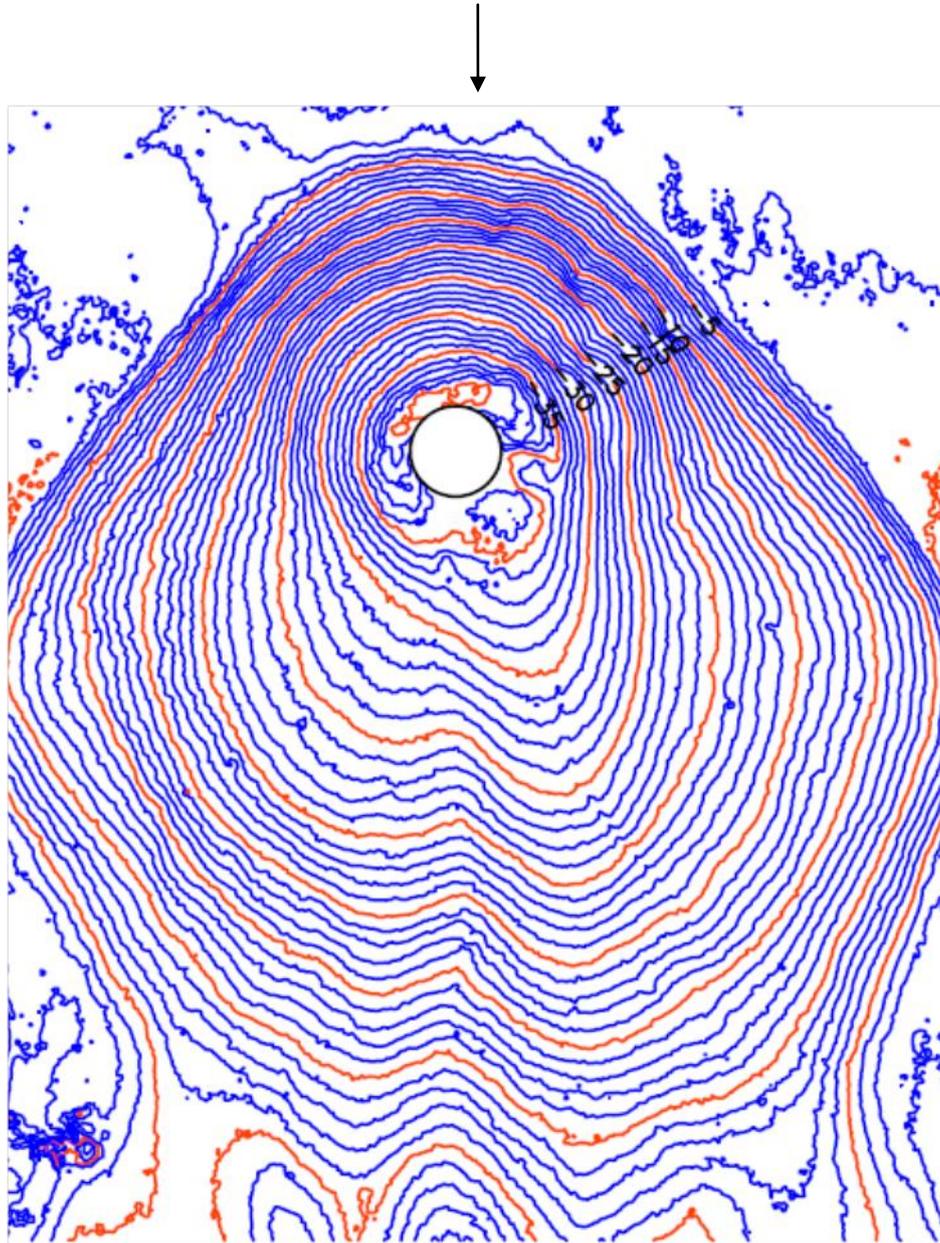
#### **4.1.2.1 Pilar circular simples**

Como se pode observar na figura 4.5, a profundidade máxima da cavidade de erosão verifica-se efetivamente no ponto imediatamente a montante do pilar, e tem um valor de aproximadamente 40 mm, ficando próximo do valor verificado experimentalmente (42 mm). Também se pode verificar que as curvas de nível apresentam maior junção a montante do pilar do que a jusante, indicando desde já que o talude a montante terá uma maior inclinação. Como se pode observar, a cavidade de erosão é aproximadamente simétrica em relação ao eixo longitudinal do pilar, podendo-se concluir que também a estrutura do escoamento será aproximadamente simétrica. Pode ainda verificar-se que na esteira do pilar existe uma zona de deposição de sedimentos e que a extensão lateral da cavidade é maior a jusante do que a montante do pilar, tanto na direção transversal, como na longitudinal.

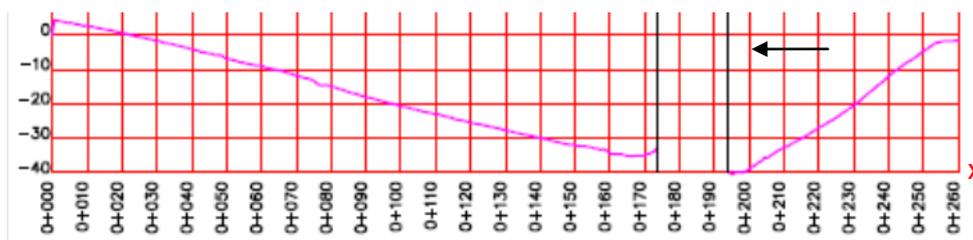
Através da análise da figura 4.6 pode-se confirmar que a profundidade da cavidade de erosão é maior a montante do que a jusante do pilar, e que a inclinação do talude da cavidade também é maior a montante.

Observando a figura 4.7 pode verificar-se a concordância da máxima profundidade da cavidade de erosão anteriormente observada na figura 4.5.

A análise comparativa das figuras 4.7 e 4.8 comprova as ilações tiradas anteriormente sobre a extensão da cavidade de erosão a montante e a jusante. Na figura 4.8 pode ainda observar-se a zona de deposição de sedimentos na esteira do pilar.



**Figura 4.5** Curvas de nível (Pilar circular simples) – Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento)



**Figura 4.6** Perfil Longitudinal (Pilar circular simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento)

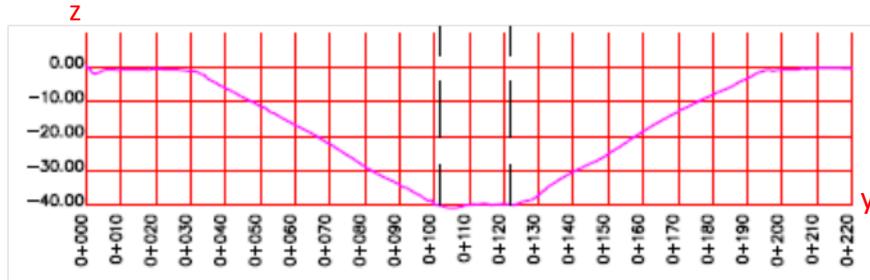


Figura 4.7 Perfil Transversal 1 (Pilar circular simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

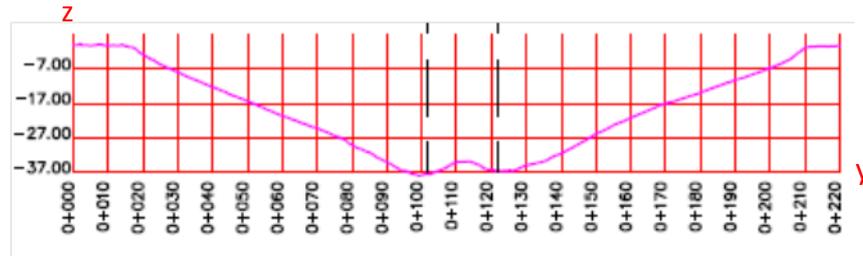
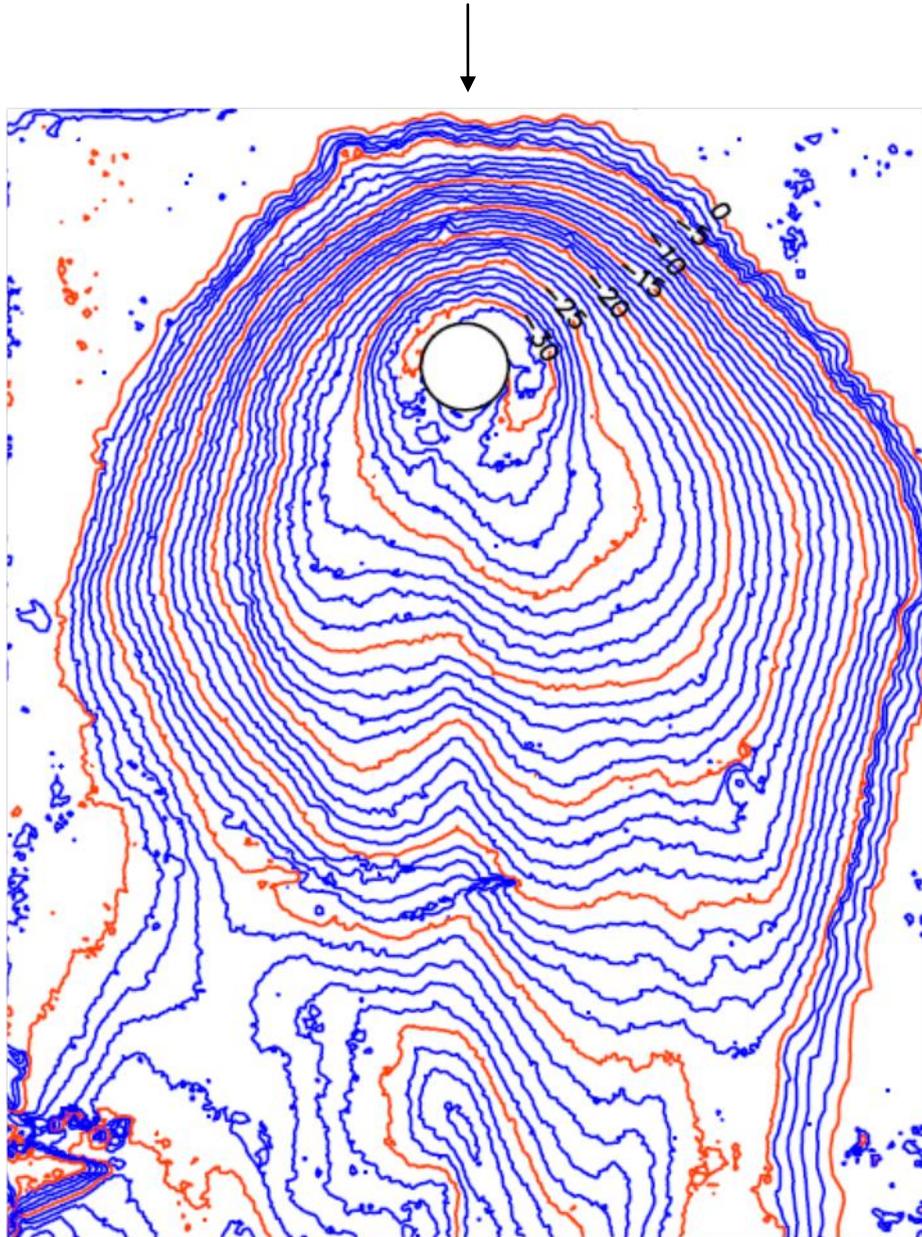


Figura 4.8 Perfil Transversal 2 (Pilar circular simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

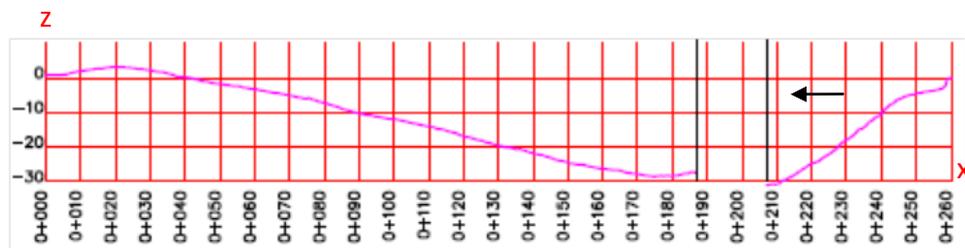
#### 4.1.2.2 Pilar circular com ranhura

Na figura 4.9 apresentam-se as curvas de nível geradas no molde do pilar circular com ranhura. A figura demonstra que a máxima profundidade da cavidade de erosão se verifica imediatamente a montante do pilar, possuindo um valor aproximado de 31 mm, que coincide com o valor verificado experimentalmente. Tal como anteriormente, verifica-se também que existe uma maior inclinação do talude da cavidade de erosão a montante do pilar comparativamente com jusante. Uma vez mais, verifica-se também a deposição de sedimentos na esteira do pilar, bem como a maior extensão da cavidade a montante do que a jusante. Neste caso em particular, a simetria da cavidade de erosão não é tão evidente, sendo que este ligeiro desfasamento se poderá dever à colocação do pilar à data do início do ensaio.

Na figura 4.10 confirma-se que a profundidade da cavidade de erosão é menor a jusante do que a montante e que a inclinação do talude da cavidade de erosão é maior a montante comparativamente com jusante. Nas figuras 4.11 e 4.12 pode observar-se a maior profundidade da cavidade de erosão a montante (figura 4.11) relativamente a jusante (figura 4.12), bem como a maior extensão da cavidade a jusante do que a montante. Na figura 4.12 é ainda possível observar a deposição de sedimentos na esteira do pilar.



**Figura 4.9** Curvas de nível (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento)



**Figura 4.10** Perfil Longitudinal (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento)

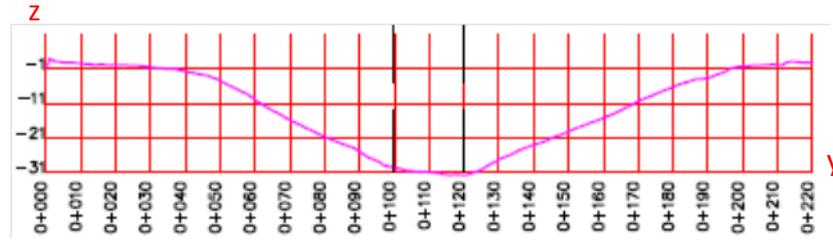


Figura 4.11 Perfil Transversal 1 (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

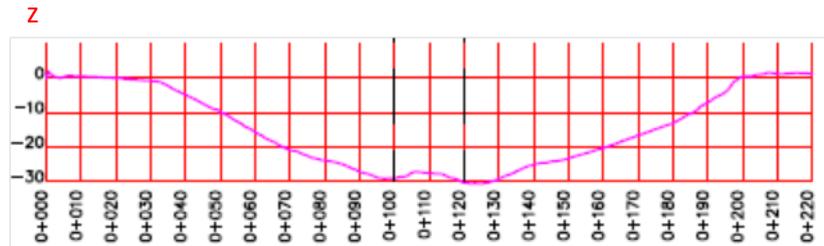


Figura 4.12 Perfil Transversal 2 (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

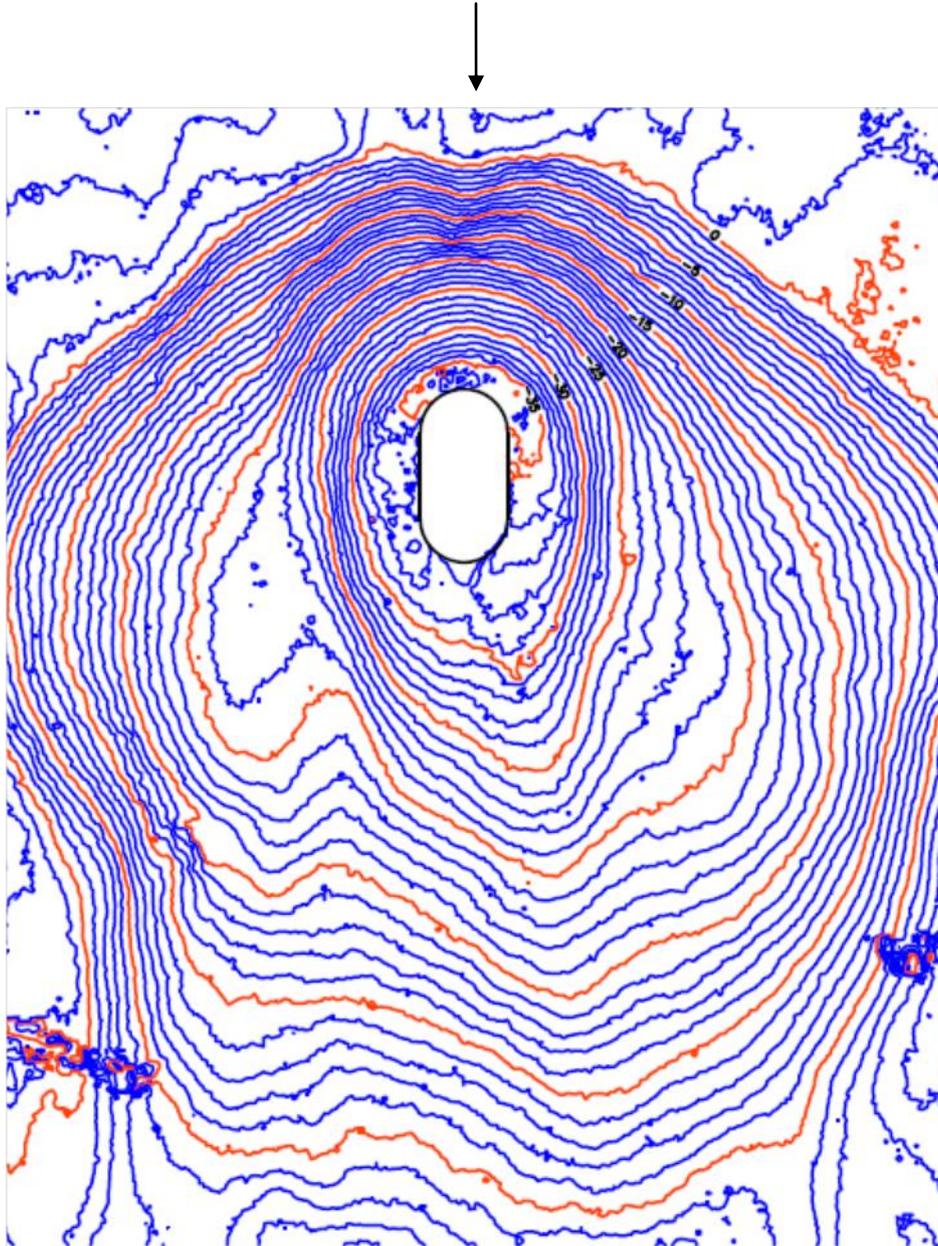
#### 4.1.2.3 Pilar alongado simples

Nas figuras 4.13 a 4.16 apresentam-se os resultados obtidos para o pilar alongado simples.

