



Estudo experimental da utilização de vanes como medida
de mitigação da erosão localizada de pilares de pontes

Nelson Daniel César Simões Ribeiro

UMinho | 2017



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Nelson Daniel César Simões Ribeiro

Estudo experimental da utilização de vanes
como medida de mitigação da erosão
localizada de pilares de pontes

maio de 2017



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Nelson Daniel César Simões Ribeiro

Estudo experimental da utilização de vanes
como medida de mitigação da erosão
localizada de pilares de pontes

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

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

DECLARAÇÃO

Nome: Nelson Daniel César Simões Ribeiro

Endereço eletrónico: abcde@email.pt Telefone: telefone 1/telefone 2 (alternativo)

Bilhete de Identidade/Cartão do Cidadão: 13007896

Título da dissertação: Estudo experimental da utilização de *vanes* como medida de mitigação da erosão localizada de pilares de pontes

Orientador/a/es:

Professor Doutor: Professora Doutora Maria Manuela Carvalho de Lemos Lima

Ano de conclusão: 2017

Mestrado em Engenharia Civil

DE ACORDO COM A LEGISLAÇÃO EM VIGOR, NÃO É PERMITIDA A REPRODUÇÃO DE QUALQUER PARTE DESTA TESE/TRABALHO.

Universidade do Minho, ____/____/_____

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

À Professora Doutora Manuela Lima por toda a orientação, apoio, disponibilidade e paciência demonstrada na execução da presente dissertação.

Ao Sr. Rui Oliveira, técnico do Laboratório de Hidráulica e de Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, por todos os ensinamentos, paciência e disponibilidade em ajudar.

Ao Professor Doutor Fernando Duarte pela disponibilidade de utilização do equipamento Roland's 3D Laser Scanner LPX-600 que foi essencial para a execução da presente dissertação.

Ao Nuno Pinto e Costa e Eduarda Ferreira pela disponibilidade em me ajudar a trabalhar os moldes 3D em *autocad*.

A todos os meus amigos do Taekwondo pelo apoio incondicional, em especial ao Rui Bragança que esteve sempre disponível para me apoiar e ajudar.

A todos os meus amigos de infância, em especial ao Pedro Salgado.

Ao meu Pai e Mãe por acreditarem em mim e porque lhes devo tudo na minha vida.

RESUMO

Em rios sujeitos a elevados caudais desenvolvem-se fenómenos erosivos devido à interação das forças hidrodinâmicas com o leito do rio. A presença de obstáculos no seio do escoamento, tais como pilares de pontes, pode originar erosões localizadas e colocar em risco a estabilidade da estrutura, ameaçando assim a integridade da vida humana. É por isso de elevada importância prever a profundidade máxima de erosão localizada em pilares e encontros de pontes.

Na presente dissertação efetuou-se um estudo experimental da utilização de uma medida de mitigação da erosão localizada em torno de pilares fundados em leitos não coesivos, no caso de escoamento sem transporte de sólido. Foram utilizados dois pilares com 20 mm de dimensão transversal, um circular e outro alongado, sendo adotada como medida de mitigação a utilização de chapas verticais colocadas no plano longitudinal do pilar imediatamente a montante do mesmo (*vane*). Utilizaram-se três chapas de comprimentos diferentes (20, 40 e 60 mm). Foi utilizada uma areia de granulometria uniforme com diâmetro médio (D_{50}) igual a 0,328 mm, sob um escoamento de superfície livre de altura igual a 5 cm com um caudal de $12,96 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

Estudou-se a evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão em função da geometria do pilar. Verificou-se que a erosão localizada é mais acentuada na fase inicial do processo erosivo. Observou-se que nos pilares cilíndricos, com *vane* de 2 e 4 cm, a erosão é maior que nos pilares alongados. Pelo contrário, no caso do pilar alongado com *vane* de 6 cm, observa-se maior erosão do que no caso do pilar cilíndrico.

Em todos os ensaios foi observado que o ângulo formado entre o fundo do leito da cavidade erodida e o nível inicial de areia é sempre maior a montante do pilar do que a jusante do mesmo. Com a implementação da medida de mitigação, os ângulos formados entre o fundo do leito da concavidade e o talude formado tiveram uma ligeira diminuição em relação aos pilares sem *vanes*, no caso dos pilares cilíndricos. Para os pilares alongados com esta medida de mitigação, na generalidade dos casos, não se observaram melhorias significativas.

Foram feitos moldes da cavidade erosiva através de uma mistura de cera e parafina para posteriormente os dados serem trabalhados em computador. Foi possível identificar as zonas de erosão e sedimentação, assim como traçar as curvas de nível da cavidade de erosão.

Palavras-Chave: Erosão localizada; Medidas de mitigação; Pilares de pontes; Topografia da cavidade de erosão; Transporte sólido; *Vanes*.

ABSTRACT

Erosive phenomena occur in rivers which are subjected to a high flow due to the interaction between hydrodynamic forces and the river bed. The presence of obstacles on the flow, such as bridge piers, can originate scour and in this way endanger the structure's stability and put human lives at risk. This is why it is so important to predict the maximum bridge piers' scour depth.

In this dissertation an experimental study on a mitigation measure of the clear water bridge piers scour, in non-cohesive beds, was performed. Two 20 mm transversal dimension piers, one elongated and one cylindrical, were used and vanes (vertical plates on the pier longitudinal symmetry plan located immediately upstream from the pier) were adopted as a scour mitigation measure. Vanes with three different lengths (20, 40 and 60 mm) were used. Uniform sand of equal granulometry, with an average diameter (D_{50}) of 0.328 mm, under a flow with 5 cm water depth and of $12,96 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, was used.

The temporal evolution of the maximum scour depth related to different geometric forms of the piers was studied. Maximum scour depth was observed in the beginning of the erosive process. In cylindrical piers, with 2 and 4 cm vanes, the erosion was higher than in the elongated pier case. The contrary occurred in the case of the elongated pier with 6 cm vane, which exhibited higher maximum scour depth than the depth observed in case of the cylindrical pier.

In every experimental study it was observed that the angle between the river bed of the eroded cavity and the initial level of sand was always higher upstream of the pier than downstream of the same. With the implementation of the mitigation measure in the cylindrical pier, the angles formed between the riverbed cavity and the bottom of the bed evidenced a slight decrease from the simple piers case. In case of the elongated piers with this mitigation measure, no improvements on most of the cases were observed.

Casts of the scour cavity were made with a mixture of paraffin and vaseline for posterior data treatment. It was possible to observe scour and sediment deposition, as well as obtaining contour lines.

KEYWORDS: Scour; Mitigation; Bridge piers; Solid transport; Scour cavity topography; Vanes

ÍNDICE

Agradecimentos.....	iii
Resumo	v
Abstract.....	vii
Nomenclatura	xvii
1. Introdução	1
1.1 Enquadramento e importância do tema	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2. Revisão bibliográfica.....	5
2.1 Erosão localizada em pilares de pontes	5
2.2 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão	7
2.3 Previsão da máxima profundidade da cavidade de erosão	8
2.4 Medidas de mitigação.....	11
2.4.1 Medidas de alteração do escoamento	11
2.4.2 Medidas de proteção do leito	20
2.5 Estudos relativos à erosão localizada em pilares de pontes.....	23
2.5.1 Estudos experimentais	23
2.5.2 Estudos numéricos.....	26
3. Método experimental	29
3.1 Introdução	29
3.2 Instalação experimental	29
3.3 Secção de teste	30
3.4 Parâmetros experimentais	31
3.4.1 Areia	31
3.4.2 Geometria dos pilares	31
3.4.3 Condições experimentais	32
3.5 Procedimento experimental	33
3.5.1 Preparação.....	33
3.5.2 Início do ensaio	34

3.5.3	Fim do ensaio	35
3.5.4	Medição da profundidade da cavidade de erosão	35
3.5.5	Digitalização dos moldes	36
4.	Resultados e discussão.....	39
4.1	Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão localizada	39
4.1.1	<i>Vane</i> de 2 cm.....	39
4.1.2	<i>Vane</i> de 4 cm.....	44
4.1.3	<i>Vane</i> de 6 cm.....	49
4.1.4	Análise comparativa entre ensaios	54
4.1.5	Comparação com estudos anteriores	56
4.2	Análise da configuração das cavidades de erosão localizada	62
4.2.1	<i>Vane</i> de 2 cm.....	63
4.2.2	<i>Vane</i> de 4 cm	67
4.2.3	<i>Vane</i> de 6 cm.....	71
4.2.4	Análise comparativa entre ensaios	75
4.2.5	Comparação com os resultados de Azevedo (2014)	76
5.	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	79
5.1	Conclusões	79
5.2	Sugestões para futuros trabalhos.....	80
	Bibliografia	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Erosão localizada nas imediações de um pilar circular (retirado de Roulund <i>et al.</i> , 2005).....	5
Figura 2.2: Diagrama de tensões gerado pela presença de um obstáculo (retirado de Fonseca, 2011)	6
Figura 2.3: Medidas de alteração do escoamento- aberturas em pilares: (1) tubos interligados internamente, (2) grupo parcial de pilares, e (3) ranhura. (adaptada de Tafarojnoruz <i>et al.</i> , 2010).....	12
Figura 2.4: Medidas de alteração do escoamento- linhas de proteção: (1) cabos enrolados à volta do pilar, (2) colares ou placas horizontais, e (3) placas acopladas a pilares. (adaptada de Tafarojnoruz <i>et al.</i> , 2010).....	12
Figura 2.5: Medidas de alteração do escoamento- bed attachments: (1) <i>sacrificial piles</i> , (2) <i>vanes and sills</i> , (3) <i>surface guide panels</i> e (4) <i>sleeve and colored sleeve</i> . (adaptada de Tafarojnoruz <i>et al.</i> , 2010).....	15
Figura 2.6: Secções de pilares mais comuns (Richardson & Davis, 2001).....	17
Figura 2.7: Ilustração do 1º caso (adaptado de Rey e Raikar, 2007).....	22
Figura 2.8: Ilustração do 2º caso (adaptado de Rey e Raikar, 2007)	22
Figura 2.9: Ilustração do 3º caso (adaptado de Rey e Raikar, 2007)	23
Figura 2.10: Representação da geometria dos pilares alongados (L=12 cm; D=4 cm).....	25
Figura 2.11: Quatro casos particulares de pilares não uniformes (adaptado de Melville e Coleman, 2000).....	26
Figura 2.12: Variação da profundidade de erosão para pilares complexos (adaptado de Melville e Coleman, 2000).....	27
Figura 3.1 Vista longitudinal do canal hidráulico GUNT a montante do escoamento.....	29
Figura 3.2: 1 reservatório, 2 secção de jusante, 3 painel de controlo, 4 bomba centrífuga, 5 medidor de caudal, 6 secção experimental, 7 ajuste da inclinação longitudinal, 8 secção de montante (instalação experimental retirado do site da Gunt).....	30
Figura 3.3: utilizados no presente estudo (a) e forma de aplicação (b).....	32
Figura 3.4: Resultado final da preparação do ensaio.....	34
Figura 3.5: Erosão provocada na imediação do pilar nos instantes iniciais do ensaio experimental.....	34

Figura 3.6: Levantamento tridimensional do molde (enchimento da cavidade de erosão com a mistura de vaselina e parafina (a); resultado final do levantamento do molde (b)).....	33
Figura 3.7: <i>Vane</i> graduado aplicado ao pilar durante ensaio experimental.....	36
Figura 3.8: Roland's 3D Laser Scanner LPX-600.....	37
Figura 4.1: Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar (pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 2 cm).....	40
Figura 4.2: Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do <i>vane</i> (pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 2 cm).....	41
Figura 4.3: Comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar cilíndrico e na extremidade de montante do <i>vane</i> de 2 cm aplicado.....	42
Figura 4.4: Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar (pilar alongado com <i>vane</i> de 2 cm).....	42
Figura 4.5: Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do <i>vane</i> (pilar alongado com <i>vane</i> de 2 cm).....	43
Figura 4.6: Comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar alongado e na extremidade de montante do <i>vane</i> de 2 cm aplicado.....	44
Figura 4.7: Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar (pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 4 cm).....	45
Figura 4.8 Evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão na extremidade de montante do <i>vane</i> (pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 4 cm).....	46
Figura 4.9: Comparação entre a evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar cilíndrico e na extremidade de montante do <i>vane</i> de 4 cm aplicado.....	47
Figura 4.10: Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar (pilar alongado com <i>vane</i> de 4 cm).....	47
Figura 4.11: Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do <i>vane</i> (pilar alongado com <i>vane</i> de 4 cm).....	48
Figura 4.12: Comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar alongado e na extremidade de montante da <i>vane</i> de 4 cm aplicado.....	49

Figura 4.13: Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar (pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 6 cm.....	50
Figura 4.14: Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do <i>vane</i> (pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 6 cm.....	44
Figura 4.15: Comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar cilíndrico e na extremidade de montante da <i>vane</i> de 6 cm aplicado.....	52
Figura 4.16: Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar (pilar alongado com <i>vane</i> de 6 cm).....	52
Figura 4.17: Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do <i>vane</i> (pilar alongado com <i>vane</i> de 6 cm).....	53
Figura 4.18: Comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar alongado e na extremidade de montante da <i>vane</i> de 6 cm aplicado.....	54
Figura 4.19: Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão dos seis ensaios experimentais.....	55
Figura 4.20: Análise comparativa do presente estudo com estudo de Azevedo (2014) no caso do pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 2 cm.....	58
Figura 4.21: Análise comparativa do presente estudo com estudo de Azevedo (2014) no caso do pilar alongado com <i>vane</i> de 2 cm.....	58
Figura 4.22: Análise comparativa do presente estudo com estudo de Azevedo (2014) no caso do pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 4 cm.....	59
Figura 4.23: Análise comparativa do presente estudo com estudo de Azevedo (2014) no caso do pilar alongado com <i>vane</i> de 4 cm.....	60
Figura 4.24: Análise comparativa do presente estudo com estudo de Azevedo (2014) no caso do pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 6 cm.....	60
Figura 4.25: Análise comparativa do presente estudo com estudo de Azevedo (2014) no caso do pilar alongado com <i>vane</i> de 6 cm.....	61
Figura 4.26: Molde da cavidade de erosão do pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 2 cm.....	64
Figura 4.27: Curvas de nível com espaçamento de 2 mm (pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 2 cm).....	65
Figura 4.28: Medição dos ângulos formados no perfil longitudinal (pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 2 cm).....	65

Figura 4.29: Molde da cavidade de erosão do pilar alongado com <i>vane</i> de 2 cm.....	66
Figura 4.30: Curvas de nível com espaçamento de 2 mm (pilar alongado com <i>vane</i> de 2 cm).....	67
Figura 4.31: Medição dos ângulos formados no perfil longitudinal (pilar alongado com <i>vane</i> de 2 cm).....	67
Figura 4.32: Molde da cavidade de erosão do pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 4 cm.....	68
Figura 4.33: Curvas de nível com espaçamento de 2 mm (pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 4 cm).....	69
Figura 4.34: Medição dos ângulos formados no perfil longitudinal (pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 4 cm)	69
Figura 4.35: Molde da cavidade de erosão do pilar alongado com <i>vane</i> de 4 cm.....	70
Figura 4.36: Curvas de nível com espaçamento de 2 mm (pilar alongado com <i>vane</i> de 4 cm).....	71
Figura 4.37: Medição dos ângulos formados no perfil longitudinal (pilar alongado com <i>vane</i> de 4 cm).....	71
Figura 4.38: Molde da cavidade de erosão do pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 6 cm.....	72
Figura 4.39: Curvas de nível com espaçamento de 2 mm (pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 6 cm).....	73
Figura 4.40: Medição dos ângulos formados no perfil longitudinal (pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 6 cm).....	73
Figura 4.41: Molde da cavidade de erosão do pilar alongado com <i>vane</i> de 6 cm.....	74
Figura 4.42 Curvas de nível com espaçamento de 2 mm (pilar alongado com <i>vane</i> de 6 cm).	75
Figura 4.43 Medição dos ângulos formados no perfil longitudinal (pilar alongado com <i>vane</i> de 6 cm).....	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Valores do facto de correção K_1	9
Tabela 2.2: Valores do fator de reação, para o ângulo, K_2	10
Tabela 2.3: Fator de correção K_3	10
Tabela 3.1 Características da areia usada no presente estudo.....	31
Tabela 3.2: Dimensões dos pilares utilizados no presente estudo (D: dimensão transversal do pilar, L: dimensão longitudinal do pilar).....	32
Tabela 3.3: Condições experimentais utilizadas no presente estudo.....	33
Tabela 4.1: Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do pilar cilíndrico com <i>vane</i> 2 cm).....	40
Tabela 4.2: Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do <i>vane</i> com 2 cm aplicado ao pilar cilíndrico)	41
Tabela 4.3: Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do pilar alongado com <i>vane</i> de 2 cm).....	43
Tabela 4.4: Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do <i>vane</i> com 2 cm aplicado ao pilar cilíndrico).....	43
Tabela 4.5: Duração das fases do processo erosivo (pilar cilíndrico com <i>vane</i> de 4 cm aplicada à extremidade de montante do pilar cilíndrico).....	45
Tabela 4.6: Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do <i>vane</i> com 4 cm aplicado ao pilar cilíndrico).....	46
Tabela 4.7: Duração das fases do processo erosivo (pilar alongado com <i>vane</i> de 4 cm na base do pilar).....	48
Tabela 4.8: Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do <i>vane</i> com 4 cm aplicado ao pilar alongado).....	48
Tabela 4.9: Duração das fases do processo erosivo (<i>vane</i> de 6 cm na extremidade de montante do pilar cilíndrico).....	50
Tabela 4.10: Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do <i>vane</i> com 6 cm aplicado ao pilar cilíndrico).....	51
Tabela 4.11: Duração das fases do processo erosivo (<i>vane</i> de 6 cm na extremidade de montante do pilar alongado).....	53
Tabela 4.12: Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do <i>vane</i> com 6 cm aplicado ao pilar alongado).....	53

