



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Francisca Luís Ferreira da Costa Leite

Estudo Experimental do Efeito de Ranhuras
na Erosão Localizada na Vizinhança de Pilares
de Pontes Circulares e Alongados



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Francisca Luís Ferreira da Costa Leite

Estudo Experimental do Efeito de Ranhuras
na Erosão Localizada na Vizinhança de Pilares
de Pontes Circulares e Alongados

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

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

outubro de 2013

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Manuela Lima, orientadora desta dissertação, pela orientação, apoio, disponibilidade demonstrada ao longo da execução de toda a dissertação.

Ao Sr. Rui Oliveira, técnico do Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos pelo acompanhamento prestado ao longo desta dissertação, bem como a disponibilidade em ajudar a resolver todos os problemas enfrentados nas etapas envolvidas nos ensaios laboratoriais.

Ao Professor Doutor Fernando Moura Duarte e ao Professor Doutor António Pontes do Departamento de Engenharia de Polímeros, pela disponibilidade utilização do equipamento Roland's 3D Laser scanner LPX-600.

Ao Marcelo Costa, aluno do Departamento de Engenharia de Polímeros pela disponibilidade que teve para me ensinar a utilizar o equipamento Roland's 3D Laser scanner LPX-600.

Ao Jonathan Silva, por ter tido disponibilidade para me ajudar a trabalhar os moldes 3D em AutoCad.

Um agradecimento especial à minha Mãe, Jesuína, e Irmãs, Ana e Celina, pelo apoio prestado ao longo de toda a minha carreira académica.

Ao meu Pai.

RESUMO

Uma das causas associada ao colapso de pontes é o fenómeno de erosão localizada na vizinhança de pilares de pontes. É importante prever a profundidade máxima da cavidade de erosão localizada em redor dos pilares, pois a estrutura pode entrar em colapso e originar acidentes, pondo em risco vidas humanas.

A presente dissertação descreve um estudo experimental da erosão localizada na proximidade de pilares de pontes. Para analisar este fenómeno, foram utilizados quatro pilares com 20 mm de dimensão transversal, sendo dois circulares e dois alongados. Um dos pilares circulares e um dos pilares alongados apresentavam uma ranhura (“*slot*”), correspondente a uma medida de alteração do escoamento. Os outros pilares, circular e alongado, eram simples. Foi utilizada uma areia com diâmetro médio de 0,332 mm, uma altura de água do escoamento igual a 5 cm e um caudal de $12,9 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$. Estudou-se a evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão.

Observou-se que a profundidade máxima da cavidade de erosão evolui mais rapidamente na fase inicial do processo erosivo. Comparando os pilares com ranhura com os pilares simples, a profundidade da cavidade de erosão foi maior nos simples. Comparando as geometrias dos pilares, no pilar alongado observou-se que a profundidade da cavidade de erosão localizada foi menor.

Foram retirados moldes da cavidade de erosão localizada de todos os ensaios realizados de forma a estudar o relevo da cavidade de erosão.

Palavras-chave: Erosão localizada, Transporte sólido, Pilares de pontes, Medidas de alteração do escoamento, Relevo da cavidade de erosão.

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.

The present dissertation describes an experimental study of scour around bridges piers. In order to analyse this phenomenon, four piers with 20 mm of transversal dimension each were used, two of them were and the other two oblong. One circular pier and one oblong pier featured a hole (“slot”) corresponding to a flow-altering countermeasure. The others circular and oblong pier were simple. Sand with a mean diameter of 0,332 mm was used, in a free surface flow with a water depth equal to 5 cm and a flow rate equal to 12,9 m³h⁻¹. The temporal evolution of the maximum scour depth was studied.

It was observed that the maximum scour depth develops more quickly in the initial phase of the erosive process. Comparing piers with flow-altering countermeasures with simple piers, the scour hole maximum depth was higher in case of the simple piers. Comparing the piers geometries, it was observed that the scour hole maximum depth was smaller in case of oblong piers.

Paraffin and vaseline casts were used to study the scour hole topography for all the experiments that were carried out.

Key-Words: Scour, Sediment transport, Bridge piers, Flow-altering countermeasures, Scour hole topography.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABELAS	xv
NOMENCLATURA.....	xvii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Importância e enquadramento do estudo	1
1.2 Objectivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 REVISÃO DO ESTADO DE ARTE.....	5
2.1 Introdução	5
2.2 Conceitos hidráulicos.....	5
2.3 Transporte sólido	7
2.4 Tipos de erosão	12
2.5 Erosão localizada na proximidade de pilares de pontes	12
2.5.1 Análise dimensional	14
2.5.2 Previsão da profundidade máxima da cavidade de erosão	15

2.5.3 Fases do processo erosivo	19
2.5.4 Factores que influenciam a erosão localizada.....	20
2.6 Semelhança hidráulica a considerar nos estudos de um modelo.....	26
3 MÉTODO EXPERIMENTAL.....	29
3.1 Introdução.....	29
3.2 Instalação experimental.....	29
3.3 Secção de teste.....	30
3.4 Escolha dos parâmetros	31
3.4.1 Areia.....	31
3.4.2 Geometria dos pilares.....	32
3.5 Medição da evolução da profundidade máxima da cavidade de erosão.....	35
3.6 Digitalização do molde da cavidade máxima de erosão.....	36
3.7 Condições experimentais.....	36
3.8 Metodologia experimental.....	37
3.8.1 Fase de montagem.....	38
3.8.2 Fase de execução.....	39
3.8.3.Digitalização dos moldes	40
4 EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DA CAVIDADE DE EROSÃO LOCALIZADA.....	43
4.1 Introdução.....	43
4.2 Resultados experimentais	43

4.2.1	Previsão da máxima profundidade da cavidade de erosão	44
4.2.2	Evolução da cavidade máxima de erosão	45
4.3	Comparação com estudo anterior	54
4.3.1	Pilares circulares	54
4.3.2	Pilares alongados	55
4.3.3	Análise de resultados	56
4.4	Conclusões	56
5	CAVIDADES DE EROSÃO LOCALIZADA	59
5.1	Primeira série de ensaios	59
5.1.1	Cavidade de erosão pilar P1	60
5.1.2	Cavidade de erosão pilar P2	62
5.1.3	Cavidade de erosão pilar P3	64
5.1.4	Cavidade de erosão pilar P4	66
5.2	Segunda série de ensaios	68
5.2.1	Cavidade de erosão pilar P1	69
5.2.2	Cavidade de erosão pilar P2	71
5.2.3	Cavidade de erosão pilar P3	73
5.2.4	Cavidade de erosão pilar P4	75
5.3	Geometria da cavidade de erosão	77
5.4	Conclusão	79

6	CONCLUSÃO	81
6.1	Conclusões.....	81
6.2	Sugestão para trabalhos futuros.....	82
	BIBLIOGRAFIA	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de Hjulstrom.....	8
Figura 2.2: Forças atuantes sobre uma partícula sólida (retirado de Leite 2010).....	9
Figura 2.3: Diagrama de Shields (retirado de Schiereck (2001)).....	11
Figura 2.4: Diagrama de tensões gerado pela presença de um obstáculo (retirada de Fonseca, 2011).....	13
Figura 2.5: Erosão localizada na proximidade de um pilar circular (retirada de Roulund et al., 2005).....	13
Figura 2.6: Fases do processo erosivo (adaptada de Cardoso and Bettess, 1999).....	19
Figura 2.7: Formas de pilares (adaptada de Melville e Coleman, 2000).....	22
Figura 2.8: Tipos de pilares (adaptada de Melville e Coleman, 2000).....	22
Figura 2.9: Vários exemplos de pilares com medidas de alteração do escoamento, retirada de Tafarojnoruz et al., (2012).....	24
Figura 2.10: Evolução da profundidade de erosão junto a pilares.....	25
Figura 2.11: Variação da profundidade de erosão ao longo do tempo e velocidade do escoamento (retirada de (Melville e Chiew, 1999)).....	26
Figura 3.1: Canal hidráulico do Departamento de Engenharia Civil	29
Figura 3.2: Secção de teste (sentido de escoamento da esquerda para a direita)	30
Figura 3.3: Cortes das diferentes partes da secção de teste	31
Figura 3.4: Curva granulométrica da areia do estudo experimental.....	32
Figura 3.5: Diferentes configurações de pilares com ranhura	32
Figura 3.6: Parâmetros geométricos de um pilar alongado com ranhura	33

Figura 3.7: Pilares usados no estudo experimenta (P1, P2, P3 e P4 da esquerda para a direita)	34
Figura 3.8: Marcação do pilar	35
Figura 3.9: Equipamento Roland´s 3D Laser Scanner LPX-600	36
Figura 3.10: Resultado final da fase de montagem	38
Figura 3.11: Exemplo da colocação da mistura de parafina e vaselina para a extração do molde	39
Figura 3.12: Molde extraído do canal	40
Figura 3.13: (a) Suporte para fixar o molde; (b) molde após digitalização	41
Figura 3.14: Modelação de um molde da cavidade de erosão através do AutoCad	41
Figura 4.1: Evolução da profundidade máxima da cavidade de erosão de todos os pilares (P1, P2, P3 e P4)	45
Figura 4.2: Percentagem de redução da profundidade máxima da cavidade de erosão em função de $(Y_s-Z_s)/D$ para pilares com ranhuras $l_s=h$. Comparação com resultados de Tafarojnoruz et al. (2012)	47
Figura 4.3: Fases do processo erosivo do pilar P1 (circular simples)	48
Figura 4.4: Fases do processo erosivo do pilar P2 (circular com ranhura)	48
Figura 4.5: Fases do processo erosivo do pilar P3 (alongado simples)	49
Figura 4.6: Fases do processo erosivo do pilar P4 (alongado com ranhura)	50
Figura 4.7: Evolução temporal da profundidade de erosão do pilar P1 (circular simples)	51
Figura 4.8: Evolução temporal da profundidade de erosão do pilar P2 (circular com ranhura)	51
Figura 4.9: Evolução temporal do pilar P3 (alongado simples)	52

Figura 4.10: Evolução temporal do pilar P4 (alongado com ranhura)	52
Figura 4.11: Diferenças das configurações da cavidade de erosão (a) P1, pilar circular simples (b) P2, pilar circular com ranhura.....	53
Figura 4.12: Diferenças das configurações da cavidade de erosão (a) P3, pilar alongado simples (b) P4, pilar alongado com ranhura	53
Figura 4.13: Resultados experimentais para pilares circulares simples	55
Figura 4.14: Resultados experimentais para pilares alongados simples.....	56
Figura 5.1: Profundidade máxima da cavidade de erosão do pilar P1 (circular simples)	60
Figura 5.2: Perfil longitudinal do pilar P1 (pilar circular simples)	61
Figura 5.3: Curvas de nível do pilar P1 (pilar circular simples), com espaçamento de 1mm ..	61
Figura 5.4: Profundidade máxima da cavidade de erosão do pilar P2 (circular com ranhura) ..	62
Figura 5.5: Perfil longitudinal do pilar P2 (pilar circular com ranhura).....	63
Figura 5.6: Curvas de nível do pilar P2 (pilar circular com ranhura), com espaçamento de 1mm.....	63
Figura 5.7: Profundidade máxima da cavidade de erosão do pilar P3 (alongado simples).....	64
Figura 5.8: Perfil longitudinal do pilar P3 (pilar alongado simples)	65
Figura 5.9: Curvas de nível do pilar P3 (pilar alongado simples) com espaçamento de 1mm.....	65
Figura 5.10: Profundidade máxima da cavidade de erosão do pilar P4 (alongado com ranhura)	66
Figura 5.11: Perfil longitudinal do pilar P2 (pilar alongado com ranhura)	67
Figura 5.12: Curvas de nível do pilar P2 (pilar alongado com ranhura), com espaçamento de 1mm	67

Figura 5.13: Molde da cavidade de erosão no final da fase inicial do processo erosivo do pilar circular simples	69
Figura 5.14 Perfil longitudinal do pilar P1 (pilar circular simples)	69
Figura 5.15: Curvas de nível do pilar P1 (pilar circular simples) com espaçamento de 1mm	70
Figura 5.16: Molde da cavidade de erosão no final da fase inicial do processo erosivo do pilar circular com ranhura	71
Figura 5.17: Perfil longitudinal do pilar P2 (pilar circular com ranhura)	71
Figura 5.18: Curvas de nível do pilar P2 (pilar circular com ranhura), com espaçamento de 1mm	72
Figura 5.19: Molde da cavidade de erosão no final da fase inicial do processo erosivo do pilar alongado simples.....	73
Figura 5.20: Perfil longitudinal do pilar P3 (pilar alongado simples)	73
Figura 5.21: Curvas de nível do pilar P3 (pilar alongado simples),com espaçamento de 1mm	74
Figura 5.22: Molde da cavidade de erosão no final da fase inicial do processo erosivo do pilar alongado com ranhura.....	75
Figura 5.23: Perfil longitudinal do pilar P4 (pilar alongado com ranhura).....	75
Figura 5.24: Curvas de nível do pilar P4 (pilar alongado com ranhura), com espaçamento de 1mm	76
Figura 5.25: Exemplo de distâncias longitudinais e transversais na cavidade de erosão	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Valores do factor de correção da forma do pilar, K_1	15
Tabela 2.2: Valores do factor de correção do ângulo, K_2	16
Tabela 2.3: Valor do factor de correção da função de forma do leito de escoamento, K_3	16
Tabela 2.4: Parâmetros da equação 2.16 (Melville e Chiew, 1999)	17
Tabela 2.5: Parâmetros de equação 2.19 (Chang et al., 2004)	19
Tabela 2.6: Estudos consultados.....	21
Tabela 3.1: Características da areia	31
Tabela 3.2: Geometria dos pilares adoptada para o estudo experimental	34
Tabela 3.3: Condições experimentais	37
Tabela 4.1: Resultados das duas séries experimentais	43
Tabela 4.2: Resultados obtidos a partir das Normas Americanas	44
Tabela 4.3: Resultados obtidos a partir das fórmulas de Melville	44
Tabela 4.4: Resultados obtidos a partir das fórmulas de Chang.....	44
Tabela 4.5: Percentagem de redução (r) da profundidade máxima da cavidade de erosão dos pilares P2 e P4 comparativamente com o pilar P1 e P3, respectivamente	46
Tabela 4.6: Equações das linhas de tendência do pilar P1 (circular simples)	48
Tabela 4.7: Equações das linhas de tendência do pilar P2 (circular com ranhura)	49
Tabela 4.8: Equações das linhas de tendência do pilar P3 (alongado simples).....	49
Tabela 4.9: Equações das linhas de tendência do pilar P4 (alongado com ranhura).....	50

Tabela 4.10: Condições experimentais para pilares circulares simples	55
Tabela 4.11: Condições experimentais para pilares alongados simples	55
Tabela 5.1: Condições experimentais dos moldes recolhidos.....	59
Tabela 5.2: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia. Pilar P1 (montante e jusante).....	62
Tabela 5.3: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia. Pilar P1 e P2 (montante e jusante).....	64
Tabela 5.4: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia. Pilar P1, P2 e P3 (montante e jusante)	66
Tabela 5.5: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia. Pilar P1, P2, P3 e P4 (montante e jusante)	68
Tabela 5.6: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia, pilar P1 1ª e 2ª série	70
Tabela 5.7: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia, pilar P2 1ª e 2ª série	72
Tabela 5.8: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia, pilar P3 1ª e 2ª série	74
Tabela 5.9: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia, pilar P4 1ª e 2ª série	76
Tabela 5.10: Distância do extremo do pilar até à cota mais baixa no molde (primeira série de ensaios).....	78
Tabela 5.11: Distância do extremo do pilar até à cota mais baixa no molde (segunda série de ensaios).....	78
Tabela 5.12: Diferenças de distâncias entre a primeira e segunda série de ensaios	79

NOMENCLATURA

CARACTERES ROMANOS

B	Largura do canal
c_1, c_2	Coefficientes empíricos da expressão da tensão crítica de arrastamento
D	Diâmetro do pilar
D_{50}	Diâmetro médio dos sedimentos
F_D	Força de arrastamento
F_r	Número de Froude
g	Aceleração da gravidade
h	Altura do escoamento
i	Inclinação de fundo do canal
J	Perda de carga unitária do escoamento
K_1	Factor de correção da forma do nariz do pilar
K_2	Factor de correção do ângulo da direção principal do pilar com o escoamento
K_3	Factor de correção função da forma do leito de escoamento
K_4	Factor de correção função da dimensão do material de fundo
K_d	Factor tamanho da partícula
K_g	Coefficiente de forma da secção transversal
K_{hD}	Factor relação profundidade/diâmetro do pilar
K_I	Factor intensidade do escoamento
K_p	Factor de forma do pilar
K_t	Factor tempo
L	Comprimento do pilar
P_1	Pilar circular simples
P_2	Pilar circular com ranhura
P_3	Pilar alongado simples
P_4	Pilar alongado com ranhura
Q	Caudal
R_e	Número de Reynolds
s	Densidade das partículas de fundo
t	Tempo
t_e	Tempo de equilíbrio
U	Velocidade
U_c	Velocidade crítica

u_*	Velocidade de atrito
W	Peso submerso
y_s	Profundidade da cavidade de erosão

CARACTERES GREGOS

α	Ângulo a montante do pilar
β	Ângulo a jusante do pilar
θ	Ângulo de alinhamento do pilar com o escoamento
γ	Peso específico da água
γ_s	Peso específico dos sedimentos
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Massa volúmica da água
ρ_s	Massa volúmica dos sedimentos
σ_D	Coefficiente de graduação da curva granulométrica
τ_0	Tensão tangencial
τ_C	Tensão crítica de arrastamento
τ_g	Desvio padrão geométrico dos sedimentos
Ψ_C	Parâmetro de Shields

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância e enquadramento do estudo

Uma das causas do colapso de pontes é o fenómeno da erosão localizada na vizinhança de pilares de pontes, sendo este mais frequente durante os cenários de cheia (Cardoso e Bettess, 1999 e Melville e Chiew, 1999). Devido a este fenómeno, têm ocorrido acidentes no mundo inteiro sendo este a maior causa de ruptura destas estruturas. Em Portugal temos como exemplo trágico da queda da ponte Hintze Ribeiro sobre o rio Douro, no dia 4 de Março de 2001 que ligava Entre-os-rios e Castelo de Paiva, resultando em várias mortes.

A problemática da erosão em pilares de pontes tem sido abordada por vários autores, desde os anos 70 do século XX (Breusers et al., 1977). Têm sido investigados diversos métodos de previsão da cavidade máxima junto a pilares e encontros de pontes, visto que se trata de um problema bastante abrangente envolvendo não só conhecimentos a nível de hidráulica mas também conhecimentos geotécnicos e estruturais. Para controlo deste fenómeno, é necessário o estudo da ocorrência da profundidade máxima de cavidade de erosão localizada na proximidade de pilares de pontes (Hill e Younkin, 2006).

Para o estudo da erosão localizada são conhecidos parâmetros que influenciam a sua ocorrência. O primeiro passo para a análise deste fenómeno é determinar as variáveis envolvidas no processo (altura de água do escoamento, a dimensão e uniformidade dos sedimentos, a geometria do pilar, a velocidade de aproximação ao pilar do escoamento e o tempo de duração) (Simarro et al., 2007). Sendo um fenómeno que muito interessa à comunidade científica ligada à área de engenharia hidráulica e por ser um acontecimento de elevada complexidade, a abordagem mais praticada é a via experimental (Simarro et al., 2007). Para além disto, a via experimental possibilita ainda a obtenção de resultados relevantes para a validação de métodos numéricos (Roulund et al., 2005).

Encontram-se na literatura da especialidade um conjunto significativo de estudos experimentais, sendo o pilar utilizado cilíndrico, na maioria dos casos. Os estudos debruçam-se em especial na previsão da máxima profundidade da cavidade de erosão e na sua evolução temporal. Uma abordagem diferente consiste no estudo pela via experimental de soluções que possibilitem evitar a ocorrência do fenómeno da erosão localizada ou minimizar os seus

efeitos. Segundo Tafarojnoruz et al. (2012), as medidas para evitar a erosão localizada incluem medidas que alteram o escoamento e medidas de proteção do leito de sedimentos. Uma ampla revisão dos estudos realizados mostra que a alteração do caudal de escoamento apresenta baixa eficiência em termos de redução de cavidade de erosão (Tafarojnoruz et al., 2012). Encontram-se mais recentemente um conjunto significativo de estudos (Gaudio et al., 2012, Grimaldi et al., 2009a e Grimaldi et al., 2009b), que apresentam a topografia da cavidade de erosão, que pode ser relevante para a validação de métodos numéricos (Khosronejad et al., 2012).

Desta forma, e dada a atualidade da investigação em curso sobre esta temática, justifica-se a proposta do presente estudo experimental da erosão localizada na vizinhança de pilares de pontes. Será dada especial atenção à caracterização do fenómeno na vizinhança de um pilar retangular de extremidades semicirculares, ou seja, um pilar alongado, e ao estudo de soluções técnicas que permitam minimizar a erosão localizada. A escolha deste pilar reside no fato de ser uma geometria mais próxima da realidade e ainda pouco estudada (Leite, 2010). O estudo será complementado com a caracterização tridimensional da cavidade de erosão localizada em torno dos pilares de diferente geometria e para diferentes instantes temporais.

1.2 Objectivos

A presente dissertação tem como principal objetivo a análise experimental da erosão localizada em pilares de pontes. Para a concretização deste objetivo geral é necessária a realização dos seguintes objetivos específicos:

- definição da geometria do pilar a utilizar e da medida de alteração do escoamento a estudar;
- realização de ensaios em canal hidráulico, de modo a que seja possível o levantamento tridimensional das características da cavidade de erosão através de moldes de vaselina e parafina. A análise destes moldes será realizada por meio de técnicas de levantamento tridimensionais, necessárias para a definição da cavidade de erosão e procurando-se relacionar com a turbulência do escoamento;
- estudo da variação temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão.

Para a realização destes objetivos foi adoptado um método experimental, que permitiu observar a evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão, para os diferentes pilares utilizados, assim como comparar estes valores medidos com os valores estimados pelas fórmulas de previsão da máxima profundidade da cavidade de erosão.

Numa primeira fase foi necessário fazer a análise detalhada dos parâmetros experimentais a utilizar para a elaboração dos trabalhos. Os parâmetros foram escolhidos com base na literatura existente, de forma a prever a cavidade máxima de erosão. Assim sendo, foi feita a análise granulometria da areia a utilizar e foram seleccionados os valores de caudal e altura de água do escoamento a serem utilizados bem como a respectiva duração dos ensaios. Foi igualmente definida a geometria a adoptar para os diferentes pilares a estudar.

Seguidamente prosseguiu-se com o trabalho experimental para caracterizar e medir a evolução da máxima profundidade da cavidade de erosão localizada na proximidade de pilares de pontes, para os diferentes pilares e medidas de alteração do escoamento a adoptar.

Por último foram recolhidos os respectivos moldes da cavidade de erosão, recolhidos numa fase inicial e posterior dos ensaios e foi efetuada a análise desses moldes recorrendo ao seu levantamento tridimensional.