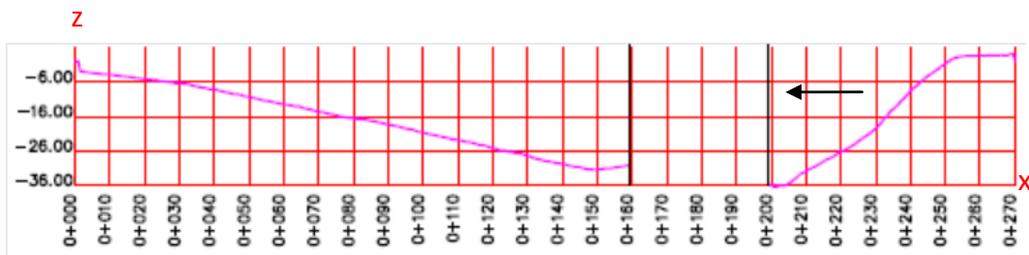
Da observação da figura 4.13 verifica-se novamente que a inclinação do talude da cavidade de erosão é maior a montante do que a jusante. Pode também observar-se que a máxima profundidade da cavidade de erosão se verifica no ponto imediatamente a montante do pilar (aproximadamente 37 mm), e que a extensão da cavidade de erosão é maior a jusante comparativamente a montante. Pode também observar-se que a cavidade de erosão se apresenta simetria em relação ao eixo do pilar e que existe na esteira do pilar deposição de material do leito.

A análise dos perfis apresentados nas figuras 4.14 a 4.16 vem uma vez mais comprovar as verificações efetuadas com a observação da figura 4.13. Assim, da observação do perfil longitudinal verifica-se que a profundidade da cavidade de erosão é maior a montante do que a jusante, bem como que a inclinação do talude da cavidade de erosão também é maior a montante comparativamente com jusante. Do perfil transversal 1 pode-se concluir que a cota mínima coincide com a cota mínima do perfil longitudinal, sendo a máxima profundidade da cavidade de erosão verificada no ponto imediatamente a montante do pilar. No perfil transversal 2 é possível observar-se a zona de deposição de sedimentos na esteira do pilar, e comparando os dois perfis transversais, verifica-se

que a cavidade de erosão apresenta maior extensão a jusante do pilar, apresentando no entanto menor profundidade.



**Figura 4.13** Curvas de nível (Pilar alongado simples) - Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento)



**Figura 4.14** Perfil Longitudinal (Pilar alongado simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento)

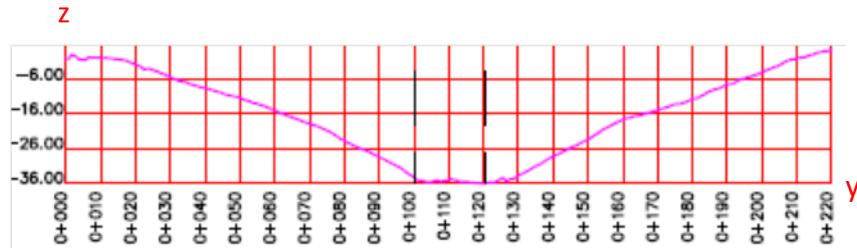


Figura 4.15 Perfil Transversal 1 (Pilar alongado simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

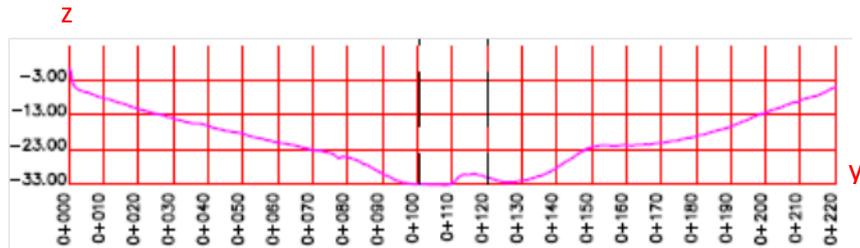


Figura 4.16 Perfil Transversal 2 (Pilar alongado simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

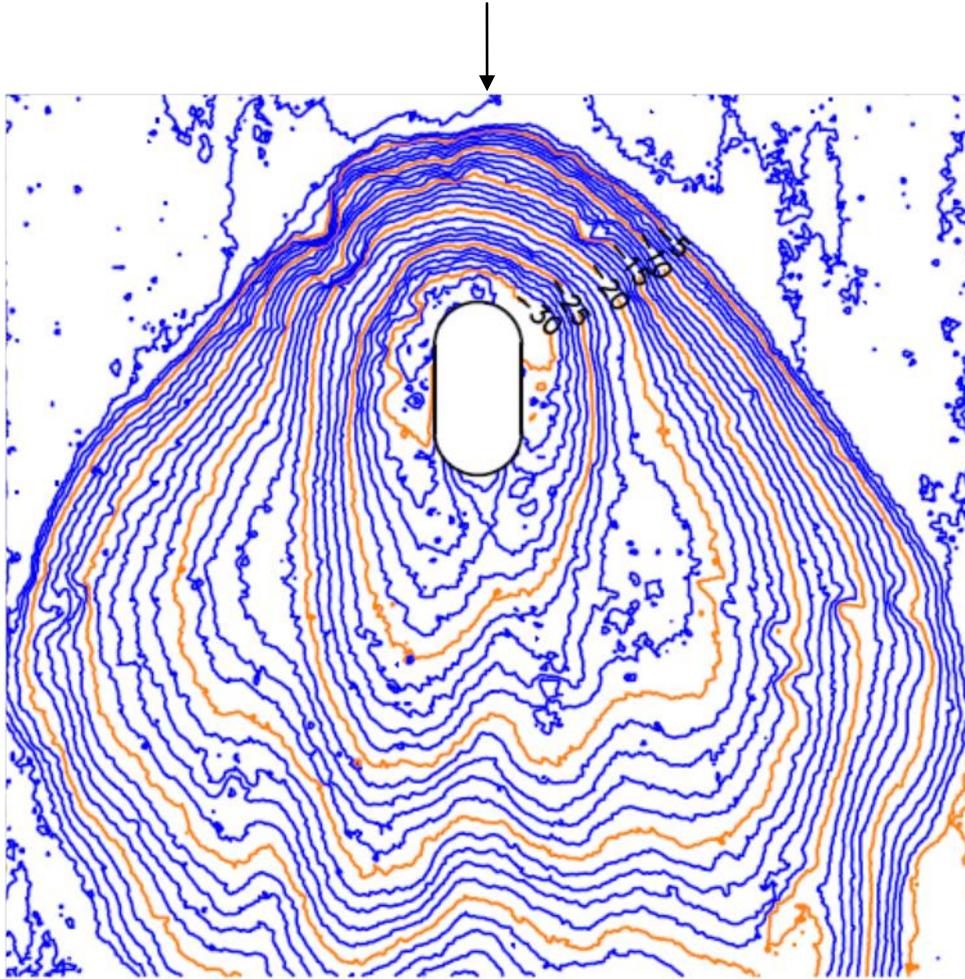
#### 4.1.2.4 Pilar alongado com ranhura

Relativamente ao pilar alongado com ranhura, apresentam-se nas figuras 4.17 a 4.20 os resultados obtidos da análise da configuração da cavidade de erosão.

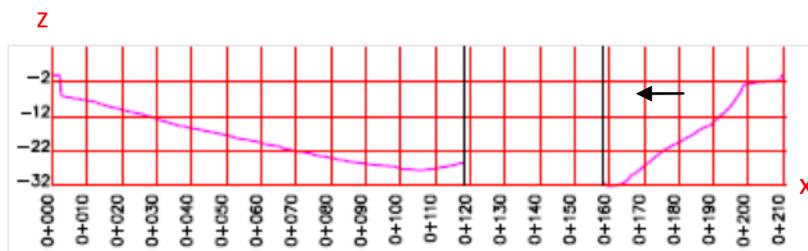
Na figura 4.17 é evidente, tal como nos pilares anteriormente analisados, a maior inclinação do talude da cavidade de erosão a montante do pilar comparativamente com jusante. É ainda possível identificar alguma simetria na cavidade de erosão em relação ao eixo longitudinal do pilar, embora esta simetria se evidencie mais em termos de extensão do que em termos de profundidade. Naturalmente, como já foi referenciado, estes pequenos desfasamentos poderão estar relacionados com a colocação do pilar no início do ensaio, bem como com a incerteza associada ao tratamento dos dados obtidos. Pode ainda verificar-se que a máxima profundidade da cavidade de erosão se verifica no ponto imediatamente a montante do pilar, possuindo um valor de aproximadamente 32mm, valor verificado na fase de equilíbrio do ensaio experimental correspondente.

Observando a figura 4.18, confirma-se a o desfasamento da profundidade da cavidade de erosão entre montante e jusante, tal como anteriormente descrito. Confirma-se ainda que a inclinação do talude da cavidade é maior a montante do que a jusante do pilar.

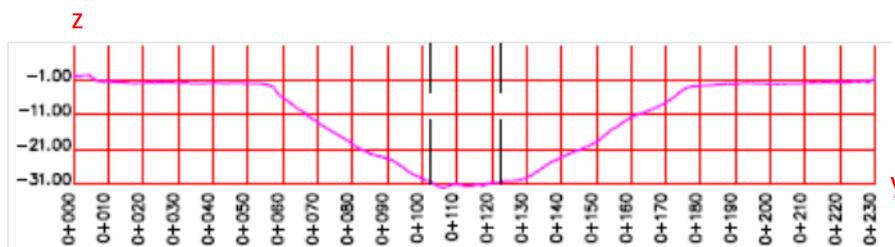
Analisando os perfis transversais (figuras 4.19 e 4.20) comprova-se a diferença na extensão lateral da cavidade de erosão, ficando claro que a mesma se apresenta maior a jusante do que a montante.



**Figura 4.17** Curvas de nível (Pilar alongado com ranhura) - Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento)



**Figura 4.18** Perfil Longitudinal (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento)



**Figura 4.19** Perfil Transversal 1 (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

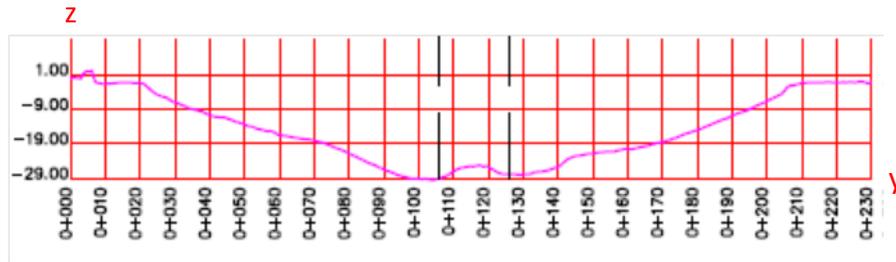


Figura 4.20 Perfil Transversal 2 (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

### 4.1.3 Análise e discussão dos resultados

Nesta secção apresenta-se a análise e discussão dos resultados obtidos, bem como às análises comparativas com estudos anteriores.

#### 4.1.3.1 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão localizada

Nesta subsecção da presente dissertação, o objetivo passa por efetuar um estudo comparativo dos resultados obtidos, de forma a poder tirar-se algumas conclusões acerca da evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão

**Análise comparativa do presente estudo.** Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos, na figura 4.21 passa-se a sintetizar a informação anteriormente apresentada relativamente aos quatro ensaios realizados.

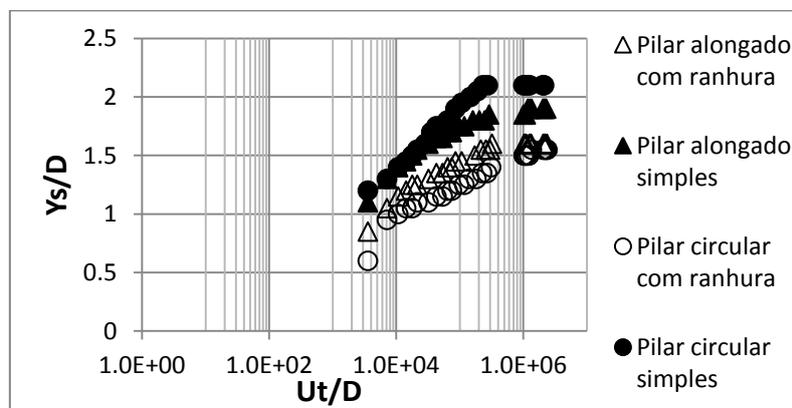


Figura 4.21 Evolução temporal da máxima profundidade d cavidade de erosão dos quatro pilares da 1ª série de ensaios experimentais

Como se pode observar na figura 4.21, e tal como seria de esperar, a máxima profundidade da cavidade de erosão evolui mais rapidamente na fase inicial do processo erosivo em todos os pilares ensaiados experimentalmente. Observa-se também que nos pilares simples, existe uma concordância nos resultados para as fases iniciais, começando os mesmos a divergir na fase principal, originando valores finais de  $Y_s/D$  diferentes.

Pode também rapidamente depreender-se que a implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento leva a uma redução da máxima profundidade da cavidade de erosão, tanto nos pilares alongados, como nos pilares circulares.

A tabela 4.9 apresenta a profundidade máxima da cavidade de erosão atingida na fase de equilíbrio para cada um dos pilares bem como a percentagem de redução da profundidade máxima da cavidade de erosão obtida com a implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento.

**Tabela 4.9** Percentagem de redução da profundidade máxima da cavidade de erosão – 1ª Série

<b>Pilar</b>	<b><math>y_s</math> (mm)</b>	<b>r [%]</b>
Circular simples	42	26.2
Circular com ranhura	31	
Alongado simples	38	15.8
Alongado com ranhura	32	

Onde  $r$  representa a redução da profundidade máxima da cavidade de erosão, calculada pela expressão 4.1:

$$r [\%] = \frac{Y_s^e \text{ pilar simples} - Y_s^e \text{ pilar com ranhura}}{Y_s^e \text{ pilar simples}} \times 100 \quad (4.1)$$

Assim, pode concluir-se também que a medida de alteração do escoamento é mais eficaz em pilares circulares do que em pilares alongados, uma vez que as reduções são de 26.2% e 15.8%, respetivamente.

Além do já anteriormente enunciado, pode também inferir-se sobre a discrepância entre os valores atingidos, para o caso dos pilares simples. A profundidade máxima da cavidade de erosão é maior no pilar circular do que no pilar alongado. Nos pilares com

ranhura esta discrepância já não se verifica, sendo que, como já se pode observar, a medida de mitigação não se apresenta tão eficaz em pilares alongados.

Quanto à duração das fases do processo erosivo, apresenta-se também a tabela 4.10 que sintetiza toda a informação obtida.

**Tabela 4.10** Resumo da duração das fases do processo erosivo – 1ª Série

<b>Pilar</b>	<b>Duração total do ensaio (min)</b>	<b>Fase</b>	<b>Duração (min)</b>
Pilar circular simples	2966	Inicial	40
		Principal	286
		Equilíbrio	2640
Pilar circular com ranhura	3344	Inicial	45
		Principal	1559
		Equilíbrio	1740
Alongado simples	3210	Inicial	30
		Principal	195
		Equilíbrio	2985
Alongado com ranhura	3300	Inicial	20
		Principal	460
		Equilíbrio	2820

Verifica-se então, que a duração média das fases iniciais é aproximadamente 33 minutos, não ultrapassando os 45 minutos. Pode também concluir-se que a fase inicial é sempre a fase de menor duração, representando em média, 1% da duração total do ensaio. Verifica-se igualmente que as diferentes fases do processo erosivo têm durações gradualmente maiores, da fase inicial para a fase de equilíbrio.

É também de assinalar que a duração da fase principal aumenta com a implementação da medida de mitigação, tanto nos pilares circulares, como nos alongados.

**Análise comparativa com o estudo de Leite (2013).** O principal objetivo da presente análise é avaliar a repetibilidade dos ensaios experimentais. A primeira série de ensaios foi realizada exatamente com os mesmos pilares, a mesma areia e sobre as mesmas condições de escoamento do que o estudo realizado anteriormente por Leite (2013). As figuras 4.22 a 4.25 apresentam a evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão obtida por Leite (2013) bem no presente estudo.

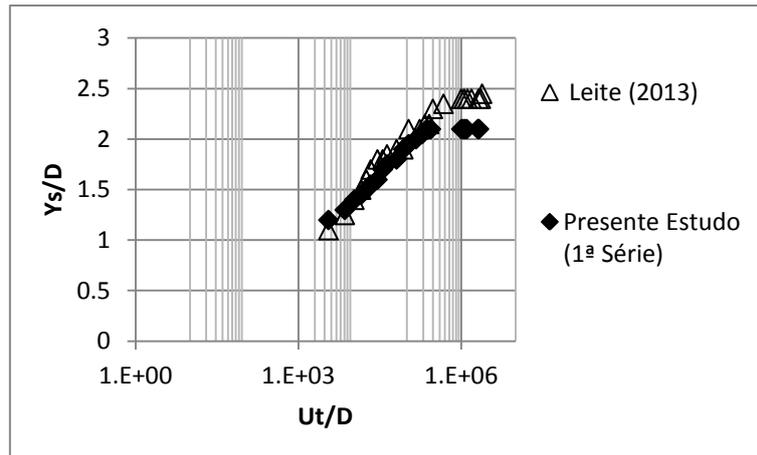


Figura 4.22 Análise comparativa do presente estudo com o estudo de Leite (2013) (Pilar circular simples – 1ª Série)

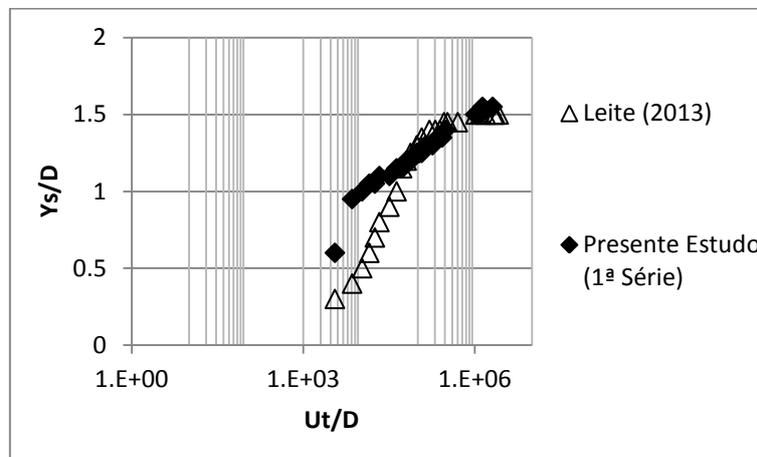


Figura 4.23 Análise comparativa do presente estudo com o estudo de Leite (2013) (Pilar circular com ranhura – 1ª Série)

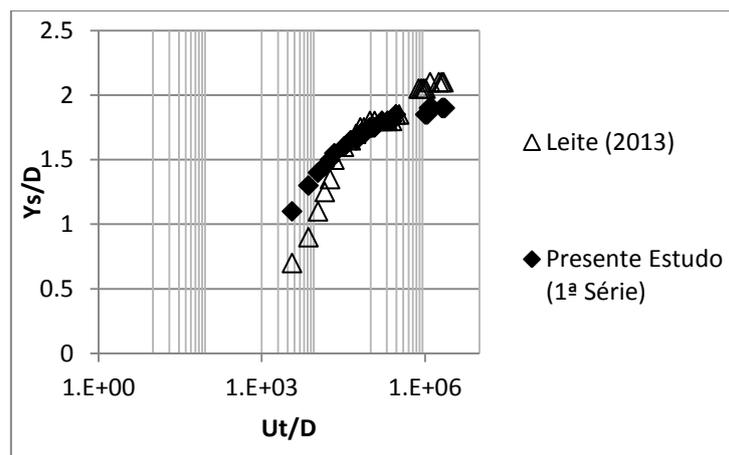
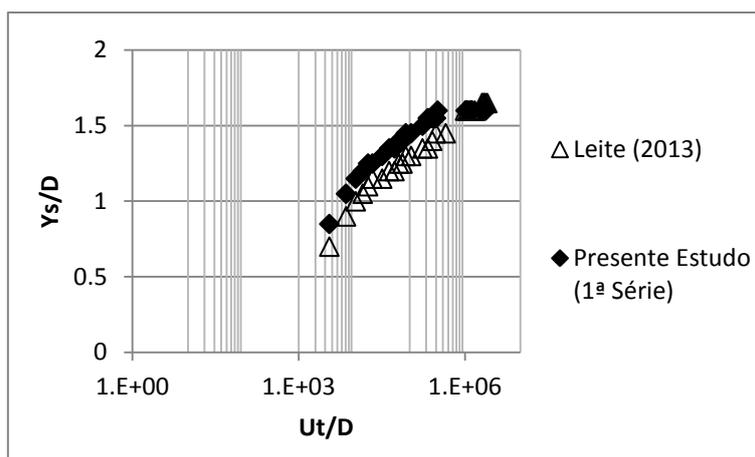


Figura 4.24 Análise comparativa do presente estudo com o estudo de Leite (2013) (Pilar alongado simples – 1ª Série)



**Figura 4.25** Análise comparativa do presente estudo com o estudo de Leite (2013) (Pilar alongado com ranhura – 1ª Série)

Para uma correta análise comparativa dos resultados obtidos, apresenta-se a tabela 4.11 que sintetiza o valor da máxima profundidade da cavidade de erosão na fase de equilíbrio, bem como a respetiva percentagem de redução.