Tabela 4.13: Comparação entre erosões localizadas na extremidade de montante e no nariz do <i>vane</i>	55
Tabela 4.14: Duração das fases do processo erosivo.....	57
Tabela 4.15: Comparação de valores da profundidade máxima da cavidade de erosão do presente estudo com os do estudo efetuado por Azevedo (2014).....	62
Tabela 4.16: Ângulos formados pelo talude imediatamente a montante e jusante do pilar.....	76
Tabela 4.17: Extensão da erosão obtida a montante e jusante do pilar.....	77
Tabela 4.18: Comparação entre os ângulos do talude formados pela escavação nas imediações do pilar no presente estudo de Azevedo (2014).....	78

NOMENCLATURA

B	Largura da secção transversal do canal
b	Diâmetro do pilar
c1, c2	Coefficientes empíricos da expressão da tensão crítica de arrastamento
d	Diâmetro da partícula
D	Diâmetro do pilar
Ds	Diâmetro da manga
D50	Diâmetro médio dos sedimentos
Fa	Força hidrodinâmica de arrastamento
Fr	Número de Froude
Fs	Força de sustentação
g	Aceleração da gravidade
h	Altura do escoamento
hv	Altura do <i>vane</i> a partir do nível inicial do solo
H	Altura das configurações de fundo
i	Declive do fundo do canal
J	Perda de carga unitária do escoamento
K_1	Fator de correção da forma do nariz do pilar
K_2	Fator de correção do ângulo da direção principal do pilar com o escoamento
K_3	Fator de correção função da forma do leito do escoamento
K_4	Fator de correção da dimensão do material do fundo
Kd	Fator da dimensão dos sedimentos
Kg	Coefficiente de forma da secção transversal
Kh	Fator da altura do escoamento

K_p	Coeficiente de forma do pilar
K_s	Coeficiente de Shields
L	Comprimento do pilar
l_v	Largura do <i>vane</i>
l_s	Altura da ranhura
Q	Caudal
Re	Número de Reynolds
r	Eficiência
s	Densidade do material do fundo
t^*	tempo de equilíbrio
t	Tempo
t_v	Espessura do <i>vane</i>
t_c	Espessura do colar
t_e	Tempo de Equilíbrio
U	Velocidade média de aproximação
u^*c	Velocidade de atrito crítica
U_c, u_r	Velocidade crítica
U^*	Velocidade tangencial
W	Peso submerso
w_c	Diâmetro do colar
w_s	Largura da ranhura
y_s	Profundidade da cavidade de erosão localizada
y_{se}	Profundidade da cavidade de erosão localizada no equilíbrio
γ	Peso específico do fluido
γ_s	Peso específico dos sedimentos
θ	Ângulo de alinhamento do pilar com o escoamento

θ_r	Ângulo de repouso
ν	Viscosidade cinemática
ρ, ρ_w	Massa volúmica do fluido
ρ_s	Massa volúmica dos sedimentos
σ_D, σ_g	Coefficiente de graduação da curva granulométrica
τ_0	Tensão tangencial
τ_c	Tensão tangencial crítica
ψ_c	Parâmetro de Shields
ω	Velocidade de queda da partícula
α_v	Ângulo formado pelo <i>vane</i>
θ_v	Ângulo do setor de vãos submersos adjacentes ao cais

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento e importância do tema

A presença de um obstáculo no interior de um escoamento pode originar a ocorrência de fenómenos erosivos no fundo de rios ou canais, com consequências diretas para a estabilidade de estruturas, como pilares e encontros de pontes (Ramos *et al.*, 2012).

As erosões localizadas são fenómenos que ocorrem em leitos móveis na vizinhança de estruturas rígidas. Essas estruturas originam alterações nos perfis de velocidade média, de intensidade de turbulência e das tensões de Reynolds do escoamento (Couto & Cardoso, 2001).

A erosão localizada em pilares e encontros de pontes é a maior causa de colapso destas estruturas (Lima e Leite, 2012). Devido a ser um processo complexo, bem como os meios físicos envolvidos, o estudo deste fenómeno de erosão localizada deve reunir à sua volta equipas multidisciplinares constituídas por projetistas de pontes, engenheiros hidráulicos e geotécnicos (Lima, 2008).

Os primeiros estudos relativos à erosão localizada de pilares de pontes centravam-se na previsão da máxima profundidade da cavidade da erosão, através do ajuste de leis matemáticas a um conjunto vasto de resultados laboratoriais e observações reais (e.g., Breusers *et al.*, (1977) e Lima, (2008)). Porém, a erosão localizada de um pilar ou do encontro de uma ponte é um fenómeno bastante mais complexo, resultante da forte interação do campo de escoamento turbulento tridimensional em redor do obstáculo com o leito de sedimentos (arenosos ou coesivos), o que se reflete nos estudos atuais sobre este tema (Roulund *et al.* (2005), Hill e Younkin (2006) e Lima, (2008)).

A primeira abordagem ao tema consiste na definição dos parâmetros envolvidos no fenómeno da erosão localizada, entre os quais a altura de água do escoamento, a dimensão e uniformidade dos sedimentos, a geometria do pilar, a velocidade de aproximação do escoamento ao pilar e o tempo de duração do ensaio (Simarro *et al.*, 2007). Mais

recentemente, Gaudio *et al.* (2012) e Tafarajnoruz *et al.* (2012) mostraram que uma vasta gama de previsões sobre a erosão localizada pode ser obtida, usando os vários métodos propostos na literatura. A solução passará pela utilização de medidas de mitigação, de forma minimizar os danos que a erosão localizada em pilares de pontes poderá causar.

O presente caso em estudo tem como objetivo estudar experimentalmente a adoção de chapas verticais colocadas no plano longitudinal do pilar imediatamente a montante do mesmo, que se passarão a designar por *vanes*, como medida de mitigação do fenómeno de erosão localizada na proximidade de pilares de pontes em fundos não coesivos.

1.2 Objetivos

Com a elaboração desta dissertação pretende-se estudar diferentes medidas de mitigação (proteção do leito de sedimentos ou alteração das características do escoamento) da erosão localizada de pilares de pontes, e em especial avaliar a eficiência de *vanes* como medida de alteração das características do escoamento. O estudo foi realizado num canal hidráulico, recorrendo a modelos de pilares de uma ponte. O objetivo passou pela utilização da areia e pilares já existentes no laboratório com o intuito de criar moldes tridimensionais das cavidades de erosão.

Para a concretização deste objetivo, tornou-se fundamental o cumprimento dos seguintes objetivos específicos:

- Procedeu-se à recolha de informação bibliográfica relativamente ao fenómeno da erosão localizada em pilares de pontes;
- Foi também recolhida informação bibliográfica relativamente às medidas de mitigação deste fenómeno;
- Construiu-se o modelo laboratorial para a realização dos ensaios. Os ensaios foram efetuados num canal hidráulico recorrendo a modelos de pilares de pontes;
- Selecionou-se uma medida de mitigação de erosão localizada a implementar;

- Fez-se o levantamento das cavidades de erosão recorrendo a moldes de vaselina e parafina. A leitura destes moldes foi feita através de técnicas de levantamentos tridimensionais procurando definir a configuração das cavidades de erosão;
- Procedeu-se à análise e discussão dos resultados.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação é composta por 5 capítulos. O presente capítulo, introduz o tema, os objetivos a cumprir, assim como a estruturação da dissertação. O segundo capítulo apresenta um estudo bibliográfico apoiado em publicações anteriores sobre o fenómeno de erosão localizada na proximidade de pilares de pontes. O terceiro capítulo diz respeito à descrição do método experimental utilizado assim como dos equipamentos utilizados e condições experimentais adotadas. No quarto capítulo são apresentados os resultados experimentais obtidos, bem como a sua análise e discussão. A dissertação termina no quinto capítulo onde são apresentadas as conclusões finais, assim como algumas sugestões para futuros trabalhos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo é apresentada uma análise bibliográfica sobre o fenómeno de erosão localizada na proximidade de pilares de pontes, bem como sobre medidas de mitigação deste fenómeno.

2.1 Erosão localizada em pilares de pontes

Quando um pilar é colocado num leito sedimentar móvel, fenómenos erosivos ocorrem na sua vizinhança, devido à acção de ondas ou correntes (Dey *et al*, 2006). Roulund *et al.*, (2005) defendem que, quando um obstáculo é colocado no escoamento com superfície livre, o escoamento sofre mudanças substanciais devido à formação de um vórtice de ferradura (figura 2.1)

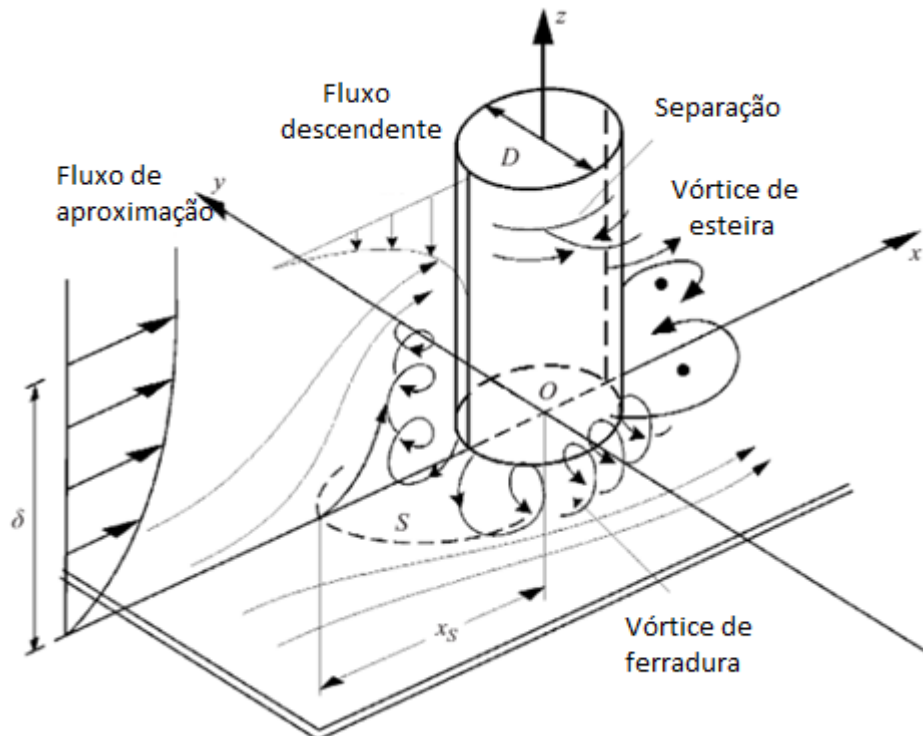


Figura 2.1 Erosão localizada nas imediações de um pilar circular (adaptada de Roulund *et al.*, 2005)

Como pode ser verificado na figura 2.2, um escoamento a montante de um pilar irá introduzir alterações na distribuição da velocidade à sua volta. Num escoamento com superfície livre a velocidade aumenta do fundo até à superfície. À medida que o escoamento vai de encontro ao obstáculo a sua velocidade tende a diminuir até ao ponto em que se anula. Como é possível verificar na figura 2.2, este fenómeno, designado por efeito de estagnação, origina um acréscimo de pressão igual a $\rho[U(y)]^2/2$, em que ρ representa a massa volumica da água e $U(y)$ a velocidade de escoamento à distância y do fundo do rio ou canal (Couto e Cardoso, 2001).

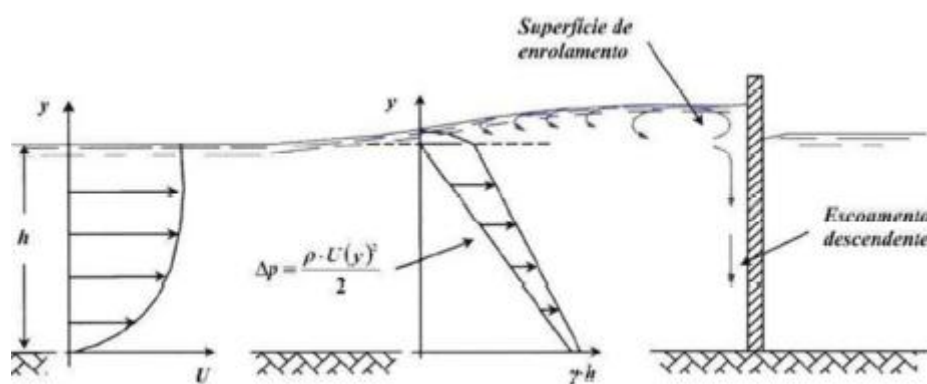


Figura 2.2 Diagrama de tensões gerado pela presença de um obstáculo (retirado de Fonseca, 2011)

Segundo El-Ghorab (2013) os dispositivos que permitem diminuir ou inibir o desenvolvimento da erosão localizada têm como objetivo:

- evitar a formação ou reduzir os vórtices de ferradura;
- desenvolver um escoamento secundário na direção oposta ao vórtice de ferradura para assim reduzir o seu efeito;
- providenciar um dispositivo a montante do pilar que promoverá a deposição de material sólido na cavidade de erosão;
- fornecer uma camada de blindagem com espessura e distribuição adequada que inibe a erosão localizada.

2.2 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão

A erosão localizada na proximidade de pilares de pontes é um fenómeno que depende de um elevado número de parâmetros, e que podem ser classificados nas seguintes categorias (Couto e Cardoso, 2001):

- características geométricas: diâmetro do pilar (D), comprimento do pilar (L), ângulo de alinhamento do pilar com o escoamento (α), coeficiente de forma do pilar (K_p), altura da água do escoamento (h), largura da secção transversal do canal (B), declive do fundo do canal (i), coeficiente da forma da secção transversal (K_g);
- características cinemáticas e dinâmicas: velocidade média de aproximação (U), perda de carga unitária do escoamento (J) e aceleração da gravidade (g);
- propriedades do fluido: viscosidade cinemática (ν), massa volúmica (ρ);
- propriedades dos sedimentos: massa volúmica (ρ_s), diâmetro mediano (D_{50}) e coeficiente de graduação da curva granulométrica (σ_D).

Conjugando estes parâmetros e, sendo y_s a profundidade máxima da cavidade de erosão, deverá verificar-se a seguinte igualdade (Couto e Cardoso, 2001a) considerando t o instante temporal em análise:

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

A relação definida pela equação 2.1, pode ser simplificada através de uma análise dimensional, sendo possível concluir que a profundidade máxima da cavidade de erosão varia com o instante temporal, $y_s(t)$, e 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 da água de escoamento e o diâmetro do pilar, e do coeficiente de graduação da curva granulométrica dos sedimentos (Couto e Cardoso 2001a), obtendo-se a seguinte equação (2.2):

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

A velocidade de atrito crítica (u^*c) é dado por:

$$u^*c = \sqrt{\psi_c(s-1)gD_{50}} \quad (2.3)$$

onde ψ_c representa o parâmetro de Shields determinado a partir do diagrama de Shields, s representa a densidade do material, g a aceleração da gravidade e D_{50} o diâmetro médio dos sedimentos.

2.3 Previsão da máxima profundidade da cavidade de erosão

A profundidade máxima da cavidade de erosão pode ser prevista com base em diversos critérios. Segundo as Normas Americanas H.C.E 18 (Richardson & Davis, 2001), a previsão da profundidade máxima da cavidade de erosão em solos arenosos (y_s), pode ser calculada com através da seguinte expressão (2.4):

$$\frac{y_s}{D} = 2.0 \times K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times \left(\frac{h}{D}\right)^{0.35} \times F_r^{0.43} \quad (2.4)$$

onde:

y_s : Profundidade máxima da cavidade de erosão;

D : Profundidade do escoamento imediatamente a montante do pilar;

K_1 : Coeficiente de forma do nariz do pilar (tabela 2.1);

K_2 : Coeficiente função do ângulo de incidência (tabela 2.2);

K_3 : Coeficiente função das configurações do leito (tabela 2.3);

K_4 : Coeficiente função da dimensão do material de fundo (expressão 2.9);

F_r : Número de Froude imediatamente a montante do pilar.

A profundidade máxima da cavidade de erosão também pode ser estimada por:

$$y_{smax} = 0.18Re^{0.635} \quad (2.5)$$

onde Re representa o número de Reynolds, obtido através da seguinte expressão (2.6):

$$Re = \frac{Uh}{\nu} \quad (2.6)$$

onde U representa a velocidade média do escoamento, h a altura de água do escoamento e ν a viscosidade cinemática do fluido.

O número de Froude pode ser determinado pela seguinte expressão (2.7):

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{g \times h}} \quad (2.7)$$

sendo U a velocidade média do escoamento, g a aceleração da gravidade e h a altura de água do escoamento.