1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação é constituída por seis capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se a importância e enquadramento do estudo da erosão localizada na vizinhança de pilares de pontes, bem como os objectivos a atingir. No segundo capítulo é apresentada a pesquisa e revisão bibliográfica dos aspectos mais importantes a considerar à cerca deste tema. No terceiro capítulo descreve-se o método experimental adoptado, bem como o equipamento utilizado ao longo do trabalho experimental. No quarto capítulo apresentam-se e analisam-se os resultados dos ensaios realizados, para as diferentes geometrias de pilares e diferentes instantes temporais, com o propósito de estudar a influência destas variáveis na evolução da máxima profundidade da cavidade de erosão. No quinto capítulo estuda-se a configuração das cavidades de erosão localizada, através da digitalização tridimensional dos moldes recolhidos do final de cada ensaio. Por último, no sétimo capítulo, expõem-se as conclusões finais desta dissertação e apresentam-se algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DO ESTADO DE ARTE

2.1 Introdução

No seguinte capítulo apresenta-se uma pesquisa com base na bibliografia existente sobre o fenómeno da erosão localizada em pilares de pontes, focando os parâmetros mais relevantes.

2.2 Conceitos hidráulicos

O escoamento com superfície livre é caracterizado pelo contacto entre dois fluidos (usualmente água e ar) através de uma superfície de contacto, onde as pressões ao longo do percurso se mantêm constantes (o mais usual é ser a pressão atmosférica). A dificuldade associada a este tipo de escoamento é a variação que lhe está associada, quer em termos de variação no espaço quer de variação no tempo.

Em relação à variável tempo, os escoamentos são classificados como permanentes e não permanentes. Esta classificação é feita atendendo à variação ou constância das suas características em relação ao tempo, ou seja, quando todas as variáveis são independentes do tempo os escoamentos são classificados como permanentes e não permanentes quando existe pelo menos uma variável dependente do tempo. No caso destas se manterem invariáveis, é possível uma outra subdivisão em relação à constância da velocidade média do escoamento ao longo do eixo do canal que, a verificar-se ou não, dará origem, respectivamente, ao movimento uniforme ou variado.

No que diz respeito à grandeza da velocidade do escoamento, os escoamentos podem ser classificados como laminares, de transição ou turbulentos.

Os escoamentos laminares são escoamentos nos quais as partículas têm velocidades relativamente pequenas, e tendem a percorrer trajetórias paralelas no sentido do escoamento. Trata-se de um escoamento de tal forma estável e regular que qualquer perturbação causada é instantaneamente suavizada. Podem ser escoamentos permanentes ou não permanentes, mas a variação ao longo do tempo é relativamente lenta.

O regime turbulento caracteriza-se pela sua irregularidade e pela mistura que ocorre em toda a massa fluida. As partículas apresentam um comportamento instável ao longo do escoamento, provocando vórtices e frequências sequenciais e originando movimentos de agitação.

Entre o regime laminar e o turbulento, existe uma fase de transição, onde as velocidades observadas são um pouco mais altas do que no laminar, e verifica-se um ligeiro aumento de agitação face a este regime.

Neste fenómeno da erosão está associado o escoamento em torno de um obstáculo (ou seja, pilar da ponte). Estes tipos de escoamentos são classificados através do número de Reynolds (equação 2.1),

$$Re = \frac{U \times h}{\nu} \quad (2.1)$$

onde U é a velocidade média, h a largura média do obstáculo no escoamento e ν a viscosidade cinemática do fluido. O número de Reynolds é um número índice, adimensional, usado na mecânica dos fluidos para o cálculo de regime dos escoamentos, em escoamentos de superfície livre ou sobre pressão. O seu significado físico é o quociente entre as forças de inércia e as forças de viscosidade. A importância fundamental deste número é a possibilidade de se avaliar a estabilidade do fluxo, podendo classificar se o escoamento flui de forma laminar, com valores inferiores a 2000, ou turbulenta, com valores superiores a 2000.

Por sua vez, um escoamento com superfície livre pode ser classificado em função do número de Froude (equação 2.2), razão entre forças inerciais e de campo gravitacional numa determinada seção.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \times h}} \quad (2.2)$$

O número de Froude permite definir três tipos de regime de escoamento:

- Escoamento fluvial (lento), $Fr < 1$;
- Escoamento torrencial (rápido), $Fr > 1$;
- Escoamento crítico, $Fr = 1$.

2.3 Transporte sólido

O estudo do fenómeno de transporte sólido é essencial nos tempos que correm, pois trata-se de processo presente em várias áreas do nosso quotidiano. Em relação à engenharia hidráulica o seu estudo é importante pelo facto dos sedimentos serem prejudiciais a projetos e operações de obras hidráulicas (barragens, órgãos especiais, obras marítimas, etc.). Os sedimentos são ainda determinantes na conservação do solo e recursos hídricos.

O transporte sólido ocorre devido à existência de uma interface entre o fluido em movimento e a fronteira de fundo móvel, provocando erosão. A atividade entre os meios é de difícil compreensão devido à gama de velocidades presente no escoamento e os resultados de difícil interpretação devido às formas da camada limite de fundo (Sheppard e Miller Jr, 2006).

Os sedimentos podem ser transportados em dois diferentes modos:

- rolando ou deslizando sobre o fundo (transporte por arrastamento);
- em suspensão na massa de água (transporte em suspensão).

A interação entre os sedimentos e as ações dos escoamentos pode ser classificada como:

- estável, caso em que as forças induzidas pelo escoamento não provocam erosão no leito, nem nas margens;
- dinamicamente estável, caso em que as forças provocadas pelo escoamento causam movimentos no leito, podendo ser observado o fenómeno de erosão e decomposição dos sedimentos;
- instável, caso em que existe grande quantidade de transporte de sedimento devido às forças do escoamento e estas estão continuamente a causar erosão.

Para determinar a capacidade de transporte e de erosão, recorre-se ao diagrama de Hjulstrom (figura 2.1).

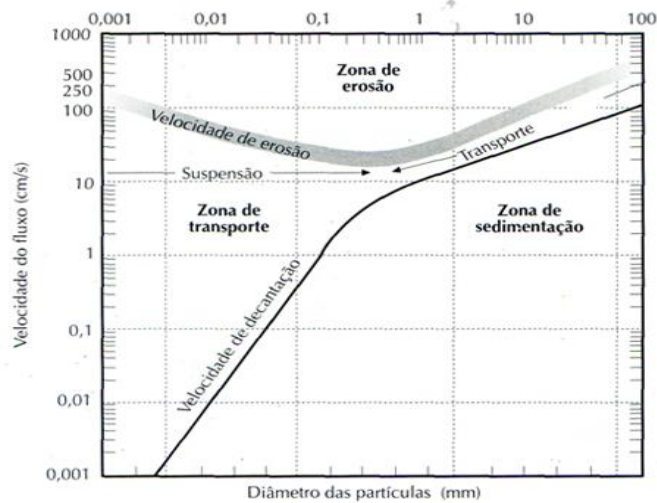


Figura 2.1: Diagrama de Hjulstrom

Este diagrama relaciona o diâmetro da partícula e velocidade para mostrar campos da erosão, transporte e deposição. Conforme a velocidade do escoamento e o tamanho do sedimento podem ocorrer erosão, transporte ou deposição. Para uma determinada velocidade de escoamento onde se observa a deposição para uma determinada partícula com uma dada dimensão, os sedimentos com dimensões inferiores podem estar a ser transportados. Quando a capacidade de transporte é superior à de deposição, observa-se o fenómeno de erosão. Estas características são pontos importantes a serem considerados no transporte mecânico de sedimentos.

Uma sintonia entre o escoamento e o transporte de sedimentos, dá origem a diferentes configurações de fundo de leito (Cardoso, 1998). A configuração do fundo do leito pode ser:

- rugas, caso em que o movimento dos sólidos é caracterizado por baixos valores do número de Froude;
- dunas, caso em que o movimento dos sólidos é caracterizado por valores moderados do número de Froude;
- transição ou leito plano, caso em que o movimento dos sólidos é caracterizado por valores do número de Froude médios, mas inferiores a 1 (configuração caracterizada por alisamento das cristas das dunas);
- antidunas ou rápidos e fundões, caso em que o movimento dos sólidos é caracterizado por valores do número de Froude superiores a 1.

A caracterização do movimento incipiente com base no conceito da tensão crítica de arrastamento, considera que as partículas da superfície do leito de fundo de um canal estão sujeitas à ação de forças hidrodinâmicas devido ao escoamento e de forças resistentes devido ao peso submerso das partículas. Desta forma, uma partícula entra em movimento quando as ações solicitadoras superam as ações resistentes. Na situação crítica as ações, solicitadoras e resistentes, que atuam numa partícula são praticamente iguais, mantendo-se esta em equilíbrio estático (Cardoso, 1998).

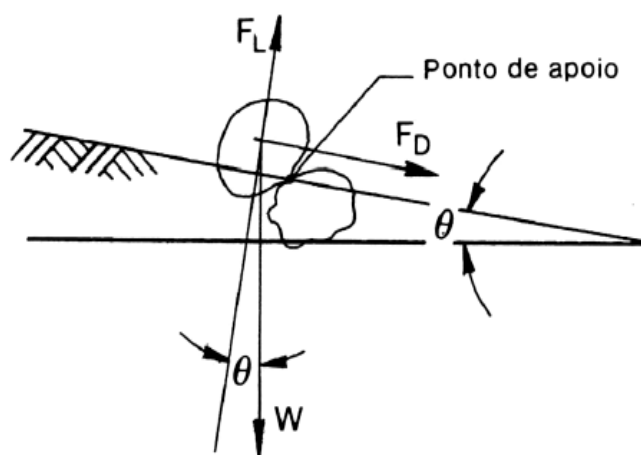


Figura 2.2: Forças atuantes sobre uma partícula sólida (retirado de Leite 2010)

Segundo a figura 2.2, as ações que incidem sobre partícula de diâmetro D são dadas pela força de arrastamento F_D , que actua segundo a direcção e sentido do escoamento, e pela força de sustentação hidrodinâmica F_L , normal a F_D . A única acção resistente existente é o peso submerso W . No entanto, a força de sustentação hidrodinâmica F_D , não é directamente considerada, pelo facto de ser de difícil contabilização. Como a sustentação e o arrastamento não são independentes, os efeitos da sustentação são considerados através de coeficientes contemplados no arrastamento (Cardoso, 1998).

A força de arrastamento, F_D , está relacionada com a tensão de arrastamento τ_0 e exprime-se pela equação (2.2):

$$F_D = C_1 \tau_0 D^2 \quad (2.3)$$

O peso submerso, W , depende do peso volúmico dos sedimentos (γ_0) e da água (γ), de acordo com a equação (2.3):

$$W = C_2(\gamma_0 - \gamma)D^3 \quad (2.4)$$

O equilíbrio de força no movimento traduz-se da seguinte forma (equação (2.4)):

$$w \cos(\theta) \tan(\theta) = F_D + W \sin(\theta) \quad (2.5)$$

Substituído F_D e W pelas respectivas equações (2.2) e (2.3), obtém-se a tensão crítica de arrastamento τ_c , isto é, a tensão de arrastamento para condições de início de movimento (equação (2.5)):

$$\tau_c = \frac{C_2}{C_1}(\gamma_0 - \gamma)D \cos(\theta) [\tan \theta_r - \tan(\theta)] \quad (2.6)$$

sendo θ e θ_r o ângulo formado entre a trajetória do sedimento e o peso submerso da partícula.

Como alternativa, o início do movimento pode ser caracterizado em função da velocidade:

- Critério baseado na velocidade de atrito u_* . A relação entre a velocidade de atrito e a tensão tangencial é dada por (equação (2.6)):

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (2.7)$$

sendo τ_0 a tensão tangencial de atrito e ρ a massa volúmica do fluido.

- Critério de Shields: para a caracterização do transporte de sedimentos quando um escoamento é uniforme, é usual recorrer ao parâmetro de Shields.

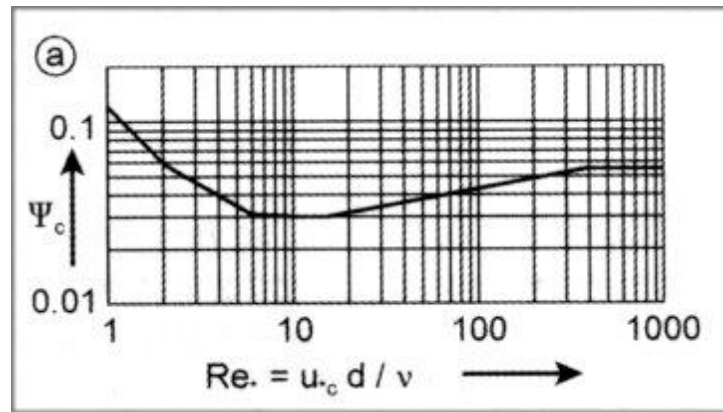


Figura 2.3: Diagrama de Shields (retirado de Schiereck (2001))

Este parâmetro Ψ_C , relaciona a tensão tangencial e o número de Reynolds (Re). A equação para Ψ_C é dada como:

$$\Psi_C = \frac{\tau_c}{(\rho_0 - \rho) \times g \times d} \quad (2.8)$$

sendo τ_c a tensão tangencial crítica, g a aceleração da gravidade, d o diâmetro das partículas, ρ a massa volúmica dos sedimento e ρ_0 a massa volúmica do fluido.

- Critério baseado na velocidade média crítica (máxima velocidade média que não provoca erosão) (Richardson e Davies, 2001):

$$U_C = \frac{\sqrt{\Psi_C \times (s - 1) \times D_{50} \times h^{1/3}}}{0,041 \times D_{50}^{1/6}} \quad (2.9)$$

Com Ψ_C coeficiente de Shields, s a densidade das partículas de fundo, h a altura de escoamento e D_{50} o diâmetro médio dos sedimentos. Caso o numero de Froude seja inferior a 0,8, Ψ_C assume os valores:

1. 0,047 para $0,065 < D_{50} < 2 \text{ mm}$
2. 0,03 para $2 < D_{50} < 40 \text{ mm}$
3. 0,02 para $D_{50} > 40 \text{ mm}$

2.4 Tipos de erosão

A erosão é um processo provocado pela ação da corrente de escoamento que escava e arrasta o material de leito do fundo (Richardson e Davies, 2001).

O processo de erosão é qualificado e dividido, de acordo com a literatura existente, em processo de erosão global e processo de erosão localizada (Lima, 2008). O primeiro deriva dos elevados caudais, da existência de curvas ou confluências de escoamento, não dependendo da existência de obstáculos. O segundo pode assumir a forma de erosão local quando junto de obstáculos e de contração lateral do escoamento, quando se verifica a diminuição da secção do escoamento provocada por aqueles ou por uma diminuição natural da secção de escoamento do rio.

A erosão localizada pode ocorrer em duas condições distintas: sem transporte generalizado de sedimentos, quando não há transporte de material no leito a montante da estrutura hidráulica e com transporte generalizado de sedimentos, quando há transporte de material do leito do rio a montante da estrutura hidráulica, sendo de natureza cíclica (Richardson e Davies, 2001).

2.5 Erosão localizada na proximidade de pilares de pontes

Segundo Roulund et al. (2005) e Hill e Younkin (2006), a erosão localizada de um pilar ou de um encontro de uma ponte é definida como sendo “um fenómeno bastante complexo, resultante da forte interação do campo de escoamento turbulento tridimensional em redor do obstáculo com o leito de sedimentos (arenosos ou coesivos)”.

A erosão localizada em estruturas é impulsionada principalmente pelas interações entre o leito móvel e pela presença de um obstáculo no fluxo de escoamento (Chang et al., 2011). Esta resulta diretamente de alterações do campo de escoamento (velocidades médias, intensidade de turbulência e tensões de Reynolds) induzidas por obstáculos nele inseridos. A presença de obstáculos implica a estagnação do escoamento junto das respectivas paredes gerando um aumento de pressão (Cardoso, 2001).

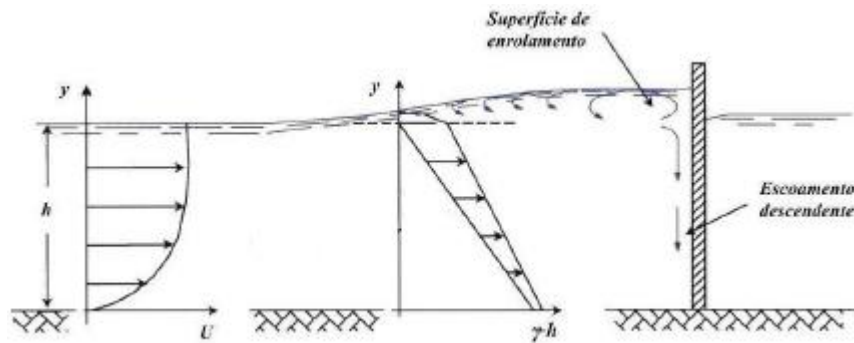


Figura 2.4: Diagrama de tensões gerado pela presença de um obstáculo (retirada de Fonseca, 2011)

A figura 2.4 mostra que o aumento de pressão é mais elevado junto à superfície livre do que junto ao fundo. Esta alteração local do campo de pressões origina:

- superfície de enrolamento;
- escoamento descendente (responsável pelo início do processo erosivo);
- separação do escoamento.

Segundo Roulund et al. (2005), quando é colocado um obstáculo sobre um leito, a corrente constante irá sofrer alterações substanciais formando um vórtice em forma de ferradura a montante desse obstáculo. A figura (2.5) representa esse fenómeno na vizinhança de um pilar circular de uma ponte:

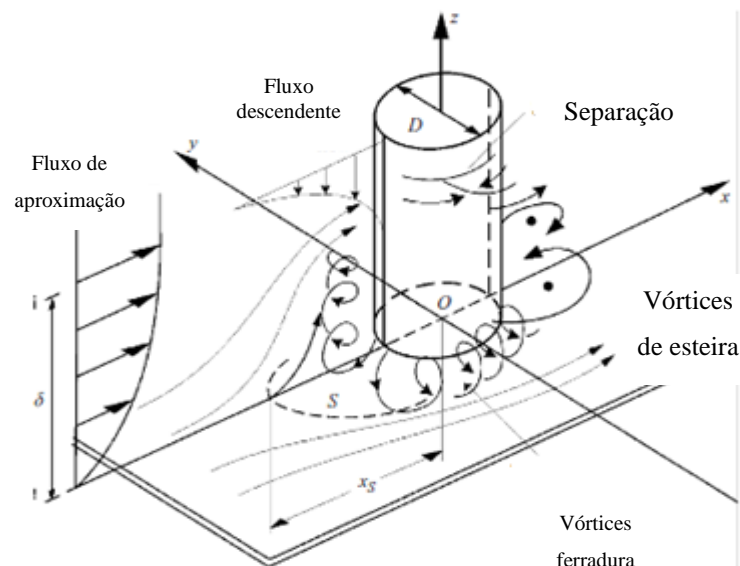


Figura 2.5: Erosão localizada na proximidade de um pilar circular (retirada de Roulund et al., 2005)

2.5.1 Análise dimensional

Segundo Richardson (2001), a erosão localizada é um fenómeno que depende de certos factores que afectam a magnitude da profundidade. Na verdade este processo é muito mais complexo do que a simples avaliação destes parâmetros, envolvendo o estudo pormenorizado de um elevado número de variáveis independentes.

Para a análise dimensional é necessário determinar as variáveis envolvidas no processo. Assim devem-se considerar,

- características geométricas do pilar: diâmetro (D), ângulo de alinhamento do pilar com escoamento (α), comprimento do pilar (L) e coeficiente de forma (K_p);
- altura de água de escoamento (h);
- variáveis referentes à geometria do canal: largura da secção transversal do canal (B), inclinação do fundo de leito (i) e coeficiente de forma da secção transversal (K_g);
- variáveis devido às características cinemáticas e dinâmicas do escoamento: velocidade média de aproximação (U), perda de carga ao longo do percurso (J) e aceleração da gravidade (g);
- variáveis relativas às propriedades do fluido: viscosidade cinemática (ν) e massa volúmica (ρ);
- variáveis relacionadas com as propriedades do sedimento: massa volúmica do sedimento (ρ_s), diâmetro médio do sedimento (D_{50}) e coeficiente de graduação da curva granulométrica (σ_D);
- tempo (t);

Entre estas grandezas, e designando por y_s , a profundidade máxima da cavidade de erosão localizada deverá verificar-se uma relação do tipo (Couto, 2001a-a):

$$F(D, L, \alpha, K_p, h, B, i, K_g, U, J, \nu, \rho, \rho_s, D_{50}, \sigma_D, y_s, t)=0 \quad (2.10)$$

Através da análise dimensional é possível simplificar esta relação e concluir que a profundidade máxima da cavidade de erosão varia com o instante temporal, $y_s(t)$, e que depende da dimensão transversal do pilar relativamente ao escoamento, da razão entre a velocidade média de aproximação e velocidade crítica (U_c), da razão entre a altura de água de

escoamento e o diâmetro do pilar, e do coeficiente de graduação da curva granulometria dos sedimentos (Couto, 2001a-b), ou seja, a relação (2.10) transforma-se na seguinte:

$$\frac{y_s(t)}{D} = F\left(\frac{U}{U_c}, \frac{h}{D}, \frac{Ut}{D}, \sigma_D\right) \quad (2.11)$$

2.5.2 Previsão da profundidade máxima da cavidade de erosão

As pesquisas feitas em relação à previsão da profundidade máxima da cavidade de erosão permitem concluir que a profundidade da cavidade de erosão aumenta com o tempo (Simarro et al., 2011).

Segundo Bolduc et al., (2008), atualmente a previsão da profundidade máxima de erosão em pilar de pontes baseia-se em modelos determinísticos.

Para determinar a previsão da profundidade máxima da cavidade de erosão (y_s), em solos arenosos com base nas Normas Americanas H.E.C. 18 (Richardson e Davies, 2001), recorre-se à seguinte equação:

$$\frac{y_s}{D} = 2.0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times \left(\frac{h}{D}\right)^{0,35} \times F_r^{0,43} \quad (2.12)$$

onde F_r representa o número de Froude (equação 2.2), K_1 é o fator de correção para a forma do pilar (tabela 2.1), K_2 é o fator de correção do ângulo (tabela 2.2), K_3 é o fator de correção da função de forma do leito de escoamento (tabela 2.3) e K_4 é o fator de correção da função de forma da dimensão do agregado.