**Tabela 4.11** Máximas profundidades das cavidades de erosão do presente estudo (1ª série) e do estudo de Leite (2012)

Pilar	$Y_s$ (mm)		r [%]	
	Leite (2013)	Presente Estudo (1ª Série)	Leite (2013)	Presente Estudo (1ª Série)
Circular	50	42	40.0	26.2
Circular com ranhura	30	31		
Alongado	42	38	21.4	15.8
Alongado com ranhura	33	32		

Como pode concluir-se através da análise dos gráficos obtidos, observa-se que nos instantes iniciais os resultados apresentam discrepâncias significativas, devidas ao facto do início de cada ensaio ser uma fase de elevada complexidade e que está intrinsecamente associada à perícia da pessoa que executa as tarefas. Note-se que, embora exista esta discrepância, os valores obtidos na fase inicial de cada ensaio foram sempre superiores no presente estudo comparativamente com o estudo de Leite (2013). Relativamente à profundidade no equilíbrio, os resultados acabam por convergir nos pilares com ranhura, apresentando diferenças significativas nos pilares simples. Esta diferença pode dever-se ao facto da areia ter sido sujeita várias vezes a determinadas condições de escoamento, de ensaio para ensaio, alterando a granulometria dos sedimentos que a constituem. No caso dos pilares com ranhura, esta divergência não se

mostrou tão acentuada, porque por si só, os pilares com ranhura atingem menores profundidades, sendo normal que a diferença não se mostrasse tão relevante. Em todo o caso, as profundidades atingidas no presente estudo foram inferiores ao estudo anteriormente realizado, exceto no caso do pilar circular com ranhura.

No caso específico do pilar circular com ranhura, poder-se-á atribuir a razão deste acontecimento ao facto de, já no estudo de Leite (2013) este mesmo pilar ter apresentado algumas diferenças na configuração da cavidade de erosão relativamente aos restantes pilares, podendo assim o resultado da profundidade no equilíbrio não ter tomado o valor espectável.

Relativamente à percentagem de redução da profundidade máxima da cavidade de erosão localizada, pode-se concluir que a implementação da medida de mitigação se mostrou mais eficaz no estudo de Leite (2012), do que no presente estudo, embora ainda assim, nos pilares circulares a medida se tenha apresentado mais eficaz.

**Análise comparativa com o estudo Tafarojnoruz *et al.* (2012) e Grimaldi *et al.* (2009b).** O presente estudo foi também comparado com outros estudos presentes na bibliografia. Através da observação da figura 4.26 podemos tirar algumas conclusões sobre a eficiência da implementação da medida de alteração do escoamento.

O gráfico da figura 4.26 apresenta uma aproximação linear aos resultados obtidos por Grimaldi *et al.* (2009b). Para efeitos de comparação, apenas se consideraram os resultados obtidos nos estudos anteriores para  $l_s$  igual a  $h$ , com  $z_s/h$  igual a 0, 1/6, 1/3 e 1/2. Salienta-se também que os estudos de Tafarojnoruz *et al.* (2012) e Grimaldi *et al.* (2009b) foram realizados com pilares cilíndricos.

A eficiência da medida de alteração do escoamento tendencialmente reduz-se para menores relações  $z_s/h$ . Pode verificar-se através da análise do gráfico que o pilar circular do presente estudo apresentou uma eficiência de aproximadamente 26%, ficando mais perto da linha de tendência apresentada. No pilar alongado verificou-se uma eficiência de 15.8%, ficando aquém dos valores atingidos nos estudos anteriores para pilares circulares. Este desfasamento terá certamente a ver com o facto de estarmos a comparar estudos realizados com pilares circulares com um presente estudo realizado com pilares alongados, onde, como já foi verificado, a eficiência da implementação da medida de mitigação não é tão assinalável.

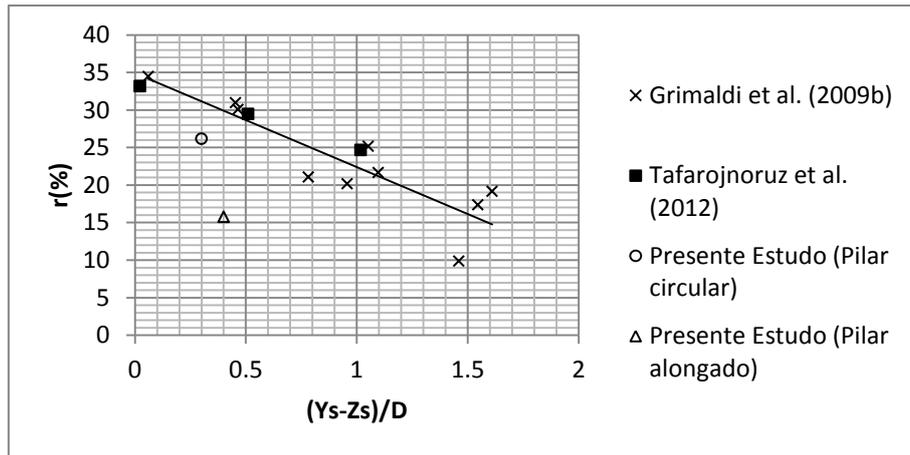


Figura 4.26 Estudo comparativo da percentagem de redução da máxima profundidade da cavidade de erosão

#### 4.1.3.2 Configuração da cavidade de erosão localizada

Observando as figuras onde se representam as curvas de nível resultantes da análise dos moldes (figuras 4.5, 4.9, 4.13 e 4.17) verifica-se que os taludes das cavidades de erosão a montante dos pilares apresentam maiores inclinações do que os taludes das cavidades a jusante dos pilares. Pode também observar-se que as cavidades de erosão apresentam simetria em relação à direção principal do escoamento. Na cotagem das curvas de nível é visível que a maior profundidade da cavidade de erosão se localiza no ponto imediatamente a montante de cada pilar, independentemente da sua configuração, sendo possível confirmar a concordância com o perfil transversal 1 imediatamente a montante dos pilares.

O *software* informático usado para o tratamento dos moldes permite retirar o valor mínimo da cota (escavação) de cada uma das superfícies resultantes dos moldes, além de todas as outras funções já enunciadas. Assim, apresentam-se de seguida a tabela 4.12 que efetua a comparação dos valores obtidos para a profundidade máxima da cavidade de erosão no programa informático e nas leituras efetuadas *in situ*.

Tabela 4.12 Valores das profundidades máximas das cavidades de erosão (1ª Série)

Pilar	Y <sub>s</sub> (mm)	Z mínimo  (mm)	Incerteza (%)
Circular	42	40.965	2
Circular com ranhura	31	31.905	3
Alongado	38	36.5	4
Alongado com ranhura	32	32.279	1

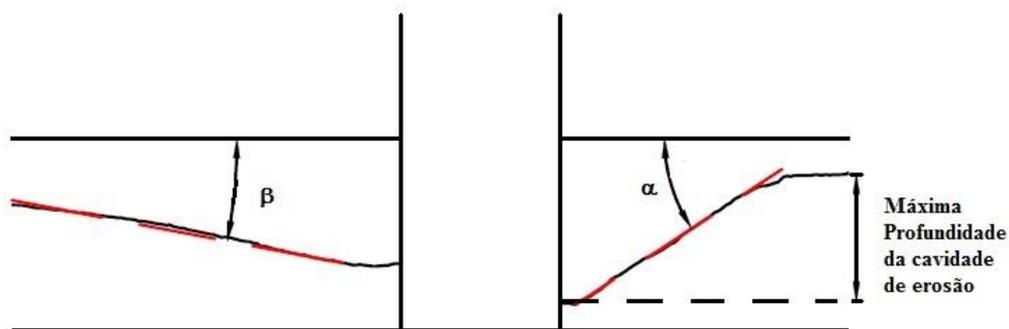
Sendo a incerteza (expressa em percentagem) calculada recorrendo à expressão (4.2):

$$\text{Incerteza (\%)} = \frac{Y_s - |Z_{\min}|}{Y_s} \times 100 \quad (4.2)$$

onde  $Y_s$  representa a profundidade real, observada no final de cada ensaio, e  $Z$  mínimo representa a menor cota da superfície de cada molde. Note-se que os valores de  $Z$  mínimo obtidos pelo programa informático têm valor negativo por se tratar de uma escavação, utilizando-se o módulo desse valor para efeitos de comparação. Pode verificar-se que as incertezas têm valores aceitáveis, pelas razões já anteriormente enunciadas.

Através da análise dos perfis longitudinais dos pilares em estudo pode confirmar-se que a máxima profundidade da cavidade de erosão se verifica imediatamente a montante do pilar, independentemente da sua configuração. Esta correspondência pode-se também observar comparando a cota mínima do perfil longitudinal com a cota mínima do perfil transversal 1 de cada um dos pilares (imediatamente a montante de cada pilar).

Com o intuito de efetuar um estudo mais completo dos resultados obtidos para as configurações das cavidades de erosão, foi realizada uma análise aos perfis longitudinais anteriormente apresentados. Assim, procedeu-se à medição do ângulo entre a linha de maior declive de cada talude das cavidades de erosão e o nível inicial da areia (a montante:  $\alpha$  e a jusante:  $\beta$ ), no perfil longitudinal no eixo do pilar, tal como se esquematiza na figura 4.27.



**Figura 4.27** Esquematização dos ângulos entre as linhas de maior declive dos taludes da cavidade de erosão e o nível inicial da areia.

Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 4.13.

**Tabela 4.13** Ângulos formados entre as linhas de maior declive dos taludes da cavidade de erosão e o nível inicial da areia (1ª Série)

Pilar	Ângulos ( $^{\circ}$ )	
	$\alpha$	$\beta$
Circular	38	12
Circular com ranhura	35	12
Alongado	36	13
Alongado com ranhura	32	8

Observa-se que os ângulos a montante ( $\alpha$ ) se aproximam dos valores típicos para os ângulos de repouso de areias (Lima e Leite, 2012).

Relativamente aos pilares simples, existe uma diferença nos ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia a montante do pilar. Esta discrepância está obviamente relacionada com a geometria dos pilares, uma vez que, embora a dimensão transversal dos pilares coincida, nos pilares alongados os vórtices de esteira não são tão evidentes como em pilares circulares, uma vez que os mesmos dissipam ao longo da dimensão longitudinal dos pilares alongados, resultando numa escavação menos acentuada.

Relativamente à implementação da medida de mitigação, pode deprender-se que resulta na diminuição dos ângulos do talude da cavidade de erosão, uma vez que alteram a estrutura do escoamento, diminuindo a intensidade do escoamento descendente e dos vórtices de ferradura, levando tanto a menores profundidades das cavidades de erosão, como a menores ângulos formados entre os taludes das cavidades de erosão e o nível inicial da areia.

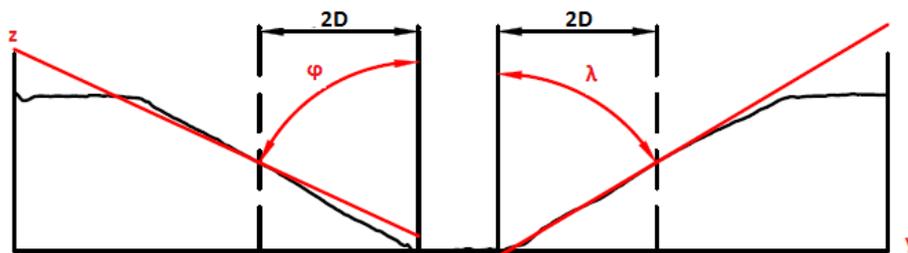
É de salientar também que através da análise dos perfis transversais a jusante dos pilares, pode concluir-se que no eixo de todos os pilares existe uma zona de deposição de sedimentos, que é consequência da migração do material de menor dimensão de montante para jusante da cavidade de erosão, depositando-se na esteira do pilar.

Comparando ainda os perfis transversais a montante e a jusante do pilar, observa-se que a extensão lateral das cavidades é maior a jusante do que a montante dos pilares, devido ao desprendimento dos vórtices de esteira, embora o mesmo não se verifique na profundidade. Pode-se também concluir que a extensão da cavidade de erosão também diminui com a implementação da medida de mitigação nos pilares alongados e circulares, tanto a montante como a jusante dos pilares.

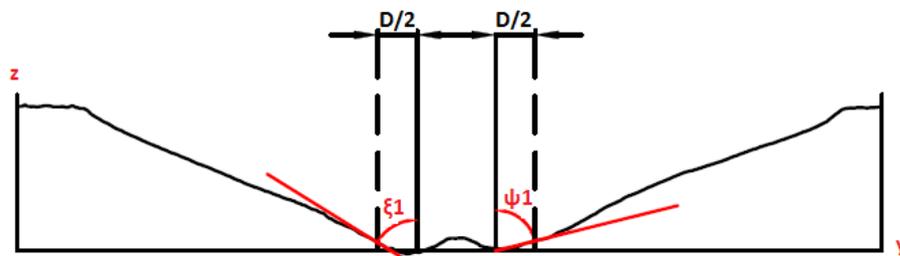
Ainda recorrendo às ferramentas do programa ZW-CAD, foram ainda medidos nos perfis transversais os ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e a face do

pilar. Esta medição foi efetuada recorrendo a linhas tangentes à linha que define cada perfil transversal. Note-se que, tal como se pode observar na figura 4.28, nos perfis transversais a montante de cada pilar apenas foram medidos dois ângulos (à esquerda do pilar:  $\varphi$  e à direita do pilar:  $\lambda$ ), uma vez que estes perfis são os que apresentam menos desfasamentos nas inclinações do talude ao longo do eixo  $y$ .

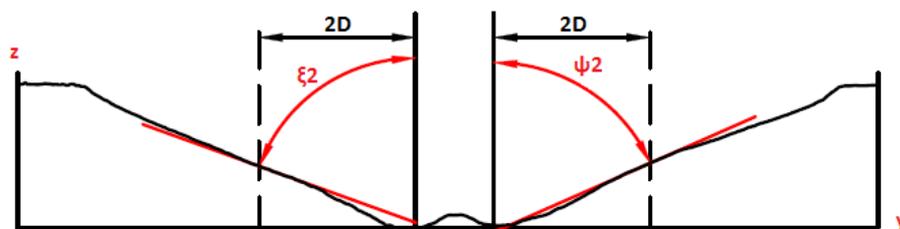
Assim, como se pode observar nas figuras 4.29 a 4.31, nos perfis transversais a jusante do pilar foram medidos ao todo seis ângulos (à esquerda do pilar:  $\xi_1, \xi_2, \xi_3$  e à direita do pilar:  $\psi_1, \psi_2, \psi_3$ ) a distâncias diferentes da face do pilar, para se poder tirar conclusões sobre a evolução da inclinação do talude ao longo do eixo  $y$ .



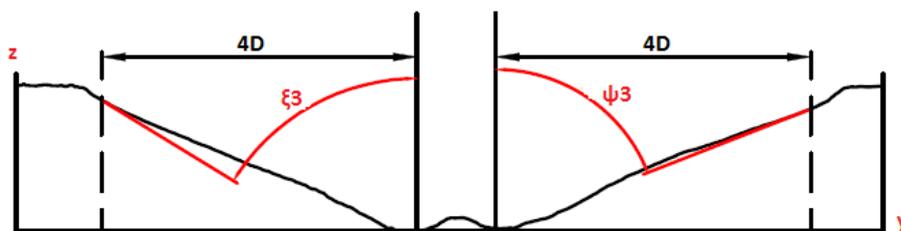
**Figura 4.28** Esquematização dos ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal 1 (a uma distância de 2D mm da face do pilar) e a face do pilar



**Figura 4.29** Esquematização dos ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal 2 (a uma distância de D/2 mm da face do pilar) e a face do pilar



**Figura 4.30** Esquematização dos ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal 2 (a uma distância de 2D mm da face do pilar) e a face do pilar



**Figura 4.31** Esquemática dos ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal 2 (a uma distância de 4D mm da face do pilar) e a face do pilar

Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 4.14.

**Tabela 4.14** Ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal e a face do pilar (1ª série)

Pilar	Perfil Transversal 1		Perfil Transversal 2					
	$\varphi$ (°)	$\lambda$ (°)	$\xi_1$ (°)	$\psi_1$ (°)	$\xi_2$ (°)	$\psi_2$ (°)	$\xi_3$ (°)	$\psi_3$ (°)
Circular simples	65	59	58	76	70	66	58	69
Circular com ranhura	51	70	58	61	56	74	90	89
Alongado simples	61	66	61	69	79	85	71	71
Alongado com ranhura	49	68	77	78	85	78	70	65

Da análise da tabela 4.14 pode concluir-se que, relativamente ao perfil transversal 1, o maior desfasamento entre  $\varphi$  e  $\lambda$  se verifica nos pilares com ranhura, e é de 19°. Este desfasamento poderá estar relacionado com o posicionamento do molde aquando da sua digitalização, visto que teoricamente a cavidade de erosão seria simétrica em relação à direção principal do escoamento. Nada se pode concluir sobre o impacto da implementação da ranhura, uma vez que para os ângulos  $\varphi$  se verifica uma diminuição com a implementação da ranhura, contrariamente ao que se verifica nos ângulos  $\lambda$ .

Já anteriormente se pôde verificar através da análise dos perfis transversais 2, que tendencialmente, à medida que se avança da face do pilar para a esquerda ou para a direita, dever-se-ia verificar  $\xi_1 < \xi_2 > \xi_3$  e  $\psi_1 < \psi_2 > \psi_3$ , respetivamente, uma vez que os perfis apresentam uma configuração que se assemelha a uma chaveta invertida. Assim, existe uma maior inclinação junto à face do pilar, que diminui à medida que aumenta a distância à face do pilar, acabando por aumentar novamente, e terminando sem inclinação (que corresponderia a 90° com a face do pilar). Nos perfis transversais 2,

as inclinações são extremamente sensíveis à extensão da cavidade de erosão, uma vez que os ângulos foram medidos sempre às mesmas distâncias da face de cada pilar, podendo este facto alterar a tendência dos resultados. No entanto esta tendência pode ser verificada em todos os pilares, menos no pilar circular com ranhura, onde  $\xi_3$  e  $\psi_3$  se aproximam de  $90^\circ$ , correspondendo naturalmente ao pilar em que a cavidade atingiu menor extensão lateral a jusante do pilar. Uma vez mais, nada se pode concluir sobre a influência da implementação da ranhura na inclinação dos taludes, podendo-se no entanto verificar que existe uma propensão para existirem em média maiores ângulos nos pilares alongados, comparativamente com os pilares circulares.