Tabela 2.1 Valores do factor de correção K_1

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

Tabela 2.2 Valores do fator de correção, para o ângulo, K_2

Ângulo	L/a=4	L/a=8	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

O valor do coeficiente K_2 é calculado com recurso à equação (2.8) obtendo-se os valores apresentados na tabela 2.2.

$$K_2 = (\cos \theta + \frac{L}{a} \times \sin \theta)^{0,65} \quad (2.8)$$

Tabela 2.3 Fator de correção K_3

Condições do leito	Altura 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	$H \geq 9$	1,1

O valor de K_4 é calculado pelas seguintes expressões (2.9), com base nos diâmetros D_{50} e D_{95} :

Para $D_{50} < 2\text{mm}$ ou $D_{95} < 20\text{mm}$: $K_4 = 1.0$

Para $D_{50} \geq 2\text{mm}$ ou $D_{95} \geq 20\text{mm}$: $K_4 = 0.4 \times u_r^{0.15}$ (2.9)

u_r é dado pela seguinte expressão (2.9):

$$u_r = \frac{u_1 - u_{icD 50}}{u_{cD 50} \times u_{icD 50}} \quad (2.10)$$

onde:

u_r : velocidade crítica acima da qual os sedimentos com granulometria inferior a D_x começam a ser transportados;

D_{50} : diâmetro mediano do material de fundo;

$u_{icD x}$: velocidade de aproximação requerida para o início da erosão no pilar, para granulometria D_x , em que:

$$u_{icDx} = 0,645 \times \left(\frac{D_x}{d}\right)^{0.053} \times u_{cDx} \quad (2.11)$$

u_{cDx} : velocidade crítica para o início do transporte de sedimentos para a granulometria D_x , em que;

$$u_{cDx} = 6.19 \times h_1^{1/6} \times D_x^{1/3} \quad (2.12)$$

K_c pode tomar um valor mínimo de 0.4 onde é exclusivamente utilizado na condição de $u_1 < u_{icD 50}$.

2.4 Medidas de mitigação

A redução da cavidade de erosão é o principal objetivo das medidas de mitigação. A determinação da profundidade máxima, área e volume da escavação em torno do pilar é de extrema importância para a implementação das fundações da estrutura, evitando assim a falha e colapso da mesma. Diferentes medidas de mitigação tem sido propostas e testadas na literatura, sendo as características hidráulicas e condições geotécnicas do leito do rio cruciais na sua escolha (Grimaldi *et al.*, 2009). As medidas de mitigação podem ser classificadas em duas categorias: (1) medidas de alteração do escoamento (*flow altering countermeasures*) e (2) medidas de proteção do leito (*bed-armoring countermeasures*) (Tafarojnoruz *et al.*, 2012). É de elevada importância a capacidade de proteger os pilares de pontes contra uma erosão excessiva que pode ter como consequência o colapso da ponte, resultando na interrupção do tráfego e na perda de vidas humanas (Tafarojnoruz *et al.*, 2012).

2.4.1 Medidas de alteração do escoamento

O princípio de funcionamento das medidas de alteração do escoamento tem como objetivo a diminuição da intensidade do escoamento descendente e dos vórtices de ferradura, que são as principais causas da erosão localizada na vizinhança do pilar. Uma pesquisa sobre medidas de alteração do escoamento mostra que, embora várias medidas tenham sido investigadas e propostas na literatura, algumas delas apresentam baixa eficiência no que diz respeito à

redução de profundidade de escavação ou apresentam graves dificuldades na sua aplicação prática (Tafarojnoruz *et al.*, 2012).

2.4.1.1 Medidas de alteração isoladas

Baseando-se na forma e no desempenho, as medidas de alteração do escoamento foram classificadas em quatro categorias (Tafarojnoruz *et al.*, 2010):

1. Aberturas em pilares- com este tipo de configuração as intensidades do escoamento descendente a montante do pilar e do vórtice em ferradura são reduzidas, devido à possibilidade do escoamento conseguir atravessar aberturas ou ranhuras no pilar, ou mesmo através de um pequeno grupo de pilares. Algumas das configurações apresentam-se como: (1) tubos interligados internamente, (2) grupo parcial de pilares (*partial pier group*) e (3) ranhura.

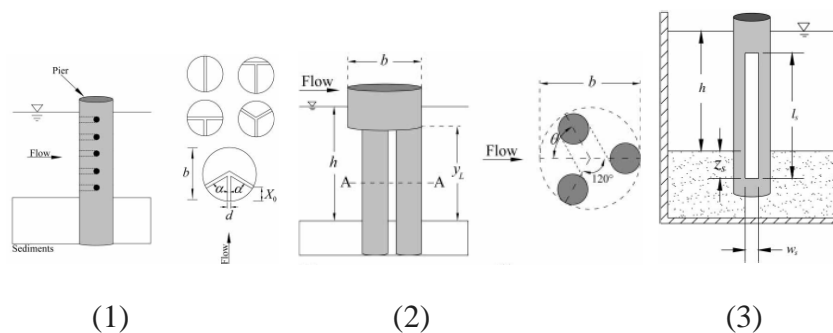


Figura 2.3 Medidas de alteração do escoamento- aberturas em pilares: (1) tubos interligados internamente, (2) grupo parcial de pilares, e (3) ranhura. (adaptada de Tafarojnoruz *et al.*, 2010).

As aberturas podem ser criadas no próprio pilar ou formadas por intervalos entre vários pilares menores que atuam para suportar uma só área. Ambas as técnicas trabalham para garantir a redução da resistência ao escoamento das águas e ao escoamento subsequente. As ranhuras reduzem a área de atrito do pilar permitindo que a água se escoe através do pilar, fazendo diminuir assim o escoamento descendente que atinge a superfície do leito (Beg e Beg, 2013). A localização da ranhura é de extrema importância pois se esta for colocada demasiado alta, a capacidade de desviar o escoamento descendente é mínima. Quando a ranhura é colocada abaixo da superfície, a água que atravessa o pilar irá atuar como um jato que irá erodir a jusante do pilar (Chiew, 1992). O transporte de sedimentos à superfície do escoamento a montante do pilar pode colmatar estas aberturas e constituir

um grande problema, tornando assim esta medida improdutivo. Dado que a manutenção tem que ser efetuada de forma regular, esta medida de alteração de escoamento torna-se dispendiosa. Incluir uma ranhura num pilar enfraquece a estrutura, sendo necessário cálculos consideráveis para a sua implementação (Beg e Beg, 2013) e adaptar o processo construtivo do mesmo. Esta medida também deve ser considerada em projecto, antes da construção da ponte, i.e. não pode ser uma medida implementada nos pilares posteriormente à construção da ponte.

2. Linhas de proteção- nesta segunda medida de alteração do escoamento o escoamento descendente e o vórtice de ferradura são reduzidos por meio de fixação de dispositivos apropriados ao pilar, tais como: (1) cabos enrolados à volta do pilar (*threading*), (2) colares ou placas horizontais e (3) placas acopladas a pilares.

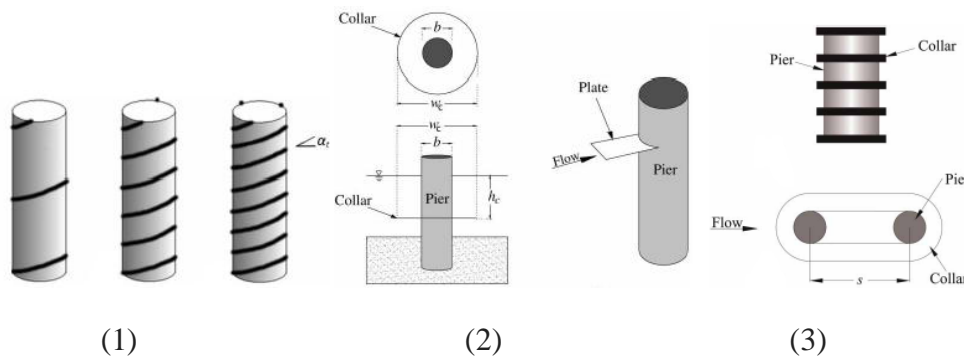


Figura 2.4 Medidas de alteração do escoamento- linhas de protecção: (1) cabos enrolados à volta do pilar, (2) colares ou placas horizontais, e (3) placas acopladas a pilares. (adaptada de Tafarojnorum et al., 2010).

- cabos enrolados à volta do pilar (*threading*)

Esta medida de alteração do escoamento foi sugerida por Dey *et al.* (2006) como um técnica económica e fácil de instalar. Os cabos são enrolados em espiral formando como que uma espiral de parafuso (*threads*) em torno do pilar, enfraquecendo assim o escoamento descendente e por consequência o vórtice de ferradura. Como se pode ver na figura 2.4 (1) existem diferentes variantes desta técnica: simples, dupla e tripla. A redução do escoamento aumenta com o aumento do diâmetro do cabo e com a diminuição do ângulo da espiral (*threading*). A redução máxima da profundidade de escavação foi de 46% para a melhor

configuração (triplo enroscamento). Este tipo de medida não só reduz o vórtice de ferradura como também o deflete para fora do pilar.

- colares ou placas horizontais

Um colar é feito de uma chapa fina horizontal anexada em torno de um pilar ligada à face do mesmo a montante (figura 2.4(2)). Geralmente a geometria adotada é circular mas colares com outras formas também já foram estudados. A eficiência do colar aumenta com a largura do colar e distância à superfície livre. Colares com largura superior a $3b$ (sendo b o diâmetro do pilar), são impraticáveis. Para valores maiores de tc/b (onde tc representa a espessura do colar), o diâmetro efetivo do pilar aumenta, resultando no aumento da profundidade de escavação (Tafarojnoruz *et al.*, 2010). Estudos mostram que a profundidade da erosão diminui com a aplicação de qualquer colar mas com um colar retangular a escavação diminui até 79%. Este mesmo estudo mostrou que a maior redução da profundidade escavada foi obtida colocando o colar sob o leito do rio (Jahangirzadeh *et al.*, 2014).

- Placas acopladas a pilares (*Plates*)

Plates ou *vanes* de diferentes configurações ou formas, aplicadas verticalmente ou com alguma inclinação, foram testadas como medidas de alteração do escoamento. Se uma placa for adicionado a um pilar, ela irá desviar o fluxo e assim reduzir o vórtice de ferradura (Tafarojnoruz *et al.*, 2010). É recomendado uso da placa numa inclinação de 3:1 para obter uma maior redução da escavação, que pode ficar entre os 70 a 80%.

3. *Bed attachments*: são aplicações que desviam ou enfraquecem o escoamento a montante do pilar e conseqüentemente também diminuem as forças de escoamento descendente e de vórtice de ferradura. Algumas técnicas foram estudadas e podem ser classificadas por: (1) pilares de sacrifício (*sacrificial piles*), (2) chapas (*vanes and sills*), (3) painéis superficiais (*surface guide panels*) e (4) camisas (*sleeve and colared sleeve*).

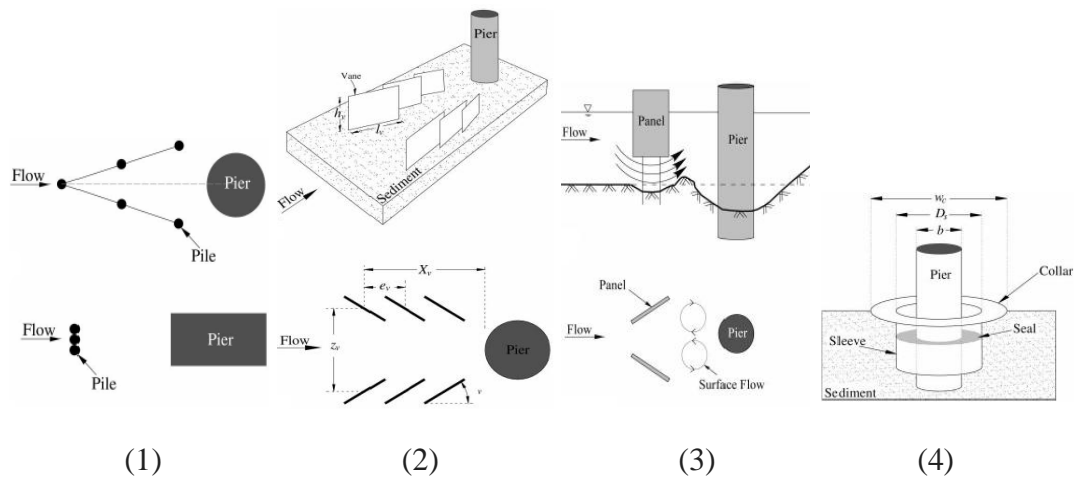


Figura 2.5 Medidas de alteração do escoamento- bed attachments: (1) *sacrificial piles*, (2) *vanes and sills*, (3) *surface guide panels* e (4) *sleeve and collared sleeve*. (adaptada de Tafarojnoruz et al., 2010).

- Pilares de sacrifício (*sacrificial piles*)

São estacas embutidas a montante do pilar que têm como função modificar e desviar o escoamento de alta velocidade transformando-o num escoamento mais lento de forma a minorar o potencial erosivo (Tafarojnoruz *et al.*, 2010). A eficácia desta medida de alteração de escoamento depende de alguns fatores importantes como: número de estacas, tamanho relativo à dimensão do pilar, submersão parcial ou total e disposição geométrica em relação ao pilar. As características do escoamento, como o ângulo de acção e a intensidade também são consideradas importantes. Estudos de Tafarojnoruz *et al.* (2010) determinaram uma eficiência de redução de escavação entre 40% e 50%. Estudos demonstram que esta medida de alteração de escoamento é ineficaz para solos não coesivos. As estacas mostram-se eficazes quando o fluxo é direto e a sua intensidade é baixa (Beg e Beg, 2013).

- *vanes and sills*

Os *vanes* são lâminas situadas antes do pilar que têm como função alterar a velocidade, direção e caudal do escoamento (Tafarojnoruz *et al.*, 2010). Os parâmetros que controlam a eficiência das lâminas são a altura, a sua orientação em relação ao escoamento, o seu comprimento submerso, espaçamento lateral entre cada uma, resistência ao canal. As lâminas

são um meio económico de reduzir a erosão localizada quando a ponte e leito do rio são de menores dimensões. Na sua melhor configuração, em leito não coesivo, foi obtido uma redução da escavação que pode variar entre 34% a 50%.

- Painéis superficiais (*Surface and guide panels*)

Os painéis superficiais são painéis verticais que estão localizados a uma certa distância a montante do pilar, formando entre si um ângulo interno. Estes painéis têm duas importantes funções na redução da erosão localizada nas imediações de um pilar. A primeira função resulta numa diminuição da velocidade escoamento à medida que se aproxima do pilar e por consequência diminui também o vórtice de ferradura (Tafarojnoruz *et al.*, 2010). A sua segunda função consiste em ajudar a depositar os sedimentos no local de escavação nas imediações do pilar. Estes testes apresentaram uma eficácia na redução da cavidade de erosão de 90% .

- Mangas (*sleeve and colared sleeve*)

Uma manga consiste na aplicação de um cilindro de diâmetro considerável em torno do pilar, como se fosse um casquilho. A manga tem como objetivo conter o vórtice de ferradura, restringindo o seu tamanho e propagação (Tafarojnoruz *et al.*, 2010). A erosão foi totalmente eliminada para uma manga com gola com medidas $D_s = 1,5b$ e $w_c = 2b$ (sendo D_s o diâmetro da manga, b o diâmetro do pilar e w_c o diâmetro do colar) selado a uma profundidade de $b/4$.

4. Outras aplicações- sucção aplicada a um pilar; alteração da configuração do pilar; *footing* e *caisson*.

- sucção aplicada a um pilar

O pilar é perfurado através da parte inferior onde posteriormente a água é sugada através de bombas. Este método mostrou resultados positivos na redução da erosão a montante do pilar

localizada a montante do pilar e também na redução da escavação a jusante (Tafarojnoruz *et al.*, 2010). É uma medida de difícil ou mesmo impossível aplicação em pilares existentes.

- alteração da configuração do pilar

Os pilares com nariz afiado apresentam melhores resultados na redução da erosão localizada pois conseguem reduzir o arrasto de sedimentos produzido pelo vórtice de ferradura a montante do pilar. Segundo Tafarojnoruz *et al.* (2010) alterando a forma do pilar, é possível obter uma redução de cerca de 30% na escavação. Esta possibilidade deverá ser tida em consideração em projecto (figura 2.6).

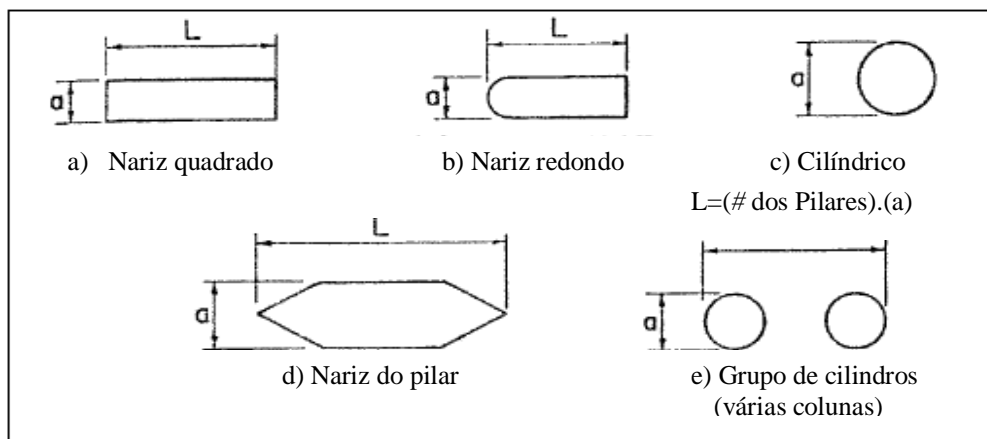


Figura 2.6 Secções de pilares mais comuns (Richardson & Davis, 2001)

- *footing* e *caisson*

Consoante a elevação da base e/ou ensecadeira (*footing* ou *caisson*) em relação ao nível do leito, estas medidas de alteração de escoamento podem aumentar ou diminuir a profundidade da escavação nas imediações do pilar.