Tabela 2.1: Valores do factor de correção da forma do pilar, K_1

Forma do pilar	K_1
Quadrado	1,1
Extremidade de montante redonda	1,0
Cilindro	1,0
Extremidade de montante afiada	0,9
Grupo de cilindros	0,9

2. Revisão do Estado de Arte

Tabela 2.2: Valores do factor de correção do ângulo, K_2

Ângulo	$\frac{L}{a} = 4$	$\frac{L}{a} = 8$	$\frac{L}{a} = 12$
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

$$K_2 = \left(\cos \theta + \frac{L}{a} + \operatorname{sen} \theta \right)^{0,65}, \text{ com } \theta \text{ o ângulo de alinhamento do pilar com o escoamento}$$

Tabela 2.3: Valor do factor de correção da função de forma do leito de escoamento, K_3

Condições do leito	Alturas das dunas (m)	K_3
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 do factor de correção da função de forma da dimensão do agregado K_4 é calculado da seguinte forma:

- para $D_{50} < 2mm$ ou $D_{95} < 20mm$, $K_4 = 1,0$
- para $D_{50} \geq 2mm$ ou $D_{95} \geq 20mm$, $K_4 = 0,4 \times u_r^{0,15}$

Sendo u_r é definido por:

$$u_r = \frac{U - U_{icD_{50}}}{U_{icD_{50}} - U_{icD_{95}}} > 0 \quad (2.13)$$

onde U_{icD_x} é a velocidade de aproximação necessária para iniciar a erosão localizada para o sedimento com dimensão D_x ,

$$U_{icD_x} = 0,645 \left(\frac{D_x}{D} \right)^{0,053} \times U_{cD_x} \quad (2.14)$$

sendo U_{cD_x} a velocidade crítica para o movimento inicial do sedimento com dimensão D_x ,

$$U_{cD_x} = K_U \times y_s^{1/6} \times D_x^{1/3}, \text{ com } K_U=6,19 \quad (2.15)$$

Segundo Melville e Chiew (1999), para estimar a profundidade máxima da cavidade de erosão pode ser utilizada a equação 2.16. Esta equação complementa outro estudo feito pelo autor com a adição do factor tempo. De uma forma simplificada esta equação relaciona o factor tempo com geometria dos pilares cilíndricos fundados em sedimentos uniformes (tabela 2.4)

$$y_s = k_{hD} \times k_I \times k_d \times k_t \quad (2.16)$$

Tabela 2.4: Parâmetros da equação 2.16 (Melville e Chiew, 1999)

Parâmetros	Relação profundidade/diâmetro do pilar, k_{yD}
	$k_{hD} = 2,4D$ para $D/h < 0,7$
	$k_{hD} = 2(yD)^{0,5}$ para $0,7 < D/h < 5$
	$k_{hD} = 4,5y$ para $D/h > 5$
	Intensidade da velocidade, k_I
	$k_I = U/U_c$ para $U/U_c < 1$
	$k_I = 1$ para $U/U_c > 1$
Tamanho da partícula, k_d	
$k_d = 0,57 \log(2,24 D/d_{50})$ para $D/d_{50} < 25$	
$k_d = 1$ para $D/d_{50} > 1$	

Com a adição do parâmetro, k_t :

$$k_t = \frac{y_s}{y_{se}} = \exp \left\{ -0.03 \left| \frac{U_c}{U} \ln \left(\frac{t}{t_e} \right) \right|^{1.6} \right\} \quad (2.17)$$

A aplicação da equação 2.14 requer o conhecimento de t_e (equações 2.17 e 2.18)

$$t_e(\text{dias}) = 48,26 \frac{D}{U} \left(\frac{U}{U_c} - 0,4 \right); \frac{h}{D} > 6 \quad (2.18)$$

$$t_e(\text{dias}) = 30,89 \frac{D}{U} \left(\frac{U}{U_c} - 0,4 \right) \left(\frac{h}{D} \right)^{0,25}; \frac{h}{D} \leq 6 \quad (2.19)$$

Existe um vasto número de abordagens referentes à descrição quantitativa da evolução do tempo na cavidade de erosão (Cardoso e Bettess, 1999). A maioria dessas abordagens aplicam-se à fase principal do processo erosivo e incluem vários coeficientes estabelecidos experimentalmente. Segundo a equação (2.20), Ettema (1980) descreveu a evolução temporal da erosão localizada em torno de um pilar de forma logarítmica:

$$\frac{y_s}{D} = k_1 \log \left[\left(\frac{D_{50}}{D} \right) \left(\frac{U_c t}{D} \right) \left(\frac{\nu}{U_c D} \right) \right] + \log k_2 \quad (2.20)$$

onde D é o diâmetro do pilar, t o tempo, y_s a evolução da profundidade de erosão, U_c a velocidade crítica, ν a viscosidade cinemática. Os valores de k_1 e k_2 são obtidos a partir das fases principal e de equilíbrio para diferentes valores de $\frac{D_{50}}{D}$ e para diferentes valores de $\frac{U}{U_c}$ que variam entre 0,9 e 0,95.

$$\frac{y_s}{L} = k_1 \log[X] + \log k_2 \text{ com } X = \frac{D_{50} \nu t}{L^3} \quad (2.21)$$

Chang et al., (2004) obtém a previsão da evolução da profundidade da cavidade de erosão da seguinte forma (equação 2.21):

$$\frac{y_s}{D} = K_d \times K_h \left(3,77 \times \frac{U}{U_c} - 1,13 \right), 0,3 \leq \frac{U}{U_c} \leq 1 \quad (2.22)$$

onde y_s é a profundidade da cavidade de erosão, D o diâmetro do pilar em estudo, U a velocidade de aproximação, U_c a velocidade crítica.

A presente equação (2.22) depende de parâmetros tais como o diâmetro médio dos sedimentos, diâmetro do pilar e altura de escoamento. Na tabela (2.5) está apresentada a forma como Chang et al. (2004) relaciona os efeitos do diâmetro médio dos sedimentos, diâmetro do pilar e altura de escoamento para estimar a profundidade da cavidade de erosão.

Tabela 2.5: Parâmetros de equação 2.19 (Chang et al., 2004)

Parâmetros	Efeito da dimensão dos sedimentos, K_d
	$K_d = 0,398 \times \ln\left(\frac{D}{d_{50}}\right) - 0,034 \left(\ln\left(\frac{D}{d_{50}}\right)\right)^2, 1 \leq \frac{D}{d_{50}} \leq 50$
	$K_d = 1, \frac{D}{d_{50}} \geq 50$
	Efeito da altura de escoamento, K_h
	$K_h = 0,738 \times \left(\frac{h}{D}\right)^{0,322} - 0,106, 0 \leq \frac{h}{D} \leq 3$
	$K_h = 1, \frac{H}{D} \geq 3$

2.5.3 Fases do processo erosivo

O processo erosivo (Cardoso e Bettess, 1999) pode apresentar três fases distintas, como representa a figura 2.6.

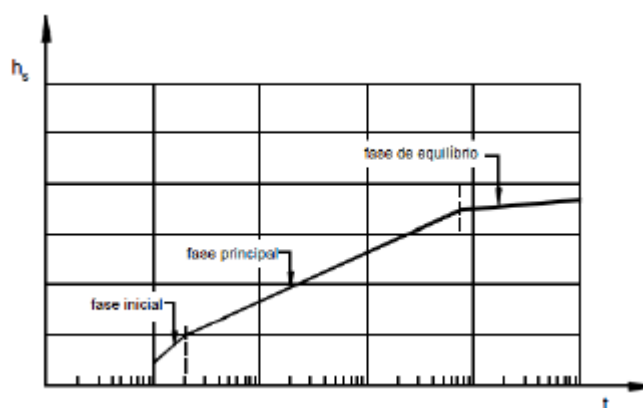


Figura 2.6: Fases do processo erosivo (adaptada de Cardoso and Bettess, 1999)

A profundidade de erosão aumenta progressivamente com o tempo e no final de todo o processo erosivo atinge o equilíbrio. As três fases são identificadas da seguinte maneira:

- a primeira fase é chamada de fase inicial, onde a profundidade de erosão tem uma evolução rápida;
- a segunda fase trata-se da fase principal do processo erosivo, onde a cavidade de erosão acentua a sua profundidade e a sua extensão tendo um ritmo cada vez mais pequeno;

- a última e terceira fase é a fase de equilíbrio em que a erosão deixa praticamente de evoluir atingindo um equilíbrio;

Ao traçar um gráfico da profundidade de erosão *versus* logaritmo do tempo, estas três fases têm diferentes inclinações. A inclinação da fase inicial deve ser aproximadamente igual a 1 e a inclinação da fase de equilíbrio mais próxima de 0.

2.5.4 Factores que influenciam a erosão localizada

São vários os factores que influenciam a erosão localizada em pilares de pontes. Dentro desses destacam-se os efeitos do tempo, velocidade e geometria dos obstáculos (pilares). Por terem grande influência na alteração do escoamento é necessário estudar as diferentes formas para serem utilizados.

A tabela 2.6 mostra a duração, U/U_c , geometrias e alturas de escoamento de diferentes ensaios realizados por diversos autores.

A consulta de estudos já realizados teve como objectivo procurar a gama de valores de relações nas quais os estudos estão inseridos, para que os ensaios experimentais ao qual me proponho possam ser válidos. Estas razões relacionam geometrias dos pilares com a largura do canal (D/B), velocidade de escoamento e velocidade crítica de escoamento U/U_c , nunca esquecendo as relações $h/B \leq 5$ para evitar escoamentos secundários e $h/D \geq 2,5$ para evitar escoamentos correspondentes a águas pouco profundas.

Através da análise da tabela 2.6 podemos referir os parâmetros mais usuais em estudos experimentais. O intervalo de valores da relação U/U_c situa-se entre os 0,4 e 1,21. Dentro dessa gama os valores mais utilizados são valores entre 0,8 e 0,95. Em relação à razão D/B , a gama de valores encontra-se entre 0,018 e 1,57.

Tabela 2.6: Estudos consultados

Estudo	Duração dos ensaios (horas)		U/U_c	Largura do canal B (m)	Geometria	Diâmetro pilar D (m)	Altura de escoamento h (m)
	Mínimo	Máximo					
Melville e Chiew(1999)	-	250	0,4-1,0	-	Pilar circular	0,016-0,2	0,05-0,6
Cardoso (1999)	46	142	0,91-1,08	2,44	Rampa inclinada	-	0,028-0,088
Graf (2002)	-	-	0,6	2,45	Pilar cilíndrico	0,15	0,18
Muzzmmil (2003)	-	-	-	0,5	Pilar circular	0,31-0,785	0,157
Chang et al.(2004)	7	72	0,6-0,9	1	Pilar circular	0,1	0,015-0,03
Roulund et al. (2005)	0,083	2	1,25	3,86	Pilar circular	0,1	0,003-0,493
Sheppard (2004)	41	616	0,75-1,21	6,1	Pilar circular	0,11-0,91	-
Sheppard e Miller Jr (2006)	0,33	7,75	0,61-6,07	1,5	Pilar circular	0,152	1,019-966
Ettema (2006)	24	48	0,8	-	Pilar circular	0,064-0,406	1
Dey (2007)	-	80	0,95	0,7	Pilar circular Pilar quadrado	0,12	0,25
Dey (2007b)	24	36	0,9	0,6	Pilar circular Pilar quadrado	0,032-0,077	0,08-0,22
Kirkil (2009)	-	-	0,42	3	Pilar cilíndrico	0,09-0,46	0,1-0,53
Gupta (2010)	-	20	0,9	0,5	“vane”+pilar semi-circular	-	-
Diab (2010)	0,183	40,17	0,95	1	Pilar quadrado Pilar circular	0,2	-
Unger (2005)	-	-	0,3-0,4	1	Pilar circular	0,457	0,1-0,2
Tafarojnoruz et al., (2012)	53,8	120	0,92-0,95	0,485	Pilares simples, “flow-altering countermeasures”e “bed-armoring countermeasures”	0,04-0,048	0,1-0,12

2.5.1.1 Efeito da geometria do pilar

A profundidade de erosão depende da obstrução que os diferentes obstáculos fazem ao escoamento. As secções transversais dos pilares podem adoptar diferentes formas (figura 2.7) e diferentes tipologias estruturais (figura 2.8).

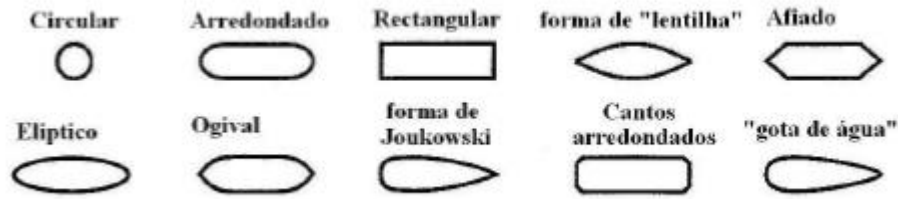


Figura 2.7: Formas de pilares (adaptada de Melville e Coleman, 2000)

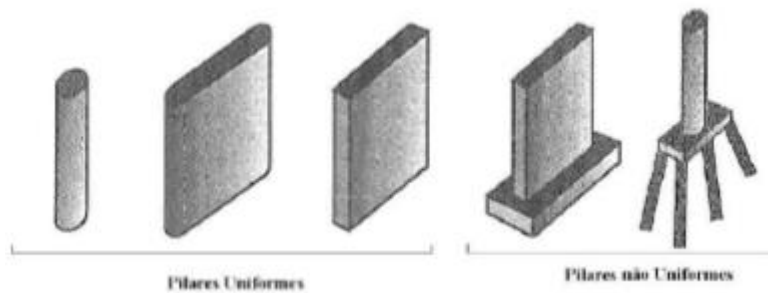


Figura 2.8: Tipos de pilares (adaptada de Melville e Coleman, 2000)

A profundidade máxima de erosão bem como a sua configuração, estão diretamente associadas às diferentes tipologias, formas e orientações que os pilares podem assumir.

Para a previsão da profundidade máxima de erosão, os autores relacionam as diferentes formas, orientações dos pilares multiplicando diferentes factores de forma (secção 2.5.2) para comparar dados com o pilar standard (circular).

Recentemente Tafarojnoruz et al. (2012) apresentou diferentes comportamentos através da aplicação de medidas. Estas medidas para a alteração favorável da evolução da cavidade de erosão localizada são denominadas como: (1) medidas de alteração do escoamento e (2) medidas de proteção do leito de sedimentos.

As medidas de proteção do leito de sedimentos baseiam-se na colocação de uma barreira de proteção de forma a proporcionar uma barreira física para proteção pilar. Estas medidas têm como objectivo diminuir a resistência do fluxo descendente e diminuir a presença de vórtices em torno do pilar. As medidas de proteção do leito de sedimentos (Richardson e Davies, 2001) são realizadas através de:

- Tapete de enrocamento (prevenção e reparação);
- Gabiões;
- Mástique asfáltico (revestimento de taludes de diques de proteção de leito de rios sujeitos a correntes de maré ou a ondas de pequena amplitude);
- Solo-cimento;
- Ensacados de areia;
- Ensacados de argamassa;
- Estacas prancha;
- Blocos artificiais isolados;
- Blocos artificiais ligados por cabos.

O princípio de funcionamento das medidas de medidas de alteração de escoamento consiste em diminuir a resistência do fluxo descendente e os vórtices ferradura em torno do pilar evitando assim que a cavidade de erosão evolua mais rapidamente. As medidas de alteração de escoamento apresentadas por Tafarofnoruz et al. (2012) (figura 2.9) são as seguintes:

- (a) Palhetas submersas, “*Submerged vanes*”;
- (b) Peitoril de proteção, “*Bed sill*”;
- (c) Estacas de defesa, “*Sacrificial piles*”;
- (d) Pilar com colarinho, “*Collar*”;
- (e) Linha de proteção, “*Threading*”;
- (f) Pilar com ranhura, “*Pier slot*”.

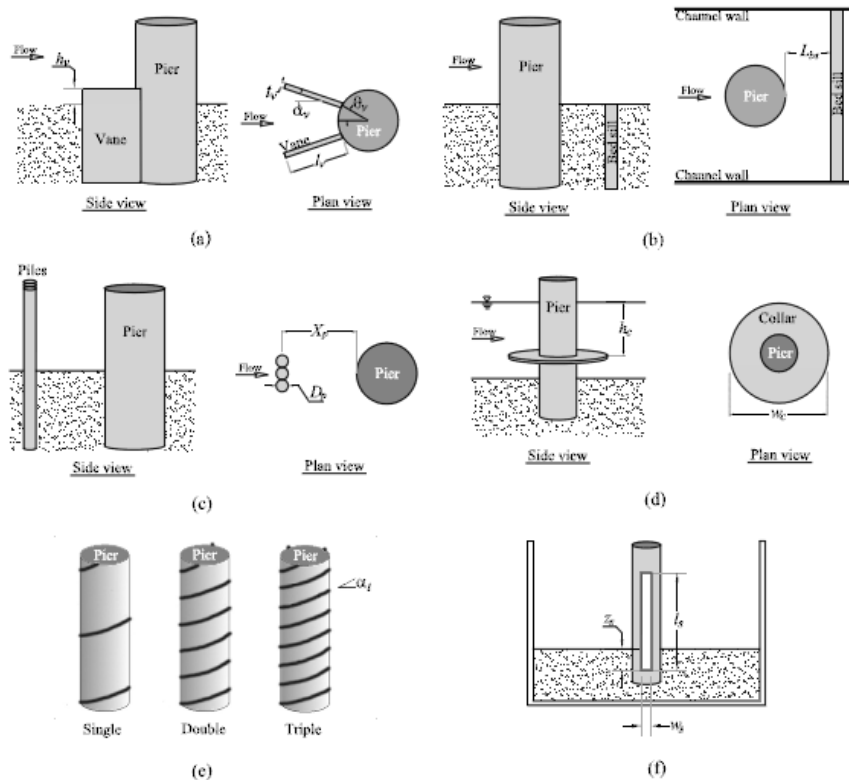


Figura 2.9: Vários exemplos de pilares com medidas de alteração do escoamento, retirada de Tafarojnoruz et al., (2012)

O pilar com ranhura é uma das formas de implementar medidas de alteração do escoamento. Este consiste na colocação de uma ranhura a meio do pilar (figura 2.9 (f) pilar com ranhura (“slot”). De acordo com Grimaldi et al. (2009b) as condições óptimas para um pilar com ranhura (“slot”) com $l_s = h$ e $w_s = D/4$, são obtidas quando $c_s = h/3$ ou $h/6$ ou $h/2$. Para haver melhor desempenho da abertura mínima do ranhura, os autores assumem que a melhor configuração é de $z_s = h/3$.

2.5.1.2 Efeito do tempo

A erosão localizada é um fenómeno que aumenta gradualmente ao longo do tempo. Segundo Melville e Chiew (1999) atingir a fase equilíbrio da cavidade de erosão localizada (profundidade para a qual é estabelecido um valor máximo) pode demorar muito tempo, e talvez possa até nunca acontecer.

O desenvolvimento da cavidade associada a este fenómeno está diretamente ligada com as condições de transporte e atinge o seu equilíbrio quando a quantidade de sedimento é igual na entrada e na saída da cavidade.

Segundo Melville e Chiew (1999) a taxa de crescimento do equilíbrio da profundidade da cavidade de erosão ($0,5 d_{se}$) é alcançado num intervalo de tempo compreendido entre 0,1 e 10 % do t_e , dependendo do caudal. Da mesma forma, 80% da taxa de crescimento da profundidade da cavidade de erosão é desenvolvido com o tempo, variando de 5 a 40% do tempo de equilíbrio.

Na figura 2.10 está representado a razão d/d_{se} , ou seja a razão entre a profundidade da cavidade de erosão e a profundidade máxima da cavidade de erosão em condições de equilíbrio, no caso de escoamentos sem transporte sedimentar. As curvas presentes na mesma figura, mostram que a profundidade de erosão para iguais valores de $\frac{t}{t_e}$ (onde t_e é o tempo necessário para atingir o equilíbrio da cavidade de erosão) é reduzida para valores mais baixos da razão $\frac{U}{U_c}$.

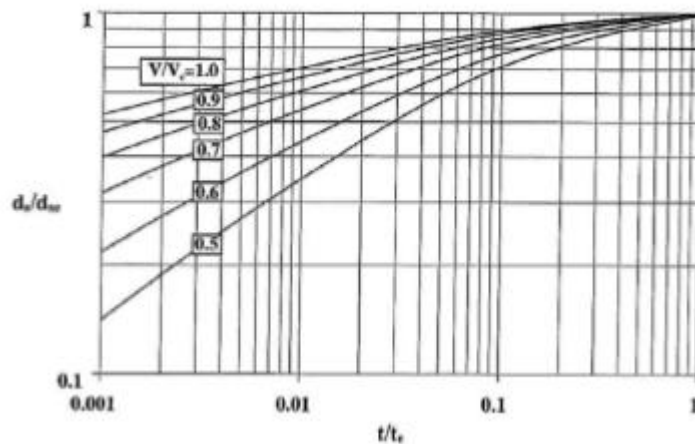


Figura 2.10: Evolução da profundidade de erosão junto a pilares

(retirada de Melville e Chiew, (1999))

Segundo Melville e Chiew (1999), o equilíbrio entre a capacidade erosiva do fluxo e a resistência ao movimento dos materiais de leito é progressivamente alcançada.

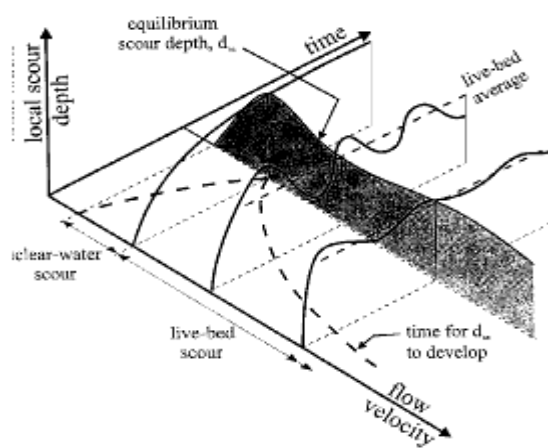


Figura 2.11: Variação da profundidade de erosão ao longo do tempo e velocidade do escoamento (retirada de (Melville e Chiew, 1999))

A figura 2.11 mostra o equilíbrio da profundidade máxima de erosão em materiais como areia ou cascalho. Em condições sem transporte generalizado de sedimentos, a erosão na camada de arrastamento é iniciada quando $U \leq U_c$, enquanto que em condições com transporte generalizado de sedimentos começa para $U > U_c$. O equilíbrio da profundidade máxima de erosão $d_{se,máx}$ ocorre quando $U = U_c$.

As linhas de trajetória da figura 2.11 representam a média temporal da profundidade de erosão em condições com transporte generalizado de sedimentos. O diagrama mostra também o tempo de equilíbrio t_e necessário para o desenvolvimento das áreas de profundidade. O tempo de equilíbrio aumenta rapidamente com a velocidades do escoamento em condições sem transporte generalizado de sedimentos, mas depois diminui em condições com transporte generalizado de sedimentos.

2.6 Semelhança hidráulica a considerar nos estudos de um modelo

De modo a simular um estudo experimental de um modelo físico de fenómenos hidráulicos, Barbosa (1997) refere que é necessário adoptar certas semelhanças hidráulicas entre o modelo e o protótipo. Na mecânica dos fluidos o termo semelhança indica a relação entre dois escoamentos de diferentes dimensões, mas com semelhança geométrica entre seus contornos.

A semelhança hidráulica consiste em estabelecer uma relação de igualdade de números de índices. Os números de índices (Euler, Strouhal, Froude, Reynolds, Weber e Cauchy) são

cocientes entre ordens de grandeza das forças de inércia e de forças de outras naturezas que condicionam o escoamento, forças de pressão, pulsatórias, gravíticas, viscosas, de tensão superficial e elásticas.

Para além do protótipo ter de verificar as semelhanças de Euler, Strouhal, Froude, Reynolds, Weber e Cauchy, este deve ainda cumprir semelhanças de geometria, através de λ_l (escala semelhança, equação (2.24)):

$$\lambda_l = \frac{l_m}{l_p}, \quad (2.24)$$

sendo l_m a medida do modelo e l_p a medida do protótipo.

Esta semelhança de forma é a propriedade dos sistemas geometricamente semelhantes, tendo a razão entre comprimentos do modelo e protótipo que e ser constante. Para além da semelhança geométrica, o modelo deve englobar semelhança de rugosidade de superfície, que muitas vezes não é alcançada devido a problemas de construção, de material e acabamentos de superfície do modelo. Na presente dissertação não foi adoptada semelhança de rugosidade de superfície.

O número de Froude e Reynolds traduzem a influência das forças gravíticas (F_{gr}) e viscosas (F_{visc}), presentes no caso em estudo.