De forma a poder comparar-se com os ângulos anteriormente medidos nos perfis longitudinais, foram também calculados os ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia nos perfis transversais. Este cálculo foi feito recorrendo ao facto de a soma dos ângulos internos de um triângulo ser  $180^\circ$ , isto é, sendo que o ângulo formado entre o nível inicial da areia e a face de cada pilar é de  $90^\circ$ , e sabendo o valor dos ângulos anteriormente mencionados (ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e a face do pilar), pode facilmente calcular-se os ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia nos perfis transversais, que se apresentam na tabela 4.15.

**Tabela 4.15** Ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal e o nível inicial da areia (1ª série)

Pilar	Perfil Transversal 1		Perfil Transversal 2					
	$\varphi'$ ( $^\circ$ )	$\lambda'$ ( $^\circ$ )	$\xi_1'$ ( $^\circ$ )	$\psi_1'$ ( $^\circ$ )	$\xi_2'$ ( $^\circ$ )	$\psi_2'$ ( $^\circ$ )	$\xi_3'$ ( $^\circ$ )	$\psi_3'$ ( $^\circ$ )
Circular simples	25	31	32	14	20	24	32	21
Circular com ranhura	39	20	32	29	34	16	0	1
Alongado simples	29	24	29	21	11	5	19	19
Alongado com ranhura	41	22	13	12	5	12	20	25

Da análise da tabela 4.15 é importante referir que comparando os ângulos medidos nos perfis transversais 1 (a montante do pilar) e os ângulos  $\alpha$  dos perfis longitudinais (a montante do pilar), pode-se concluir que, em média os ângulos dos perfis transversais apresentam valores inferiores.

Dos ângulos dos perfis transversais a jusante dos pilares (perfis transversais 2) observa-se naturalmente que em média os ângulos são menores para os pilares alongados.

## **4.2 Ensaios Experimentais com areia uniforme**

Na presente secção apresentam-se os ensaios e respetivas análises, referentes à segunda série de ensaios, ou seja, aos ensaios experimentais realizados com areia uniforme.

### **4.2.1 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão localizada**

A presente secção foca-se na apresentação dos resultados no que diz respeito à evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão. Tal como anteriormente, pretende-se não só analisar a evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão, mas também definir as diferentes fases do processo erosivo. Para o efeito, foi utilizado o mesmo processo da primeira série de ensaios experimentais, já anteriormente descrito.

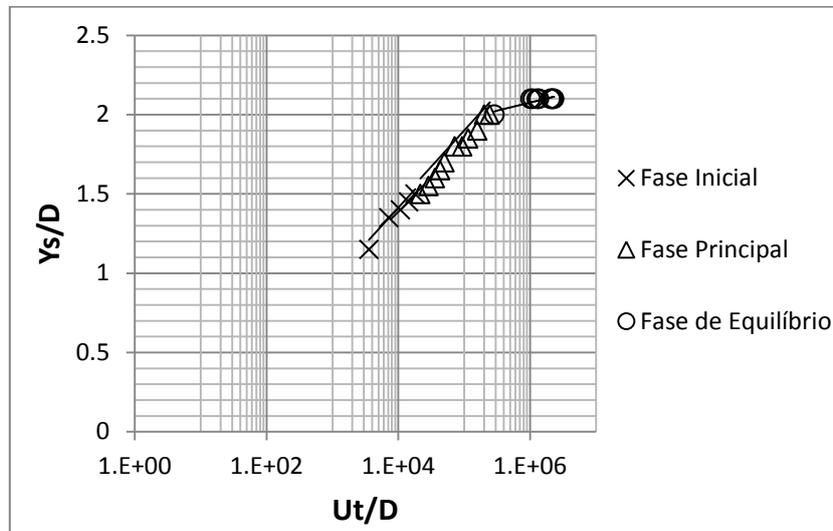
Tal como na primeira série de ensaios, para determinar que a profundidade máxima da cavidade de erosão atinge a fase de equilíbrio, foram utilizados os critérios de paragem anteriormente mencionados. Assim, como todos os critérios de paragem dependem apenas de parâmetros que são comuns a todos os ensaios experimentais (diâmetro do pilar, diâmetro médio dos sedimentos do leito, velocidade média de aproximação, velocidade crítica e altura da água do escoamento), implicará que o critério de paragem se aplica a todos os ensaios experimentais realizados. Os resultados obtidos para os valores dos critérios de paragem já foram anteriormente apresentados na tabela 3.6.

Nas secções que se seguem serão apresentados os resultados obtidos relativos à segunda série de ensaios experimentais.

#### **4.2.1.1 Pilar circular simples**

Para o pilar circular, os resultados obtidos resultantes das medições da profundidade máxima da cavidade de erosão localizada, realizadas ao longo do ensaio experimental,

apresentam-se na figura 4.32. Na mesma figura, gráfico apresenta as linhas de tendência, que representam as três fases do processo erosivo.



**Figura 4.32** Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar circular simples - 2ª Série)

A tabela 4.16 apresenta as equações das linhas de tendência presentes no gráfico, tal como os respectivos  $R^2$ .

**Tabela 4.16** Equações das linhas de tendência (Pilar circular simples – 2ª Série)

Fase Inicial	$Y_s/D = 0.21 \ln (Ut/D) - 0.5506$	$R^2 = 0.98$
Fase Principal	$Y_s/D = 0.211 \ln (Ut/D) - 0.6025$	$R^2 = 0.99$
Fase Equilíbrio	$Y_s/D = 0.0445 \ln (Ut/D) + 1.4618$	$R^2 = 0.77$

Uma vez mais, tal como sucedeu na primeira série, a aproximação logarítmica para a fase de equilíbrio apresenta menor  $R^2$ , e portanto, maior incerteza. Na tabela 4.17 apresentam-se respetivamente a duração de cada uma das fases do fenómeno da erosão localizada, tal como a duração total do ensaio experimental.

**Tabela 4.17** Duração das fases do processo erosivo (Pilar circular simples – 2ª Série)

	Duração (minutos)
Fase Inicial	30
Fase Principal	310
Fase Equilíbrio	2880
TOTAL	3220

### 4.2.1.2 Pilar circular com ranhura

Tal como na secção anterior, apresentam-se na figura 4.33 e tabelas 4.18 e 4.19 os resultados obtidos para o pilar circular com ranhura, tanto sobre a evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão, como sobre as fases do processo erosivo e respetivas durações.

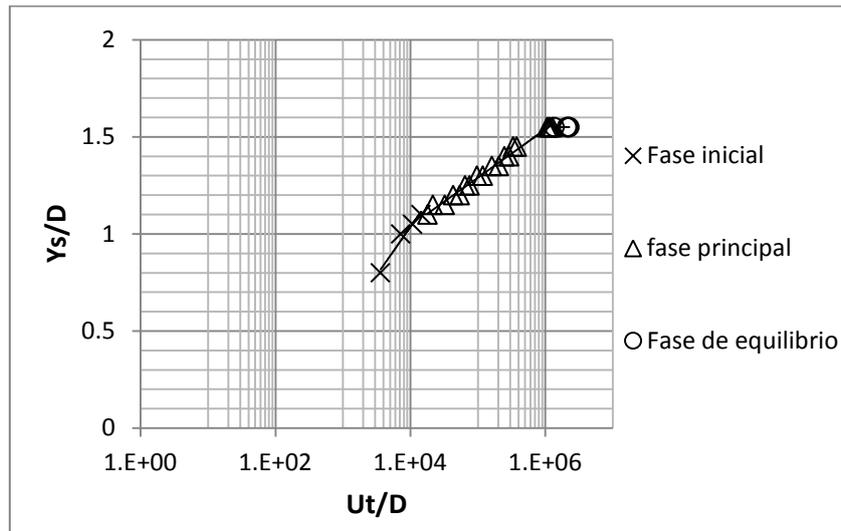


Figura 4.33 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar circular com ranhura - 2ª Série)

Tabela 4.18 Equações das linhas de tendência (Pilar circular com ranhura – 2ª Série)

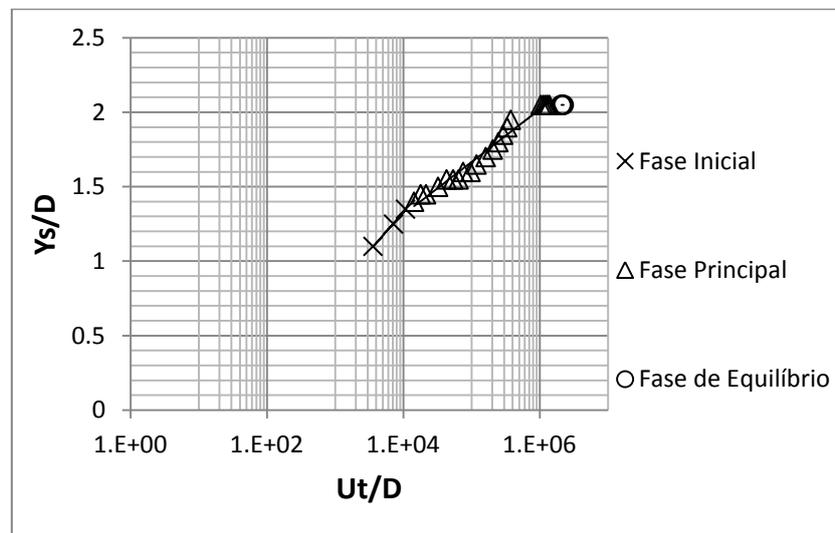
Fase Inicial	$Y_s/D = 0.2152 \ln (Ut/D) - 0.9454$	$R^2 = 0.97$
Fase Principal	$Y_s/D = 0.1079 \ln (Ut/D) + 0.0478$	$R^2 = 0.99$
Fase Equilíbrio	$Y_s/D = 1.55$	$R^2 = 1$

Tabela 4.19 Duração das fases do processo erosivo (Pilar circular com ranhura – 2ª Série)

	Duração (minutos)
Fase Inicial	20
Fase Principal	1760
Fase Equilíbrio	1380
TOTAL	3160

### 4.2.1.3 Pilar alongado simples

De seguida apresenta-se a evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão relativa ao pilar alongado simples (figura 4.34), bem como a distinção entre as fases de erosão e correspondentes durações (tabelas 4.20 e 4.21).



**Figura 4.34** Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar alongado simples - 2ª Série)

**Tabela 4.20** Equações das linhas de tendência (Pilar alongado simples – 2ª Série)

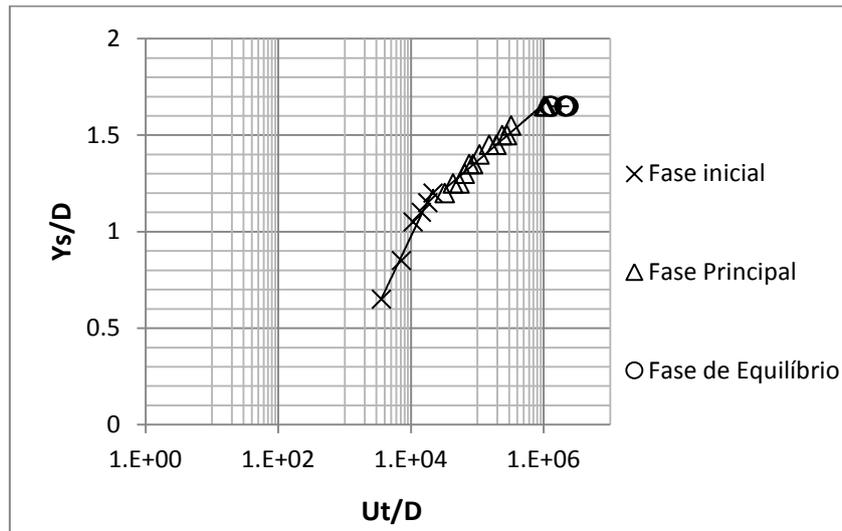
Fase Inicial	$Y_s/D = 0.2264 \ln(Ut/D) - 0.7554$	$R^2 = 0.99$
Fase Principal	$Y_s/D = 0.1534 \ln(Ut/D) - 0.0996$	$R^2 = 0.98$
Fase Equilíbrio	$Y_s/D = 2.05$	$R^2 = 1$

**Tabela 4.21** Duração das fases do processo erosivo (Pilar alongado simples – 2ª Série)

	Duração (minutos)
Fase Inicial	15
Fase Principal	1915
Fase Equilíbrio	1200
TOTAL	3130

#### 4.2.1.4 Pilar alongado com ranhura

Para o pilar alongado com ranhura, passa-se a apresentar, tal como os restantes, os resultados obtidos resultantes da análise da evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão (figura 4.35), bem como da análise das durações das fases do processo erosivo (tabelas 4.22 e 4.23).



**Figura 4.35** Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão (Pilar alongado com ranhura - 2ª Série)

**Tabela 4.22** Equações das linhas de tendência (Pilar alongado com ranhura – 2ª Série)

Fase Inicial	$Y_s/D = 0.314 \ln (Ut/D) - 1.9155$	$R^2 = 0.98$
Fase Principal	$Y_s/D = 0.128 \ln (Ut/D) - 0.1071$	$R^2 = 0.98$
Fase Equilíbrio	$Y_s/D = 1.65$	$R^2 = 1$

**Tabela 4.23** Duração das fases do processo erosivo (Pilar alongado com ranhura – 2ª Série)

	Duração (minutos)
Fase Inicial	30
Fase Principal	1500
Fase Equilíbrio	1740
TOTAL	3270

## **4.2.2 Configuração das cavidades de erosão localizada**

Esta secção tem como objetivo a apresentação dos resultados obtidos após a análise da configuração da cavidade de erosão para cada um dos pilares ensaiados experimentalmente. Esta análise foi feita recorrendo ao tratamento dos moldes resultantes de cada um dos ensaios.

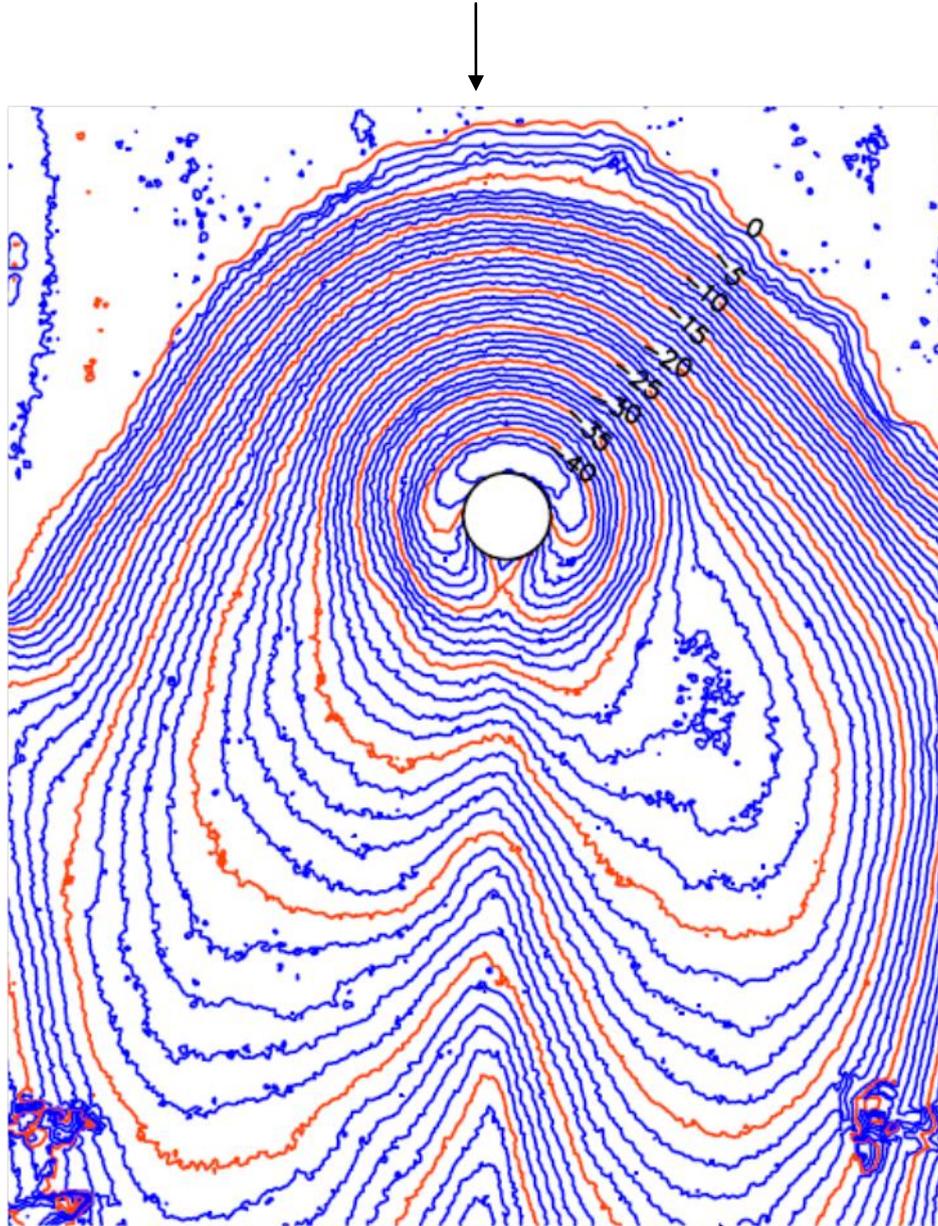
### **4.2.2.1 Pilar circular simples**

As figuras 4.36 a 4.39 apresentam os resultados obtidos no estudo da configuração da cavidade de erosão do pilar circular simples. Na figura 4.36 observa-se com maior evidência a simetria da cavidade de erosão relativamente ao eixo longitudinal do pilar. Verifica-se ainda que a profundidade máxima da cavidade de erosão se verifica imediatamente a montante do pilar, sendo de aproximadamente 42 mm e coincidindo com o valor verificado experimentalmente. A inclinação do talude da cavidade de erosão é maior a montante do pilar do que a jusante. Verifica-se ainda, tal como ocorreu com todas as cavidades de erosão dos pilares ensaiados na primeira série, uma zona de deposição de sedimentos na esteira do pilar.

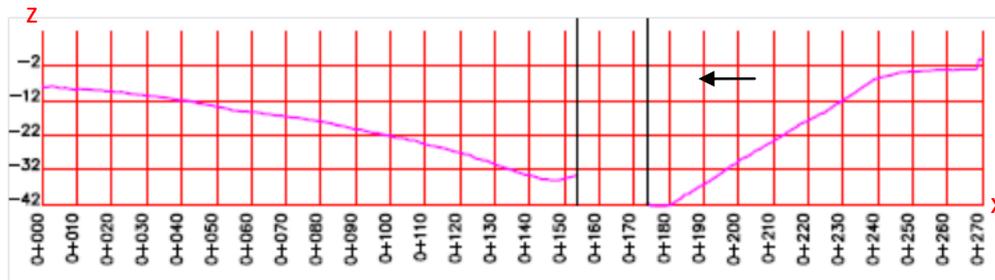
Da análise do perfil longitudinal (figura 4.37) pode concluir-se que, de facto, a máxima profundidade da cavidade de erosão se verifica imediatamente a montante do pilar, e que a inclinação do talude da cavidade de erosão é maior a montante do que a jusante.