2.4.1.2 Combinação de medidas de alteração do escoamento

Com o intuito de melhorar os resultados obtidos com a aplicação de uma medida de alteração do escoamento, foram também testadas algumas combinações de medidas de alteração de escoamento, que se passam a referir:

- ranhura e colar: segundo Tafarojnoruz *et al.* (2010) implementando uma fenda no pilar e dois colares de dimensões $w_c=2b$ e $3b$ (sendo w_c o diâmetro do colar e b o diâmetro do pilar), respetivamente, acoplados ao pilar em diferentes posições. A medida combinada de alteração do escoamento aumenta a eficiência de redução da cavidade erodida. Na maioria das combinações a erosão foi eliminada a 100%.
- colar e grupo de pilares: aplicar uma combinação de grupo de pilares mais um colar ($w_c=2b$). Foi verificado que um colar anexado a um grupo de estacas é mais eficaz do que apenas um colar anexado (Tafarojnoruz *et al.*, 2010);
- lençóis permeáveis e armaduras de rocha (*riprap*): este tipo de combinação foi testada para pilares circulares e retangulares (Tafarojnoruz *et al.*, 2010). Os lençóis permeáveis ajudam a reduzir a velocidade do fluxo e por consequência a estabilizar o *riprap*. Em solos não coesivos foi obtido um desempenho de até 91%.
- sucção e *riprap*: aplicaram uma nova forma de sucção para determinar os efeitos do *riprap* em torno do pilar. Este tipo de sucção foi aplicado em 3 tubos imediatamente a montante da camada de *riprap*. Os lençóis permeáveis reduzem a velocidade do escoamento próximo do pilar e por consequência estabilizam o *riprap*. O efeito de sucção na estabilidade depende do tipo de falha do *riprap*, da taxa de sucção e da intensidade do escoamento. A sucção reduz a ameaça de falha, diminuindo o nível de intensidade de turbulência dos vórtices induzidos pelo pilar (Tafarojnoruz *et al.*, 2010).
- colar e *riprap*: Com colar e *riprap*, os resultados experimentais demonstraram uma redução na profundidade de escavação de 50% na vizinhança do pilar dianteiro e 60% na vizinhança do pilar traseiro, (Tafarojnoruz *et al.*, 2010).
- ranhura e *bed sill*: Grimaldi *et al.* (2009) testou uma combinação de *downstream bed sill* e ranhura na sua melhor configuração e obteve uma redução da escavação de 45%.

2.4.1.3 Limitações e dificuldades em aplicações no terreno

Algumas medidas de alteração do escoamento apresentam limitações e dificuldades de aplicação em campo, o que pode comprometer a sua utilização prática. Tafarojnoruz *et al.*, (2010) enumeraram algumas das vantagens e desvantagens destas medidas de alteração de escoamento. As limitações mais importantes são as seguintes:

- **Acumulação de detritos:** o transporte de detritos pelo escoamento pode bloquear espaçamentos entre pilares ou grupos de pilares, podendo também bloquear parcialmente alguma abertura em pilares, reduzindo assim a eficiência das medidas de alteração de escoamento. O mesmo problema pode também afetar tubos de conexão internos. O uso de colares pode fazer com que ocorra retenção de detritos originando um lençol poroso ineficiente. A eficiência de sucção através de pilares devido a orifícios obstruídos por detritos pode também ser prejudicada. Para melhor compreensão sobre o efeito do escoamento de detritos na alteração das medidas de escoamento são necessárias mais pesquisas.
- **Obliquidade de escoamento:** segundo Tafarojnoruz *et al.* (2010) uma abertura em um pilar, em que a sua função é diminuir o escoamento descendente, pode perder a sua eficiência quando exposto a escoamentos oblíquos. O escoamento oblíquo também pode fazer diminuir a eficiência da aplicação de *sacrificial piles* ou um *sill* a montante do pilar.
- **Elevada intensidade do escoamento:** Na generalidade das medidas de alteração do escoamento mostraram-se pouco eficientes quando expostas a escoamentos com caudais elevados, caso em que estas medidas mais seriam necessárias, pois a probabilidade de ocorrer erosão localizada aumenta com o aumento da velocidade média e crítica do escoamento. A estabilidade das medidas de alteração de escoamento é uma das causas da baixa eficiência quando sujeitas a inundações.
- **Outros problemas:** O sistema de sucção necessita de acompanhamento e manutenção regular. O uso de *sacrificial piles* traz desvantagens estéticas. Aberturas ou tubos de ligação interna, são medidas difíceis de implementar para pilares já existentes, e também podem afetar a segurança da estrutura.

Assim, devido à dificuldade de implementação e suas limitações, as medidas de alteração de escoamento podem ser divididas em duas categorias:

- Medidas de baixa eficiência ou que são de difícil implementação. Nesta situação, devido aos problemas que podem surgir, as medidas de alteração de escoamento devem ser previamente estudadas. Todas as medidas de alteração de escoamento revelaram menor eficiência em leitos não coesivos em relação a leitos coesivos. Entre elas, *sacrificial sill* e disposição triangular de *sacrificial piles* apresentaram eficiências inferiores a 15%. Estas medidas não são confiáveis em condições de cheia. Uma redução da escavação foi obtida em testes laboratoriais com sucção mas mostrou-se necessário um bombeamento permanente. A aplicação de *surface guide panels* parece ser impraticável para condições de cheia uma vez que não garante a sua estabilidade.
- Medidas que são aplicáveis no terreno mas que necessitam de mais estudos para justificar a sua implementação. Estas medidas podem ser aplicadas especialmente se o "escoamento de detritos" e a "obliquidade de escoamento" não forem dominantes, mas mais estudos serão necessários para ensaios sob o efeito de solo coesivos e não coesivos. A combinação entre *slanting plates* e *guide wall* mostraram boa eficiência em solos coesivos e não coesivos, no entanto é necessário verificar a eficiência destas medidas na presença de "escoamento de detritos" e "obliquidade de escoamento". Colares e pilares retangulares são também duas medidas aparentemente eficazes mas que necessitam de um estudo mais elaborado para confirmar a sua eficácia. Combinações de medidas que alteram o escoamento resultam de uma forma mais eficaz e uma melhor combinação surge quando uma medida combinada de alteração do escoamento é relacionada com uma medida de protecção de leito (*bed armouring*).

2.4.2 Medidas de protecção do leito

O leito dos rios é comumente constituído por uma mistura de diferentes tamanhos de areias e cascalho. Sob condições em que se observam variadas velocidades de escoamento, o processo de encouraçamento dos rios começa, resultando a exposição de partículas mais grossas devido à lavagem da fração fina. As medidas de protecção do leito consistem em

sobrepor uma camada mais grosseira por cima da camada de areia nas imediações do pilar. Dey e Raikar (2007) efetuaram estudos experimentais para testar a eficácia desta medida de proteção. As camadas de proteção que geram preocupação no cálculo da extensão da erosão são aquelas envoltas de camadas de areia por cima da camada de cascalho. A experiência foi realizada com dois tipos de pilares, um circular e um quadrado. O pilar foi incorporado em duas camadas de sedimentos, uma de areia coberta por outra de cascalho. Cada experiência foi efectuada com uma camada de areia uniforme de tamanho médio d coberto por uma camada de protecção de cascalho $2d_g$, pois a espessura típica da camada de armadura natural é $d - 3d_g$ (Dey e Raikar, 2007). O estudo foi efectuado sem transporte sólido durante um período de 24 h a 36 h após o equilíbrio. Foram identificados três casos que podem ser resumidos da seguinte forma:

1ª caso: a cavidade de erosão nas imediações do pilar desenvolve-se através da camada de proteção removendo por baixo a areia do leito. A camada de proteção mantém-se intacta ao redor do perímetro de erosão, como se pode verificar na figura 2.7.

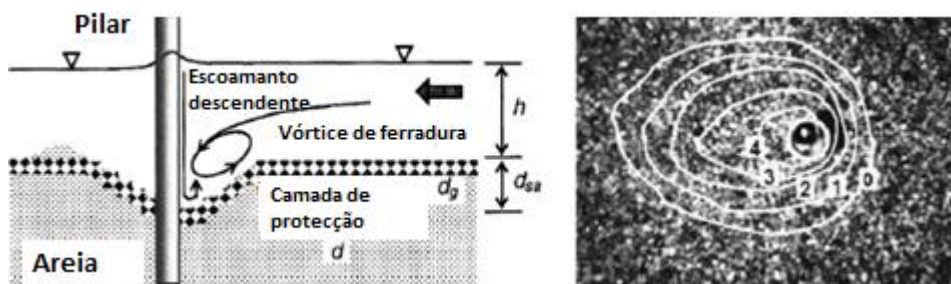


Figura 2.7 Ilustração do 1º caso (adaptado de Rey e Raikar, 2007)

2º caso: a cavidade de erosão nas imediações do pilar forma-se através da camada de proteção do leito, apresentando relativamente maior extensão a montante da mesma. No entanto a camada de proteção permanece intacta em redor do perímetro da cavidade (figura 2.8).

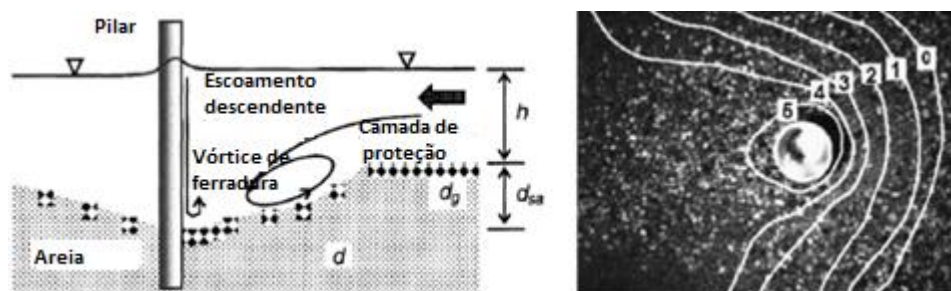


Figura 2.8 Ilustração do 2º caso (adaptado de Rey e Raikar, 2007)

3º caso: a cavidade de erosão nas imediações do pilar desenvolve-se, destruindo a camada de proteção numa extensão considerável a montante do pilar. Por outro lado, uma lavagem completa da camada de proteção a jusante é observada. No entanto, a camada de proteção em redor do perímetro de cavidade permanece inalterada, formando um grande arco circular, como indica a figura 2.9.

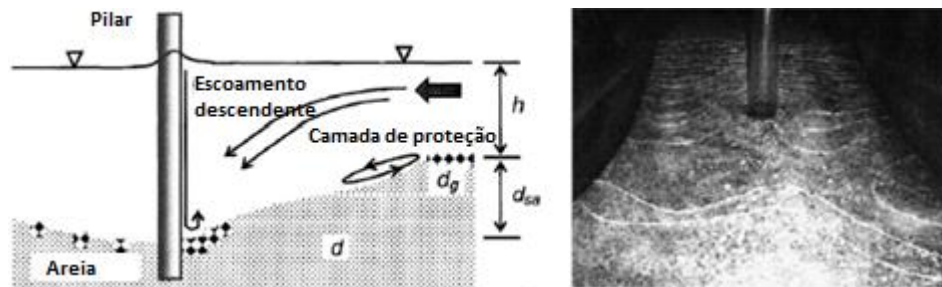


Figura 2.9 Ilustração do 3º caso (adaptado de Rey e Raikar, 2007)

Assim, Dey e Raikar (2007) puderam concluir que no primeiro caso, a cavidade erosiva se desenvolve através da camada protetora de cascalho. O ponto de equilíbrio da cavidade acontece quando o leito é totalmente coberto pela camada secundária protetora. No segundo caso, a profundidade da cavidade erosiva através da camada de cascalho tem uma extensão relativamente longa. A cavidade erosiva em equilíbrio é parcialmente coberta pela camada de armadura secundária. A camada protetora principal desintegra-se a uma curta distância a jusante, mas mantém-se intacta no perímetro a montante da cavidade. No terceiro caso a cavidade de erosão desenvolve-se originando o colapso da camada protetora de cascalho ao longo de uma distância considerável a montante. Na fase de equilíbrio, a existência de uma camada protetora secundária é quase insignificante. Comparando o primeiro caso com o segundo, observa-se que no primeiro caso a cavidade de erosão localizada em leitos com uma camada protetora é menor do que para leitos não protegidos, nas mesmas condições. Isto acontece devido a uma camada de cascalho secundária que protege a cavidade de erosão. Por outro lado, no terceiro caso a profundidade da cavidade erosiva é maior, dado que a camada secundária protetora de cascalho se encontra dispersa.

2.5 Estudos relativos à erosão localizada em pilares de pontes

O fenómeno de erosão localizada em pontes pode ser estudado experimentalmente e numericamente. Nesta secção apresentam-se sucintamente alguns estudos relativos a esta temática.

2.5.1 Estudos experimentais

Diferentes formas e/ou geometrias do pilar irão originar diferentes morfologias no terreno. A profundidade de escavação, o local e onde são depositados os sedimentos está diretamente relacionado com o tipo de pilar adotado: cilíndricos, alongados, quadrados, entre outras formas.

2.5.1.1 Pilares cilíndricos

Melville e Chiew (1999) elaboraram um estudo experimental em pilares de secção circular. O estudo teve como base a erosão localizada em pilares cilíndricos em leito de areia uniforme. As principais conclusões foram as seguintes:

- A profundidade de equilíbrio da cavidade de erosão localizada em pilares de pontes em condições sem transporte generalizado de sedimentos pode ser traduzida assintoticamente;
- A profundidade de erosão após 10% do tempo de equilíbrio varia entre cerca de 50% a 80% da profundidade de equilíbrio, dependendo da intensidade do escoamento;
- A escala temporal de equilíbrio ($t^* = Ut_e/D$, sendo t^* a escala temporal de equilíbrio, U a velocidade média do escoamento de aproximação, t_e o tempo de equilíbrio e D diâmetro do pilar) para o desenvolvimento da erosão localizada num pilar de uma ponte em condições sem transporte generalizado de sedimentos, é função da intensidade de escoamento (U/U_c , onde U é a velocidade média de escoamento e U_c a velocidade crítica), altura do escoamento (y/D onde y é profundidade de erosão localizada e D o diâmetro do pilar) e dimensão dos sedimentos (D/D_{50}). A influência da intensidade do escoamento, da altura do escoamento e da dimensão dos sedimentos

na escala temporal e na razão entre profundidade de equilíbrio e o diâmetro do pilar é demonstrada, utilizando um modelo laboratorial, para serem equivalentes.

2.5.1.2 Pilares alongados

Lima e Costa(2009) procederam ao estudo experimental do fenómeno de erosão localizada na proximidade de pilares de pontes em fundos não coesivos. Foram ensaiadas alturas de água iguais a 5, 10, e 15 cm. Os caudais utilizados com base no início do fenómeno erosivo na proximidade de um pilar variaram entre 7 e $32,4 m^3 h^{-1}$. Contrariamente à maioria dos estudos experimentais existentes, adotaram um pilar não cilíndrico, por ser mais representativo da realidade. A geometria do pilar escolhido era retangular com as extremidades a montante e jusante semi circulares, por ser esta a configuração existente em muitas pontes do nosso país (figura 2.10).

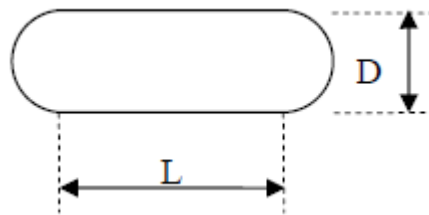


Figura 2.10 Representação da geometria dos pilares alongados (L=12 cm; D=4 cm)

Neste estudo Lima e Costa (2009) concluíram que:

- a configuração do escoamento em torno de um pilar retangular de extremidades semi circulares não era muito diferente da observada em torno de um pilar cilíndrico;
- a cavidade de erosão era simétrica em relação ao plano de simetria longitudinal do pilar;
- fixando a altura da água do escoamento e aumentando o caudal a dimensão da cavidade de erosão localizada aumentava, chegando a atingir toda a extensão longitudinal do pilar;

- a jusante do pilar se observava o efeito dos vórtices de esteira, com sucessivas regiões de escavação e deposição de material sólido;
- a profundidade máxima da cavidade de erosão aumentava muito rapidamente com o tempo e este aumento era totalmente independente de h/D para profundidades relativas superiores a 2;
- a fase principal do processo erosivo se iniciava 15 minutos após o início da erosão localizada, e após 160 minutos ainda não se tinha atingido a fase de equilíbrio;
- para a mesma altura de água de escoamento e aumentando o caudal, a profundidade máxima da cavidade aumentava;
- para maiores alturas de escoamento, o fenómeno de erosão localizada se iniciava para caudais superiores.

2.5.1.3 Pilares complexos

Em pilares complexos as estimativas de erosão são baseadas, respetivamente, na largura do pilar e das fundações, onde também se deve ter em consideração a altura e a velocidade do escoamento junto do topo da fundação. Melville e Coleman (2000) apresentaram 4 casos de erosão que podem ocorrer em pilares complexos (figura 2.11).