O número de Reynolds representa a razão entre as forças de inércia (F_{in}) e as forças viscosas (equação 2.22), enquanto que o número de Froude representa a razão entre as forças de inércia e as forças gravíticas (equação 2.23):

$$R_e = \frac{U \times l}{\nu} = \frac{F_{in}}{F_{visc}} \quad (2.22)$$

$$F_r = \frac{U^2}{g \times l} = \frac{F_{in}}{F_{gr}} \quad (2.23)$$

O número de Froude aplica-se a fenómenos que envolvam escoamentos com superfície livre. Num modelo como o do presente estudo, a semelhança de Froude permite reproduzir à escala em laboratório um escoamento simplificado do que ocorre num trecho de um rio.

O número de Reynolds aplica-se a fenómenos que envolvam o escoamento em torno de corpos submersos. Num modelo como o do presente estudo, a semelhança de Reynolds

permite reproduzir à escala em laboratório um escoamento em torno de um pilar de uma ponte.

Em aplicações práticas a consideração simultânea das semelhanças de Reynolds e Froude é impossível, por serem de difícil compatibilização em aplicações laboratoriais. Por esta razão, no presente estudo não se procurou reproduzir em laboratório nenhum caso real. Optou-se por estudar modelos de pilares para relações fixas entre as variáveis intervenientes no fenómeno (secção 2.5.4), por forma a permitir a comparação dos resultados obtidos com os de outros estudos identificados na bibliografia.

3 MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

No presente capítulo apresenta-se a metodologia adoptada para esta dissertação bem como a instalação experimental, equipamentos de medição e materiais utilizados.

3.2 Instalação experimental

Para a elaboração do trabalho experimental do estudo da evolução da cavidade de erosão localizada na vizinhança de pilares de pontes foi necessária a utilização do canal hidráulico situado no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos, do Departamento de Engenharia Civil, em Azurém.



Figura 3.1: Canal hidráulico do Departamento de Engenharia Civil

Na figura (3.1) apresenta-se fotografias do respectivo canal, (a) vista longitudinal a montante e (b) vista longitudinal a jusante.

3. Método Experimental

Tem 14m metros de comprimento, 10 dos quais dizem respeito à secção de teste, com 30 cm de largura (B).

Este é ainda constituído por diversos equipamentos:

- três reservatórios ligados entre si com capacidade de 1000 litros cada um;
- uma bomba centrífuga;
- medidor de caudal;
- secção de teste;
- painel de controlo;

Para que o caudal permaneça constante, o canal está ligado a três reservatórios com capacidade de 1000 litros. A inclinação pode ser modificada tendo uma variação entre 1/1200 e 1/50. Nos presentes ensaios adoptou-se uma inclinação de 1/500.

3.3 Secção de teste

Na figura (3.2) está representado o canal hidráulico onde foi montada a secção de teste

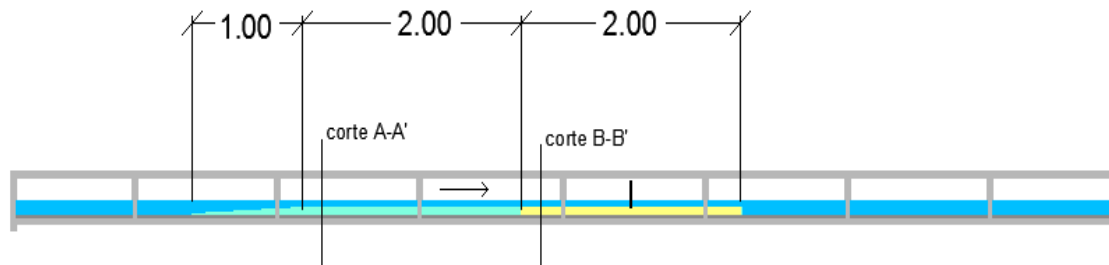


Figura 3.2: Secção de teste (sentido de escoamento da esquerda para a direita)

Na secção de teste foi montado um perfil de acrílico de forma a facilitar a colocação de areia. O acrílico era constituído por duas peças, uma rampa e um patamar com 10 cm de altura.

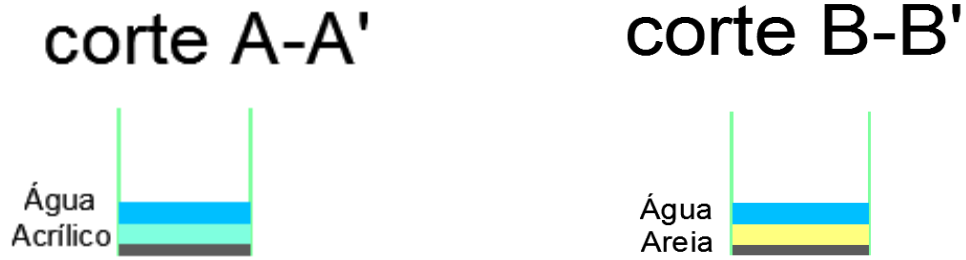


Figura 3.3: Cortes das diferentes partes da secção de teste

O pilar foi colocado no meio da caixa de areia devidamente centrado.

3.4 Escolha dos parâmetros

Antes da realização do estudo experimental da erosão localizada na vizinhança de pilar de pontes foi necessário seleccionar e fundamentar a escolha dos parâmetros nele envolvido. Nos seguintes subcapítulos serão fundamentadas essas escolhas.

3.4.1 Areia

Para o estudo experimental utilizou-se uma areia com as seguintes características (tabela 3.1).

Foi efectuado o estudo granulométrico da areia de forma a conhecer o d_{50} , diâmetro médio da areia bem como os respectivos d_{84} e d_{16} visto que o coeficiente de graduação da curva granulométrica, $\sigma_D = \frac{1}{2} \left(\frac{d_{84,1}}{d_{50}} + \frac{d_{50}}{d_{15,9}} \right)$.

Tabela 3.1: Características da areia

d_{50} (mm)	σ_D
0,332	1,94

3. Método Experimental

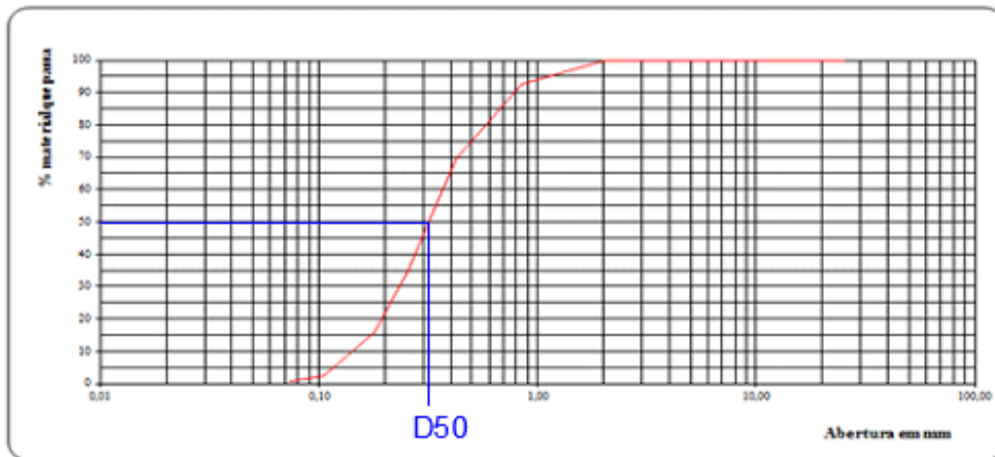


Figura 3.4: Curva granulométrica da areia do estudo experimental

3.4.2 Geometria dos pilares

Para a execução do trabalho experimental foram utilizados quatro pilares (figura 3.7): dois pilares circulares, e dois pilares rectangulares com faces semi-circulares a montante e jusante. Os pilares rectangulares com faces semi-circulares são denominados de pilares alongados, no presente estudo o seu comprimento na é o duplo do diâmetro do pilar.

De modo a comparar resultados com Tafarojnoruz et al., (2012), foi imposta uma medida de alteração de escoamento nas diferentes geometrias de pilares. Os resultados obtidos com os pilares sujeitos a esta medida, serão comparados com os obtidos para pilares com a mesma geometria mas sem ranhuras, designados por pilares simples.

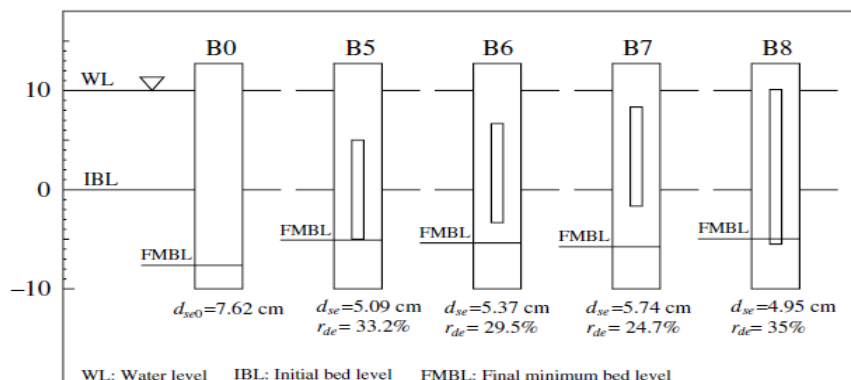


Figura 3.5: Diferentes configurações de pilares com ranhura

No estudo elaborado por Tafarajnoruz et al. (2012) estão presentes três configurações de z_s (B5 a B7, na figura 3.5) e foram comparadas com outro estudo (B8) em que a abertura está estendida desde a superfície livre até à camada de areia.

Os resultados do estudo mostram que aumentar a ranhura do teste B5 até à superfície livre (teste B8) é insignificante em termos de eficiência. Assim sendo a melhor configuração para a ranhura do pilar “slot” 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 no presente estudo foi selecionada a geometria da configuração B5. Para a melhor identificação da altura e largura da ranhura, l_s e w_s apresenta-se na figura 3.6, um esquema para o caso do pilar alongado.

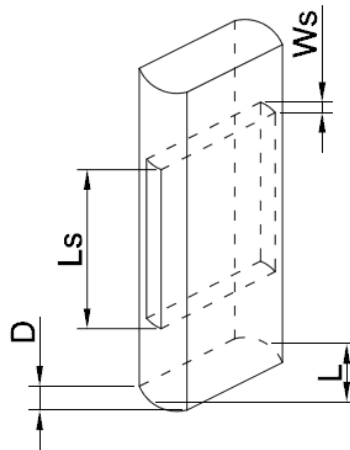


Figura 3.6: Parâmetros geométricos de um pilar alongado com ranhura

Foram efetuados vários ensaios experimentais com o intuito de achar a melhor relação D/B . Inicialmente foi testado um pilar com 30 mm de diâmetro ($D/B=0,1$). Com o decorrer deste ensaio, a erosão localizada em redor do pilar chegava às paredes da secção de teste, indicando que a relação de D/B , apesar de ser cumprida ($D/B \leq 0,1$), não era suficiente. Assim sendo, foi feito novamente novo ensaio com outro pilar, agora com 25 mm de diâmetro. Com o decorrer do ensaio, observou-se o mesmo caso, a erosão localizada em redor do pilar atingia as paredes da seção de teste. Com tudo isto, a relação de D/B foi novamente modificada utilizando agora um pilar com 20 mm de diâmetro. Neste caso a erosão localizada em redor do pilar não chegou às paredes da secção de teste.

3. Método Experimental

Posto isto, para a realização do estudo experimental foram utilizados quatro pilares, dois circulares e dois alongados com 20 mm de dimensão transversal (figura 3.7). Para cada uma das geometrias foram implementadas medidas de alteração de escoamento como mostra a tabela (3.2).

Tabela 3.2: Geometria dos pilares adoptada para o estudo experimental

Pilar	D (mm)	L_s (mm)	$Z_s = h/3$ (mm)	$W_s = b/4$ (mm)
Circular simples	20	-	-	-
Alongado simples	20	-	-	-
Circular com ranhura	20	50	25	5
Alongado com ranhura	20	50	25	5



(a) Pilar circular simples e pilar circular com ranhura



(b) Pilar alongado simples e pilar alongado com ranhura

Figura 3.7: Pilares usados no estudo experimenta (P1, P2, P3 e P4 da esquerda para a direita)

3.5 Medição da evolução da profundidade máxima da cavidade de erosão

Nem sempre os equipamentos que temos à disposição são os indicados para a realização de certos trabalhos. Para a medição da evolução da profundidade máxima da cavidade de erosão optou-se por fazer uma marcação de uma régua com caneta de acetado em todos os pilares figura (3.8). Optou-se por esta via porque ao utilizar uma vara vertical ligada a uma régua graduada, quando fosse medir a profundidade da cavidade de erosão a régua alterava de alguma forma o escoamento e poderia influenciar a configuração da cavidade de erosão. A medição foi feita sempre a montante do pilar onde a profundidade da cavidade de erosão era máxima.



Figura 3.8: Marcação do pilar

3.6 Digitalização do molde da cavidade máxima de erosão

Para efetuar a digitalização da cavidade máxima de erosão fez-se um levantamento recorrendo a moldes compostos por uma mistura de cera (80%) e parafina (20%).

A digitalização do molde da cavidade máxima de erosão foi efectuada com recurso do equipamento Roland's 3D Laser Scanner LPX-600 do Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho.



Figura 3.9: Equipamento Roland's 3D Laser Scanner LPX-600

Este equipamento tem a propriedade de fazer *scanner* de objetos em 3D para passar para formato digital. Este equipamento está restrito 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 exportados para o programa informático, por excederem a dimensão máxima de armazenamento do software bloqueando o funcionamento do computador. A exportação dos moldes foi feita em .txt e o programa escolhido para o tratamento dos moldes foi o AutoCAD.

3.7 Condições experimentais

Na presente dissertação para o estudo do fenómeno da erosão localizada na vizinhança de pilares de pontes foram feitas duas sequências de quatro ensaios com uma altura de água

constante de 5 cm. Esta altura de água do escoamento permitia garantir a relação $h/D \geq 2,5$, evitando assim o estudo de escoamentos pouco profundos. Permitia ainda garantir a relação $B/h \geq 5$, de maneira a evitar o aparecimento de escoamentos secundários.

Selecionou-se uma relação entre a velocidade média de aproximação e a velocidade crítica (U/U_c) igual a 0,9. A razão entre a velocidade de aproximação e a velocidade crítica para além de ser determinada teoricamente (equação 2.9) foi determinada experimentalmente. No canal hidráulico foi montada a seção de teste sem o pilar. A velocidade crítica é atingida quando os primeiros sedimentos começam a ser arrastados. De forma a observar este fenómeno, encheu-se o canal e aumentou-se o caudal muito lentamente até os sedimentos começarem a erodir. Isto permitiu identificar uma velocidade crítica igual a $0,27 \text{ ms}^{-1}$.

Apresentam-se na tabela 3.3 as condições experimentais para aos ensaios realizados.

Tabela 3.3: Condições experimentais

ψ_s	s	D_{50} (mm)	h (m)	U_c (m/s)	U (m/s)	Q (m ³ /s)	Q (m ³ /h)	Fr	Re
0,047	2,44	0,332	0,05	0,27	0,24	0,0036	12,96	0,342	9169

De forma a estudar as três fases do processo erosivo, inicialmente foram feitos 4 ensaios com os 4 pilares de geometrias diferentes e uma duração de aproximadamente 3 dias. Numa segunda fase de ensaios foram novamente executados os 4 ensaios, com o propósito de estudar com mais pormenor a fase inicial do processo erosivo para cada um dos pilares. No final dos ensaios foram sempre retirados os moldes da cavidade de erosão localizada.

As condições experimentais foram exatamente iguais na primeira e na segunda série de ensaios.

3.8 Metodologia experimental

A metodologia experimental da presente dissertação consiste na determinação da evolução temporal da cavidade de erosão. Para aproximar esse fenómeno foi montado um modelo à escala baseado na bibliografia existente.

3. Método Experimental

Esta metodologia experimental está dividida em duas fases:

- fase de montagem
- fase de execução.

Todos os procedimentos envolvidos nas fases de preparação e execução foram repetidos em todos os ensaios.

3.8.1 Fase de montagem

A montagem do canal consiste na colocação de uma rampa de acrílico seguido de um patamar com 10 cm de altura. A colocação deste acrílico tem como objectivo a formação de uma caixa de 2 m de comprimento e 10 cm de altura para a colocação da areia devidamente nivelada com o pilar ao centro.

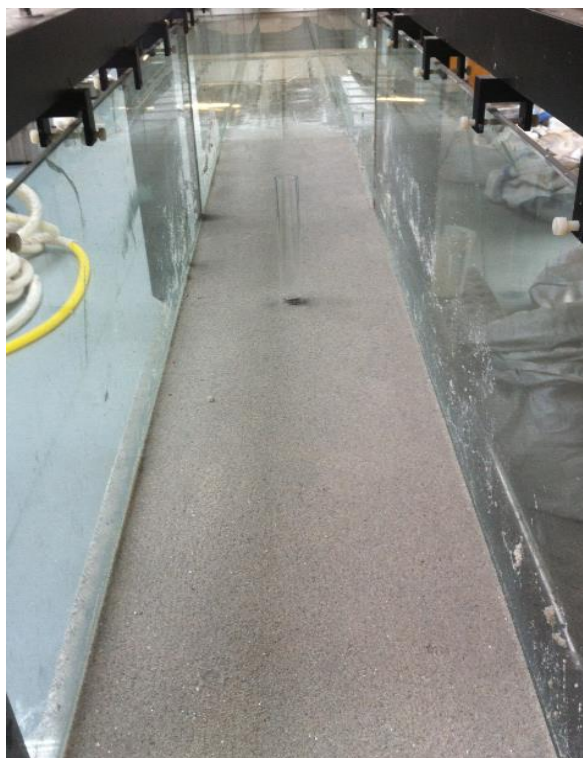


Figura 3.10: Resultado final da fase de montagem

Com este procedimento terminado, iniciou-se os ensaios.

3.8.2 Fase de execução

Com a fase de montagem devidamente acabada, deu-se início à fase de execução.

Nesta fase dá-se início ao enchimento do canal hidráulico, com recurso à bomba centrífuga do canal que descarrega a montante da secção de teste e de outra bomba que descarrega a jusante. O uso da bomba a jusante é importante para não haver transporte de sedimentos na vizinhança do pilar e para elevar o nível da água lentamente. Este processo teve de ser devidamente cuidado pois se houvesse transporte de sedimentos o processo tinha de ser repetido. Depois do canal estar devidamente cheio era retirada a bomba a jusante, passado só a estar a funcionar a bomba centrífuga do canal, que permite controlar a velocidade de ensaio. Com a velocidade corretamente ajustada, era vez de regular a altura da água no canal. Esta era controlada através de um descarregador a jusante do pilar.

Completado o tempo de ensaio, o canal é esvaziado e deixa-se a areia secar. Com a areia devidamente seca iniciava-se o processo de moldagem da profundidade da cavidade máxima de erosão na vizinhança do modelo. Este processo consiste no aquecimento de uma mistura de parafina e vaselina numa cuba que depois é colocado na secção de teste como mostra a figura 3.11.



Figura 3.11: Exemplo da colocação da mistura de parafina e vaselina para a extração do molde

3. Método Experimental

Depois de arrefecido o molde, o pilar era retirado com o máximo cuidado possível e o molde extraído da secção de teste. Imediatamente após o arrefecimento o molde era limpo com uma escova de modo a retirar os grãos de areia (figura 3.12).



Figura 3.12: Molde extraído do canal

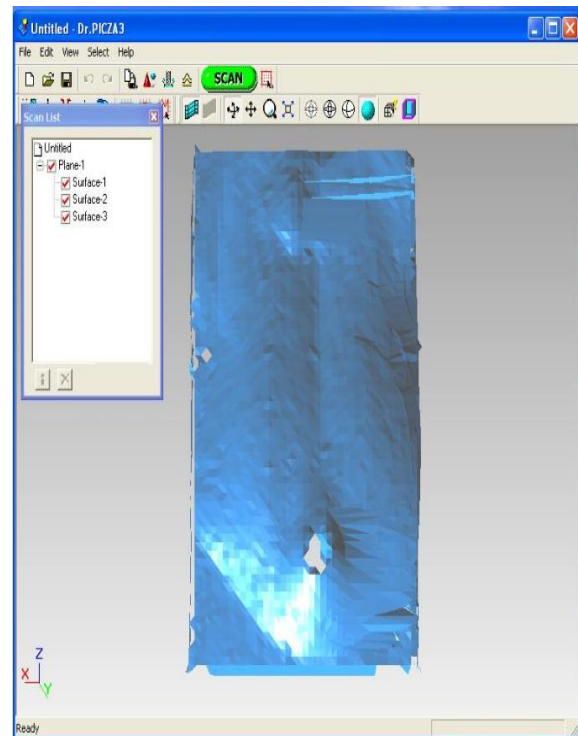
3.8.3. Digitalização dos moldes

Com o molde feito e solidificado, deu-se seguimento à digitalização do molde. A digitalização foi feita com recurso ao equipamento Roland's 3D Laser Scanner LPX-600 do Departamento de Engenharia de Polímeros. Este equipamento transforma o molde real em virtual, passível de ser trabalhado e analisado em computador.

Para a digitalização foi necessário a utilização de um suporte para o molde ficar fixo (figura 3.13).



(a)



(b)

Figura 3.13: (a) Suporte para fixar o molde; (b) molde após digitalização

Feita a digitalização, realizou-se a análise da cavidade de erosão através do *software* AutoCad (figura 3.14).

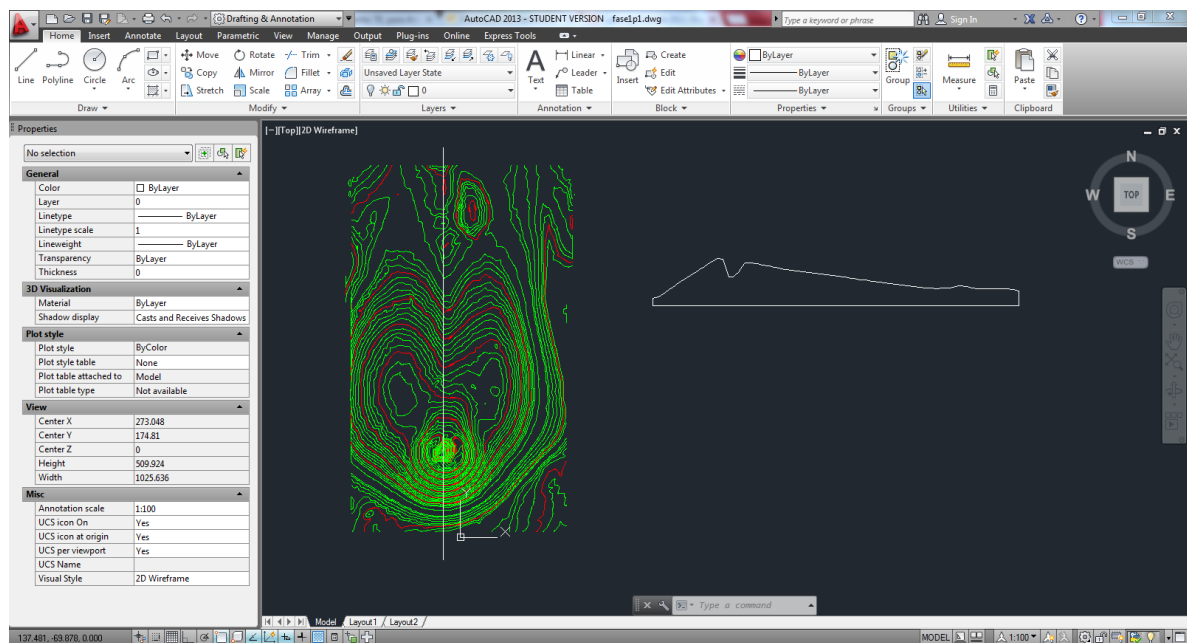


Figura 3.14: Modelação de um molde da cavidade de erosão através do AutoCad

4 EVOLUÇÃO TEMPORAL DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DA CAVIDADE DE EROSÃO LOCALIZADA

4.1 Introdução

Com o propósito de definir e identificar as diferentes fases da evolução temporal da erosão localizada na vizinhança de pilares de pontes, inicialmente foram realizados duas séries de ensaios. No presente capítulo vão ser apresentadas as variantes e resultados de cada ensaio.