A concordância da cota mínima do perfil longitudinal com a cota mínima do perfil transversal 1 vem corroborar o facto da máxima profundidade da cavidade de erosão se verificar no ponto imediatamente a montante do pilar.

A observação da figura 4.39 confirma a existência da zona de deposição de sedimentos imediatamente a jusante do pilar, podendo-se ainda concluir que a extensão lateral da cavidade de erosão é maior a jusante do pilar comparativamente com montante.



**Figura 4.36** Curvas de nível (Pilar circular simples) – Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento)



**Figura 4.37** Perfil longitudinal (Pilar circular simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento)

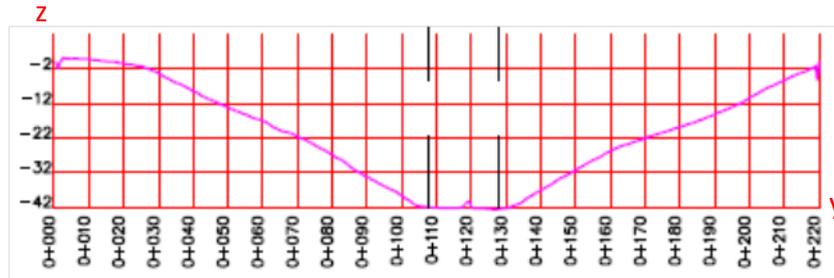


Figura 4.38 Perfil transversal 1 (Pilar circular simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

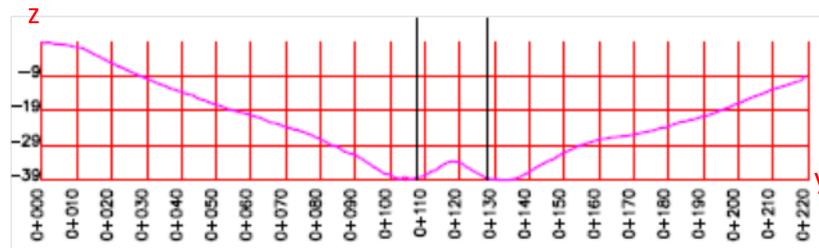


Figura 4.39 Perfil transversal 2 (Pilar circular simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

#### 4.2.2.2 Pilar circular com ranhura

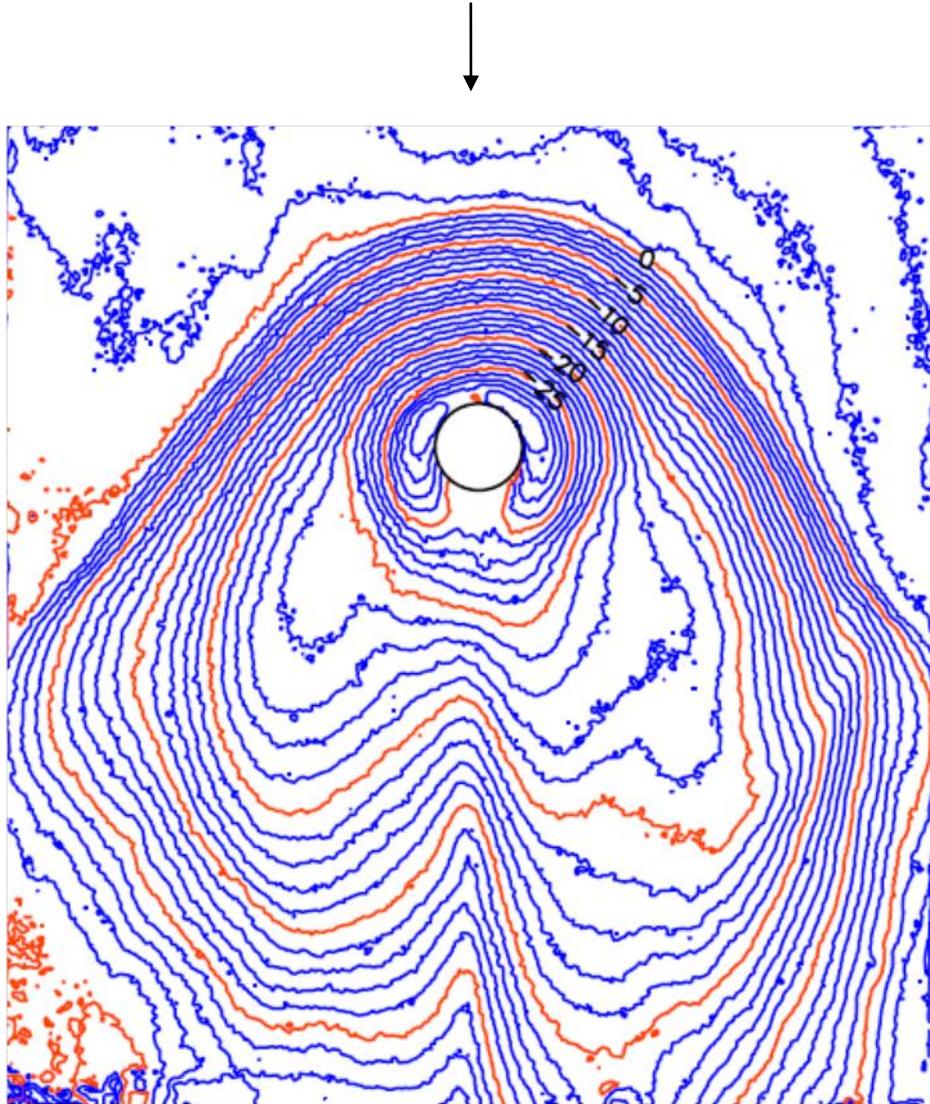
Nas figuras 4.40 a 4.43 apresentam-se os resultados obtidos da análise da configuração da cavidade de erosão para o pilar circular com ranhura.

A figura 4.40 apresenta a configuração da cavidade de erosão de onde se pode concluir que a máxima profundidade da cavidade de erosão se verifica no ponto imediatamente a montante do pilar, apresentando um valor aproximado de 30 mm, sendo o valor verificado experimentalmente de 31 mm. A cavidade de erosão apresenta ainda alguma simetria em relação ao eixo do pilar. Pode ainda observar-se que a inclinação do talude da cavidade a montante é maior do que a jusante, tal como ocorreu com os restantes pilares já analisados.

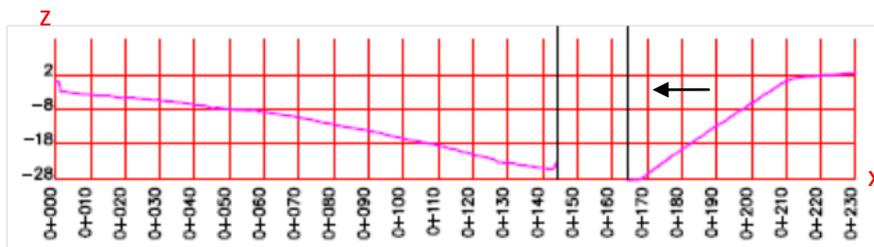
Através da observação do perfil longitudinal pode-se comprovar o desfasamento da profundidade da cavidade de erosão a montante e a jusante, tal como já foi dito, bem como o desfasamento da inclinação do talude da cavidade de erosão a montante e a jusante.

A análise das figuras 4.42 e 4.33 permite concluir que a extensão da cavidade de erosão é menor a montante do que a jusante do pilar, podendo-se ainda verificar a diferença das cotas mínimas, em concordância com as diferenças de profundidade a montante e a

jusante do pilar. Nomeadamente na figura 4.43 é ainda possível observar a deposição de sedimentos na esteira do pilar, tal como ocorreu com todos os outros pilares analisados.



**Figura 4.40** Curvas de nível (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento)



**Figura 4.41** Perfil longitudinal (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento)

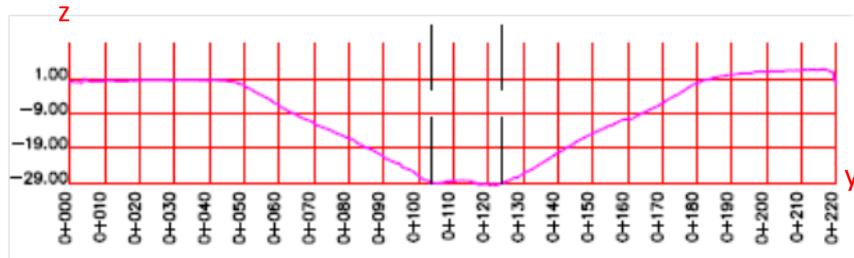


Figura 4.42 Perfil transversal 1 (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

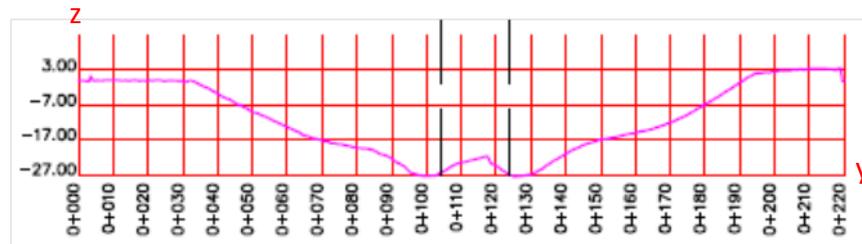


Figura 4.43 Perfil transversal 2 (Pilar circular com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

### 4.2.2.3 Pilar alongado simples

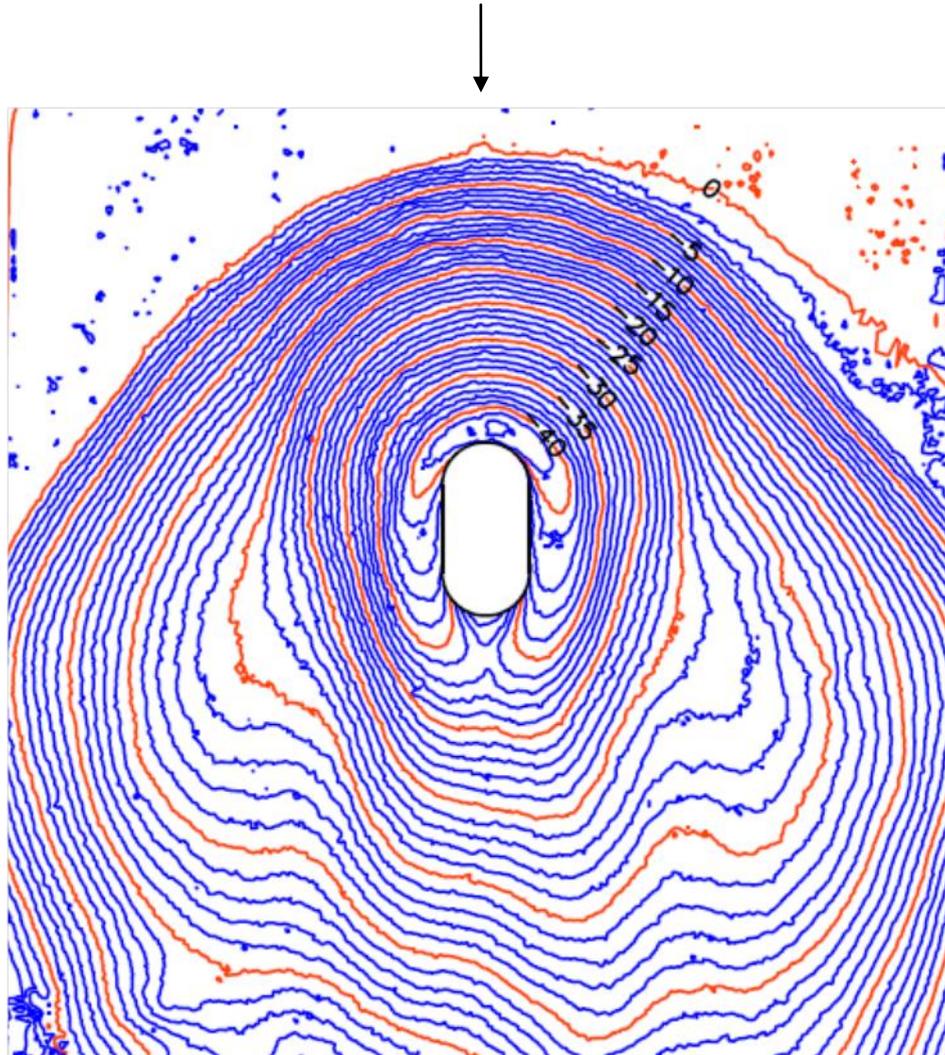
Para o pilar alongado simples apresentam-se de seguida as figuras 4.44 a 4.47, que ilustram a análise da configuração da cavidade de erosão.

A análise da figura 4.44 permite concluir que existe uma simetria da cavidade em relação ao eixo longitudinal do pilar e que a máxima profundidade da cavidade de erosão se verifica uma vez mais no ponto imediatamente a montante do pilar, tomando o valor aproximado de 42 mm, face aos 41 mm atingidos nos ensaio experimental correspondente. Verifica-se ainda a maior inclinação do talude da cavidade de erosão a montante do pilar, relativamente a jusante.

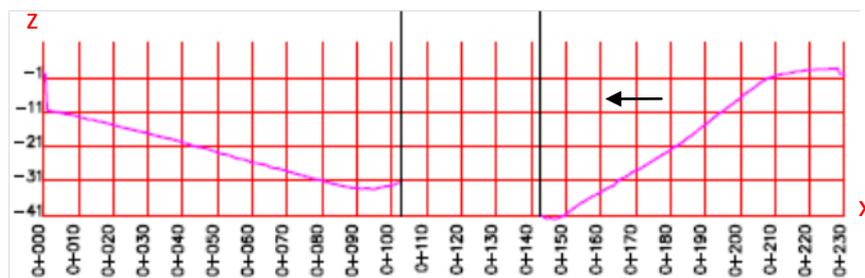
Tal como sucede com os restantes pilares, também neste caso particular se pode observar a diferença de profundidades da cavidade de erosão a montante e a jusante do pilar através da observação da figura 4.45. No perfil longitudinal (figura 4.45) pode ainda verificar-se a discrepância na inclinação dos taludes da cavidade de erosão a montante e a jusante do pilar, sendo a maior inclinação verificada a montante do pilar.

A análise das figuras 4.46 e 4.47 comprova, uma vez mais, a discrepância das profundidades atingidas a montante e a jusante, bem como evidencia a diferença na extensão da cavidade de erosão, que é maior a jusante do que a montante, que também

pode ser observada na figura 4.44. Além do já descrito, na figura 4.47 pode ainda verificar-se a deposição de material do leito na esteira do pilar, tal como aconteceu com os restantes pilares já analisados.



**Figura 4.44** Curvas de nível (Pilar alongado simples) – Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento)



**Figura 4.45** Perfil longitudinal (Pilar alongado simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento)

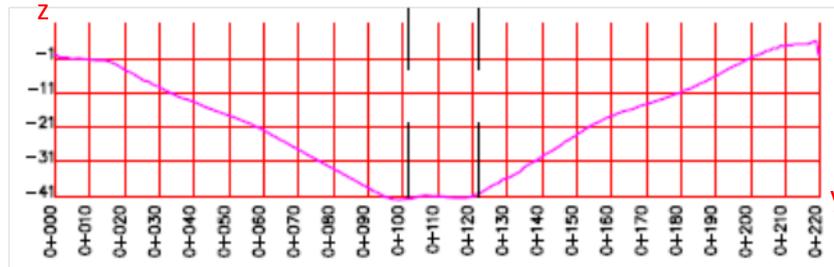


Figura 4.46 Perfil transversal 1 (Pilar alongado simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

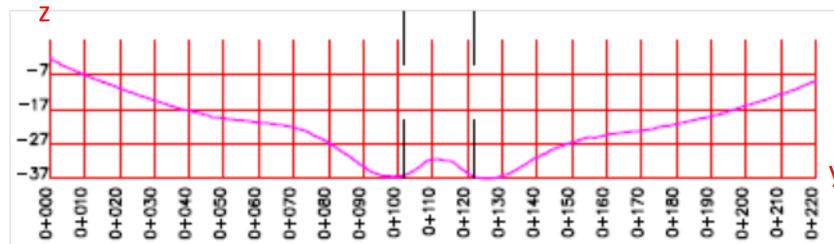


Figura 4.47 Perfil transversal 2 (Pilar alongado simples) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

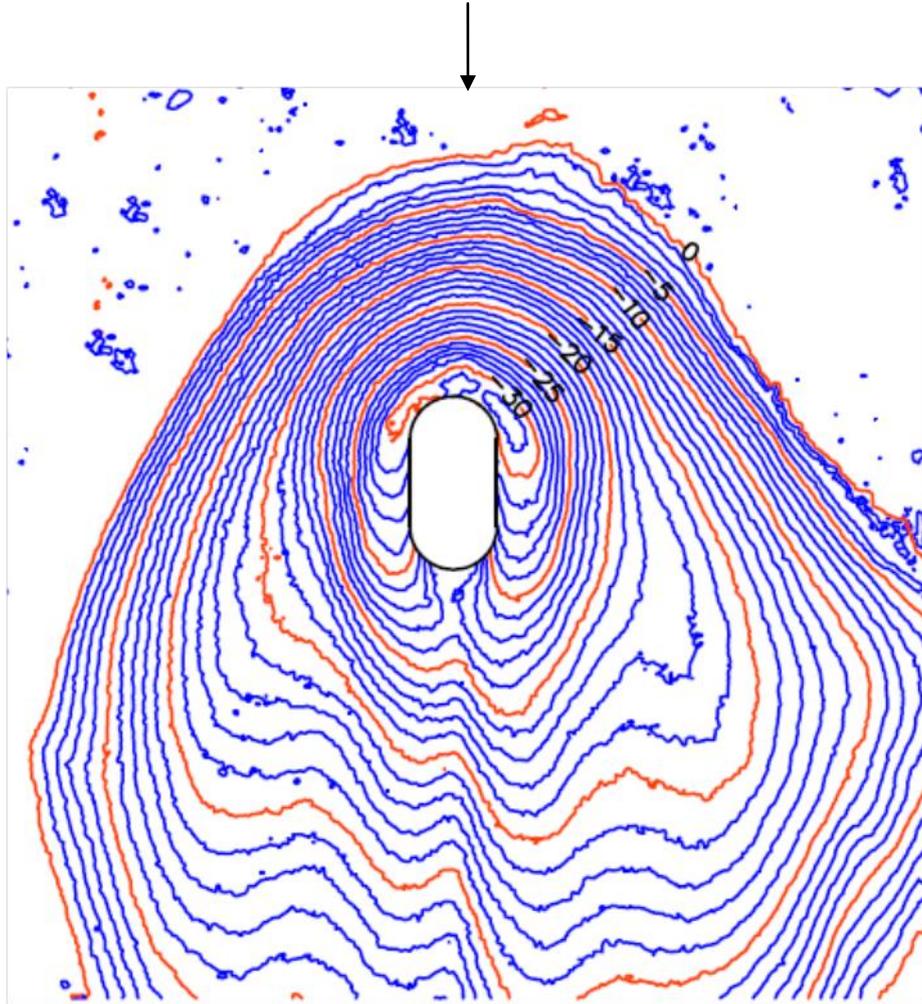
#### 4.2.2.4 Pilar alongado com ranhura

Nas figuras 4.48 a 4.51 apresentam-se as figuras referentes ao estudo da configuração da cavidade de erosão para o pilar alongado com ranhura.