Através da observação dos resultados (figura 2.12), os autores puderam concluir que:

- No Caso I se pode constatar que a profundidade da erosão é inalterada pela presença das fundações;
- No Caso II a erosão localizada é reduzida devido às fundações interceptarem o escoamento descendente o que produz um efeito benéfico;
- No Caso III se verifica um aumento da erosão;
- No Caso IV ocorre a erosão máxima, sendo a fase em que a estrutura fica em risco.

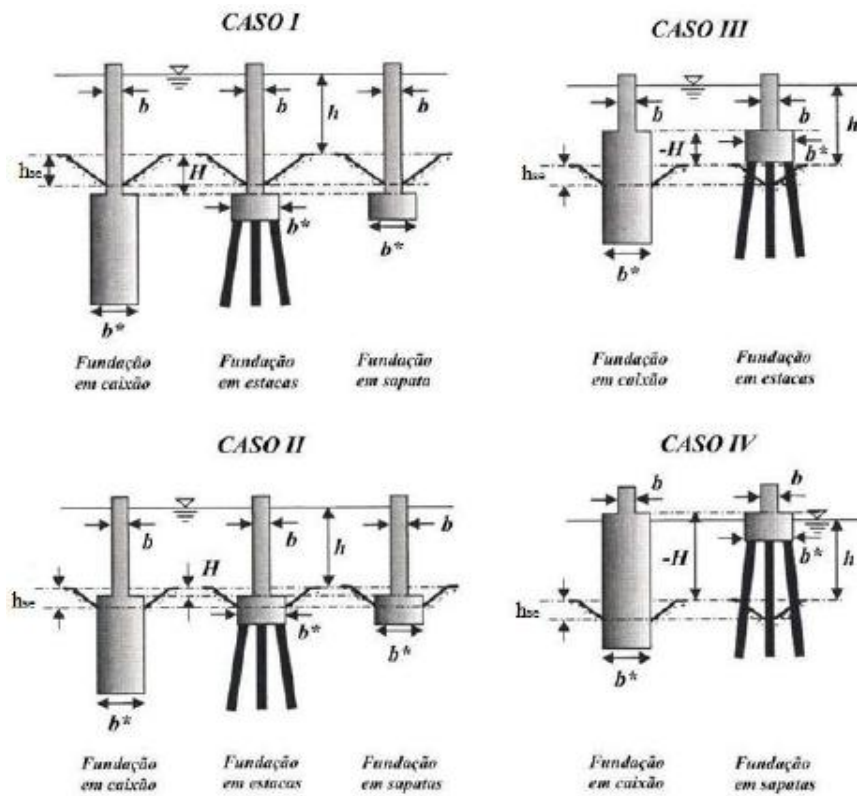


Figura 2.11 Quatro casos particulares de pilares não uniformes (adaptado de Melville e Coleman, 2000)

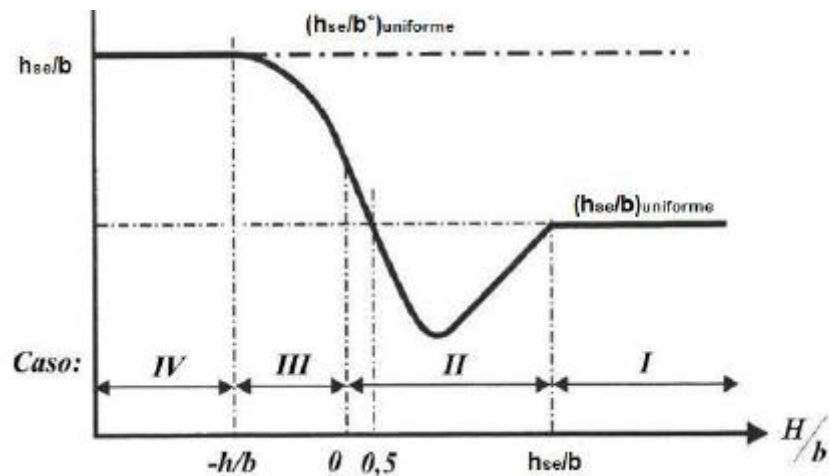


Figura 2.12 Variação da profundidade de erosão para pilares complexos (adaptado de Melville e Coleman, 2000)

2.5.2 Estudos numéricos

A Modelação Numérica de Fluidos ou Dinâmica de Fluidos Computacional (na literatura inglesa *Computational Fluid Dynamics – CFD*) é o ramo da mecânica dos fluidos responsável pela simulação numérica dos fenómenos que ocorrem num determinado escoamento. A sua

aplicabilidade é vasta e o seu uso tem tendência a crescer com o aparecimento de computadores cada vez mais rápidos e eficazes no processamento e armazenamento de dados. O princípio básico do *CFD* passa por dividir o escoamento em pequenos elementos, constituindo uma malha de volumes finitos. A cada elemento é necessário aplicar um conjunto de equações resultante de três princípios governativos da dinâmica de fluidos: Lei da conservação da massa, Lei da Quantidade de Movimento (Segunda Lei de Newton) e Lei da Conservação da Energia (Primeira Lei de Newton).

A erosão localizada junto de pilares pode comprometer a sua estabilidade e, conseqüentemente, da ponte que suporta. O estudo deste fenómeno tem sido maioritariamente de carácter experimental, mas Ramos *et al.* (2012) demonstrou no seu estudo que a modelação numérica de escoamentos apresenta-se como uma alternativa económica e fiável. O objetivo do estudo passou pela modelação numérica em torno de um pilar em duas configurações diferentes em fundo fixo, a primeira correspondendo a um fundo plano (início do processo erosivo) e a segunda correspondendo à situação de equilíbrio da cavidade de erosão. Roulund *et al.*, (2005) também apresentaram estudos com resultados computacionais apoiados por resultados experimentais. Neste estudo, foi utilizado um modelo hidrodinâmico tridimensional (*EllipSys3D*), incorporado com um modelo de turbulência do tipo $k-\omega$, que teve como objetivo estudar os vórtices de ferradura e de esteira. Estudaram também o efeito de três parâmetros nos vórtices em ferradura: a espessura da camada limite, o número de Reynolds e a rugosidade do leito.

3. MÉTODO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Neste capítulo apresentam-se as várias fases do procedimento experimental assim como toda a descrição dos equipamentos de medição e instalação experimental necessários para a realização deste estudo.

3.2 Instalação experimental

Para que a realização do estudo experimental sobre o fenómeno da erosão localizada na vizinhança de pilares fosse possível foi necessário o uso do canal hidráulico GUNT (figura 3.1), localizado no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, em Azurém.



Figura 3.1 Vista longitudinal do canal hidráulico GUNT a montante do escoamento

O canal hidráulico, com 14 m de comprimento, dos quais 4 m correspondem ao comprimento das secções de entrada e saída e 10 m correspondem à secção de teste propriamente dita (com 30 cm de largura e paredes de vidro), é constituído por:

- 3 reservatórios ligados entre si com capacidade para 1000 L cada um;
- uma bomba centrífuga;
- um medidor de caudal electromagnético;

- secção de teste;
- painel de controlo.

A inclinação do canal é ajustável podendo variar entre $-1/1200$ e $1/50$ e permite um transporte de caudal máximo de $150 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, monitorizado através do medidor de caudal electromagnético.

3.3 Secção de teste

Na figura 3.2 temos a representação da estrutura do canal hidráulico. Na secção de teste foi aplicado um perfil em acrílico, rampa e patamar, de forma a facilitar a colocação da areia. A caixa de areia é construída com as dimensões adequadas ao estudo do fenómeno, com dois metros de comprimento e dez centímetros de altura, de forma a simular, o mais próximo possível, as condições a que um pilar está sujeito quando incorporado num leito não coesivo de um rio. O pilar a ser ensaiado foi sempre colocado centrado no eixo do canal e no meio dessa caixa de areia.

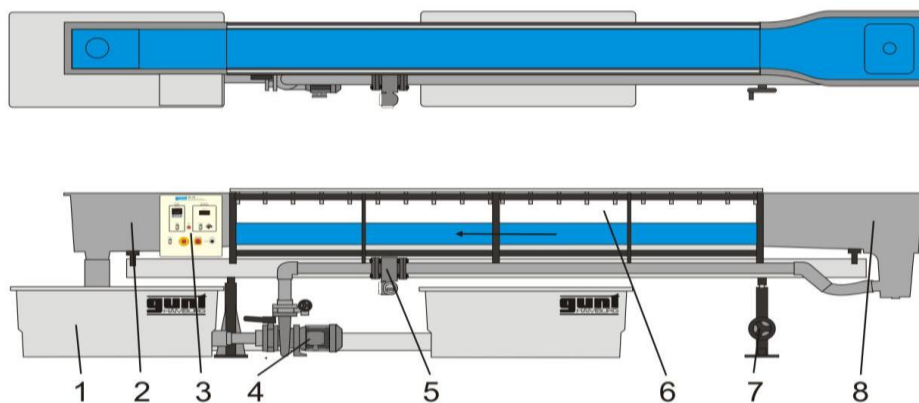


Figura 3.2 1 reservatório, 2 secção de jusante, 3 painel de controlo, 4 bomba centrífuga, 5 medidor de caudal, 6 secção experimental, 7 ajuste da inclinação longitudinal, 8 secção de montante (instalação experimental retirado do site da Gunt)

3.4 Parâmetros experimentais

Para a realização deste ensaio experimental da erosão localizada em pilares de pontes, foi de elevada importância a escolha de parâmetros diretamente relacionados com as condições de escoamento, geometria dos pilares e granulometria do material constituinte do leito do rio.

3.4.1 Areia

Nestes ensaios laboratoriais utilizou-se uma areia com D_{50} igual a 0,328 mm e com um coeficiente de graduação de curva granulométrica σ_D de 1,27, correspondente a uma granulometria uniforme ($\sigma_D < 1,4$). Deste modo evitou-se a ocorrência do efeito de encouraçamento que torna mais complicada a análise e validação dos resultados obtidos (Lima, 2008).

D₁₆ (mm)	D₈₄ (mm)	D₅₀ (mm)	σ_D	D_g (mm)
0,252	0,405	0,328	1,267	0,319

Tabela 3.1 Características da areia usada no presente estudo

3.4.2 Geometria dos pilares

No presente estudo experimental foram utilizados dois pilares com diferentes configurações, um circular e outro rectangular com extremidades semi-circulares a montante e a jusante, também denominado por pilar alongado (tabela 3.2). A estes pilares foram aplicadas, a montante e perpendicularmente a estes, chapas metálicas verticais que se passarão a designar por *vanes* à falta de nomenclatura própria e estabelecida na língua portuguesa. Estes *vanes* tinham 2 cm, 4 cm e 6 cm de extensão na direcção do escoamento. (figura 3.3). No texto que se segue utiliza-se a designação de pilares cilíndricos simples e alongados simples, quando não são utilizados *vanes*. Decidiu-se seleccionar a aplicação de *vanes* como medida de alteração de escoamento pois, na bibliografia sobre a matéria, não é encontrada nenhuma medida igual à apresentada. Os *vanes* geralmente referidos na bibliografia apresentam um ângulo com direcção e escoamento e não estão muitas vezes acoplados ao pilar. Assim a

presente configuração procurou estudar a eficácia da utilização de uma geometria mais simples, não usual e alternativa.

Tipo de pilar	D(mm)	L(mm)
Cilíndrico simples	20	20
Alongado Simples	20	40

Tabela 3.2 Dimensões dos pilares utilizados no presente estudo (D: dimensão transversal do pilar, L: dimensão longitudinal do pilar)



Figura 3.3 Vanes utilizados no presente estudo (a) e forma de aplicação (b)

(a)

(b)

3.4.3 Condições experimentais

Realizou-se um total de 6 ensaios experimentais, sempre para a mesma condição experimental apresentada na tabela 3.3, para pilares e *vanes* diferentes. A velocidade de atrito crítica foi estimada a partir da equação (2.3), considerando um parâmetro de Shields (ψ_S) igual a 0,04. A velocidade média crítica U_c correspondia a um valor de 0,27 m/s, estimado por Leite (2013). A observação do leito de sedimentos muito a montante do pilar permitiu classificar o escoamento como sendo sem transporte generalizado, ocorrendo unicamente transporte de sedimentos na vizinhança do pilar, o que está de acordo com o valor da razão U/U_c ser

aproximadamente igual a 0,9. Fr foi estimado a partir da equação (2.7) e Re a partir da equação (2.6).

ψ_s	s	D ₅₀ (mm)	σ_D	h (m)	u*c (m/s)	U _c (m/s)	U (m/s)	Q (m ³ /s)	Fr	Re
0,04	2,44	0,328	1,27	0,05	0,0137	0,27	0,24	0,0036	0,342	10435

Tabela 3.3 Condição experimental utilizada no presente estudo

3.5 Procedimento experimental

Nesta secção descreve-se o procedimento utilizado nos ensaios experimentais. Este procedimento foi repetido de forma rigorosa em todos os ensaios de modo a obter resultados coerentes, no seguimento da experiência acumulada em trabalhos anteriores realizados no canal hidráulico (e.g. Leite (2010)).

3.5.1 Preparação

Para preparar o ensaio foi necessário que a areia estivesse parcialmente seca de modo a poder trabalhá-la corretamente. Pretendeu-se que a areia ficasse nivelada à geometria da caixa e para isso usou-se uma régua de 4 metros de comprimento. Alisou-se a areia com a régua e retirou-se o excesso dos bordos com uma espátula. Posteriormente fez-se passar um pequeno bloco de poliuretano para corrigir pequenas imperfeições e retirar pequenos excessos. Com a ajuda de uma fita métrica mediu-se o centro da área nivelada e retirou-se a areia necessária para colocar o pilar a ser ensaiado. Depois de colocar o pilar bem centrado e alinhado no canal de teste, voltou-se a preencher o espaço vazio em torno do pilar com areia e um pouco de água, para ajudar a compactar possíveis espaços vazios e alisou-se novamente a superfície como descrito anteriormente. O resultado final da preparação do ensaio é ilustrado na figura 3.4.



Figura 3.4 Resultado final da preparação do ensaio

3.5.2 Início do ensaio

Depois tudo preparado procedeu-se ao enchimento do canal. O enchimento do canal foi feito de forma lenta e gradual de modo a que não surgissem cavidades em locais indesejáveis até que se atingissem as condições de escoamento necessárias. Com o auxílio de uma bomba centrífuga, o canal foi abastecido com água até à altura desejada. Recorreu-se igualmente a uma outra bomba auxiliar a funcionar em simultâneo e a descarregar a jusante do pilar, para que o nível da água fosse aumentando sem causar grandes perturbações em torno do pilar, evitando-se assim erosões localizadas precoces. O nível da água era mantido por um descarregador localizado a jusante do canal, aumentando-se o caudal até ao nível desejado. Na figura 3.5 é possível observar o início da escavação nas imediações do pilar com *vane* de 4 cm.



Figura 3.5 Erosão provocada na imediação do pilar nos instantes iniciais do ensaio experimental

3.5.3 Fim do ensaio

O ensaio decorria em média entre 4 a 5 dias, sem qualquer alteração às condições experimentais (caudal e altura da água do escoamento). Após passarem 24 horas sem erodir mais que 1 mm na vizinhança do pilar, o ensaio era terminado e o canal esvaziado. O passo seguinte era a recolha do molde da cavidade de erosão localizada em torno do pilar, com recurso a uma mistura de parafina e vaselina em estado líquido que depois de solidificada permitia estudar a geometria da cavidade de erosão (figura 3.6).

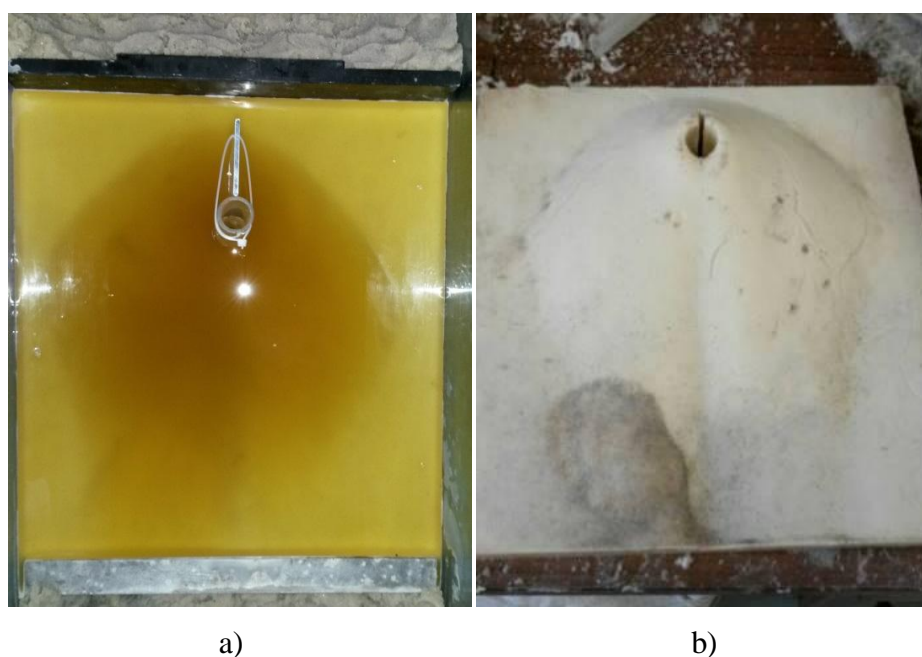


Figura 3.6 Levantamento tridimensional do molde (enchimento da cavidade de erosão com a mistura de vaselina e parafina (a); resultado final do levantamento do molde (b))

3.5.4 Medição da profundidade da cavidade de erosão

Como é ilustrado na figura 3.7, a medição da profundidade da cavidade de erosão era efetuada através da graduação do *vane* aplicado ao pilar, com menor divisão igual a 1 mm, sendo efetuada imediatamente a montante do pilar, onde a cavidade de erosão era máxima, e na extremidade oposta da chapa aplicada ao pilar, possibilitando assim o registo da profundidade da erosão localizada nessas duas posições. No caso de pilares simples, utilizaram-se os resultados de Azevedo (2014) para efeitos de comparação, sendo que a profundidade máxima

da cavidade de erosão tinha sido determinada com base na escala (com resolução de 1 mm) marcada na extremidade de montante dos mesmos. Esta comparação foi possível porque a repetibilidade dos ensaios foi avaliada anteriormente (Leite, 2010) e considerada satisfatória, desde que se adotasse sempre o mesmo procedimento experimental, o que aconteceu.