4.2 Resultados experimentais

Nesta secção serão apresentados as previsões da máxima profundidade de erosão (subsecção 4.2.1) e os resultados obtidos na série de ensaios correspondente à evolução da cavidade máxima de erosão (subsecção 4.2.2.1) e ao estudo pormenorizado correspondente a fase inicial do processo erosivo (subsecção 4.2.2.2) e uma comparação do presente estudo com os resultados de Leite (2010) (subsecção 4.2.3).

Na tabela 4.1 apresentam-se os resultados experimentais da profundidade máxima da cavidade de erosão de duas séries de ensaios. A 1ª série teve uma duração de 3 dias e representa os resultados experimentais da profundidade máxima da cavidade de erosão de todo o processo erosivo, enquanto que a 2ª série representa a profundidade máxima da cavidade de erosão relativamente à fase inicial do processo erosivo.

Tabela 4.1: Resultados das duas séries experimentais

Série	Pilar	y_s (mm)
1ª série	P1 (Circular simples)	50
	P2 (Circular com ranhura)	30
	P3 (Alongado simples)	42
	P4 (Alongado com ranhura)	33
2ª série	P1 (Circular simples)	33
	P2 (Circular com ranhura)	27
	P3 (Alongado simples)	32
	P4 (Alongado com ranhura)	23

4. Evolução Temporal da Profundidade Máxima da Cavidade de Erosão Localizada

4.2.1 Previsão da máxima profundidade da cavidade de erosão

Apresentam-se nas tabelas 4.2 a 4.4 os resultados de previsão da máxima profundidade da cavidade de erosão, por aplicação das fórmulas (2.12), (2.14) e (2.20).

Tabela 4.2: Resultados obtidos a partir das Normas Americanas

Normas Americanas H.E.C. 18			
$\frac{y_s}{D} = 2.0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times \left(\frac{h}{D}\right)^{0,35} \times F_r^{0,43}$			
Dados			
$Q = 12,9 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$		$h = 5\text{cm}$	
P1	P2	P3	P4
$y_s = 72,65\text{mm}$			

Tabela 4.3: Resultados obtidos a partir das fórmulas de Melville

Melville 1999			
$y_s = k_{yD} \times k_l \times k_d \times k_t$			
Dados			
$Q = 12,9 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$		$h = 5\text{cm}$	
P1	P2	P3	P4
$y_s = 84,68\text{mm}$			

Tabela 4.4: Resultados obtidos a partir das fórmulas de Chang

Chang 2004			
$\frac{y_s}{D} = K_d \times K_h \left(3,77 \times \frac{U}{U_c} - 1,13\right), 0,3 \leq \frac{U}{U_c} \leq 1$			
Dados			
$Q = 12,9 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$		$h = 5\text{cm}$	
P1	P2	P3	P4
$y_s = 59,16\text{mm}$			

Em comparação com os resultados da fase experimental, as previsões da profundidade da cavidade de erosão com recurso à aplicação das fórmulas de Melville, normas americanas H.E.C. e Chang apresentam uma gama de valores exagerados. A previsão mais próxima com o presente estudo é a de Chang.

4.2.2. Evolução da cavidade máxima de erosão

Apresentam-se os resultados de evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão, para $U/U_c = 0,9$ e $h/D = 2,5$ e areia com $\sigma_c = 1,94$. Assim a equação 2.11 transforma-se em:

$$\frac{y_s(t)}{D} = F\left(\frac{Ut}{D}\right) \quad (4.1)$$

4.2.2.1 Efeito da geometria do pilar

A figura que se segue (4.1), apresenta os resultados de todos os ensaios relativamente à evolução temporal da cavidade máxima de erosão para os pilares circular simples, alongado simples, circular com ranhura e alongado com ranhura para um período de aproximadamente de 3 dias. Os resultados mostram que a profundidade máxima da cavidade de erosão evolui com o decorrer do ensaio e a sua evolução é mais rápida na fase inicial do processo erosivo.

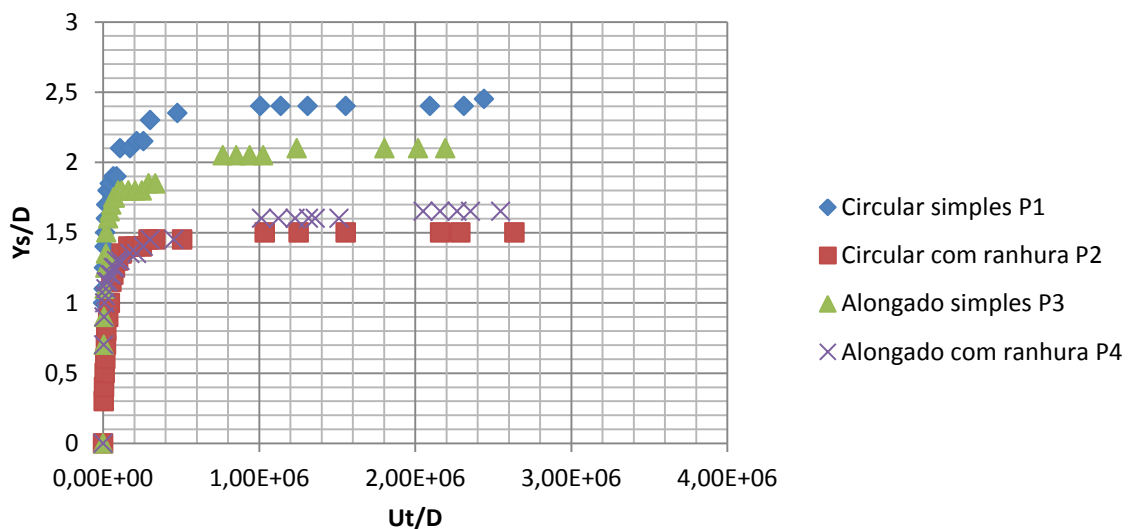


Figura 4.1: Evolução da profundidade máxima da cavidade de erosão de todos os pilares (P1, P2, P3 e P4)

4. Evolução Temporal da Profundidade Máxima da Cavidade de Erosão Localizada

Através da figura 4.1 observa-se as diferentes profundidades da cavidade de erosão a montante para todos os pilares. Para as mesmas condições de escoamento (velocidade e altura), observa-se que os pilares P1 e P3 (pilares simples) têm maior profundidade da cavidade de erosão do que os pilares P2 e P4, pilares com medidas de alteração do escoamento.

Na tabela 4.5 apresentam-se as percentagens de redução (r) da profundidade máxima da cavidade de erosão dos pilares P2 e P4 relativamente aos pilares P1 e P3 respectivamente.

Tabela 4.5: Percentagem de redução (r) da profundidade máxima da cavidade de erosão dos pilares P2 e P4 comparativamente com o pilar P1 e P3, respectivamente

Pilar	Y_s [mm]	r [%]
P1	50	-
P2	30	40
P3	42	-
P4	33	21,4

A partir destes resultados podemos concluir que os pilares com medidas de alteração do escoamento têm maior eficiência relativamente aos pilares simples, ou seja a profundidade da cavidade de erosão é menor nos pilares com medidas de alteração de escoamento.

No estudo de Tafarjnorouz et al. (2012) a percentagem de redução entre um pilar circular simples e um pilar circular com ranhura é de 35% para um período de 72 horas. No presente estudo a eficiência de redução foi cerca de 40%.

Na figura 4.6 são apresentadas as percentagens de redução do estudo Tafarjnorouz et al. (2012) (estudos de pilares circulares com ranhuras, figura 3.5) e respectiva curva de tendência. No mesmo gráfico, também são apresentadas as percentagens de redução relativas ao pilar circular com ranhura e pilar alongado com ranhura.

4. Evolução Temporal da Profundidade Máxima da Cavidade de Erosão Localizada

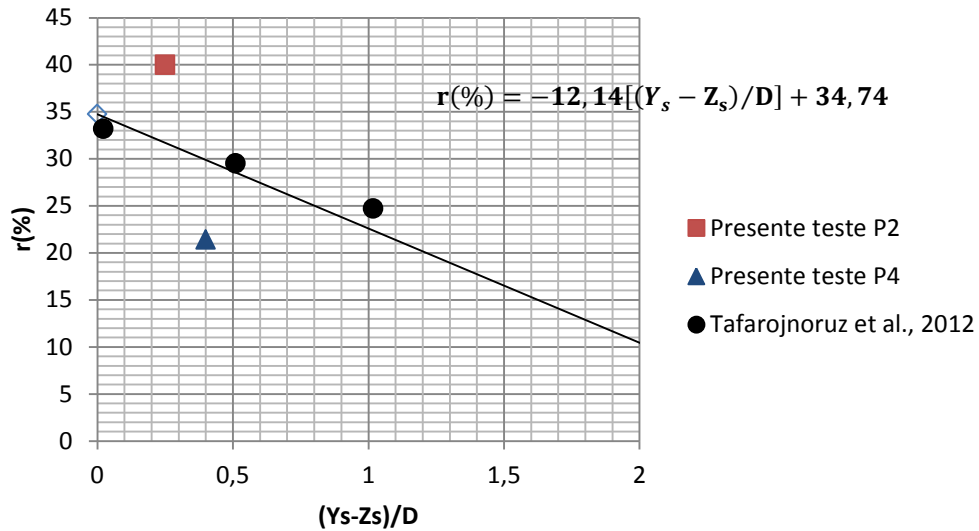


Figura 4.2: Percentagem de redução da profundidade máxima da cavidade de erosão em função de $(Y_s - Z_s)/D$ para pilares com ranhuras $l_s = h$. Comparação com resultados de Tafarojnoruz et al. (2012)

Em comparação com Tafarojnoruz et al. (2012), o pilar circular com ranhura P2 apresenta maior percentagem de redução da profundidade máxima da cavidade de erosão relativamente a um pilar circular simples com o mesmo diâmetro. O pilar alongado com ranhura tem menor percentagem de redução relativamente ao pilar circular com ranhura P2 bem como relativamente aos pilares circulares com ranhura de Tafarojnoruz et al. (2012).

Em seguida serão apresentados os mesmos resultados em gráficos do tipo semi-logarítmico (figuras 4.3 a 4.6). Este tipo de gráfico permite identificar as diferentes fases do processo erosivo. A identificação da fase inicial do processo erosivo foi feita através de uma curva de tendência logarítmica nos momentos iniciais do ensaio. Para a definir a fase inicial do processo erosivo, foi gerado um sistema de tentativa e erro através dos ensaios da 1ª série, que engloba as três fases do processo erosivo, de modo a obter R^2 aproximadamente igual a 1. Serão também apresentadas tabelas referentes às equações das linhas de tendência para as diferentes fases do processo erosivo para cada pilar.

4. Evolução Temporal da Profundidade Máxima da Cavidade de Erosão Localizada

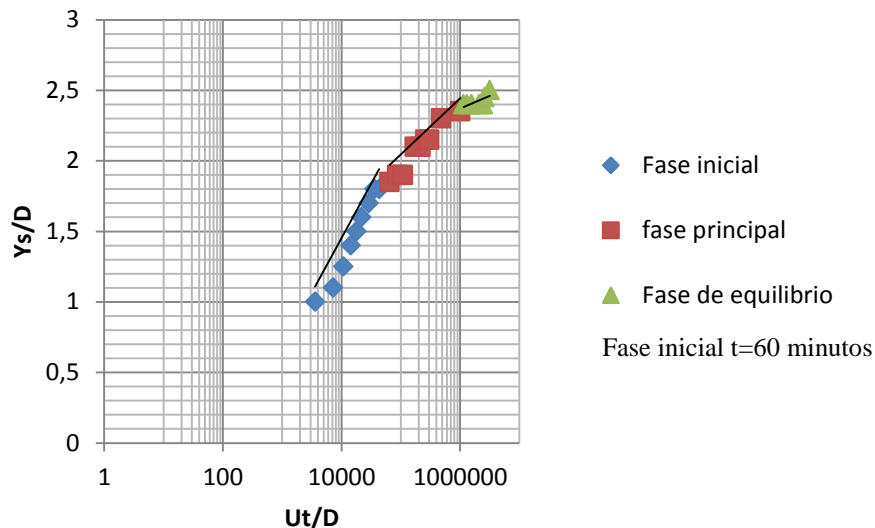


Figura 4.3: Fases do processo erosivo do pilar P1 (circular simples)

Tabela 4.6: Equações das linhas de tendência do pilar P1 (circular simples)

Fase Inicial	$y = 0,3639\ln(x) - 2,0622$	$R^2 = 0,9703$
Fase Principal	$y = 0,1997\ln(x) - 0,3599$	$R^2 = 0,9544$
Fase Equilíbrio	$y = 0,0682\ln(x) + 1,4307$	$R^2 = 0,4275$

Para o pilar circular simples é de notar que a fase inicial do processo erosivo tem uma duração de aproximadamente de 60 minutos (duração da 2ª fase de ensaios, subsecção 4.2.2.2), fase mais repentina de todo o processo erosivo. A partir desse instante passa a ser observado as duas fases mais estacionárias do processo, fase principal e de equilíbrio.

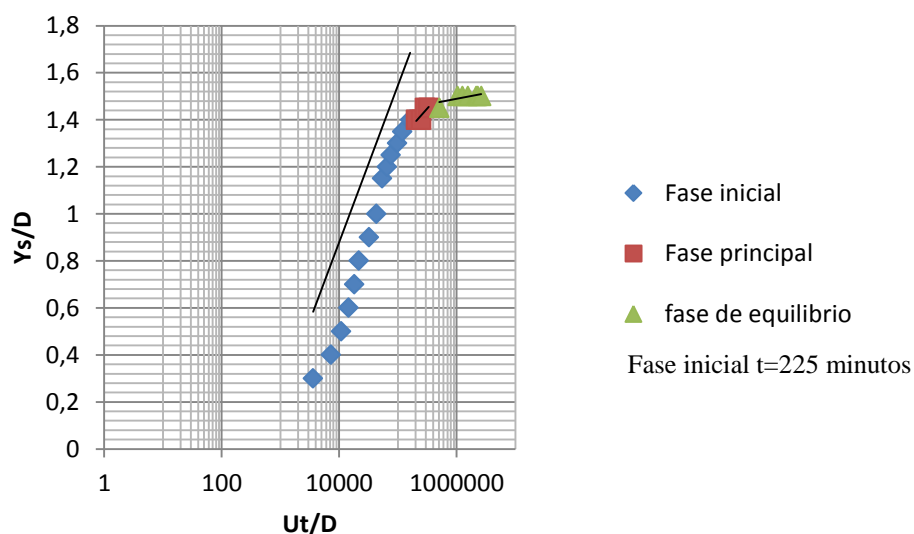


Figura 4.4: Fases do processo erosivo do pilar P2 (circular com ranhura)

4. Evolução Temporal da Profundidade Máxima da Cavidade de Erosão Localizada

Tabela 4.7: Equações das linhas de tendência do pilar P2 (circular com ranhura)

Fase Inicial	$y = 0,3279\ln(x) - 2,4813$	$R^2 = 0,983$
Fase Principal	$y = 0,1218\ln(x) - 0,0964$	$R^2 = 0,7916$
Fase Equilíbrio	$y = 0,0267\ln(x) + 1,1144$	$R^2 = 0,6526$

A fase inicial do processo erosivo para o pilar circular com ranhura tem uma duração de aproximadamente de 225 minutos (duração da 2ª fase de ensaios, subsecção 4.2.2.2). Neste tipo de pilar o fenómeno de erosão não é tão acentuado comparativamente com o pilar circular simples, e a profundidade máxima cavidade de erosão é menor.

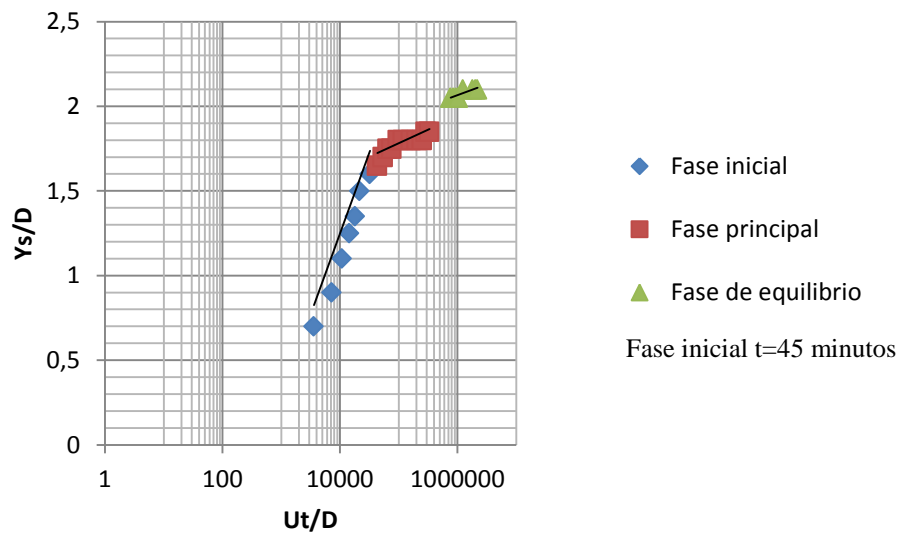


Figura 4.5: Fases do processo erosivo do pilar P3 (alongado simples)

Tabela 4.8: Equações das linhas de tendência do pilar P3 (alongado simples)

Fase Inicial	$y = 0,4358\ln(x) - 2,9151$	$R^2 = 0,9827$
Fase Principal	$y = 0,0773\ln(x) + 0,8706$	$R^2 = 0,8207$
Fase Equilíbrio	$y = 0,0581\ln(x) + 1,2587$	$R^2 = 0,8007$

4. Evolução Temporal da Profundidade Máxima da Cavidade de Erosão Localizada

No presente ensaio a fase inicial do processo erosivo decorre nos primeiros 45 minutos (duração da 2ª fase de ensaios, subsecção 4.2.2.2). No pilar alongado verifica-se uma redução na cavidade de erosão em relação ao pilar circular simples, no entanto este pilar não tem melhor desempenho do que o pilar circular com ranhura.

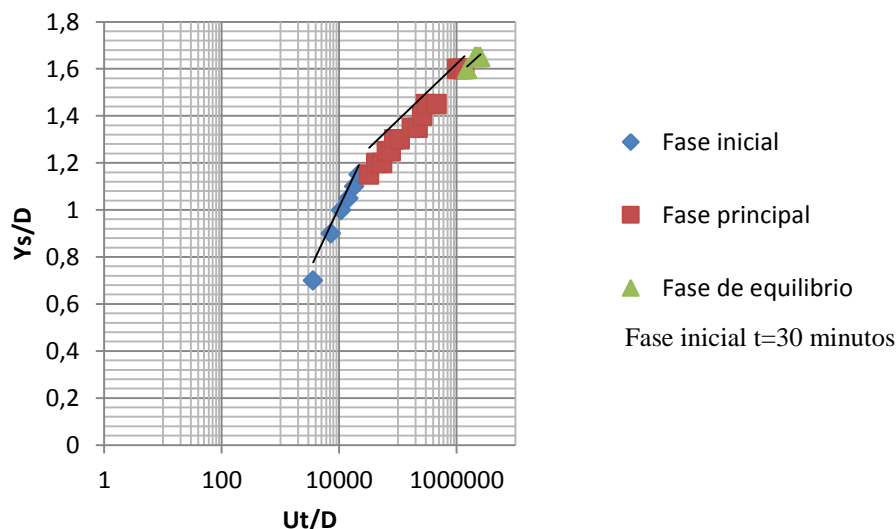


Figura 4.6: Fases do processo erosivo do pilar P4 (alongado com ranhura)

Tabela 4.9: Equações das linhas de tendência do pilar P4 (alongado com ranhura)

Fase Inicial	$y = 0,2457\ln(x) - 1,2978$	$R^2 = 0,9938$
Fase Principal	$y = 0,1223\ln(x) - 0,1177$	$R^2 = 0,9883$
Fase Equilíbrio	$y = 0,1026\ln(x) + 0,1473$	$R^2 = 0,834$

A profundidade máxima da cavidade de erosão do pilar alongado com ranhura é bastante semelhante ao do pilar circular com ranhura, apesar da fase inicial do processo erosivo do pilar alongado com ranhura ser de 30 minutos (duração da 2ª fase de ensaios, subsecção 4.2.2.2) e o do pilar circular com ranhura de 225 minutos.

4.2.2.2. Efeito do tempo

Na subsecção 4.2.2.2. apresentam-se as figuras 4.7 a 4.10 da evolução temporal da profundidade máxima de erosão para os ensaios realizados (tabelas 3.2 e 3.3). Os gráficos apresentados dizem respeito à primeira e segunda série de ensaios.

4. Evolução Temporal da Profundidade Máxima da Cavidade de Erosão Localizada

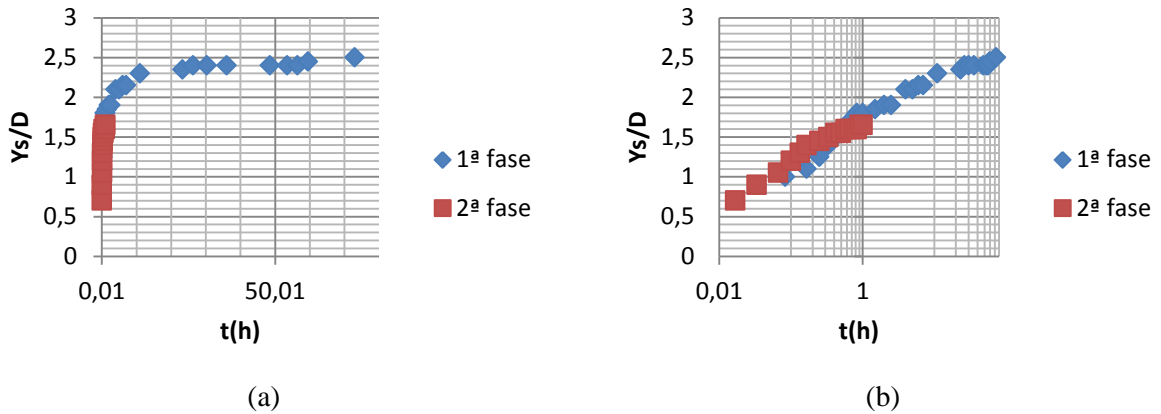


Figura 4.7: Evolução temporal da profundidade de erosão do pilar P1 (circular simples)

Na figura 4.7 são apresentados os resultados da primeira e segunda fase de ensaios relativamente ao pilar circular simples P1. Como podemos observar no gráfico (a) da figura (4.7), os resultados são coincidentes. O mesmo já não se passa quando os resultados são apresentados num gráfico semi-logarítmico (figura 4.7 (b)), visto as rectas de tendência não terem a mesma inclinação, como seria de esperar. Contudo, os resultados a partir de um certo instante começam a ser coincidentes.