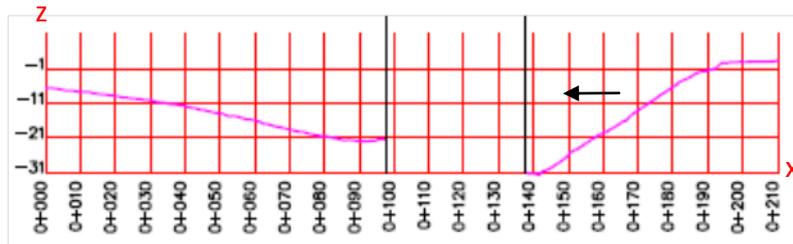
Na figura 4.48, comparando a zona de montante e de jusante do pilar, é evidente a diferença de inclinação do talude da cavidade de erosão e da profundidade atingida, sendo ambas maiores a montante do pilar. Uma vez mais, a máxima profundidade da cavidade de erosão verificou-se imediatamente a montante do pilar, apresentando um valor aproximadamente de 31 mm, face aos 33 mm verificados experimentalmente. Neste caso em particular, a simetria não é tão evidente, pelos motivos já anteriormente descritos.

A figura 4.49 vem comprovar que a profundidade da cavidade de erosão é maior a montante do que a jusante do pilar, e que a também a inclinação do talude da cavidade é maior a montante, comparativamente com jusante.

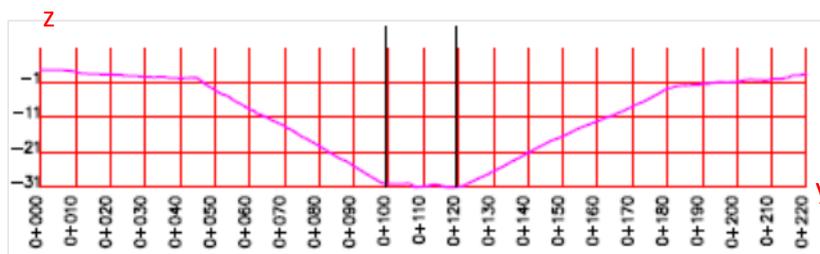
A observação das figuras 4.50 e 4.51 leva a concluir que, tal como em todos os outros pilares, a extensão da cavidade de erosão é maior a jusante do que a montante do pilar. As mesmas figuras comprovam ainda a discrepância na profundidade da cavidade de erosão entre montante e jusante do pilar. Uma vez mais, na figura 4.51 pode-se observar a deposição de sedimentos imediatamente a jusante do pilar.



**Figura 4.48** Curvas de nível (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2 (Espaçamento entre curvas de nível: 1mm, a seta indica o sentido do escoamento)



**Figura 4.49** Perfil longitudinal (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm, a seta indica o sentido do escoamento)



**Figura 4.50** Perfil transversal 1 (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

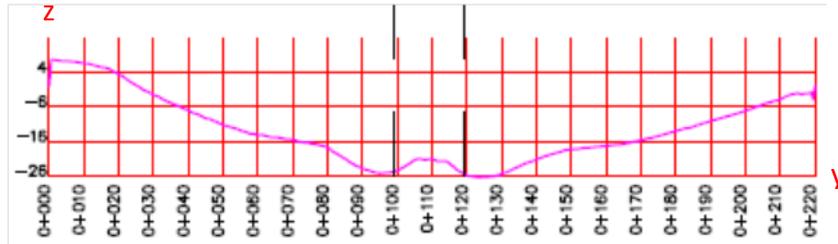


Figura 4.51 Perfil transversal 2 (Pilar alongado com ranhura) – Escala 1:2.5 (eixos em mm)

### 4.2.3 Análise e discussão dos resultados

Nesta subsecção passa-se à análise e discussão dos resultados obtidos nos ensaios experimentais com areia uniforme, bem como às análises comparativas com estudos anteriores.

#### 4.2.3.1 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão localizada

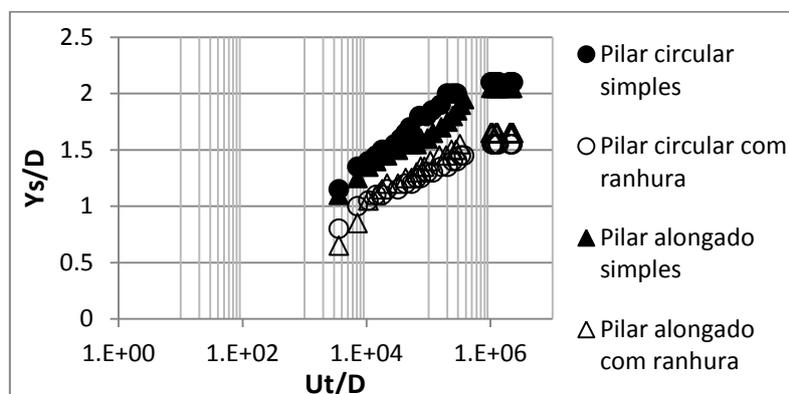
A presente subsecção tem como objetivo efetuar um estudo de comparação dos resultados obtidos sobre a evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão.

**Análise comparativa do presente estudo.** De forma a efetuar uma análise comparativa dos quatro ensaios realizados na segunda série, passa-se a condensar a informação anteriormente apresentada. Assim, na figura 4.52 estão presentes os resultados obtidos na segunda série de ensaios.

Como se pode observar no gráfico da figura 4.52, e tal como ocorrido na primeira série de ensaios, a máxima profundidade da cavidade de erosão evolui mais rapidamente na fase inicial do processo erosivo em todos os pilares. Observa-se também que existe uma concordância nos resultados para as fases iniciais nos pilares simples, começando os mesmos a divergir na fase principal, levando a resultados distintos. Nos pilares com ranhura, a concordância de resultados ocorre durante a fase principal, verificando-se alguma discrepância nas outras duas fases.

Pode também depreender-se que, tal como ocorreu na primeira série de ensaios, a implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento leva a uma redução

da máxima profundidade da cavidade de erosão, tanto nos pilares alongados, como nos pilares circulares.



**Figura 4.52** Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão dos quatro pilares da 2ª série de ensaios experimentais

A tabela 4.24 apresenta a profundidade máxima da cavidade de erosão atingida na fase de equilíbrio para cada um dos pilares bem como a percentagem de redução ( $r$ ) da profundidade máxima da cavidade de erosão com a implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento.

**Tabela 4.24** Percentagem de redução da profundidade máxima da cavidade de erosão – 2ª Série

Pilar	$y_s$ (mm)	$r$ [%]
Circular simples	42	26.2
Circular com ranhura	31	
Alongado simples	41	19.5
Alongado com ranhura	33	

Assim, pode mais uma vez concluir-se que a medida de alteração do escoamento é mais eficaz em pilares circulares do que em pilares alongados, uma vez que as reduções são de 26.2% e 19.5%, respetivamente.

Contrariamente ao que seria de esperar, nesta segunda série de ensaios não se verifica uma discrepância assinalável entre os pilares simples, uma vez que a profundidade atingida por ambos os pilares apenas difere um milímetro. Note-se que, ainda assim, a profundidade máxima da cavidade de erosão é maior no pilar circular simples do que no pilar alongado simples.

Quanto à duração das fases do processo erosivo, apresenta-se também a tabela 4.25, que resume toda a informação já anteriormente apresentada.

**Tabela 4.25** Resumo da duração das fases do processo erosivo – 2ª Série

<b>Pilar</b>	<b>Duração total do ensaio (min)</b>	<b>Fase</b>	<b>Duração (min)</b>
Pilar circular simples	3220	Inicial	30
		Principal	310
		Equilíbrio	2880
Pilar circular com ranhura	3160	Inicial	20
		Principal	1760
		Equilíbrio	1380
Alongado simples	3130	Inicial	15
		Principal	1915
		Equilíbrio	1200
Alongado com ranhura	3270	Inicial	30
		Principal	1500
		Equilíbrio	1740

Como se pode verificar através da análise da tabela, a fase inicial é sempre a fase de menor duração do processo erosivo, representando sempre menos de 1% da duração total do ensaio. Nos pilares circulares, a fase de equilíbrio aumenta drasticamente de duração com a implementação da medida de mitigação, enquanto nos pilares alongados a mesma diminui ligeiramente.

**Análise comparativa com a 1ª série de ensaios do presente estudo.** A presente subsecção tem como objetivo avaliar a influência da alteração da granulometria da areia utilizada para os ensaios experimentais na evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão. As figuras 4.53 a 4.56 apresentam os resultados obtidos da evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão para cada um dos pilares nas duas séries de ensaios.

Através da análise dos gráficos obtidos pode verificar-se que, à exceção do pilar circular com ranhura, a profundidade máxima da cavidade de erosão atinge valores menores na segunda série de ensaios nas fases inicial e principal, sendo que na fase de equilíbrio acaba por convergir ou até ultrapassar os valores da primeira série.

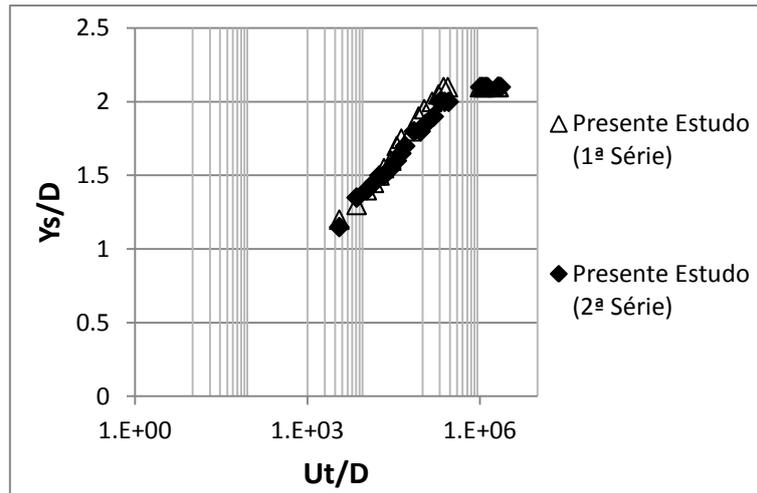


Figura 4.53 Análise comparativa dos pilares circulares simples do presente estudo (1ª e 2ª Série)

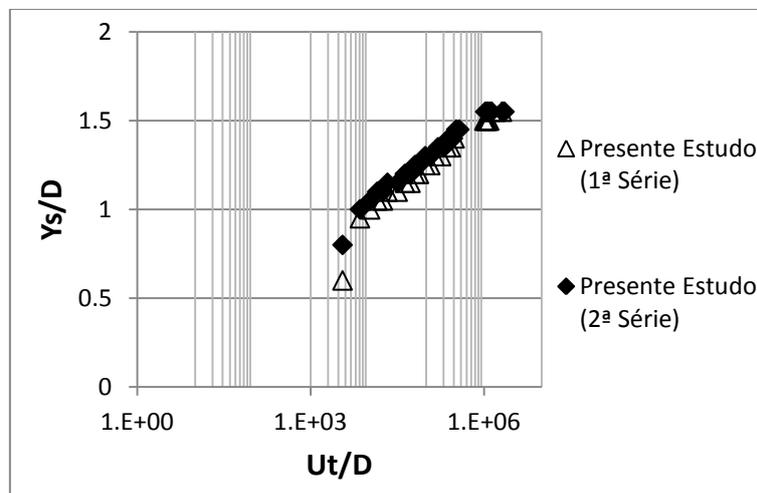


Figura 4.54 Análise comparativa dos pilares circulares com ranhura do presente estudo (1ª e 2ª Série)

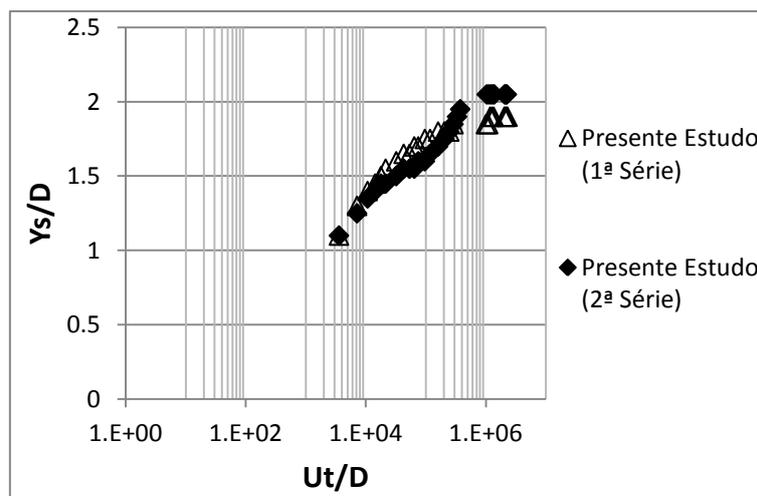
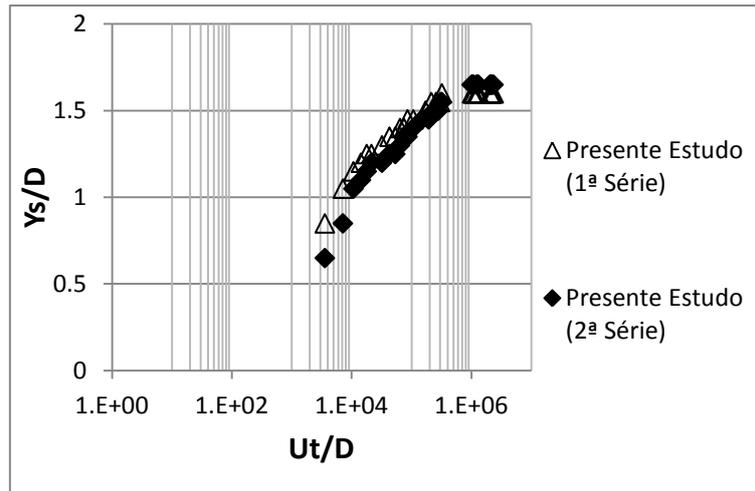


Figura 4.55 Análise comparativa dos pilares alongados simples do presente estudo (1ª e 2ª Série)



**Figura 4.56** Análise comparativa dos pilares alongados com ranhura do presente estudo (1ª e 2ª Série)

Para uma completa análise comparativa dos resultados obtidos, apresenta-se também a tabela 4.26 que sintetiza os valores da máxima profundidade da cavidade de erosão na fase de equilíbrio em cada um dos pilares, bem como a respetiva redução.

**Tabela 4.26** Estudo comparativo da máxima profundidade da cavidade de erosão

PILAR	Ys (mm)		r (%)	
	1ª Série	2ª Série	1ª Série	2ª Série
Circular	42	42	26.2	26.2
Circular com ranhura	31	31		
Alongado	38	41	15.8	19.5
Alongado com ranhura	32	33		

Através da análise da tabela 4.26 pode concluir-se que a alteração do coeficiente de graduação da curva granulométrica de 1.94 para 1.27 não origina alterações significativas nos resultados obtidos.

Nos pilares circulares, não se verificou qualquer alteração na profundidade no equilíbrio, e consequentemente na eficiência da medida de mitigação. Já nos pilares alongados observou-se um aumento da profundidade de 3 e 1 milímetros, respetivamente para o pilar simples e para o pilar com ranhura. Esta ligeira alteração levou obviamente a um aumento da eficiência da medida de mitigação nos pilares alongados. Seria de esperar que com a alteração para a areia uniforme existisse um aumento da profundidade máxima da cavidade de erosão localizada, o que apenas se observou nos pilares alongados.

Relativamente à duração de cada uma das fases do processo erosivo, apresenta-se a tabela 4.27 com a informação condensada.

**Tabela 4.27** Análise comparativa da duração das fases do processo erosivo

Pilar	Fase	1ª Série	2ª Série
		Duração (min)	
Pilar circular simples	Inicial	40	30
	Principal	286	310
	Equilíbrio	2640	2880
Pilar circular com ranhura	Inicial	45	20
	Principal	1559	1760
	Equilíbrio	1740	1380
Alongado simples	Inicial	30	15
	Principal	195	1915
	Equilíbrio	2985	1200
Alongado com ranhura	Inicial	20	30
	Principal	460	1500
	Equilíbrio	2820	1740

A análise da tabela 4.27 permite concluir que as fases iniciais do processo erosivo são sempre as fases de menor duração de todo o processo, e tendencialmente diminuem da primeira para a segunda série de ensaios (apenas no pilar alongado com ranhura se verificou um aumento de 10 minutos da fase inicial). Já a fase principal aumenta de duração da primeira para a segunda série de ensaios em todos os pilares.

Pode também verificar-se que nos ensaios realizados com areia não uniforme (1ª Série) a fase de equilíbrio é atingida mais rapidamente do que nos ensaios com areia uniforme (2ª Série), em todos os pilares ensaiados. Isto está de acordo com o efeito de encouraçamento (Leite, 2010), no entanto ressalta-se o facto de o valor final de  $Y_s/D$  atingido não apresentar variações significativas.

**Análise comparativa com o estudo Tafarojnoruz *et al.* (2012) e Grimaldi *et al.* (2009a e 2009b).** A presente secção tem como finalidade a análise comparativa dos resultados da segunda série de ensaios experimentais com estudos realizados anteriormente e presentes na bibliografia. Para uma mais correta interpretação e comparação dos resultados apresentam-se na tabela 4.28 as condições experimentais,

tanto do presente estudo, como dos estudos anteriores de Tafarojnoruz *et al.* (2012), Grimaldi *et al.* (2009a) e Grimaldi *et al.* (2009b).

**Tabela 4.28** Síntese das Condições Experimentais

	Presente Estudo (2ª Série)	Tafarojnoruz <i>et al.</i> (2012) (Série B)	Grimaldi <i>et al.</i> (2009a) (Série B)	Grimaldi <i>et al.</i> (2009b) (Série A)
B (m)	0.3	0.485	2	0.8
i (%)	0.2	0.06	0.012	0
h (m)	0.05	0.1	0.25	0.15
D <sub>50</sub> (mm)	0.328	0.76	0.7	1.3
$\sigma_g$	1.27	1.46	1.44	1.46
D (m)	0.02	0.04	0.09	0.075
U (m/s)	0.24	0.269	0.33	0.4
Q (m <sup>3</sup> /s)	0.0036	0.013	0.168	0.048
F	0.34	0.26	0.21	0.33
F <sub>p</sub>	0.54	0.43	0.36	0.47
Re	9169	10275	30240	30000
h/D	2.5	2.5	2.8	2
B/D	15	12.1	22.2	10.7
D/d <sub>50</sub>	61	52.6	132.2	58.6
B/h	6	4.85	8	5.33
U/U <sub>c</sub>	0.9	0.947	1	1

A presente análise foi efetuada recorrendo a métodos expeditos, uma vez que os estudos anteriores não apresentam os dados que dão origem aos gráficos referentes à evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão. Assim, e apenas com a informação dos gráficos, foi feita uma análise recorrendo à sobreposição dos gráficos anteriormente apresentados, com os gráficos presentes nos artigos. Obviamente que este trabalho requereu alguns cuidados adicionais, tal como a colocação dos eixos com as mesmas unidades. Passa-se então a apresentar os resultados obtidos, bem como breves análises aos mesmos.