Figura 3.7 Vane graduado aplicado ao pilar durante ensaio experimental

3.5.5 Digitalização dos moldes

Para a digitalização dos moldes recorreu-se ao equipamento *Roland's 3D Laser Scanner LPX-600* (figura 3.8) do Departamento de Engenharia de Polímeros da Universidade do Minho. Este *scanner* permitiu obter a digitalização em 3D de todos os moldes, desde que este não ultrapassa-se as dimensões que o aparelho suportava: 406,4mm x 254,1mm, para posteriormente ser importado para o *Geomagic Design*. Este equipamento tem uma capacidade de incrementação de 0,2 mm a 20 mm, tendo sido utilizado na presente dissertação um incremento de 0,8 mm. As curvas de nível foram obtidas usando o *software*

Autocad 2016. O molde foi colocado totalmente na vertical pois é nesta posição que se conseguem obter, com maior rigor e sem necessidade de correções posteriores, as coordenadas dos pontos de superfície dos moldes.



Figura 3.8 Roland's 3D Laser Scanner LPX-600

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são analisados e discutidos os ensaios experimentais realizados no que diz respeito à evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão localizada a montante do pilar, bem como à configuração dessa cavidade.

4.1 Evolução temporal da máxima profundidade da cavidade de erosão localizada

Nesta secção da dissertação são apresentados os resultados relativos à evolução do processo erosivo. Apresenta-se a evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão para os pilares cilíndrico e alongado no caso de *vanes* de 2 cm (subsecção 4.1.1), *vanes* de 4 cm (subsecção 4.1.2) e *vanes* de 6 cm (subsecção 4.1.3), determinada na extremidade de montante do pilar (local onde esta profundidade é máxima) e na extremidade de montante do *vane*. A comparação entre os diferentes casos estudados é apresentada na subsecção 4.1.4, enquanto que na subsecção 4.1.5 se comparam os resultados obtidos com os de outros autores.

Por uma questão de adimensionalização, e adaptando a equação (2.2), representa-se a profundidade da cavidade de erosão y_s adimensionalizada pela dimensão D do pilar, em função do parâmetro Ut/D .

4.1.1 *Vane* de 2 cm

- Pilar cilíndrico

Os valores da profundidade da cavidade de erosão localizada na extremidade de montante do pilar cilíndrico, com *vane* de 2 cm acoplado, estão representados na figura 4.1. Pela análise da evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão é possível verificar a existência de 3 fases do processo erosivo. A identificação destas fases foi elaborada através de um processo

de tentativa e erro de modo a obter um ajuste de uma recta de tendência aos resultados experimentais com um valor de R^2 aproximadamente igual a 1.

A primeira fase, ou fase inicial, é a que é representada por uma recta com declive superior. Corresponde às medições para as quais se observa maior incremento da profundidade da cavidade de erosão localizada num menor intervalo de tempo. Na segunda fase, ou fase de principal, a profundidade da cavidade de erosão continua a aumentar em profundidade e extensão. Na terceira fase, ou fase de equilíbrio, a profundidade da cavidade de erosão pouco evolui ou estagna. A duração das três fases é apresentada na tabela 4.1.

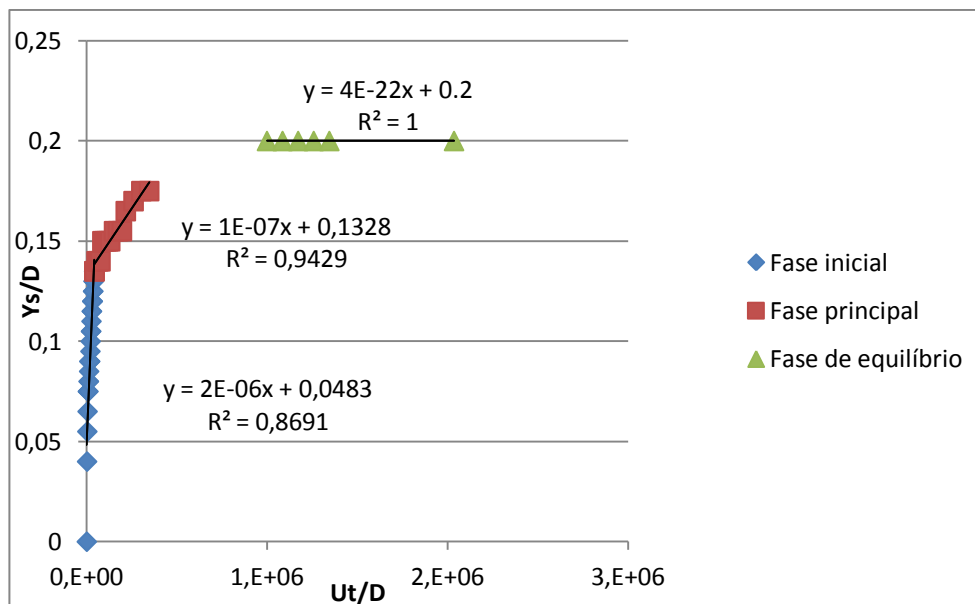


Figura 4.1 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar (pilar cilíndrico com *vane* de 2 cm).

	Duração das fases (em minutos)
Fase Inicial	56
Fase Principal	424
Fase de Equilíbrio	2347
Total	2827

Tabela 4.1 Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do pilar cilíndrico com *vane* 2 cm)

De seguida, na figura 4.2, são apresentados os resultados obtidos da medição da profundidade da cavidade de erosão localizada na extremidade de montante do *vane* de 2 cm acoplado ao pilar cilíndrico. A duração das três fases identificadas é apresentada na tabela 4.2.

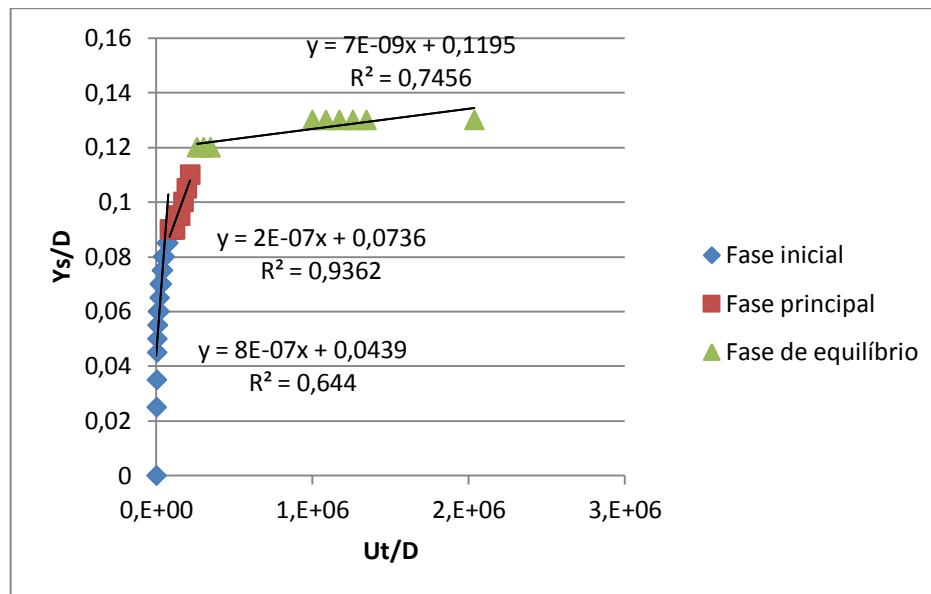


Figura 4.2 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do *vane* (pilar cilíndrico com *vane* de 2 cm).

	Duração das fases (em minutos)
Fase Inicial	105
Fase Principal	195
Fase de Equilíbrio	2527
Total	2827

Tabela 4.2 Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do *vane* com 2 cm aplicado ao pilar cilíndrico)

A figura 4.3 ilustra a comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar cilíndrico e na extremidade de montante da *vane* de 2 cm aplicado, representando o eixo das abcissas em escala logarítmica. Como é possível verificar através da análise da figura, em todas as três fases distintas do processo erosivo a profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do *vane* de 2 cm é sempre menor do que na extremidade de montante do pilar cilíndrico. Observa-se ainda que y_s/D aumenta a maior taxa na extremidade de montante do pilar.

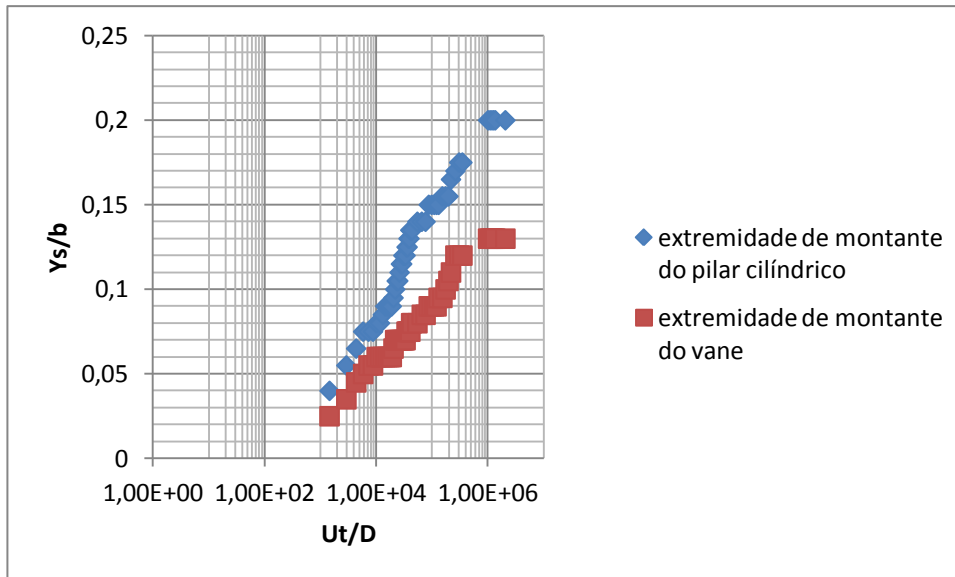


Figura 4.3 Comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar cilíndrico e na extremidade de montante do *vane* de 2 cm aplicado.

- Pilar alongado

Na figura 4.4 estão representados os valores obtidos no ensaio experimental relativos à evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar alongado com *vane* de 2 cm aplicado, onde são facilmente identificadas as três fases do processo erosivo. A duração das três fases é apresentada na tabela 4.3.

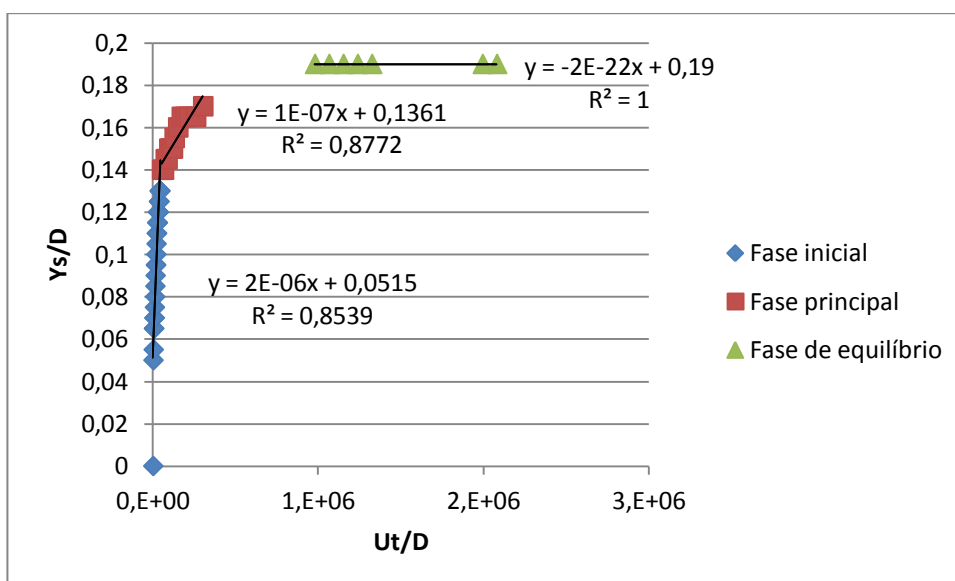


Figura 4.4 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar (pilar alongado com *vane* de 2 cm).

	Duração das fases (em minutos)
Fase Inicial	60
Fase Principal	360
Fase de Equilíbrio	2470
Total	2890

Tabela 4.3 Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do pilar alongado com *vane* de 2 cm)

Na figura 4.5 estão representados os resultados obtidos da medição da profundidade da cavidade de erosão localizada na extremidade de montante do *vane* de 2 cm acoplado ao pilar alongado. A duração das três fases identificada é apresentada na tabela 4.4.

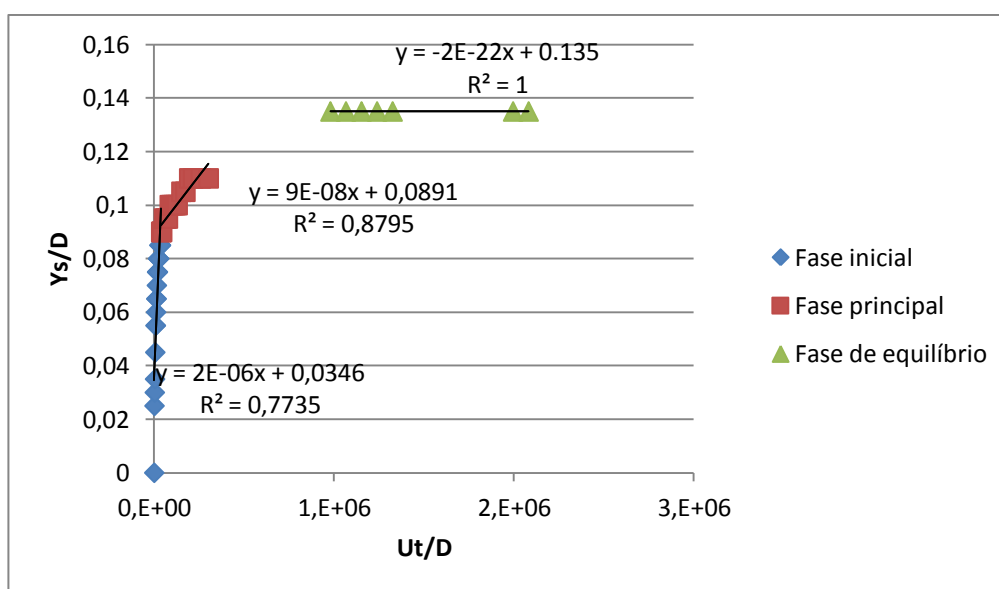


Figura 4.5 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do *vane* (pilar alongado com *vane* de 2 cm).

	Duração das fases (em minutos)
Fase Inicial	52
Fase Principal	368
Fase de Equilíbrio	2470
Total	2890

Tabela 4.4 Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do *vane* com 2 cm aplicado ao pilar cilíndrico)

A figura 4.6 apresenta a comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar alongado e na extremidade de montante da *vane* de 2 cm aplicado, representando o eixo das abcissas em escala logarítmica. Através da análise da figura, observa-se que em todas as três fases distintas do processo erosivo a profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do *vane* de 2 cm é sempre menor do que na extremidade de montante do pilar cilíndrico, havendo uma ligeira aproximação de resultados na fase principal.

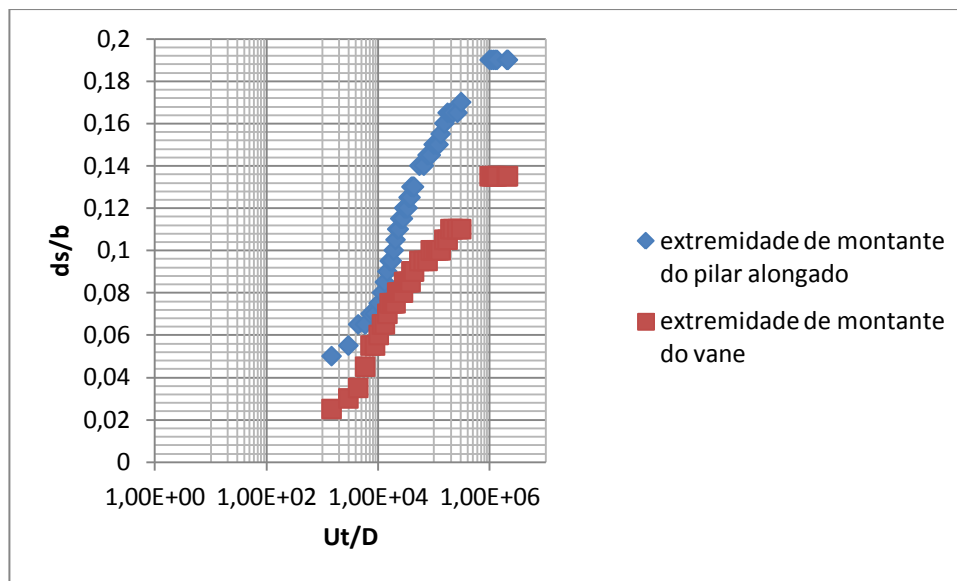


Figura 4.6 Comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar alongado e na extremidade de montante do *vane* de 2 cm aplicado.