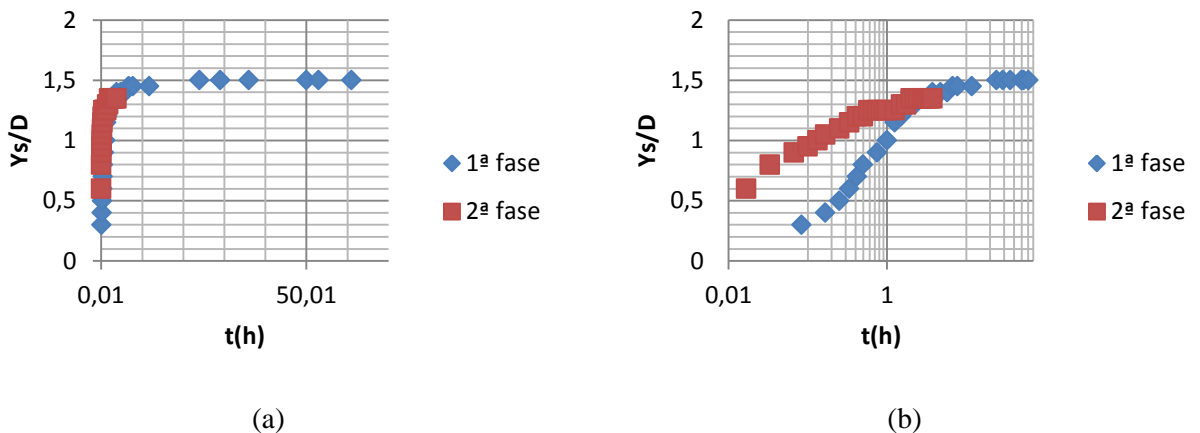


Figura 4.8: Evolução temporal da profundidade de erosão do pilar P2 (circular com ranhura)

Na figura 4.8 são apresentados os resultados da primeira e segunda fase de ensaios relativamente ao pilar circular com ranhura, P2. Tal como acontece no caso anterior (pilar circular simples), no gráfico (a) os dois ensaios são coincidentes, a evolução da profundidade de erosão é idêntica na primeira e na segunda fase, o que não se observa quando se utiliza o gráfico semi-logarítmico.

4. Evolução Temporal da Profundidade Máxima da Cavidade de Erosão Localizada

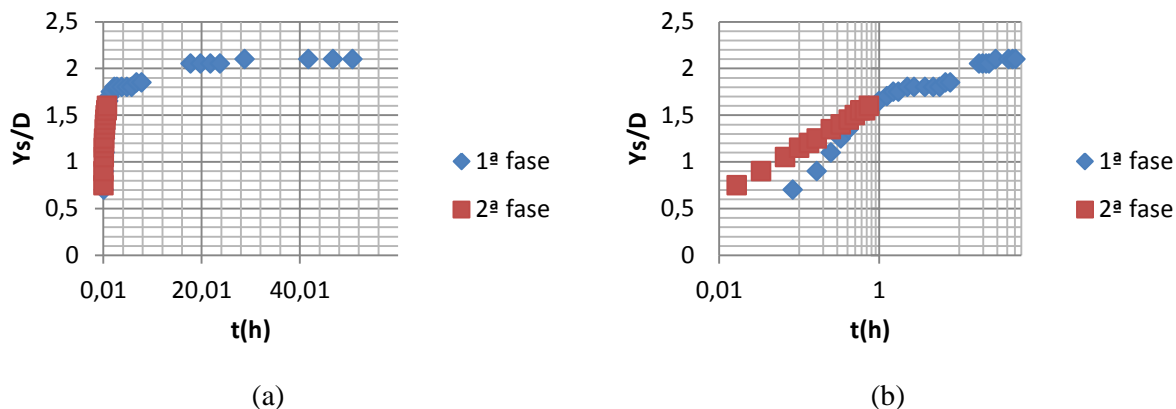


Figura 4.9: Evolução temporal do pilar P3 (alongado simples)

Na figura 4.9 são apresentados os resultados relativamente à primeira e segunda fase de ensaios para o pilar alongado simples, P3. Tal como acontece nos casos anteriores, no gráfico (a) os dois ensaios são coincidentes, a evolução da profundidade de erosão é idêntica na primeira e na segunda fase, o que não se observa quando se utiliza o gráfico semi-logarítmico.

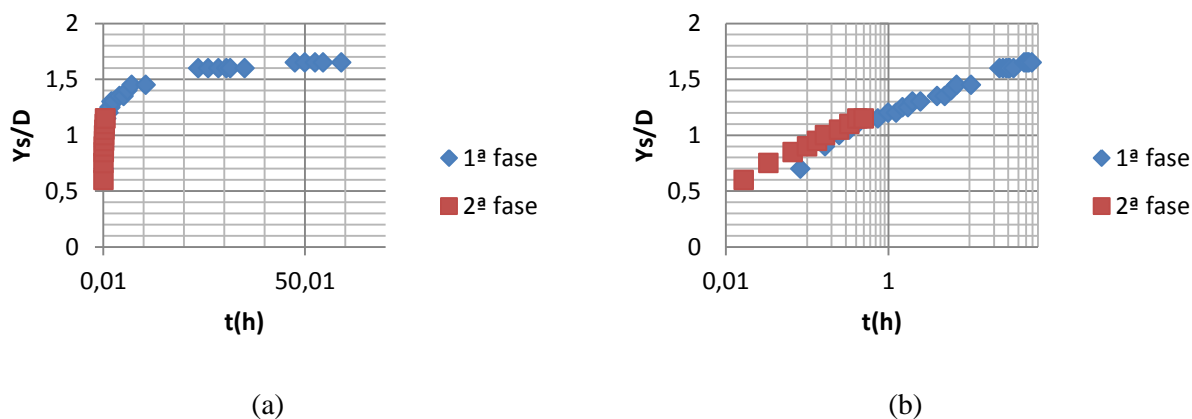


Figura 4.10: Evolução temporal do pilar P4 (alongado com ranhura)

Na figura 4.10 são apresentados os resultados relativamente à primeira e segunda fase de ensaios para o pilar alongado com ranhura, P4. Dentro dos quatro ensaios apresentados nesta série, este ensaio é o que apresenta a recta mais paralela entre a 1ª e 2ª série do mesmo pilar no gráfico do tipo semi-logarítmico.

Em seguida serão apresentadas as imagens das cavidades de erosão para as diferentes geometrias dos ensaios realizados nesta série (figuras 4.11 e 4.12).

4. Evolução Temporal da Profundidade Máxima da Cavidade de Erosão Localizada



(a)



(b)

Figura 4.11: Diferenças das configurações da cavidade de erosão (a) P1, pilar circular simples (b) P2, pilar circular com ranhura



(a)



(b)

Figura 4.12: Diferenças das configurações da cavidade de erosão (a) P3, pilar alongado simples (b) P4, pilar alongado com ranhura

4. Evolução Temporal da Profundidade Máxima da Cavidade de Erosão Localizada

Analisando as figuras apresentadas podemos concluir que nas configurações da cavidade de erosão apresentadas, a maior erosão acontece a montante do pilar, independente da geometria do pilar ou das medidas implementadas.

Os pilares P1, P3 e P4 apresentam uma configuração relativamente simétrica com o eixo longitudinal do pilar, enquanto que na configuração do pilar P2 isso já não se observa.

Comparando as cavidades de erosão dos pilares circulares P1 e P2 com os pilares alongados P3 e P4, a profundidade é mais acentuada nos pilares circulares e propaga-se muito mais na transversal, ou seja o desenvolvimento da profundidade da cavidade de erosão é mais extensa transversalmente.

Para os pilares com medidas de alteração de escoamento implementadas (P2 e P4), a cavidade de erosão é menor do que nos pilares simples.

4.3 Comparação com estudo anterior

Na presente subsecção, irá ser apresentada uma comparação com um estudo anterior (Leite, 2010) realizado no mesmo laboratório. A relação entre os trabalhos experimentais é a geometria de alguns dos pilares do presente estudo e do estudo de Leite (2010) ser idêntica (pilar circular simples e pilar alongado simples) e a relação entre a velocidade de escoamento e a velocidade crítica (U/U_c) ser igual a 0,9. No entanto nos ensaios de Leite (2010) a areia podia ser classificada como uniforme, o que não acontece no presente estudo.

Em cada secção da presente subsecção serão apresentadas as condições experimentais dos respectivos ensaios, bem como um gráfico com os resultados finais.

4.3.1. Pilares circulares

Na presente subsecção será apresentado o estudo de comparação da presente dissertação com o estudo de Leite (2010) relativamente ao pilar circular (tabela 4.10 e figura 4.13).

4. Evolução Temporal da Profundidade Máxima da Cavidade de Erosão Localizada

Tabela 4.10: Condições experimentais para pilares circulares simples

Pilar	Areia		Q (m^3/h)	D (cm)	h (cm)	U/ U_c	h/D	y_s (mm)
	d_{50} (mm)	σ_D						
Presente estudo pilar P1	0,332	1,94	12,9	2	5	0,9	2,5	38
Leite (2010)	0,376	1,4	13,5	4	5	0,9	1,25	65
Leite (2010)	0,376	1,4	49	4	15	0,9	3,75	80

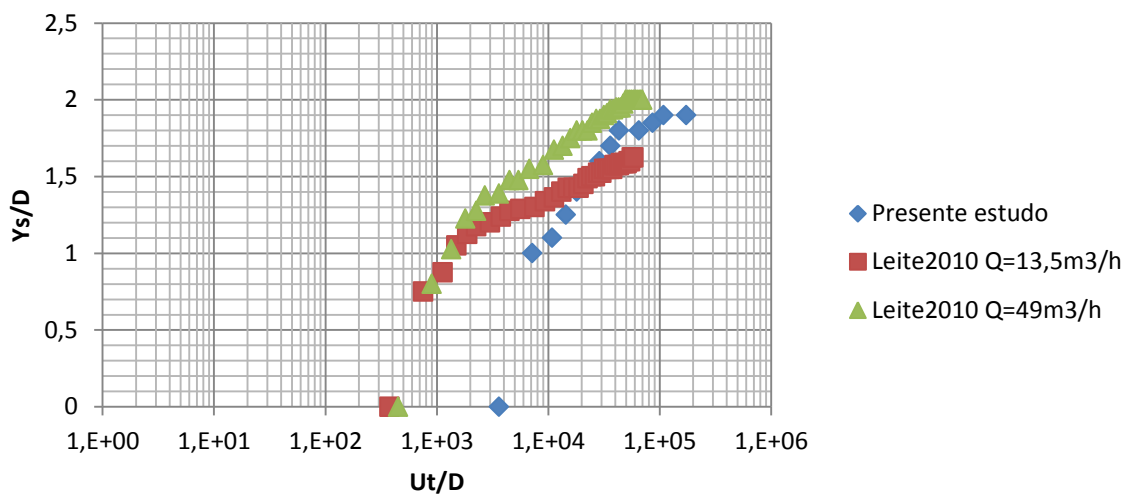


Figura 4.13: Resultados experimentais para pilares circulares simples

4.3.2. Pilares alongados

Na presente subseção será apresentado o estudo de comparação da presente dissertação com o estudo de Leite (2010) relativamente ao pilar alongado (tabela 4.11 e figura 4.14).

Tabela 4.11: Condições experimentais para pilares alongados simples

Pilar	Areia		Q (m^3/h)	D (cm)	h (cm)	U/ U_c	h/D	y_s (mm)
	d_{50} (mm)	σ_D						
Presente estudo pilar P3	0,332	1,94	12,9	2	5	0,9	2,5	36
Leite (2010)	0,376	1,4	13,5	4	5	0,9	1,25	63
Leite (2010)	0,376	1,4	49	4	15	0,9	3,75	78

4. Evolução Temporal da Profundidade Máxima da Cavidade de Erosão Localizada

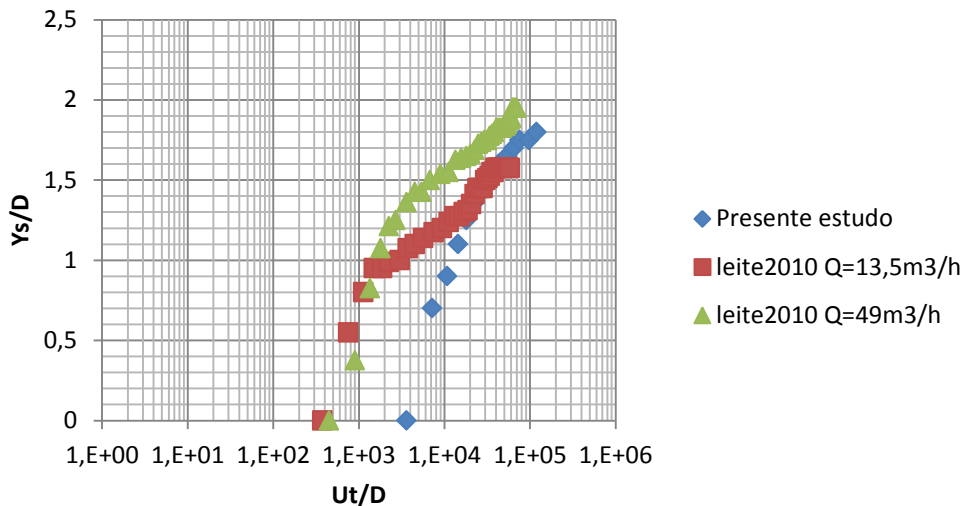


Figura 4.14: Resultados experimentais para pilares alongados simples

4.3.3 Análise de resultados

Os resultados mostram a influência de parâmetros como h/D e a granulometria da areia. Observa-se que na fase inicial, Y_s/D cresce aproximadamente à mesma taxa, no entanto no ensaio de Leite (2010) com $h/D= 1,25$ a fase inicial é mais curta. Analisando os resultados de acordo com h/D , verifica-se que quer para o pilar circular, quer para o pilar alongado, a profundidade da cavidade de erosão apresenta taxas de crescimento semelhantes para $h/D= 2,5$ (presente estudo) e $h/D= 3,75$ (Leite, 2010). Isto está de acordo com a indicação que se deve evitar a utilização de escoamentos com águas pouco profundas em laboratório ($h/D \geq 2,5$) (Tafarojnoruz et al., 2012). Observa-se igualmente que nos presentes resultados a cavidade de erosão (aferida por Y_s/D) se inicia para valores superiores de Ut/D , o que pode ser devido à utilização de uma areia não uniforme.

4.4 Conclusões

Em todos os ensaios realizados foi observado que a erosão localizada teve sempre início a montante do pilar, independentemente da geometria do pilar.

Para as mesmas condições de escoamento todos os pilares em estudo tiveram diferentes comportamentos relativamente ao desenvolvimento da profundidade máxima de erosão. Através dos gráficos apresentados é possível observar que os pilares mais eficazes são os

pilares com ranhura. Com o trabalho experimental elaborado observou-se que com as medidas de alteração do escoamento implementadas, a presença de vórtices em torno do pilar é mais reduzida fazendo que a profundidade máxima de erosão em torno do pilar seja menor.

É de notar as diferenças entre os pilares alongados (P3e P4) com os pilares circulares (P1e P2). Não só a evolução da cavidade tem comportamentos e resultados diferentes como também a própria configuração final da cavidade de erosão é diferente (figuras 4.11 e 4.12). As cavidades dos pilares circulares têm uma configuração mais alongada, com propagação na longitudinal muito diferente das configurações dos pilares alongados que têm uma tendência a alastrar-se na transversal.

Em conclusão, o fenómeno da erosão localizada é menos acentuado em pilares alongados do que nos pilares circulares, sendo ainda menos acentuado em pilares com medidas de alteração do escoamento.

4. Evolução Temporal da Profundidade Máxima da Cavidade de Erosão Localizada

5 CAVIDADES DE EROSÃO LOCALIZADA

De forma a perceber e estudar o fenómeno de erosão localizada na vizinhança de pilares de pontes com mais pormenor no final de cada ensaio foi retirado o respectivo molde da cavidade de erosão.

Com recurso ao programa informático AutoCAD foi possível caracterizar relevo da cavidade de erosão, bem como determinar os respectivos perfis longitudinais nas secções mais críticas de cada molde.

De uma forma geral foi observado que a erosão da cavidade era iniciada nos primeiros momentos do ensaio imediatamente a montante do pilar, passando para as zonas laterais do pilar, e seguindo para a região mais a jusante do pilar.

Os moldes recolhidos dizem respeito às duas séries de ensaios com as condições descritas na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Condições experimentais dos moldes recolhidos

Série	Pilar	Molde	h(m)	Q (m ³ /h)	U (m/s)	Tempo (h)
Primeira	Circular simples	1	0,05	12,9	0,24	73
	Circular com ranhura	2				61
	Alongado simples	3				51
	Alongado com ranhura	4				59
Segunda	Circular simples	1	0,05	12,96	0,24	1
	Circular com ranhura	2				3,75
	Alongado simples	3				0,75
	Alongado com ranhura	4				0,5

5.1 Primeira série de ensaios

Na seguinte secção serão apresentados os moldes e respectivas digitalizações da cavidade máxima de erosão.

Nos primeiros instantes do processo de erosão, os sedimentos começam a erodir a montante do pilar no sentido do escoamento. Após colidirem com o obstáculo, estes depositam-se a jusante deste. Os sedimentos de menor dimensão são os primeiros a ser transportados e com o

depósito dos primeiros sedimentos estes passam a ser considerados obstáculos para o escoamento. Ao longo do ensaio, a capacidade de transporte dos sedimentos vai diminuindo tornando-se mais difícil transportar os sedimentos com maior dimensão. Devido a isso, à medida que a cavidade de erosão é formada, os sedimentos de maior dimensão acabam por ficar retidos na cavidade pois são mais pesados e o escoamento não tem força suficiente para os transportar.

Este fenómeno foi observado em todos os ensaios laboratoriais, nuns mais acentuados e outros menos.

5.1.1. Cavidade de erosão pilar P1

Na seguinte figura (5.1) mostra o molde retirado após término do ensaio e respectiva digitalização do equipamento Roland's 3D. Através destas duas figuras já se conclui que a profundidade de erosão a montante do pilar é superior à profundidade de erosão a jusante.



(a) Molde



(b) Digitalização

Figura 5.1: Profundidade máxima da cavidade de erosão do pilar P1 (circular simples)

Na figura 5.2 está representado o perfil longitudinal que passa pelo centro do pilar circular simples P1. Na figura 5.3 apresenta-se o terreno da cavidade de erosão modelado através de curvas de nível.

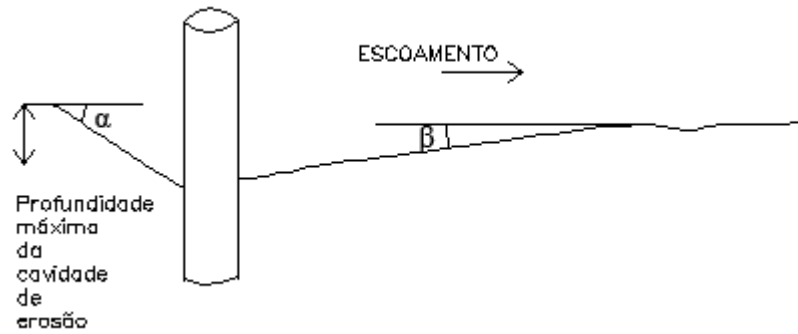


Figura 5.2: Perfil longitudinal do pilar P1 (pilar circular simples)

Através da análise da cavidade de erosão do perfil longitudinal P1, podemos observar que o ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e do nível inicial da areia a montante é de aproximadamente $38,9^\circ$ e a jusante é de $10,3^\circ$.

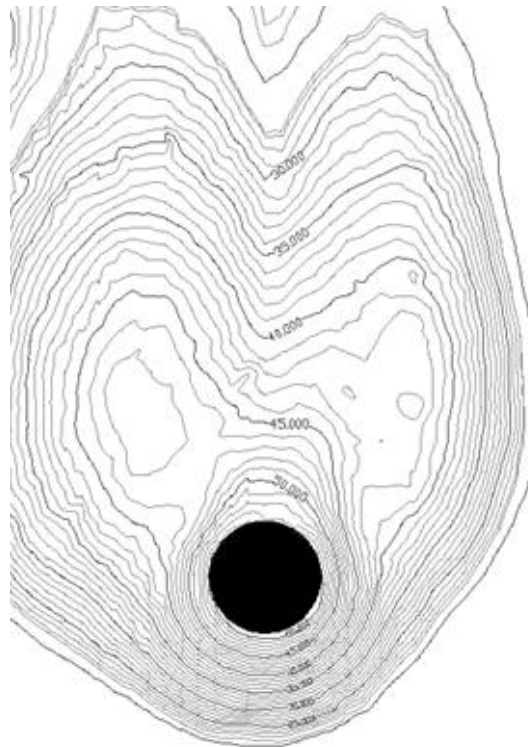


Figura 5.3: Curvas de nível do pilar P1 (pilar circular simples), com espaçamento de 1mm

Na figura 5.3 apresenta-se o traçado das curvas de nível no interior da cavidade de erosão. Com recurso a esta imagem é possível observar que a cavidade de erosão a montante tem uma escavação de aproximadamente 50 mm a montante e a jusante de 47 mm. Observa-se também que as curvas de nível não são simétricas relativamente ao plano longitudinal do pilar, devido

5. Cavidades de Erosão Localizada

ao facto do pilar ser circular e este tipo de pilar provocar vórtices que favorecem a escavação em redor do pilar.

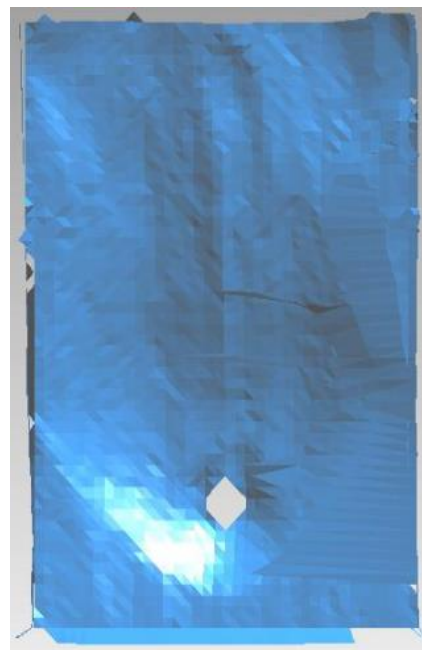
Tabela 5.2: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia. Pilar P1 (montante e jusante)

	α	β
Pilar circular P1	38,9°	10,3°

5.1.2. Cavidade de erosão pilar P2



(a) Molde



(b) Digitalização

Figura 5.4: Profundidade máxima da cavidade de erosão do pilar P2 (circular com ranhura)

Na figura 5.5 está representado o perfil longitudinal que passa pelo centro do pilar circular com ranhura P2. Na figura 5.6 apresenta-se o terreno da cavidade de erosão modelado através de curvas de nível.



Figura 5.5: Perfil longitudinal do pilar P2 (pilar circular com ranhura)

Através da análise da cavidade de erosão do perfil longitudinal P2, podemos observar que o ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e do nível inicial da areia a montante é de aproximadamente $38,4^\circ$ e a jusante é de $7,2^\circ$.