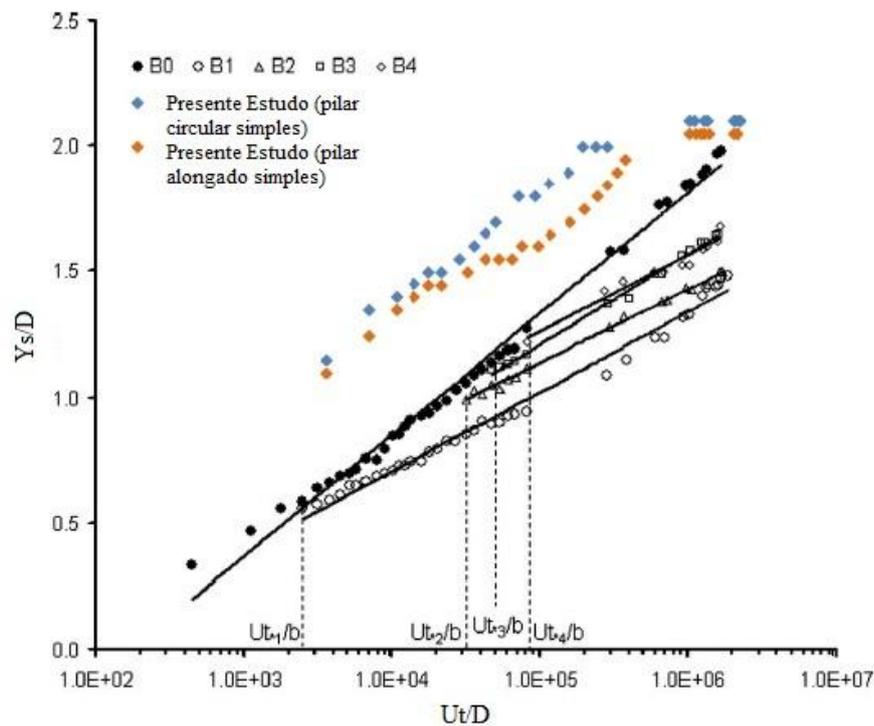


Figura 4.57 Análise comparativa do presente estudo (2ª série) com o estudo de Grimaldi et al. (2009a)

A figura 4.57 diz respeito ao estudo de Grimaldi *et al.* (2009a) (Série B), que tem como finalidade avaliar uma medida de mitigação de alteração do escoamento que consiste na colocação de uma espécie de parede enterrada no leito de sedimentos, de forma a minimizar a escavação. Deste modo, esses ensaios não são comparáveis com o presente estudo na vertente da medida de alteração do escoamento, mas pode sim efetuar-se uma análise comparativa dos pilares em que não foi implementada a referida medida (ensaio B0). Por este mesmo motivo, apenas se efetua a comparação com os pilares simples do presente estudo.

Pode desde já observar-se que se obtiveram profundidades bastante superiores no presente estudo, apesar de na fase de equilíbrio esta disparidade ser menos evidente. Pode observar-se que na fase de equilíbrio, o valor de  $Y_s/D$  no estudo de Grimaldi *et al.* (2009a) (Ensaio B0) aproxima-se de 2, enquanto no presente estudo  $Y_s/D$  ultrapassa ligeiramente este valor situando-se em 2.05 e 2.1.

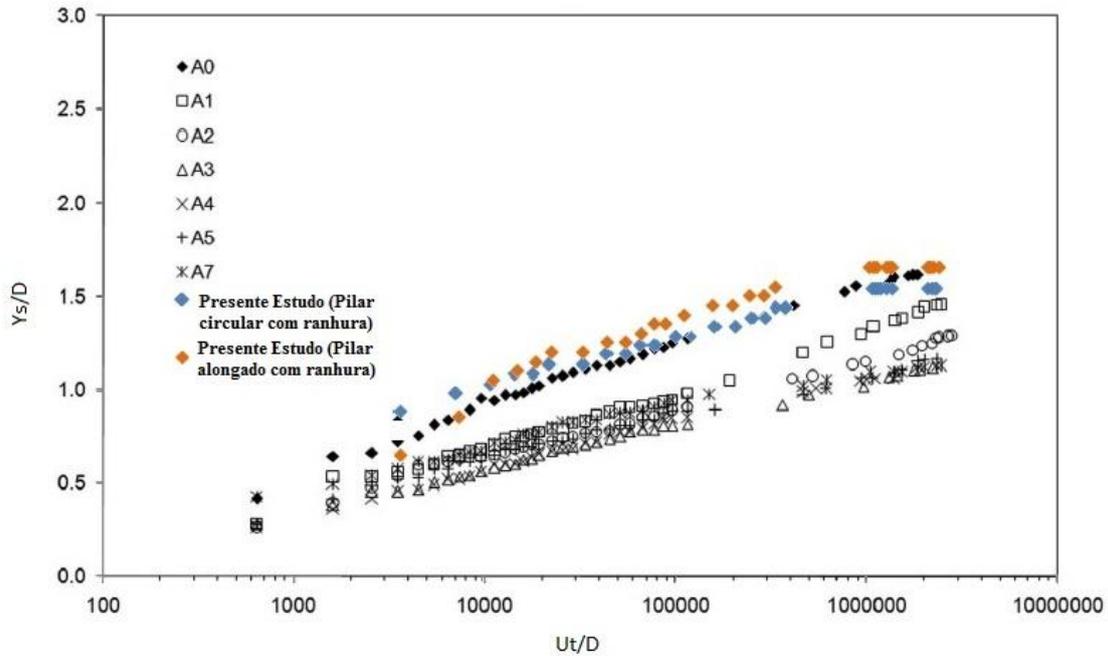


Figura 4.58 Análise comparativa do presente estudo (2ª série) com o estudo de Grimaldi et al. (2009b)

A figura 4.58 diz respeito à análise comparativa do presente estudo com o estudo de Grimaldi *et al.* (2009b) (Série A). O objetivo do estudo de Grimaldi *et al.* (2009b) (Série A) foi avaliar a eficiência da implementação de uma ranhura como medida de mitigação de alteração do escoamento, bem como da combinação da ranhura com colocação de parede enterrada no leito de sedimentos. Nesse trabalho os ensaios A1 a A5 correspondem a ensaios experimentais apenas com a ranhura implementada para diferentes valores de  $z_s/h$ . O ensaio A0 diz respeito ao ensaio experimental realizado com o pilar simples (sem medidas de mitigação de alteração do escoamento implementadas), e A7 corresponde ao ensaio experimental que combina as duas medidas de mitigação anteriormente mencionadas.

Deste modo, podem comparar-se os resultados obtidos no presente estudo para os pilares com ranhura, sendo que no presente estudo  $z_s/h$  toma o valor de  $\frac{1}{2}$ , correspondendo ao ensaio A4 de Grimaldi *et al.* (2009b). Observa-se ainda assim uma disparidade bastante elevada em  $Y_s/D$ , sendo que no presente estudo se atingiu profundidades bastante mais elevadas. No presente estudo,  $Y_s/D$  toma valores próximos de 1.5, enquanto o ensaio A4 apresenta valores próximos de 1.

Contudo, as evoluções temporais apresentam alguma concordância, uma vez que o declive é semelhante nos três ensaios em análise, revelando que a taxa de evolução da profundidade máxima da cavidade de erosão nos três ensaios é idêntica. Isto sugere que

as características da instalação experimental ou da metodologia experimental podem originar valores iniciais mais elevados que se traduziram num valor superior de  $Y_s/D$  na fase de equilíbrio.

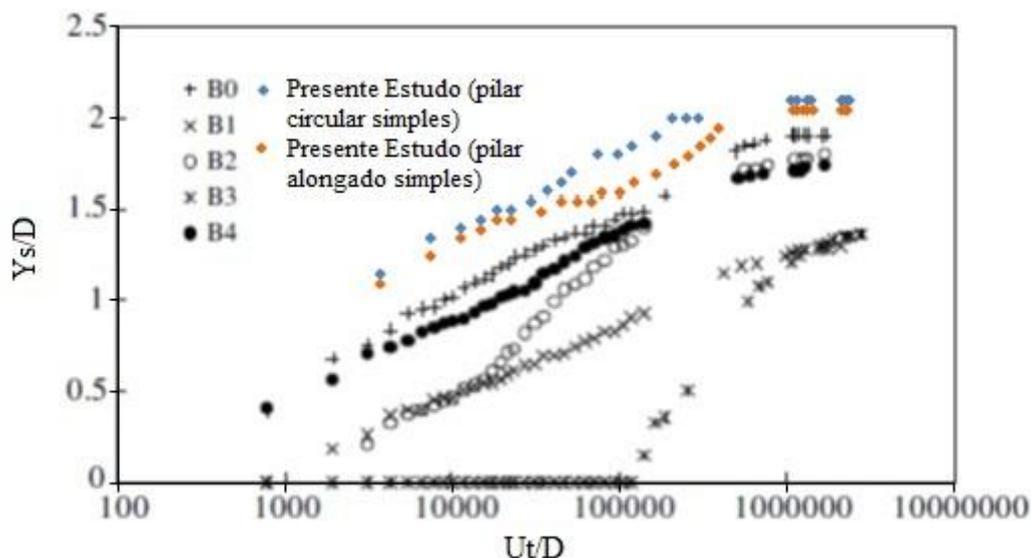


Figura 4.59 Análise comparativa do presente estudo (2ª série) com o estudo de Tafarojnoruz et al. (2012)

A figura 4.59 diz respeito à análise comparativa do presente estudo com o estudo de Tafarojnoruz *et al.* (2012). O estudo de Tafarojnoruz *et al.* (2012) tem como objetivo avaliar a eficiência de seis medidas de mitigação de alteração do escoamento, entre as quais a implementação de uma ranhura. Seria de facto interessante comparar uma vez mais os resultados obtidos nos pilares com ranhura, mas o estudo de Tafarojnoruz *et al.* (2012) não apresenta a evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão com a implementação da ranhura. Os resultados presentes no gráfico apenas dizem respeito aos ensaios B0 a B4, sendo que nenhum dos ensaios corresponde à implementação da ranhura como medida de mitigação de alteração do escoamento.

Assim, o ensaio B0 corresponde ao ensaio realizado por Tafarojnoruz *et al.* (2012) com um pilar simples, e B1 a B4 correspondem aos ensaios realizados no mesmo estudo com outras medidas de mitigação. Assim, apenas se pode realizar uma análise comparativa com os resultados obtidos para os pilares simples do presente estudo e B0 do estudo de Tafarojnoruz *et al.* (2012). Pode concluir-se através da análise do presente gráfico que, uma vez mais, no presente estudo se atingiram maiores profundidades, sendo que  $Y_s/D$  ultrapassou o valor de 2, e no estudo de Tafarojnoruz *et al.* (2012) não chega a atingir

esse valor. Uma vez mais, embora exista uma disparidade nos resultados de  $Y_s/D$ , a taxa de evolução é semelhante nos três ensaios em análise.

A análise generalizada das comparações efetuadas mostra-nos que no presente estudo se atingiram valores sempre superiores da profundidade máxima da cavidade de erosão comparativamente com os três estudos anteriormente realizados. Contudo se comparamos por exemplo os estudos de Grimaldi *et al.* (2009a) e Grimaldi *et al.* (2009b) para os pilares simples (B0 e A0 respetivamente), verifica-se também uma disparidade considerável no valor de  $Y_s/D$  no equilíbrio. Enquanto que no ensaio B0 o valor de  $Y_s/D$  no equilíbrio se aproxima de 2, no ensaio A0 este aproxima-se de 1.5. Assim pode concluir-se que, também entre os resultados publicados existe alguma disparidade nos resultados obtidos, considerando-se natural que não exista total concordância nos resultados quando se efetua uma análise comparativa do presente estudo com estudos anteriormente publicados.

Relativamente à eficiência da medida de mitigação implementada, e tal como já ocorreu com os ensaios da primeira série, apresenta-se o gráfico (figura 4.60) onde constam os resultados obtidos por Tafarojnoruz *et al.* (2012) e Grimaldi *et al.* (2009b) para a eficiência da implementação da ranhura como medida de mitigação de alteração do escoamento, bem como os resultados obtidos nesta segunda série de ensaios experimentais. Através da observação da figura 4.60, podemos tirar algumas conclusões sobre a eficiência da implementação da medida de alteração do escoamento.

Pode verificar-se através da análise do gráfico da figura 4.60 que o pilar circular do presente estudo apresentou uma eficiência de aproximadamente 26%, ficando mais perto da linha de tendência dos resultados de Grimaldi *et al.* (2009b) do que o pilar alongado, onde se verificou uma eficiência de aproximadamente 19%. Naturalmente, nesta segunda série de ensaios, onde se verificou um aumento da eficiência da medida nos pilares alongados, observa-se uma aproximação deste valor aos valores publicados nos estudos anteriores. Ainda assim, este resultado apresenta ainda um desfasamento considerável, uma vez que os resultados apresentados nos estudos anteriores referem-se a pilares circulares. Nada há a assinalar para esta segunda série nos pilares circulares, uma vez que a eficiência da medida de alteração do escoamento se manteve inalterada relativamente à primeira série.

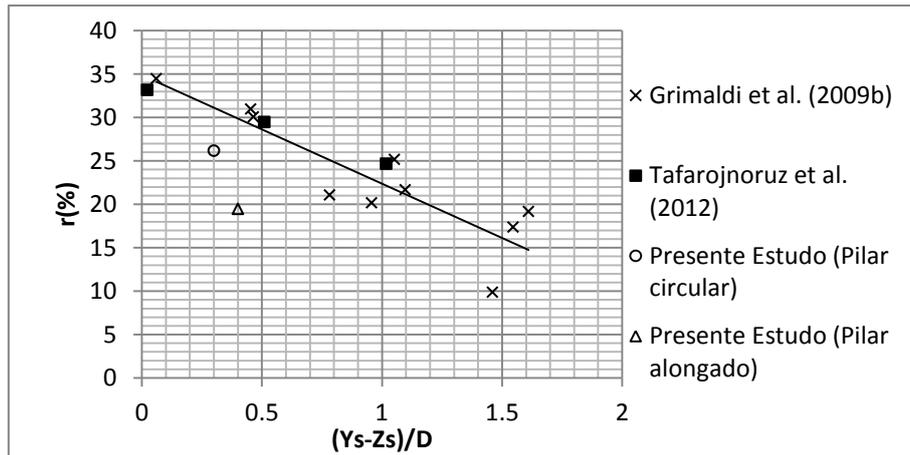


Figura 4.60 Estudo comparativo da percentagem de redução da máxima profundidade da cavidade de erosão

#### 4.2.3.2 Configuração da cavidade de erosão localizada

Através da análise das figuras que esquematizam as curvas de nível das cavidades de erosão (figuras 4.36, 4.40, 4.44, 4.48) verifica-se que as curvas apresentam uma maior proximidade entre elas a montante dos pilares, de onde se depreende que nesta zona a inclinação dos taludes das cavidades é superior. Pode também observar-se que as geometrias das cavidades de erosão apresentam alguma simetria em relação à direção principal do escoamento. Observando a cotagem das curvas de nível de todos os pilares, conclui-se que existe uma maior escavação a montante dos mesmos, que se deve à ação dos vórtices de ferradura.

Tal como para a primeira série de ensaios, de seguida, apresenta-se a tabela 4.29 que efetua a comparação dos valores obtidos para a profundidade máxima da cavidade de erosão no programa informático e nas leituras efetuadas nos ensaios experimentais, sendo a incerteza calculada pela expressão (4.2).

Tabela 4.29 Valores das profundidades máximas das cavidades de erosão (2ª Série)

Pilar	$Y_s$ (mm)	$ Z \text{ mínimo} $ (mm)	Incerteza (%)
Circular simples	42	42.8	1
Circular com ranhura	31	30.1	3
Alongado simples	41	42.5	4
Alongado com ranhura	33	31.8	4

Pode verificar-se que as incertezas obtidas têm valores aceitáveis, pelas razões já anteriormente enunciadas, sendo a maior incerteza igual a 1.2 mm.

Através da análise dos perfis longitudinais dos pilares em estudo confirma-se que a máxima profundidade da cavidade de erosão se verifica imediatamente a montante do pilar, independentemente da sua configuração. Esta correspondência pode-se também visualizar comparando a cota mínima do perfil longitudinal com a cota mínima do perfil transversal 1 de cada um dos pilares.

Tal como para a primeira série de ensaios, e de forma a poder analisar-se corretamente os resultados obtidos para as configurações das cavidades de erosão, foi realizado um estudo aos perfis longitudinais anteriormente apresentados. Do mesmo modo, foram medidos os ângulos entre as linhas de maior declive dos taludes das cavidades de erosão e o nível inicial da areia (a montante:  $\alpha$  e a jusante:  $\beta$ ), no perfil longitudinal no eixo do pilar. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 4.30.

**Tabela 4.30** Ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia (2ª Série)

Pilar	Ângulos (°)	
	$\alpha$	$\beta$
Circular simples	37	13
Circular com ranhura	32	12
Alongado simples	35	13
Alongado com ranhura	32	10

Uma vez mais, os ângulos a montante ( $\alpha$ ) aproximam-se dos valores típicos para os ângulos de repouso de areias.

Comparando os pilares simples, observa-se uma diferença significativa dos ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia a montante do pilar. Esta discrepância deve-se ao facto de que nos pilares alongados os vórtices de esteira não serem tão evidentes como nos pilares circulares, dissipando-se ao longo da dimensão longitudinal dos pilares alongados, levando a uma menor escavação.

No que diz respeito à implementação da medida de mitigação, observa-se uma diminuição dos ângulos do talude da cavidade de erosão, tal como na primeira série, uma vez que essa implementação tem como função diminuir a intensidade do

escoamento descendente e conseqüentemente dos vórtices de ferradura, resultando em menores profundidades das cavidades de erosão e em menores ângulos.

Também analisando os perfis transversais a jusante dos pilares, continua a observar-se no eixo de todos os pilares uma zona de deposição de sedimentos, que ocorre devido ao movimento do material mais leve de montante para jusante da cavidade de erosão, depositando-se na esteira dos pilares.

Comparando ainda os perfis transversais a montante e a jusante do pilar, observa-se que a extensão das cavidades é menor a montante do que a jusante dos pilares, devido ao despreendimento dos vórtices de esteira, atingindo no entanto menores profundidades do que a montante. Observa-se também uma diminuição da extensão da cavidade de erosão, a montante e a jusante, com a implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento, quer nos pilares alongados, quer nos pilares circulares.

À semelhança da primeira série de ensaios, também para a segunda série foram medidos nos perfis transversais os ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e a face do pilar, da forma anteriormente apresentada nas figuras 4.28 a 4.31. Os resultados obtidos apresentam-se na tabela 4.31.