4.1.2 *Vane* de 4 cm

- Pilar cilíndrico

Os valores da profundidade da cavidade de erosão localizada na extremidade de montante do pilar cilíndrico com *vane* de 4 cm, estão representados na figura 4.7. As três fases do processo erosivo fase inicial, fase principal e fase de equilíbrio, estão devidamente identificadas na figura. A duração das três fases é apresentada na tabela 4.5.

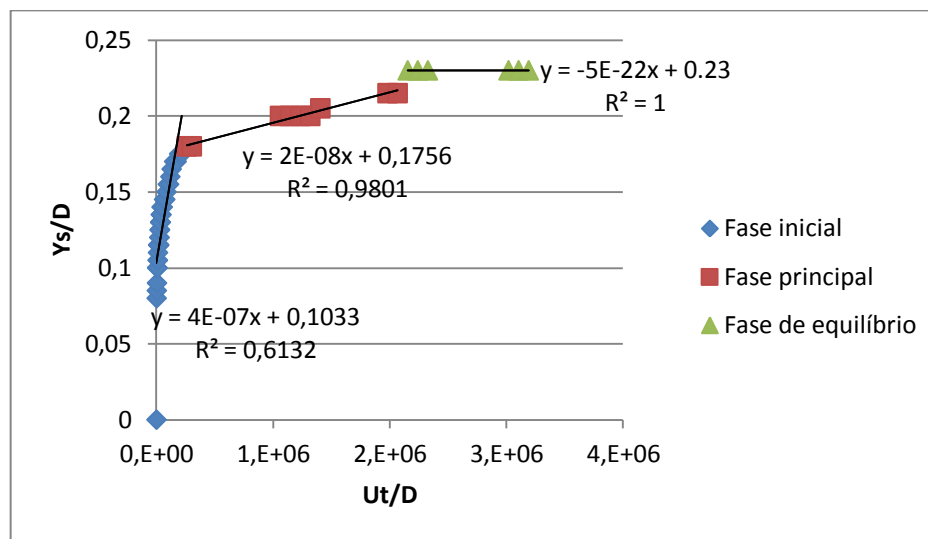


Figura 4.7 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar (pilar cilíndrico com *vane* de 4 cm).

	Duração das fases (em minutos)
Fase Inicial	300
Fase Principal	2570
Fase de Equilíbrio	1560
Total	4430

Tabela 4.5 Duração das fases do processo erosivo (pilar cilíndrico com *vane* de 4 cm aplicada à extremidade de montante do pilar cilíndrico)

Na figura 4.8 estão representados os resultados obtidos da medição da profundidade da cavidade de erosão localizada na extremidade de montante do *vane* de 4 cm acoplado ao pilar cilíndrico. A duração das três fases é apresentada na tabela 4.6.

Na figura 4.9 está representada a comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar cilíndrico e na extremidade de montante da *vane* de 4 cm aplicado, representando o eixo das abcissas em escala logarítmica. É facilmente observável que em toda a duração do ensaio a evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão da extremidade a montante do *vane* de 4 cm é muito menor que a evolução temporal da cavidade de erosão na extremidade a montante do pilar cilíndrico.

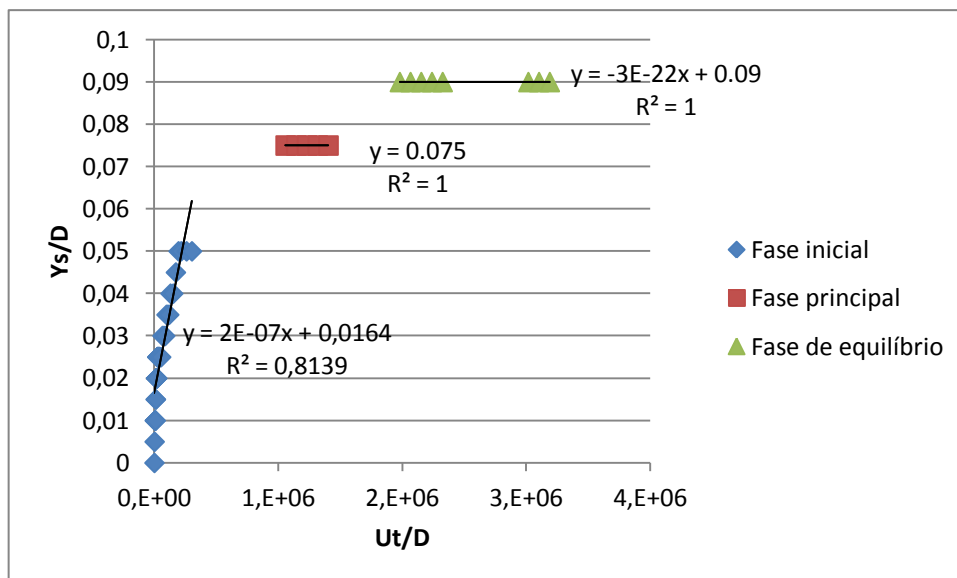


Figura 4.8 Evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão na extremidade de montante do *vane* (pilar cilíndrico com *vane* de 4 cm).

	Duração das fases (em minutos)
Fase Inicial	420
Fase Principal	1530
Fase de Equilíbrio	2480
Total	4430

Tabela 4.6 Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do *vane* com 4 cm aplicado ao pilar cilíndrico)

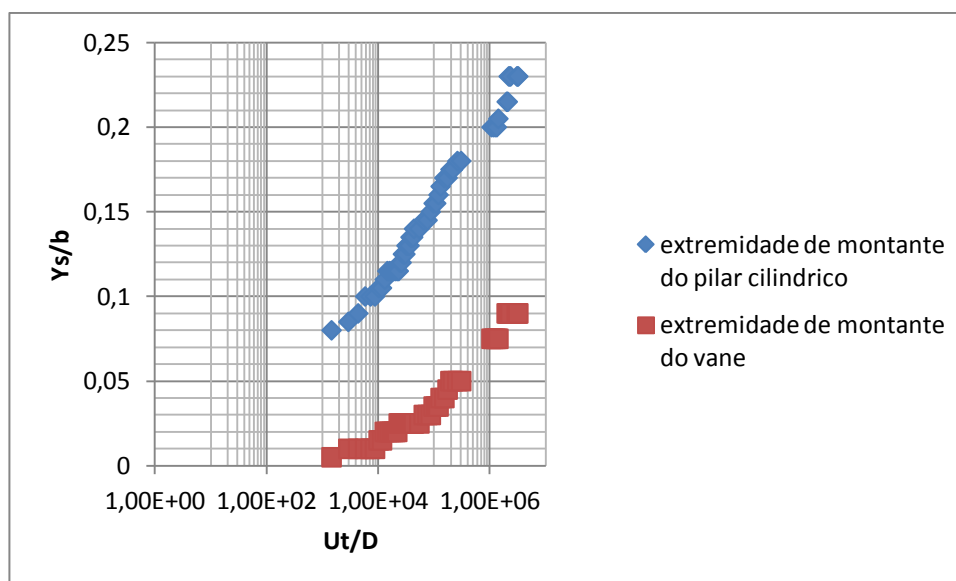


Figura 4.9 Comparação entre a evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar cilíndrico e na extremidade de montante do *vane* de 4 cm aplicado.

- Pilar alongado

A figura 4.10 representa a evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar alongado com *vane* de 4 cm. A duração das três fases do processo erosivo é apresentada na tabela 4.7.

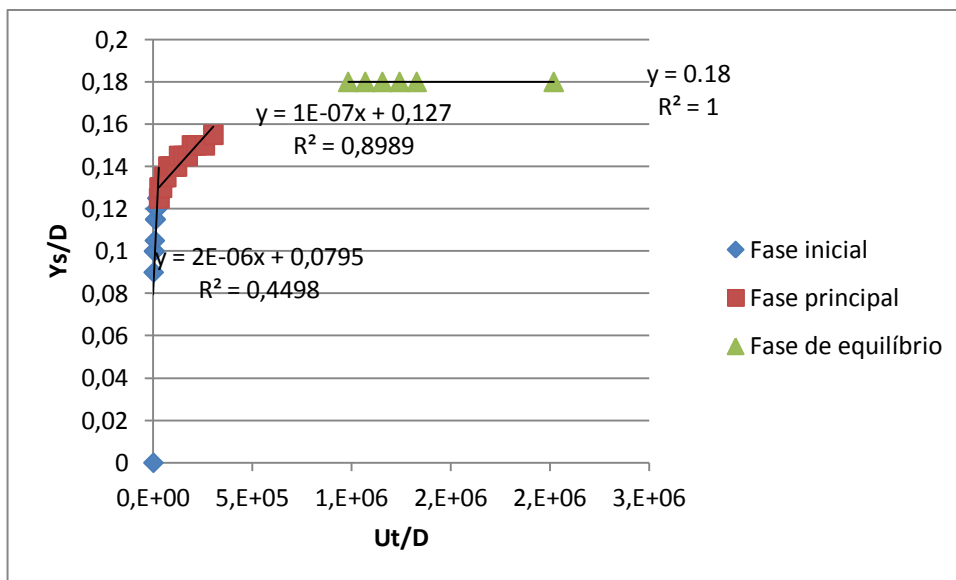


Figura 4.10 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar (pilar alongado com *vane* de 4 cm).

	Duração das fases (em minutos)
Fase Inicial	38
Fase Principal	382
Fase de Equilíbrio	2384
Total	2804

Tabela 4.7 Duração das fases do processo erosivo (pilar alongado com *vane* de 4 cm na base do pilar)

Na figura 4.11 estão representados os resultados obtidos da medição da erosão localizada na extremidade de montante do *vane* de 4 cm acoplado ao pilar alongado. A duração das três fases do processo erosivo é apresentada na tabela 4.8.

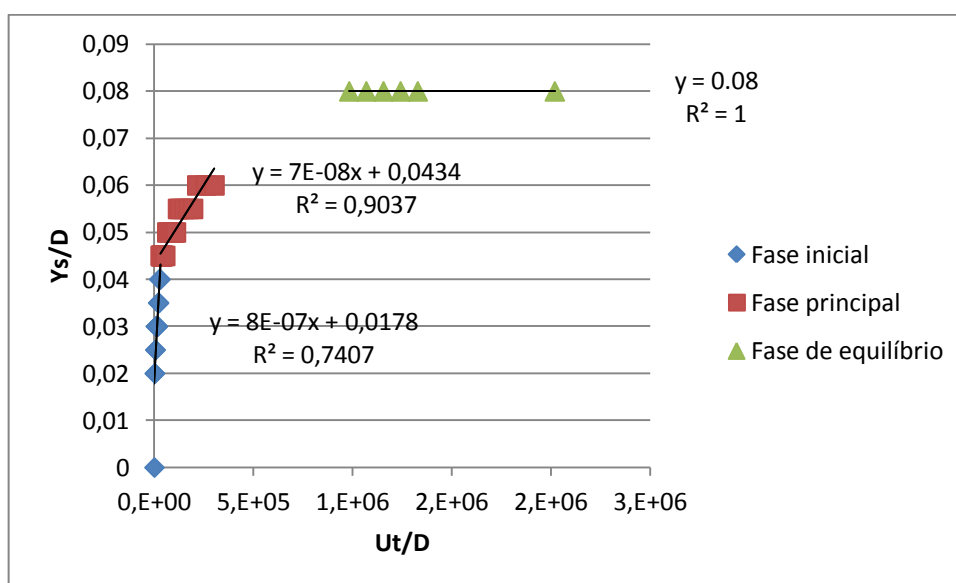


Figura 4.11 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do *vane* (pilar alongado com *vane* de 4 cm).

	Duração das fases (em minutos)
Fase Inicial	42
Fase Principal	378
Fase de Equilíbrio	2384
Total	2804

Tabela 4.8 Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do *vane* com 4 cm aplicado ao pilar alongado)

Através de figura 4.12 é possível comparar a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão determinadas na extremidade de montante do pilar alongado e na extremidade de montante do *vane* de 4 cm aplicado, representando o eixo das abcissas em escala logarítmica. Na análise da figura constata-se que os valores da evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade a montante do *vane* são sempre muito inferiores aos obtidos na extremidade de montante do pilar alongado.

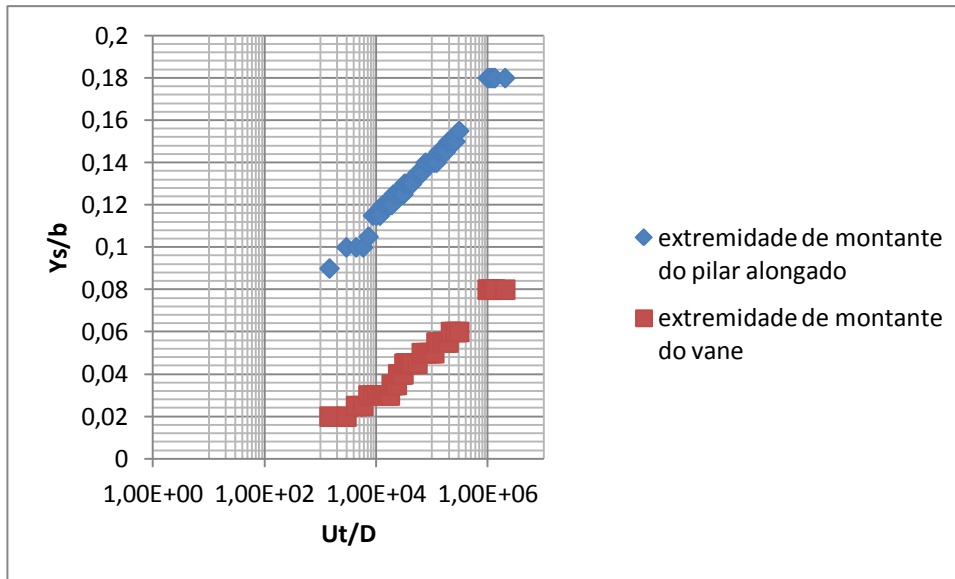


Figura 4.12 Comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar alongado e na extremidade de montante da *vane* de 4 cm aplicado.

4.1.3 *Vane* de 6 cm

- Pilar cilíndrico

Os valores da profundidade da cavidade de erosão localizada na extremidade de montante do pilar cilíndrico com *vane* de 6 cm são apresentados na figura 4.13. A duração das três fases do processo erosivo identificadas é apresentada na tabela 4.9.

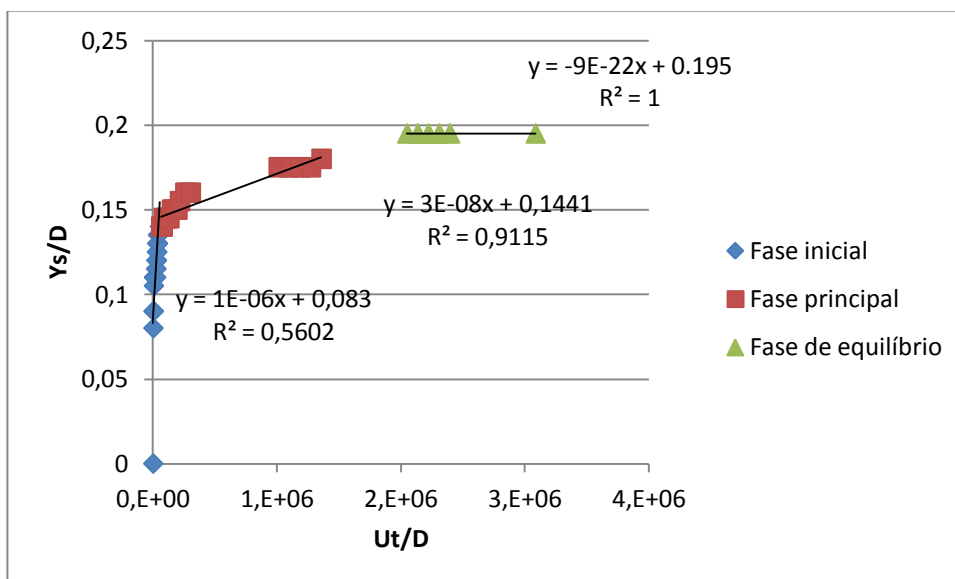


Figura 4.13 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar (pilar cilíndrico com *vane* de 6 cm).

	Duração das fases (em minutos)
Fase Inicial	75
Fase Principal	1811
Fase de Equilíbrio	2400
Total	4286

Tabela 4.9 Duração das fases do processo erosivo (*vane* de 6 cm na extremidade de montante do pilar cilíndrico)

Na figura 4.14 são apresentados os resultados obtidos da medição da erosão localizada na extremidade de montante do *vane* de 6 cm acoplado ao pilar cilíndrico. A duração das três fases do processo erosivo identificadas é apresentada na tabela 4.10.