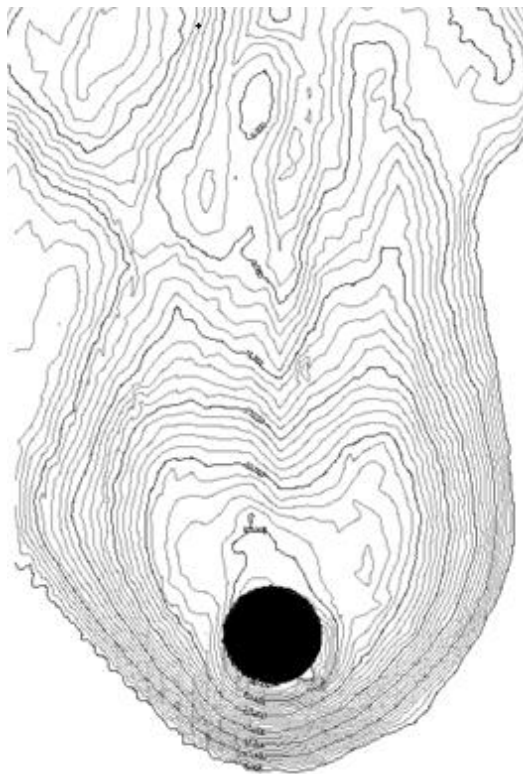


Figura 5.6: Curvas de nível do pilar P2 (pilar circular com ranhura), com espaçamento de 1mm

Na figura 5.6 apresenta-se o traçado das curvas de nível no interior da cavidade de erosão. Com recurso a esta imagem é possível observar que a cavidade de erosão a montante tem uma escavação de aproximadamente 30mm a montante e a jusante de 26mm. Já se observa que as

5. Cavidades de Erosão Localizada

curvas de nível são mais acentuada relativamente à simetria ao longo do plano longitudinal do pilar em comparação à figura 5.3, pilar circular simples.

Tabela 5.3: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia. Pilar P1 e P2 (montante e jusante)

	α	β
Pilar circular P1	38,9°	10,3°
Circular com ranhura P2	38,4°	7,2°

As inclinações da profundidade da cavidade de erosão a montante dos pilares (P1 e P2) são semelhantes, sendo a cavidade menos inclinada a do pilar P2, como seria de esperar. Apesar de ambos os pilares serem circulares, o pilar P2 contém uma medida de alteração de escoamento que faz com que o movimento dos sedimentos seja ligeiramente diferente do pilar P1. No pilar P1 a cavidade de erosão inicia-se em redor do pilar formando vórtices. No pilar P2 passa-se exatamente o mesmo, mas como o pilar tem uma abertura a meio, alguns dos sedimentos transportados acabam por passar pela abertura fazendo como que a presença de vórtices seja menor em redor do pilar.

5.1.3. Cavidade de erosão pilar P3



(a) Molde



(b) Digitalização

Figura 5.7: Profundidade máxima da cavidade de erosão do pilar P3 (alongado simples)

Na figura 5.8 está representado o perfil longitudinal que passa pelo centro do pilar alongado simples P3. Na figura 5.9 apresenta-se o terreno da cavidade de erosão modelado através de curvas de nível.

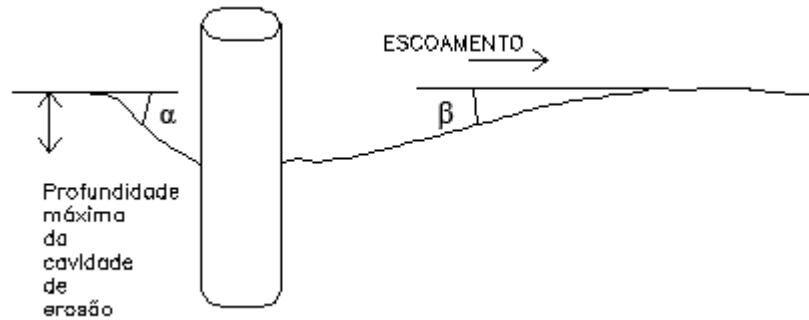


Figura 5.8: Perfil longitudinal do pilar P3 (pilar alongado simples)

Através da análise da cavidade de erosão do perfil longitudinal P3, podemos observar que o ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e do nível inicial da areia a montante é de aproximadamente $42,6^\circ$ e a jusante é de $10,5^\circ$.

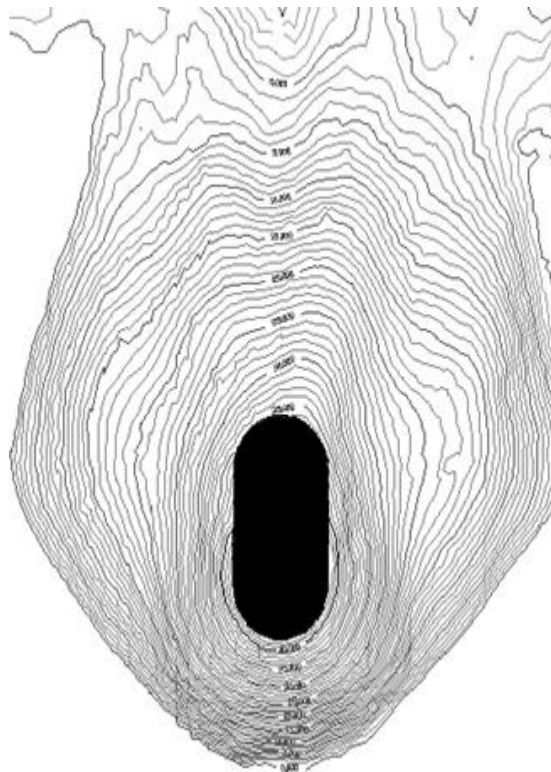


Figura 5.9: Curvas de nível do pilar P3 (pilar alongado simples) com espaçamento de 1mm

5. Cavidades de Erosão Localizada

Na figura 5.9 apresenta-se o traçado das curvas de nível no interior da cavidade de erosão. Com recurso a esta imagem é possível observar que a cavidade de erosão a montante tem uma escavação de aproximadamente 42 mm a montante e a jusante de 35 mm. Observa-se que as curvas de nível são simétricas ao logo do plano longitudinal do pilar. Isto acontece devido à geometria do pilar.

Tabela 5.4: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia. Pilar P1, P2 e P3 (montante e jusante)

	α	β
Pilar circular P1	38,9°	10,3°
Pilar Circular com ranhura P2	38,4°	7,2°
Pilar alongado P3	42,6°	10,5°

Comparando o ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e do nível inicial a montante dos pilares circular simples (P1) e alongado simples (P3), o ângulo é superior no pilar P3. Isto deve-se ao facto do pilar P3 ter uma geometria mais alongada que o pilar P1, os sedimentos são arrastados de maneiras completamente diferentes dentro da cavidade de erosão.

5.1.4. Cavidade de erosão pilar P4



(a) Molde



(b) Digitalização

Figura 5.10: Profundidade máxima da cavidade de erosão do pilar P4 (alongado com ranhura)

Na figura 5.11 está representado o perfil longitudinal que passa pelo centro do pilar alongado com ranhura P4. Na figura 5.12 apresenta-se o terreno da cavidade de erosão modelado através de curvas de nível.

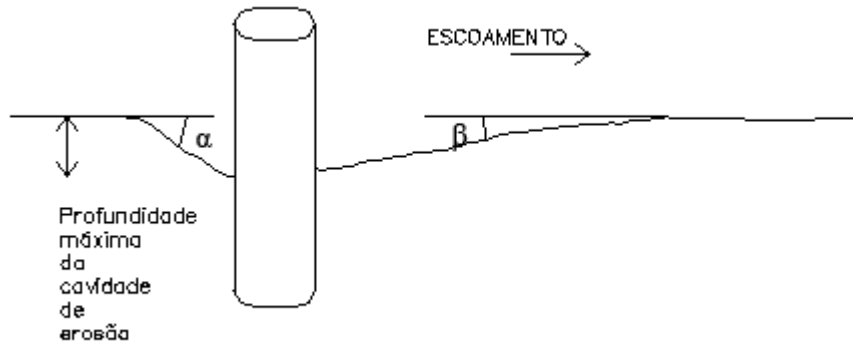


Figura 5.11: Perfil longitudinal do pilar P2 (pilar alongado com ranhura)

Através da análise da cavidade de erosão do perfil longitudinal P4, podemos observar que o ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e do nível inicial da areia a montante é de aproximadamente $35,2^\circ$ e a jusante é de $7,7^\circ$.

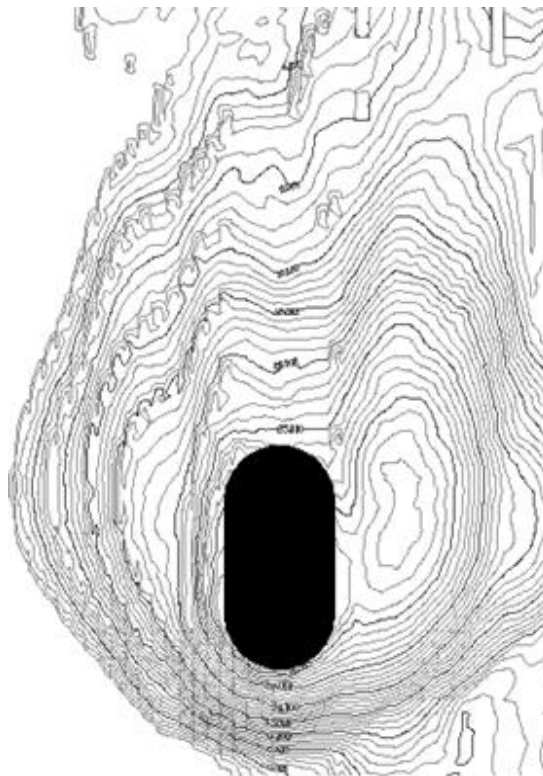


Figura 5.12: Curvas de nível do pilar P2 (pilar alongado com ranhura), com espaçamento de 1mm

Na figura 5.12 apresenta-se o traçado das curvas de nível no interior da cavidade de erosão. Com recurso a esta imagem é possível observar que a cavidade de erosão a montante tem uma escavação de aproximadamente 32mm a montante e a jusante de 26mm.

Tabela 5.5: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia. Pilar P1, P2, P3 e P4 (montante e jusante)

	α	β
Pilar circular P1	38,9°	10,3°
Pilar Circular com ranhura P2	38,4°	7,2°
Pilar alongado P3	42,6°	10,5°
Pilar alongado com ranhura P4	35,2°	7,1°

O ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia a montante do pilar P3 é bastante maior do que o ângulo do pilar P4. Apesar de ambos serem pilares com geometrias iguais, alongadas, o pilar P4 contém medidas de alteração de escoamento. Estas medidas, tal como aconteceu no pilar P2 reduziram significativamente a profundidade de erosão em redor do pilar e por consequência o ângulo formado entre o leito de fundo a concavidade de erosão e o nível inicial da areia relativamente ao pilar com a mesma geometria mas sem essas medidas.

Relacionando as diferenças dos ângulos a montante e a jusante dos pilares P2 e P4, observa-se que no pilar P2 estes são menores. Apesar de ambos os pilares terem medidas de alteração de escoamento implementadas esta ocorrência é explicada pelo facto dos pilares serem de geometrias diferentes e por consequência o movimento de escoamento (a forma de como os sedimentos são transportados) é igualmente diferente.

5.2 Segunda série de ensaios

Na seguinte secção serão apresentados os moldes e respectivas digitalizações dos ensaios correspondentes à fase inicial do processo erosivo.

5.2.1. Cavidade de erosão pilar P1



(a) Molde



(b) Digitalização

Figura 5.13: Molde da cavidade de erosão no final da fase inicial do processo erosivo do pilar circular simples

Na figura 5.14 está representado o perfil longitudinal que passa pelo centro do pilar circular simples P1 no final fase inicial do processo erosivo. Na figura 5.15 apresenta-se o terreno da cavidade de erosão modelado através de curvas de nível.

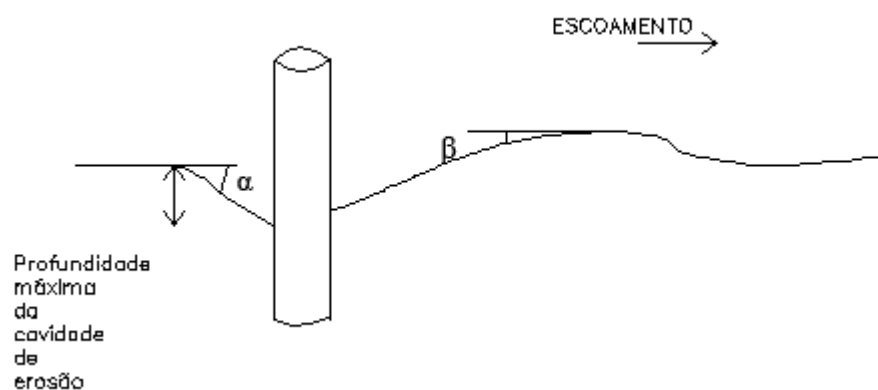


Figura 5.14 Perfil longitudinal do pilar P1 (pilar circular simples)

5. Cavidades de Erosão Localizada

Através da análise da cavidade de erosão do perfil longitudinal P1, podemos observar que o ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e do nível inicial da areia a montante é de aproximadamente $60,5^\circ$ e a jusante é de $52,1^\circ$.

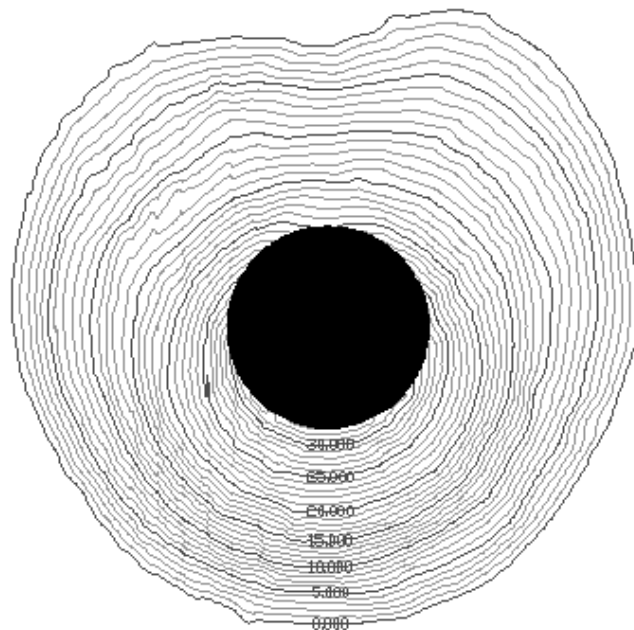


Figura 5.15: Curvas de nível do pilar P1 (pilar circular simples) com espaçamento de 1 mm

Na figura 5.15 apresenta-se o traçado das curvas de nível no interior da cavidade de erosão. Com recurso a esta imagem é possível observar que a cavidade de erosão a montante tem uma profundidade de escavação de aproximadamente igual a 32 mm a montante e a jusante de 20 mm.

Tabela 5.6: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia, pilar P1 1ª e 2ª série

Pilar circular simples P1	α	β
1ª Série	$38,9^\circ$	$10,3^\circ$
2ª Série	$60,5^\circ$	$52,1^\circ$

5.2.2. Cavidade de erosão pilar P2

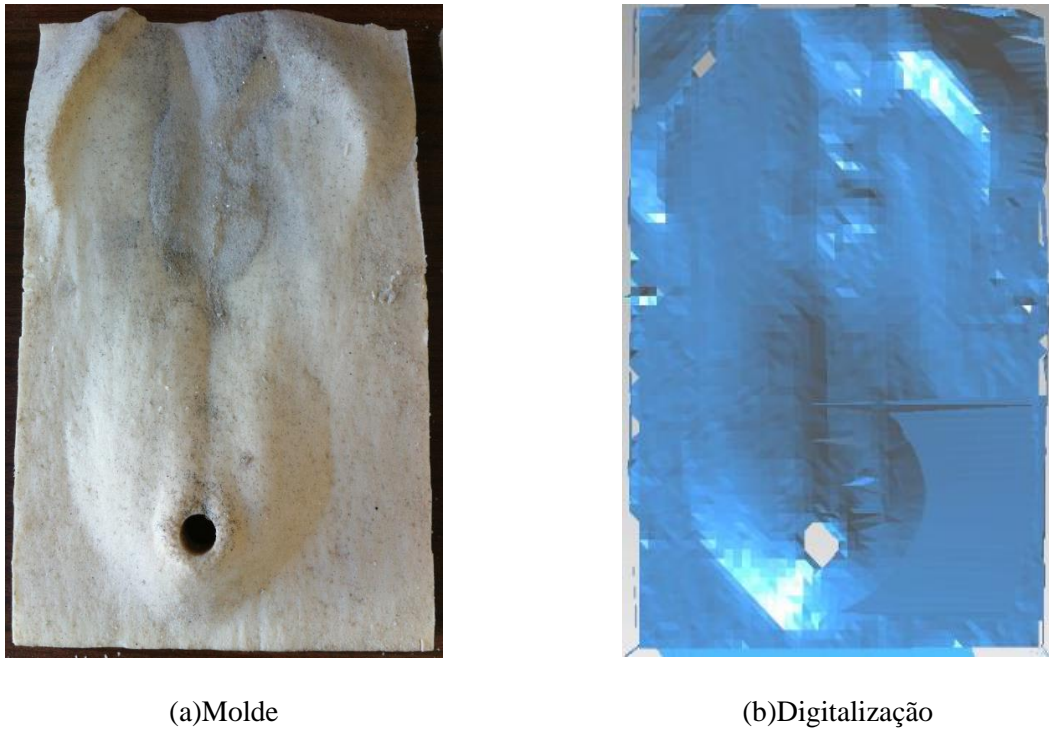


Figura 5.16: Molde da cavidade de erosão no final da fase inicial do processo erosivo do pilar circular com ranhura

Na figura 5.17 está representado o perfil longitudinal que passa pelo centro do pilar circular com ranhura P2. Na figura 5.18 apresenta-se o terreno da cavidade de erosão modelado através de curvas de nível.

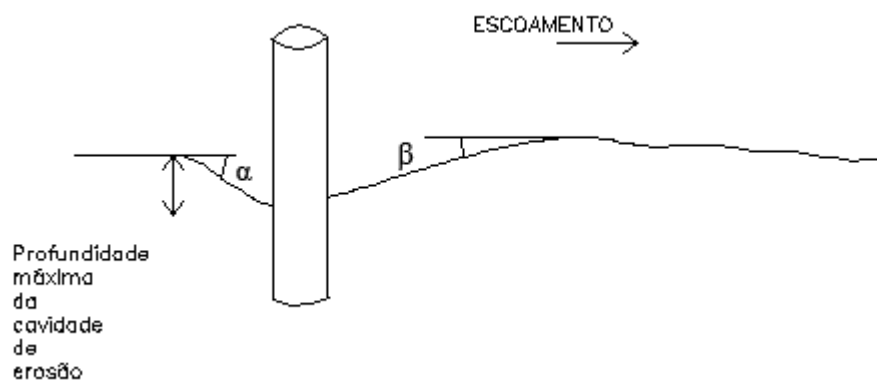


Figura 5.17: Perfil longitudinal do pilar P2 (pilar circular com ranhura)

Através da análise da cavidade de erosão do perfil longitudinal P2, podemos observar que o ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e do nível inicial da areia a montante é de aproximadamente $46,3^\circ$ e a jusante é de $35,6^\circ$.

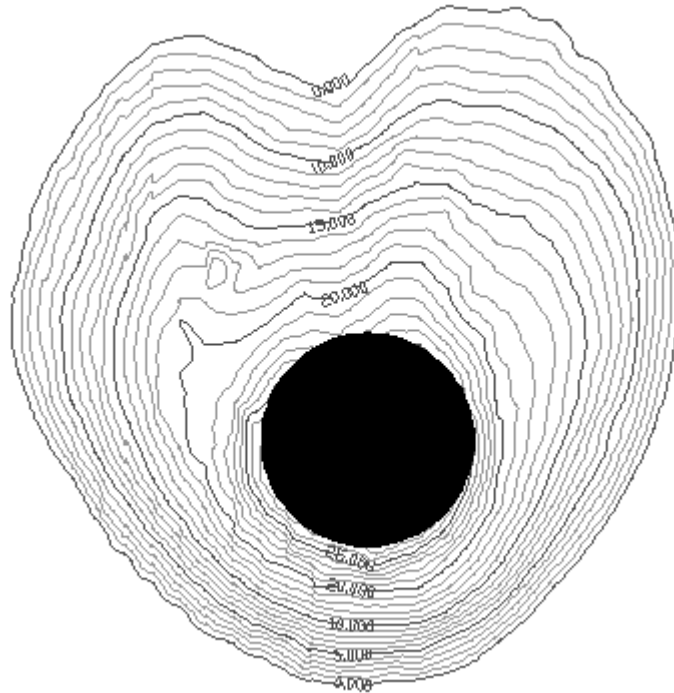


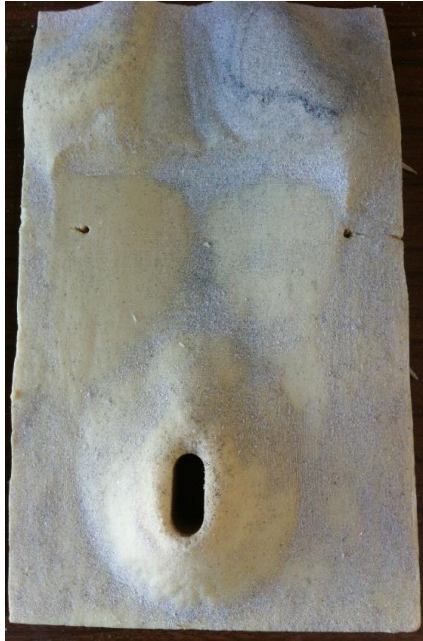
Figura 5.18: Curvas de nível do pilar P2 (pilar circular com ranhura), com espessamento de 1mm

Na figura 518 apresenta-se o traçado das curvas de nível no interior da cavidade de erosão. Com recurso a esta imagem é possível observar que a cavidade de erosão a montante tem uma profundidade de escavação aproximadamente igual a 27 mm e a jusante de 22 mm.

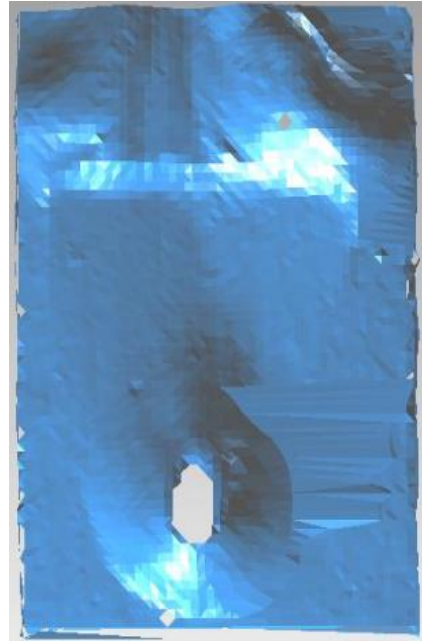
Tabela 5.7: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia, pilar P2 1ª e 2ª série

Pilar circular com ranhura P2	α	β
1ª Série	38,4°	7,2°
2ª Série	46,3°	35,6°

5.2.3. Cavidade de erosão pilar P3



(a) Molde



(d) Digitalização

Figura 5.19: Molde da cavidade de erosão no final da fase inicial do processo erosivo do pilar alongado simples

Na figura 5.20 está representado o perfil longitudinal que passa pelo centro do pilar alongado simples P3. Na figura 5.21 apresenta-se o terreno da cavidade de erosão modelado através de curvas de nível.