**Tabela 4.31** Ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal e a face do pilar (2ª série)

Pilar	Perfil Transversal 1		Perfil Transversal 2					
	$\varphi$ (°)	$\lambda$ (°)	$\xi_1$ (°)	$\psi_1$ (°)	$\xi_2$ (°)	$\psi_2$ (°)	$\xi_3$ (°)	$\psi_3$ (°)
Circular simples	66	72	51	62	69	82	65	68
Circular com ranhura	73	63	50	52	52	69	76	89
Alongado simples	57	57	63	68	89	80	69	79
Alongado com ranhura	59	64	67	69	76	84	60	71

Tal como sucedeu com a primeira série de ensaios, relativamente aos perfis transversais a montante de cada pilar, não existe conclusão a tirar relativamente à implementação da medida de mitigação, uma vez que embora se verifique um aumento dos ângulos  $\varphi$  e  $\lambda$  com a implementação da medida de mitigação em todos os pilares, nos pilares circulares o ângulo  $\lambda$  diminui. Neste caso em particular, o maior desfasamento entre  $\varphi$  e  $\lambda$  é de

10°, no pilar circular com ranhura, ficando assim mais clara a semelhança entre a inclinação dos taludes da cavidade de erosão do lado esquerdo e direito do pilar.

Relativamente aos perfis transversais 2, tal como já foi dito na primeira série de ensaios, as inclinações são extremamente sensíveis à extensão lateral da cavidade de erosão, uma vez que as mesmas variam bastante ao longo da mesma. Uma vez mais, verifica-se que em média os ângulos  $\xi$  e  $\psi$  são maiores nos pilares alongados do que nos pilares circulares. Como já foi mencionado, tendencialmente, à medida que se avance da face do pilar para a esquerda ou para a direita ao longo do eixo y, dever-se-ia verificar  $\xi_1 < \xi_2 > \xi_3$  e  $\psi_1 < \psi_2 > \psi_3$ , respetivamente. Nesta segunda série de ensaios, esta tendência volta a verificar-se em todos os pilares, exceto no pilar circular com ranhura, uma vez que neste pilar a extensão lateral da cavidade é a menor, justificando-se a exceção devido ao facto de a medição dos ângulos ter sido feita às mesmas distâncias das faces de cada pilar.

De forma análoga à primeira série de ensaios, foram calculados os ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia nos perfis transversais, que se apresentam na tabela 4.32.

**Tabela 4.32** Ângulos formados entre a tangente à linha que define o perfil transversal e o nível inicial da areia (2ª série)

Pilar	Perfil Transversal 1		Perfil Transversal 2					
	$\varphi'$ (°)	$\lambda'$ (°)	$\xi_1'$ (°)	$\psi_1'$ (°)	$\xi_2'$ (°)	$\psi_2'$ (°)	$\xi_3'$ (°)	$\psi_3'$ (°)
Circular simples	24	18	39	28	21	8	25	22
Circular com ranhura	17	27	40	38	38	21	14	1
Alongado simples	33	33	27	22	1	10	21	11
Alongado com ranhura	31	26	23	21	14	6	30	19

Da análise da tabela 4.32 importa mencionar que efetuando a comparação entre os ângulos medidos nos perfis transversais 1 (a montante do pilar) e os ângulos  $\alpha$  dos perfis longitudinais (a montante do pilar), pode-se concluir que os ângulos dos perfis transversais apresentam valores inferiores.

Dos ângulos dos perfis transversais a jusante dos pilares (perfis transversais 2) ao observa-se que em média os ângulos são menores para os pilares alongados.

### **4.3 Conclusões**

Na presente secção apresentam-se algumas das conclusões tiradas com base na análise dos resultados obtidos nos ensaios experimentais.

#### **4.3.1 Ensaios Experimentais com areia não uniforme**

##### **4.3.1.1 Profundidade máxima da cavidade de erosão**

Após a análise e discussão dos resultados, podem tirar-se algumas conclusões sobre a profundidade máxima da cavidade de erosão. Tal como descrito em estudos anteriores, verificou-se que a máxima profundidade da cavidade de erosão evolui mais rapidamente na fase inicial do processo erosivo e ocorre sempre no ponto imediatamente a montante do pilar.

Pode também concluir-se que a implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento leva a uma redução da máxima profundidade da cavidade de erosão, tanto nos pilares alongados, como nos pilares circulares, embora nos pilares circulares essa redução se apresente mais acentuada. Nos pilares simples, profundidade máxima da cavidade de erosão é maior no pilar circular do que no pilar alongado. Nos pilares com ranhura esta disparidade já não se verifica, sendo que a medida de mitigação não se apresenta tão eficaz em pilares alongados.

Quanto à duração das fases do processo erosivo conclui-se que a fase inicial é sempre a fase de menor duração, representando em média, 1% da duração total do ensaio. Verifica-se também que as diferentes fases do processo erosivo têm durações gradualmente maiores, da fase inicial para a fase de equilíbrio.

É também de assinalar que a duração da fase principal aumenta com a implementação da medida de mitigação, tanto nos pilares circulares, como nos alongados.

A comparação dos resultados obtidos no presente estudo com o estudo de Leite (2013) revela que os resultados da profundidade máxima da cavidade de erosão, embora com discrepâncias significativas nos instantes iniciais, acabam por convergir nos pilares com

ranhura, apresentando diferenças significativas nos pilares simples. Ainda assim, no presente estudo a profundidade máxima da cavidade de erosão verificou-se sempre inferior do que no estudo de Leite (2013), à exceção do pilar circular com ranhura.

Relativamente ao estudo comparativo com ensaios realizados noutras publicações quanto à eficiência da medida de mitigação, pode-se concluir que no presente estudo os resultados ficam um pouco aquém do esperado, embora ainda assim o valor da eficiência nos pilares circulares se aproxime mais do que nos pilares alongados dos valores obtidos nos estudos anteriores.

#### **4.3.1.2 Configuração da cavidade de erosão localizada**

O estudo das configurações das cavidades de erosão permite confirmar que, embora existam alguns erros, o programa utilizado para o tratamento dos moldes se adequa à análise pretendida.

Esta análise confirma também que a máxima profundidade da cavidade de erosão se verifica sempre no ponto imediatamente a montante de cada pilar.

Através da análise dos perfis longitudinais de cada pilar conclui-se que os ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia é sempre superior a montante do que a jusante, independentemente do pilar.

Importa também referir que a implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento leva à diminuição da profundidade máxima da cavidade de erosão, bem como à diminuição dos ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia, tanto no pilar circular, como no alongado.

Quanto à extensão da cavidade de erosão, conclui-se que a mesma atinge valores superiores a jusante do pilar, comparativamente com a de montante, independentemente da sua configuração. Conclui-se também que esta extensão diminui com a implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento, tanto nos pilares circulares como nos pilares alongados.

Relativamente aos ângulos medidos nos perfis transversais, é importante mencionar que se verifica em todos os pilares uma grande variação da inclinação do talude da cavidade de erosão ao longo do perfil transversal a jusante dos pilares. Verifica-se ainda que, em média, os ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e a face de cada pilar, são maiores nos pilares alongados do que nos pilares circulares.

Assinala-se ainda que a montante, não se verifica uma variação assinalável na inclinação dos taludes ao longo da extensão dos perfis transversais.

### **4.3.2 Ensaios Experimentais com areia uniforme**

#### **4.3.2.1 Profundidade máxima da cavidade de erosão**

Tal como ocorreu na primeira série de ensaios, a máxima profundidade da cavidade de erosão evolui mais rapidamente na fase inicial do processo erosivo em todos os pilares. Verificou-se também que a máxima profundidade da cavidade de erosão é maior no pilar circular simples do que no pilar alongado simples. Nos pilares com ranhura a profundidade máxima é maior no pilar alongado do que no pilar circular.

A implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento leva a uma redução da máxima profundidade da cavidade de erosão, tanto nos pilares alongados, como nos pilares circulares, embora a mesma se revele mais eficaz em pilares circulares do que em pilares alongados.

Contrariamente ao que seria de esperar, nesta segunda série de ensaios não se verifica uma discrepância assinalável na profundidade máxima da cavidade de erosão entre os pilares simples, uma vez que a profundidade atingida por ambos os pilares apenas difere um milímetro.

Quanto à duração das fases do processo erosivo, verifica-se que a fase inicial é sempre a fase de menor duração do processo erosivo, representando sempre menos de 1% da duração total do ensaio. Nos pilares circulares, a fase de equilíbrio aumenta drasticamente de duração com a implementação da medida de mitigação, enquanto nos pilares alongados a mesma diminui ligeiramente.

Através do estudo comparativo entre os ensaios realizados com areia uniforme e não uniforme, verifica-se à exceção do pilar circular com ranhura, a profundidade máxima da cavidade de erosão atinge valores menores na segunda série de ensaios nas fases inicial e principal, sendo que na fase de equilíbrio acaba por atingir ou até ultrapassar os valores da primeira série, na fase de equilíbrio. Assim, conclui-se que com a areia uniforme, os resultados obtidos para a máxima profundidade da cavidade de erosão são sempre iguais ou superiores aos resultados obtidos com a areia não uniforme.

Nos pilares circulares, não se verificou qualquer alteração na profundidade no equilíbrio, e conseqüentemente na eficiência da medida de mitigação. Já nos pilares alongados observou-se um aumento da profundidade de 3 e 1 milímetros respectivamente para o pilar simples e para o pilar com ranhura. Esta ligeira alteração levou obviamente a um aumento da eficiência da medida de mitigação nos pilares alongados.

Pode também concluir-se que todos os ensaios realizados com areia uniforme levaram mais tempo a atingir a fase de equilíbrio comparativamente com os ensaios realizados com areia não uniforme.

Relativamente à análise comparativa com os estudos de Tafarojnoruz *et al.* (2012) e Grimaldi *et al.* (2009a e 2009b), conclui-se que os resultados obtidos no presente estudo para a evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão apresentam concordância relativamente ao ritmo de evolução, mas apresentam algum desfasamento em termos de profundidade máxima no equilíbrio. Assim, embora exista algumas semelhanças no ritmo da evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão em todos os quatro estudos em análise, verifica-se que no presente estudo se atingiu profundidades sempre superiores do que nos três estudos anteriormente publicados.

Contudo, também nos três estudos em análise publicados anteriormente se verificam algumas discrepâncias quanto aos valores de  $Y_s/D$  no equilíbrio, inclusivamente nos dois estudos publicados pelos mesmos autores (Grimaldi *et al.*, 2009a e 2009b).

Quanto à eficiência da medida de mitigação implementada, e comparando com os estudos de Grimaldi *et al.* (2009b) e Tafarojnoruz *et al.* (2012), conclui-se que no presente estudo se atingiram eficiências mais baixas do que o expectável, embora naturalmente se verifique maior concordância nos pilares circulares.

#### **4.3.2.2 Configuração das cavidades de erosão localizada**

Após a análise da geometria das cavidades de erosão existem algumas conclusões tiradas que importa mencionar.

Assim, relativamente à análise das curvas de nível resultantes da análise dos moldes obtidos nos ensaios experimentais conclui-se que a maior profundidade da cavidade de erosão se verifica no ponto imediatamente a montante do pilar, independentemente da

sua configuração. Conclui-se também que em todos os pilares se verificou que a inclinação do talude da cavidade de erosão é maior a montante do que a jusante.

A implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento resulta na diminuição da profundidade máxima da cavidade de erosão, bem como na diminuição dos ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia a montante, tanto no pilar circular, como no alongado.

A extensão da cavidade de erosão verificou-se maior a jusante do que a montante em todos os pilares. Observa-se também que tanto nos pilares circulares, como nos pilares alongados, a extensão diminui com a implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento, quer a montante, quer a jusante dos pilares.

Dos ângulos medidos nos perfis transversais a jusante dos pilares verifica-se uma grande variação da inclinação ao longo da extensão lateral da cavidade. Conclui-se ainda que, em média, os ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e a face de cada pilar são maiores nos pilares alongados comparativamente com os pilares circulares.

A montante, não se verifica uma variação assinalável na inclinação dos taludes ao longo da extensão lateral dos perfis transversais.

## 5 CONCLUSÃO E PESPETIVAS PARA O FUTURO

O presente capítulo tem como objetivo a apresentação sintetizada das conclusões da dissertação, bem como deixar algumas sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 Conclusões

Numa primeira fase, o objetivo passou pela caracterização da evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão. Assim sendo, pode concluir-se que:

1. A máxima profundidade da cavidade de erosão evolui mais rapidamente na fase inicial do processo erosivo;
2. A fase inicial do processo erosivo é sempre a fase de menor duração, e representa cerca de 1% da duração total do ensaio;
3. A implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento leva a uma redução da máxima profundidade da cavidade de erosão, tanto nos pilares alongados, como nos pilares circulares;
4. Nos pilares simples, profundidade máxima da cavidade de erosão é maior no pilar circular do que no pilar alongado;
5. A implementação de uma ranhura como medida de mitigação é mais eficaz em pilares circulares do que em pilares alongados;
6. A fase de equilíbrio leva mais tempo a ser atingida nos ensaios realizados com areia uniforme, comparativamente aos ensaios realizados com areia não uniforme;
7. As profundidades máximas das cavidades de erosão nos ensaios com a areia uniforme foram sempre iguais ou muito pouco superiores às verificadas nos ensaios com areia não uniforme;
8. As eficiências verificadas no presente estudo ficam aquém das eficiências verificadas noutras publicações, independentemente da areia utilizada, embora a eficiência dos pilares circulares fique mais próxima;
9. As profundidades máximas das cavidades de erosão no presente estudo foram maiores do que noutros estudos publicados, embora também exista alguma discrepância entre as profundidades atingidas noutras publicações;

Numa segunda fase, pretendeu-se caracterizar a configuração das cavidades de erosão, podendo-se concluir que:

1. A utilização de moldes de vaselina e parafina permite a análise da topografia da cavidade de erosão;
2. Embora se verifiquem algumas incertezas, o programa utilizado para o tratamento dos moldes adequa-se à análise pretendida;
3. A máxima profundidade da cavidade de erosão verifica-se sempre no ponto imediatamente a montante de cada pilar.
4. Os ângulos formados entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia são sempre superiores a montante do que a jusante, independentemente do pilar.
5. Os ângulos formados entre a linha de maior declive do talude da cavidade de erosão e o nível inicial da areia diminuem com a implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento, tanto nos pilares circulares, como nos pilares alongados;
6. A montante de cada pilar, os ângulos formados entre os taludes das cavidades de erosão e o nível inicial da areia nos perfis transversais são, em média, inferiores aos ângulos formados entre a linha de maior declive dos taludes da cavidade de erosão e o nível inicial da areia nos perfis longitudinais.
7. A extensão da cavidade de erosão atinge valores superiores a jusante do pilar, comparativamente com a de montante, independentemente do pilar;
8. As extensões a montante e a jusante diminuem com a implementação da medida de mitigação de alteração do escoamento, tanto nos pilares circulares como nos pilares alongados.

## **5.2 Sugestão para trabalhos futuros**

Com o intuito de alargar a bibliografia existente sobre a erosão localizada, deixam-se algumas sugestões para trabalhos experimentais futuros:

1. Utilizar gravações de vídeo e efetuar a visualização do escoamento com recurso a um traçador, com o objetivo de relacionar a estrutura do escoamento com a configuração da cavidade de erosão;

2. Realizar ensaios de maior duração de forma a inferir sobre a fiabilidade dos critérios de paragem presentes na bibliografia;
3. Estudar experimentalmente outras medidas de mitigação do fenómeno de erosão localizada;
4. Utilizar outros *softwares* para o tratamento de moldes, de forma a reduzir a incerteza;
5. Analisar a possibilidade de utilizar equipamentos de medida mais sofisticados, diminuindo a incerteza associada à leitura da máxima profundidade da cavidade de erosão.



## **BIBLIOGRAFIA**

Briaud, J.L., Chen, H.C., Li, Y., Nurtjahyo, P. E Wang, J., Complex Pier Scour and Contraction Scour in Cohesive Soils, National Cooperative Highway Research Program, Report 24-15, Transportation Research Board, National Research Council (2003).

Brito, L., Pêgo, J. P., Maia, R., Estudo Experimental de Erosões Localizadas junto de Pilares Complexos, Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, ISBN 978-989-95557-5-4 (2011).

Chang, W., Lai, J., Yen, C., Evolution of Scour Depth at Circular Bridge Piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 130(9), 905-913 (2004).

Couto, L.T. e Cardoso, A.H., Erosões Localizadas Junto de Encontros e Pilares de Pontes. Parte I - Caracterização da situação de referência, Recursos Hídricos, 22(1), 65 74 (2001a).

Dey, S. e Raikar, R.V., Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 133(4)- Abr., 399-413, (2007).

Ettema, R., Melville B.W. e Barkdoll, B., Scale effect in pier-scour experiments, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 124(6)- Jun., 639-642 (1998).

Gaudio, R., Tafarjnoruz, A., Calomino, F., Combined flow-altering countermeasures against bridge pier scour, Journal of Hydraulic Research, Vol. 50, Iss. 1 (2012).

Graf, W.H. e Istiarto, I., Flow pattern in the scour hole around a cylinder, Journal of Hydraulic Research, Vol. 40, Iss. 1 (2002).

Gusmão Filho, J. A., Fundações de Pontes: Hidráulica e Geotécnica, Editora Universitária UFPE (2008).

Hoyt, J. W., Sellin, R. H. J., Three-dimensional visualization of large structures in the turbulent boundary layer, *Experiments in Fluids* 30 295-301 (2001).

Khosronejad, A., Kang, S., Sotiropoulos, F., Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers, *Advances in Water Resources*, Vol. 37 (2012).

Kirkil, G., Constantinescu, S. G., Ettema, R., Coherent Structures in the Flow Field around a Circular Cylinder with Scour Hole, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 134(5), 572-587 (2008).

Kirkil, G., Constantinescu, S. G., Ettema, R., Detached Eddy Simulation Investigation of Turbulence at a Circular Pier with Scour Hole, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 135(11), 888-901 (2009).

Leite, E., Estudo Experimental da Erosão Localizada em Pilares de Pontes, Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (2012).

Leite, E. Estudo Experimental do Efeito de Ranhuras na Erosão Localizada na Vizinhaça de Pilares de Pontes Circulares e Alongados, Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (2013).

Lima, M.M.C.L., Estudo Experimental da Erosão Localizada na Proximidade de Pilares de Pontes, *Revista Civil-UM*, 41-52 (2008).

Lima, M.M.C.L. e Leite, E., Configuração da cavidade de erosão localizada na proximidade de pilares de diferente secção, IV Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia, MEFTE (2012).

Melville, B.W. e Chiew, Y.M., Time scale for local scour at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 125(1)- Jan., 59-65 (1999).

Novais-Barbosa, J, Mecânica dos Fluidos e Hidráulica Geral, vol 1, Porto Editora, Porto, 479 (1986).

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

Pinheiro, R.M.C., Estudo Experimental da Erosão em Pilares de Pontes, Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (2010).

Pinho, J.L.S., Apontamentos das Aulas de Hidráulica Fluvial, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho (2013).

Richardson, E. V. e Davies, S. R., *Evaluating Scour at Bridges*, 4ª Ed., US Department of Transportation, HEC 18, FHWA-NHI-01-001 (2001).

Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J. e Michelsen, J., Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile, *Journal of Fluid Mechanics*, 534, 351-401 (2005).

Simarro, G., Teixeira, L., Cardoso, A., Flow Intensity Parameter in Pier Scour Experiments, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 133(11), 1261-1264 (2007).

Tafarojnoruz, A., Gaudio, R., Calomino, F., Evaluation of Flow-Altering Countermeasures against Bridge Pier Scour, *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 138(3), 297-305 (2012).

Unger, J. e Hager, W.H., Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers, *Experiments in Fluids*, 42, 1–19 (2007).