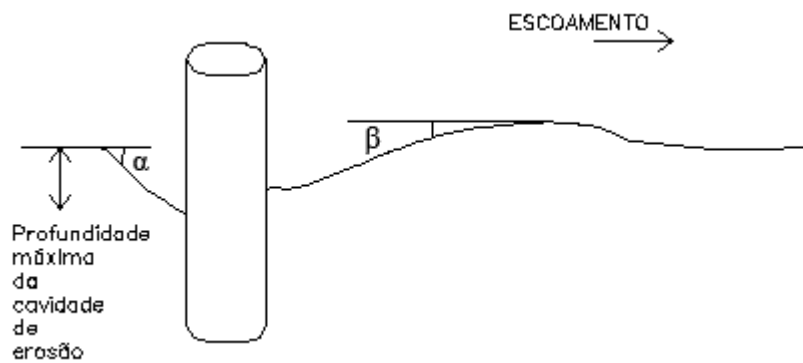


Figura 5.20: Perfil longitudinal do pilar P3 (pilar alongado simples)

5. Cavidades de Erosão Localizada

Através da análise da cavidade de erosão do perfil longitudinal P3, podemos observar que o ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e do nível inicial da areia a montante é de aproximadamente $45,5^\circ$ e a jusante é de $27,9^\circ$.

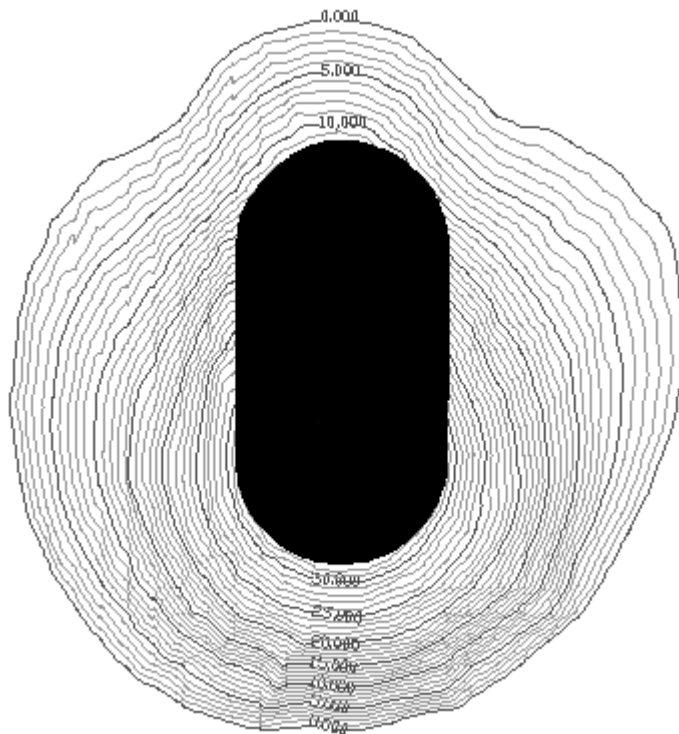


Figura 5.21: Curvas de nível do pilar P3 (pilar alongado simples), com espaçamento de 1mm

Na figura 5.22 apresenta-se o traçado das curvas de nível no interior da cavidade de erosão. Com recurso a esta imagem é possível observar que a cavidade de erosão a montante tem uma profundidade de escavação aproximadamente igual a 32 mm e a jusante de 12 mm.

Tabela 5.8: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia, pilar P3 1ª e 2ª série

Pilar alongado simples P3	α	β
1ª Série	$42,6^\circ$	$10,5^\circ$
2ª Série	$45,5^\circ$	$27,9^\circ$

5.2.4. Cavidade de erosão pilar P4

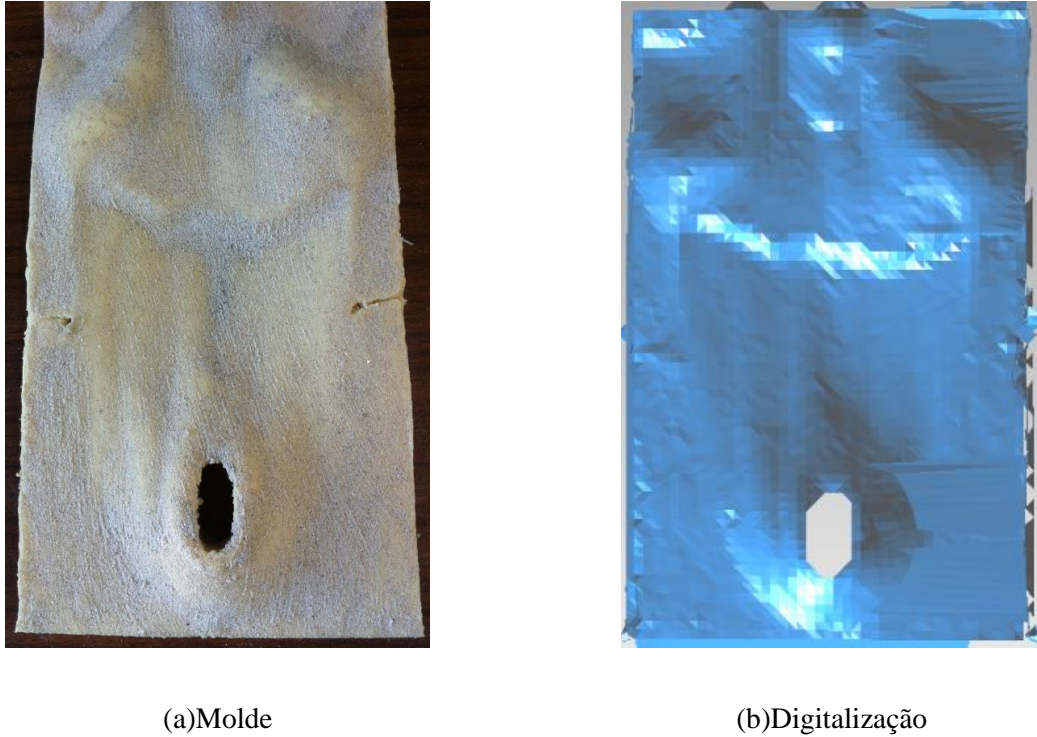


Figura 5.22: Molde da cavidade de erosão no final da fase inicial do processo erosivo do pilar alongado com ranhura

Na figura 5.24 está representado o perfil longitudinal que passa pelo centro do pilar alongado com ranhura P4. Na figura 5.25 apresenta-se o terreno da cavidade de erosão modelado através de curvas de nível.

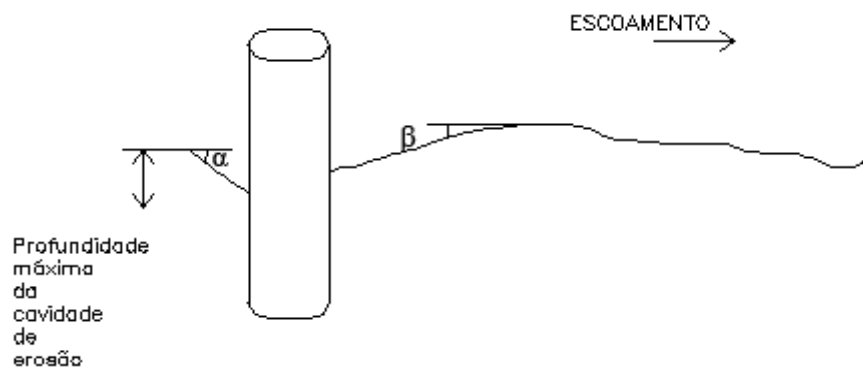


Figura 5.23: Perfil longitudinal do pilar P4 (pilar alongado com ranhura)

Através da análise da cavidade de erosão do perfil longitudinal P4, podemos observar que o ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e do nível inicial da areia a montante é de aproximadamente $53,2^\circ$ e a jusante é de $33,1^\circ$.

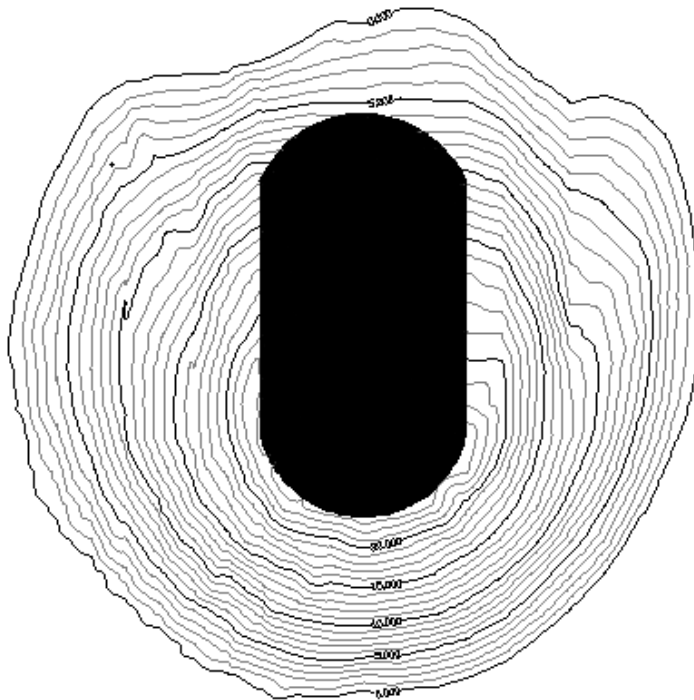


Figura 5.24: Curvas de nível do pilar P4 (pilar alongado com ranhura), com espaçamento de 1mm

Na figura 5.25 apresenta-se o traçado das curvas de nível no interior da cavidade de erosão. Com recurso a esta imagem é possível observar que a cavidade de erosão a montante tem uma profundidade de escavação aproximadamente igual a 23 mm e a jusante de 6 mm.

Tabela 5.9: Ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia, pilar P4 1ª e 2ª série

Pilar alongado com ranhura P4	α	β
1ª Série	35,2°	7,1°
2ª Série	53,2°	33,1°

Esta série de ensaios tem como objectivo a comparação do ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia entre a fase inicial do processo erosivo e o todo o processo erosivo. Com a análise dos moldes apresentados podemos concluir que os ângulos formados, quer a montante quer a jusante entre as duas séries de ensaios são distintos nos quatro pilares. Na primeira série, correspondente a todo o processo erosivo, os ângulos formados a montante rodam os 40° e a jusante os 10°. Na segunda série de

ensaios, correspondente à fase inicial do processo erosivo, esta gama de valores já não é observada, os ângulos dos perfis longitudinais são muito mais acentuados que na primeira série de ensaios. Isto deve-se ao facto da cavidade de erosão ainda não ter evoluído transversalmente, ou seja, na fase inicial do processo erosivo a cavidade de erosão evolui mais em profundidade do que lateralmente.

5.3 Geometria da cavidade de erosão

A presente secção tem o propósito de observar as diferenças das geometrias da cavidade de erosão na fase inicial do processo erosivo (segunda série de ensaios) e de todo o processo erosivo (primeira série de ensaios).

Na figura 5.25 está representado um esquema de um molde da cavidade de erosão, onde exemplifica como as distâncias geométricas foram retiradas em cada molde.

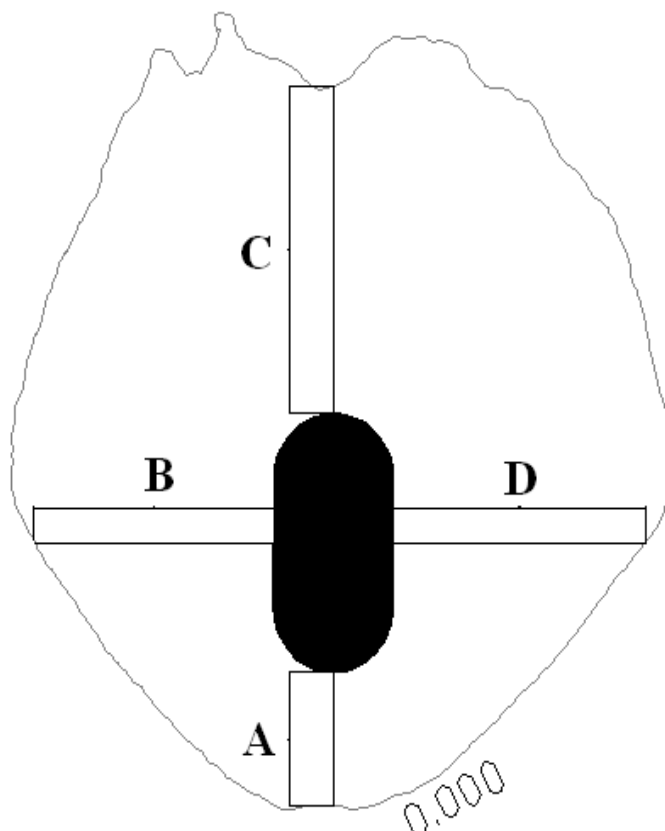


Figura 5.25: Exemplo de distâncias longitudinais e transversais na cavidade de erosão

5. Cavidades de Erosão Localizada

Nas seguintes tabelas (5.10 e 5.11) estão indicadas as distâncias entre as extremidades dos pilares até à cota zero, caso esteja presente no molde. No caso da cota zero não estar representada no molde, indica-se a cota utilizada para determinar essas distâncias.

Tabela 5.10: Distância do extremo do pilar até à cota mais baixa no molde (primeira série de ensaios)

1ª série	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
Pilar circular simples P1	60,9	74,7	276,3	107,4
	Cota 8	Cota 32	Cota 13	Cota 6
Pilar circular com ranhura P2	55,7	58,1	239,1	64,8
			Cota 5	
Pilar alongado simples P3	45,4	85,3	117,9	90,1
Pilar alongado com ranhura P4	36,9	70,2	128,9	83,7
				Cota 17

Tabela 5.11: Distância do extremo do pilar até à cota mais baixa no molde (segunda série de ensaios)

2ª série	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
Pilar circular simples P1	38,9	42,3	35,9	41,3
Pilar circular com ranhura P2	25,9	40,4	50,4	32,9
Pilar alongado simples P3	31,1	41,7	22,1	44,9
Pilar alongado com ranhura P4	25,6	36,7	13,6	34,1

Como se pode observar nas tabelas 5.10 e 5.11 tanto na primeira série de ensaios como na segunda série de ensaios os pilares com medidas de alteração de escoamento têm distâncias inferiores até à cota zero, do que os pilares sem medidas de alteração do escoamento.

Em relação ao processo erosivo, as distâncias na fase inicial (segunda série de ensaios) são inferiores às do processo erosivo completo (primeira série de ensaios).

Tabela 5.12: Diferenças de distâncias entre a primeira e segunda série de ensaios

Variação	A (mm)	B (mm)	C (mm)	D (mm)
Pilar circular simples P1	21	32,4	240,4	66,1
Pilar circular com ranhura P2	29,8	17,7	188,7	31,9
Pilar alongado simples P3	14,3	43,6	95,8	45,2
Pilar alongado com ranhura P4	11,3	33,5	115,3	49,6

É notória a diferença entre as distâncias dos moldes retirados na primeira e na segunda série de ensaios (tabela 5.12).

5.4 Conclusão

Com a extração dos moldes da cavidade de erosão foi possível compreender com maior pormenor o fenómeno da erosão localizada para pilares com geometrias e medidas de escoamento distintas. Foi possível identificar as diferenças entre as cavidades de erosão obtidas para pilares circulares, alongados e circulares e alongados com medidas de alteração do escoamento implementadas.

Na primeira fase de ensaios, observam-se pequenas diferenças nos valores da profundidade máxima da cavidade de erosão quer a montante quer a jusante dos pilares. Conclui-se que os pilares com medidas de alteração do escoamento têm menor profundidade máxima da cavidade de erosão do que os pilares sem medidas implementadas e que no pilar alongado a cavidade de erosão é mais acentuada do que no pilar circular. As concavidades da cavidade de erosão nesta série de ensaios variam entre os 35,2° e 42,6° a montante e entre 7,2° e 10,5° a jusante.

Na segunda fase de ensaios observou-se que na fase inicial do processo erosivo a profundidade de erosão evolui mais acentuadamente em profundidade do que transversalmente. As concavidades da cavidade de erosão nesta série de ensaios variam entre os 60,5° e 45,5° a montante e entre 52,1° e 27,9° a jusante.

6 CONCLUSÃO

Neste capítulo apresenta-se um resumo das principais condições da presente dissertação (subsecção 6.1) e algumas sugestões para a realização de futuros trabalhos (subsecção 6.2).

6.1 Conclusões

Numa primeira fase, o presente trabalho consiste na análise da evolução da profundidade máxima de erosão com a utilização de pilares com diferentes geometrias e medidas de alteração do escoamento. Deste modo podemos concluir que:

- comparando os resultados obtidos experimentalmente com os resultados obtidos analiticamente através das fórmulas americanas H.E.C. 18 (Richardson e Davies, 2001), de Melville e Chiew (1999) e Chang et al. (2004), observa-se que estas últimas apresentam todas previsões por excesso;
- os pilares com medidas de alteração de escoamento, apresentam uma redução significativa da profundidade máxima da cavidade de erosão relativamente aos pilares sem medidas de alteração de escoamento.
- a profundidade máxima da cavidade de erosão é menor no pilar alongado do que no pilar circular.
- em comparação com um estudo realizado no mesmo laboratório, verifica-se que quer para o pilar circular simples, quer para o pilar alongado, a profundidade da cavidade de erosão apresenta taxas de crescimento semelhantes.

Relativamente à extração e levantamento das características dos moldes da profundidade máxima da cavidade de erosão e da primeira fase do processo erosivo (fase inicial) podemos concluir que:

- Em ambas as séries e em todos os pilares, o ângulo formado entre o leito de fundo da concavidade de erosão e o nível inicial da areia a montante é superior ao ângulo formado a jusante do pilar.
- Na primeira série de ensaios, em pilares sem medidas de alteração de escoamento, observou-se que no pilar alongado (P2) o ângulo a montante é inferior do que o ângulo observado no pilar circular.

- Comparando pilares com medidas de alteração de escoamento e pilares sem medidas de alteração de escoamento, os ângulos são inferiores nos pilares com medidas implementadas.
- Na segunda série de ensaios, em todos os ensaios foi observado que a cavidade de erosão na primeira fase do processo erosivo a evolução é menos acentuada na direção transversal em relação à profundidade.

6.2 Sugestão para trabalhos futuros

Para adquirir maior conhecimento relativamente ao fenómeno da erosão localizada na vizinhança de pilares de pontes por via experimental, propõe-se algumas sugestões para trabalhos que sejam desenvolvidos futuramente. Assim sugere-se:

- que sejam experimentadas outras medidas de alteração do escoamento.
- que sejam feitos ensaios com durações diferentes para o mesmo pilar de forma a caracterizar a evolução da cavidade de erosão e identificar as três fases do processo erosivo.
- que seja feita uma análise da morfologia de comparação e da alteração do escoamento das cavidades de erosão (moldes);
- utilização de equipamento de medida mais preciso.

BIBLIOGRAFIA

- Bolduc, L. C., Gardoni, P. e Briaud, J.-L. (2008). Probability of Exceedance Estimates for Scour Depth around Bridge Piers. *Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering* 134(2) 175-184.
- Breusers, H. N. C., Nicollet, G. e Shen, H. W. (1977). Local Scour Around Cylindrical Piers. *Journal of Hydraulic Research* 15(3) 211-252.
- Cardoso, A. H. (1998). *Hidráulica Fluvial*. Fundação Calouste Gulbenkian.
- Cardoso, A. H. e Bettess, R. (1999). Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments. *Journal of Hydraulic Engineering* 125(4) 388-398.
- Chang, W.-Y., Lai, J.-S. e Yen, C.-Y. (2004). Evolution of Scour Depth at Circular Bridge Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130 (9) 905-913.
- Chang, W.-Y., Constantinescu, G., Tsai, W. F. e H. C. Lien, H. C. (2011). Coherent structure dynamics and sediment erosion mechanisms around an in-stream rectangular cylinder at low and moderate angles of attack. *Water Resources Research*, 47, W12532.
- Couto, L. T. e Cardoso, A.H. (2001a). Erosões Localizadas Junto de Encontros e Pilares de Pontes, Parte I - Caracterização da situação de referência. *Recursos Hídricos*.
- Couto, L. T. e Cardoso, A.H. (2001b). Erosões Localizadas Junto de Encontros e Pilares de Pontes, Parte II - Da situação de referência à prática. *Recursos Hídricos*.
- Dey, S. e Raikar, R. V. (2007). Characteristics of Horseshoe Vortex in Developing Scour Holes at Piers. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Dey, S. e Raikar, R. V. (2007b). Clean-Water Scour at Piers in Sand Beds with an Armor Layer of Gravels. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Diab, R., Link, O. e Zanke, U. (2010) Geometry of Developing and Equilibrium Scour Holes at Bridge Piers Gravel. *NRC Research Press*.
- Ettema, R., Melville, B. W. e Barkdoll, B. (1998) Scale Effect in Pier-Scour Experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Fonseca, M. I. J. (2011), *Estudo das erosões localizadas junto de grupos de estacas cilíndricas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior.
- Graf, W. H. e Istarto, I (2002), Flow Pattern in the Scour Hole Around a Cylinder. *Journal of Hydralic Research*. 40':1, 13-20
- Gupta, U.P., Ojha, C. S. P. e Sharma, N. (2010), Enhancing Utility of Submerged Vans with Collar. *Journal of Hydraulic Engineering*.

- Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. e Cardoso, A. H. (2009a) Control of Scour at Bridge Piers by a Downstream Bed Sill. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, N° 1, 13-21.
- Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. e Cardoso, A. H. (2009b) Countermeasures against Local Scouring at Bridge Piers: Slot and Combined System of Slot and Bed Sill. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 135, N° 5, 425-431.
- Hill, D. F. e Younkin, B. D. (2006). PIV measurements of flow in and around scour holes. *Experiments in Fluids* 41(2) 295-307.
- Khosronejad, A., Kang, S. e Sotiropoulos, F. (2012). Experimental and computational investigation of local scour around bridge piers. *Advances in Water Resources* 37, 73–85.
- Kirkil, G., Constantinesca, G. e Ettema, R (2009) Detached Eddy Simulation Investigation of Turbulence at a Circular Pier with Scour Hole. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Leite, E. P. M. (2010), *Estudo Experimental da Erosão Localizada na Proximidade de Pilares de Pontes*. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Lima, M. M. C. L. (2008). Estudo Experimental da Erosão Localizada na Proximidade de Pilares de Pontes *Revista Civil-UM*.
- Melville, B. W. e Chiew, Y.-M. (1999). Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125 (1) 59–65.
- Melville, B. W. (2000). *Bridge Scour*. In S. E. Coleman ed. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado.
- Muzzammil, M. e Gaugadharial, T. (2003) The Mean Characteristics of Horseshoe Vortex at a Cylindrical Pier. *Journal of Hydralic Research*. 41:3, 285-297
- Richardson, E. V. e Davies, S. R (2001). *Evaluating Scour at Bridges*. US Department of Transportation, HEC 18, FHWA-NHI-01-001
- Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J. e Michelsen, J. (2005). Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Fluid Mechanics* 534, 351-401.
- Schiereck, G. J. (2001) , *Introduction to bed bank and shore protection*, Delft University Press.
- Sheppard, M., Odeh, M. e Glasser, T. (2004). Large Scale Clear-Water Local Pier Scour Experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Sheppard, D. M. e Miller Jr, W. (2006). Live-bed local pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering* 132(7) 635-642.
- Simarro, G., Fael, C. M. S. e Cardoso, A. H. (2011). Estimating equilibrium scour depth at cylindrical piers in experimental studies. *Journal of Hydraulic Engineering* 137(9) 1089-1093.

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

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

Unger, J. e Hager, W. H. (2005) The Mean Characteristics of Horseshoe Vortex at a Cylindrical Pier. *Journal of Hydralic Research*. 43:5, 584-587