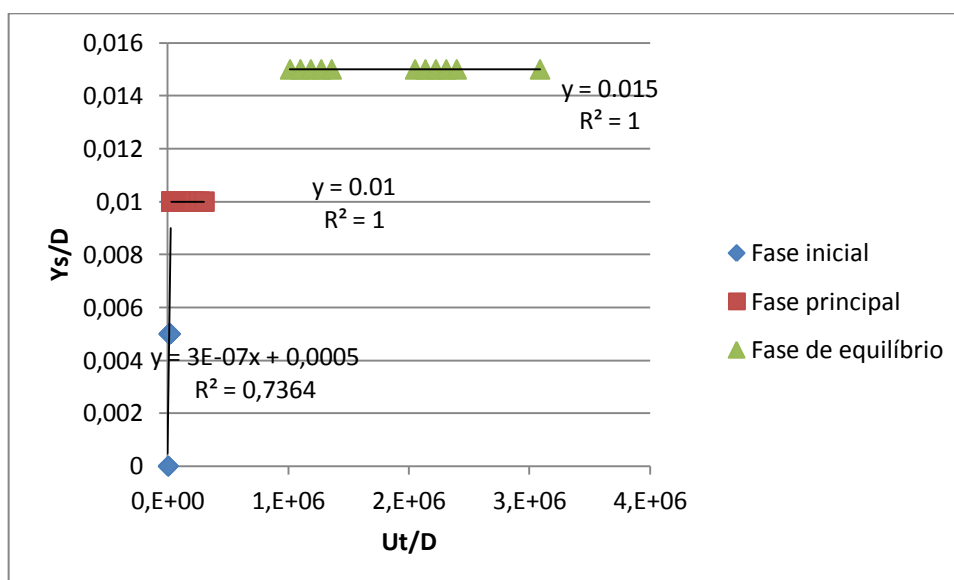


Figura 4.14 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do *vane* (pilar cilíndrico com *vane* de 6 cm).

	Duração das fases (em minutos)
Fase Inicial	36
Fase Principal	384
Fase de Equilíbrio	3866
Total	4286

Tabela 4.10 Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do *vane* com 6 cm aplicado ao pilar cilíndrico)

Na figura 4.15 apresenta-se a comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão medidas na extremidade de montante do pilar cilíndrico e na extremidade de montante da *vane* de 6 cm aplicado, representando o eixo das abcissas em escala logarítmica. Como nos casos anteriores, observa-se que a evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do *vane* de 6 cm é muito inferior relativamente à profundidade medida na extremidade de montante do pilar cilíndrico.

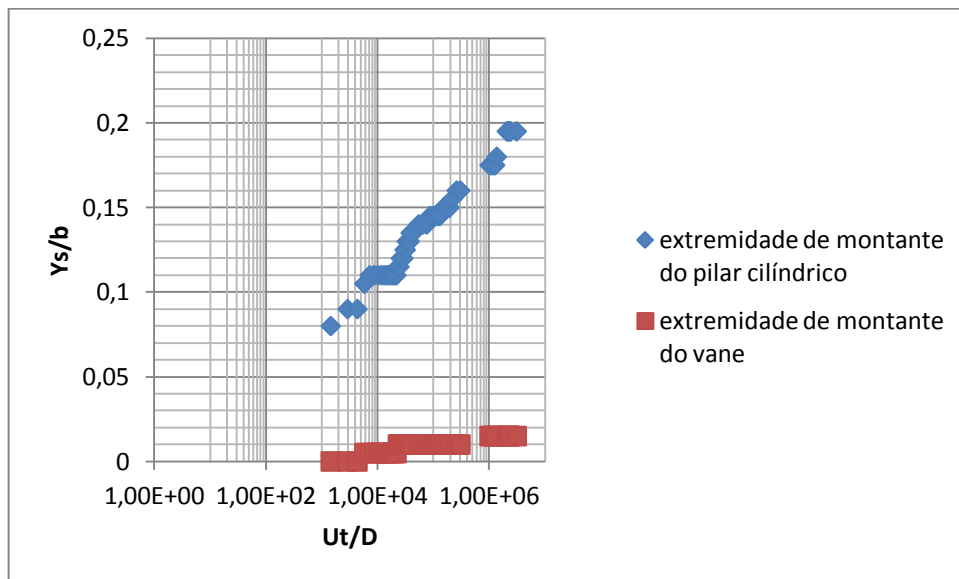


Figura 4.15 Comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar cilíndrico e na extremidade de montante da *vane* de 6 cm aplicado.

- Pilar alongado

Os valores da máxima profundidade da cavidade de erosão localizada na extremidade de montante do pilar alongado com *vane* de 6 cm são apresentados na figura 4.16. A duração das três fases do processo erosivo identificadas é apresentada na tabela 4.11.

Na figura 4.17 estão representados os resultados obtidos da medição da erosão localizada na extremidade de montante do *vane* de 6 cm acoplado ao pilar alongado. A duração das três fases do processo erosivo identificadas é apresentada na tabela 4.12.

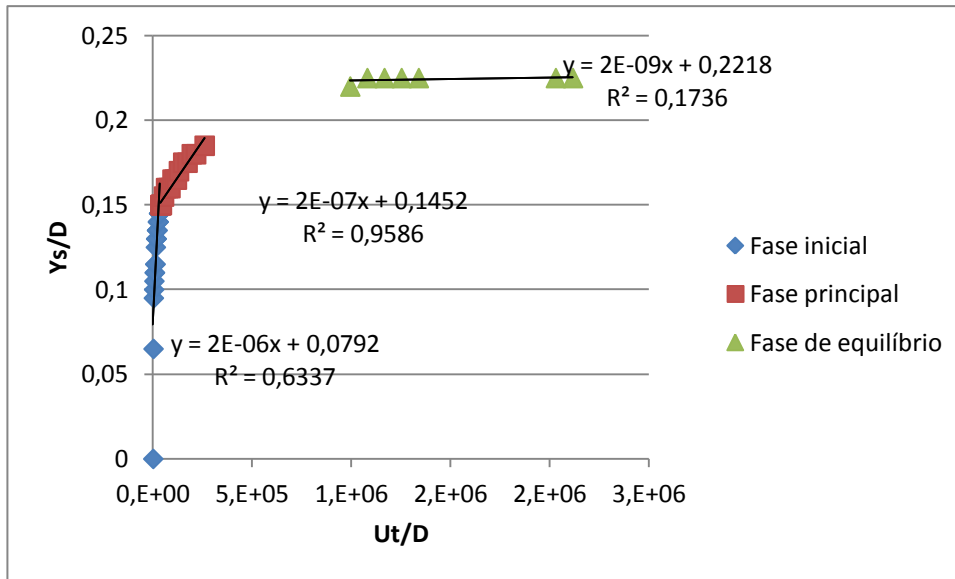


Figura 4.16 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar (pilar alongado com *vane* de 6 cm).

	Duração das fases (em minutos)
Fase Inicial	48
Fase Principal	312
Fase de Equilíbrio	2580
Total	2940

Tabela 4.11 Duração das fases do processo erosivo (*vane* de 6 cm na extremidade de montante do pilar alongado)

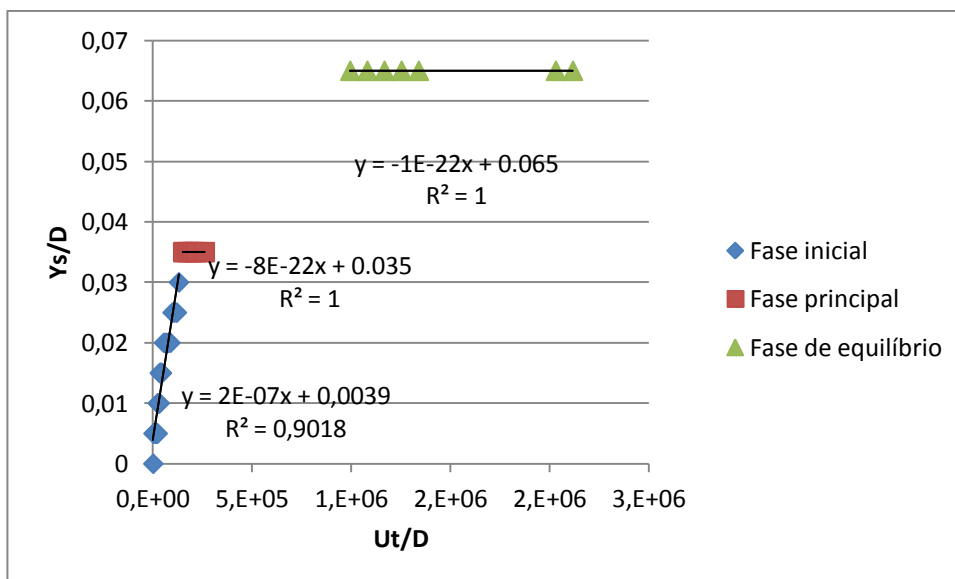


Figura 4.17 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão na extremidade de montante do *vane* (pilar alongado com *vane* de 6 cm).

	Duração das fases (em minutos)
Fase Inicial	180
Fase Principal	180
Fase de Equilíbrio	2580
Total	2940

Tabela 4.12 Duração das fases do processo erosivo (na extremidade de montante do *vane* com 6 cm aplicado ao pilar alongado)

Comparando a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão determinadas na extremidade de montante do pilar alongado e na extremidade de montante do *vane* de 6 cm aplicado (fig. 4.18) pode-se verificar que no início do ensaio não houve praticamente erosão na extremidade de montante do *vane* de 6 cm. Mais uma vez, como em todos os outros ensaios, a profundidade de erosão na extremidade de montante do *vane* de 6 cm ao longo do ensaio é sempre inferior à profundidade de erosão na extremidade de montante do pilar.

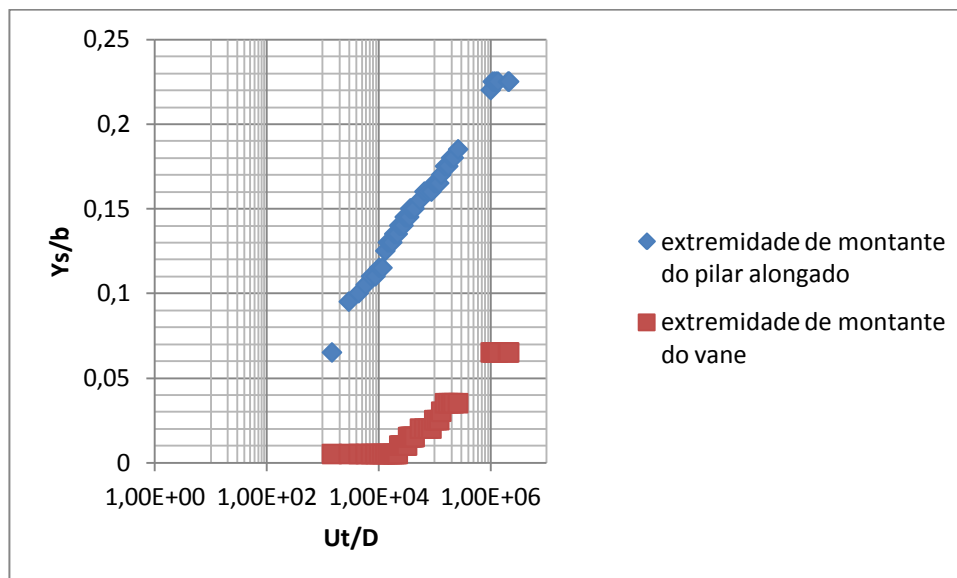


Figura 4.18 Comparação entre a evolução temporal das profundidades da cavidade de erosão na extremidade de montante do pilar alongado e na extremidade de montante da *vane* de 6 cm aplicado.

4.1.4 Análise comparativa entre ensaios

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos decidiu-se agrupar a informação anteriormente apresentada num único gráfico (figura 4.19).

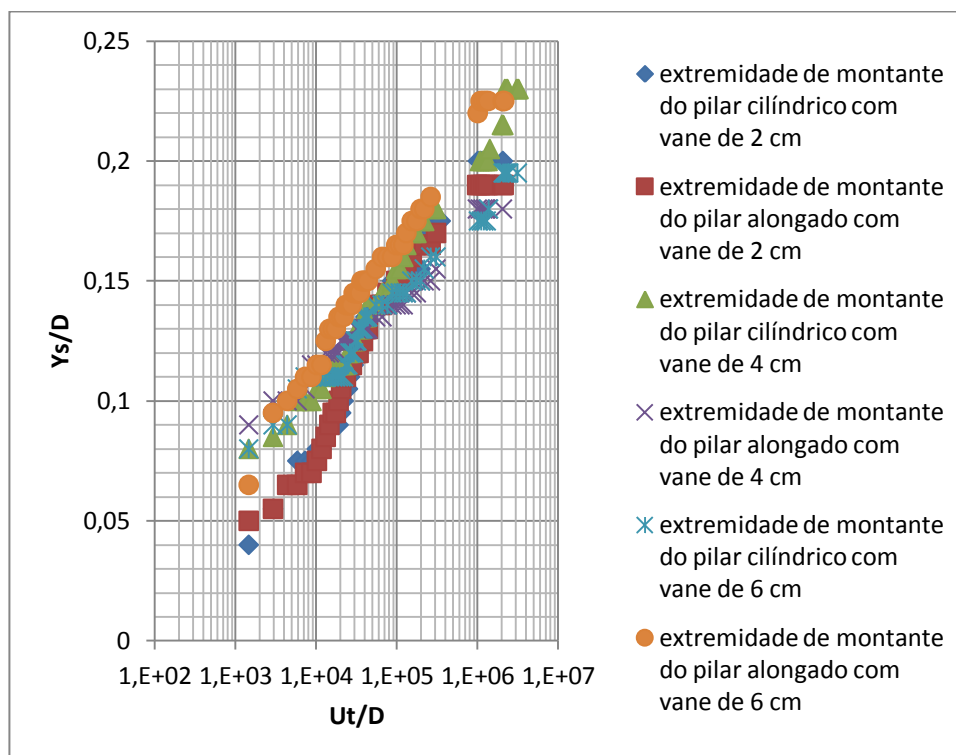


Figura 4.19 Evolução temporal da profundidade da cavidade de erosão dos seis ensaios experimentais.

É na fase inicial que se observa uma maior aceleração no processo de erosão em todos os ensaios experimentais. Não se observa uma concordância aparente na fase inicial de erosão localizada entre pilares. Começa por haver, na fase de equilíbrio, uma uniformização dos resultados, voltando por fim, nos instantes finais desta fase, a existir uma ligeira discrepância.

Todos os valores da profundidade da cavidade de erosão, determinados no final da fase de equilíbrio para os diferentes ensaios, são apresentados na tabela 4.13. Como se pode observar na tabela 4.13, em todos os ensaios experimentais ocorreu uma maior escavação imediatamente a montante do pilar relativamente à extremidade de montante do *vane* acoplado a este. Nos pilares com *vane* de 2 cm e 4 cm os resultados mostram alguma

concordância relativamente aos valores de escavação máxima na extremidade de montante do pilar, na medida em que o cilíndrico sofre uma erosão maior comparativamente ao alongado. A exceção ocorre nos pilares com *vanes* de 6 cm, casos em que o valor da máxima escavação se verifica na extremidade de montante do pilar alongado. Pode-se também verificar que à medida que o comprimento da chapa aumenta o valor da escavação na sua extremidade de montante diminui. Segundo os dados da tabela, a medida de alteração de escoamento que obtém melhores resultados na extremidade de montante do pilar, é conseguida com o pilar alongado com *vane* de 4 cm. Na extremidade de montante do *vane*, a medida de alteração do escoamento mais eficaz consiste na utilização de um *vane* de 6 cm acoplado a um pilar cilíndrico.

Pilar	Ys (mm) extremidade de montante do Pilar	Ys (mm) extremidade de montante do Vane
Cilíndrico c/ <i>vane</i> de 2cm	40	26
Alongado c/ <i>vane</i> de 2cm	38	27
Cilíndrico c/ <i>vane</i> de 4cm	46	18
Alongado c/ <i>vane</i> de 4cm	36	16
Cilíndrico c/ <i>vane</i> de 6cm	39	3
Alongado c/ <i>vane</i> de 6cm	45	13

Tabela 4.13 Comparação entre erosões localizadas na extremidade de montante e no nariz do *vane*.

A tabela 4.14 apresenta a duração das três fases do processo erosivo. Como pode ser verificado na tabela 4.14, a fase inicial é a fase mais curta em todas os ensaios experimentais, por outro lado, a fase de equilíbrio mostrou-se a fase mais demorada em todos os ensaios com apenas uma exceção, no caso do pilar cilíndrico acoplado por uma chapa de 4 cm em que a fase principal superou o tempo de duração da fase de equilíbrio.

Pilar	Duração Total do Ensaio (min)	Fase	Duração-Extremidade de Montante do Pilar (min)	Duração-Extremidade de Montante do Vane (min)
Cilíndrico c/ vane de 2cm	2827	Inicial	56	105
		Principal	424	195
		Equilíbrio	2347	2527
Alongado c/ vane de 2cm	2890	Inicial	60	52
		Principal	360	368
		Equilíbrio	2470	2470
Cilíndrico c/ vane de 4cm	4430	Inicial	300	420
		Principal	2570	1530
		Equilíbrio	1560	2480
Alongado c/ vane de 4cm	2804	Inicial	38	42
		Principal	382	378
		Equilíbrio	2384	2384
Cilíndrico c/ vane de 6cm	4286	Inicial	75	36
		Principal	1811	384
		Equilíbrio	2400	3866
Alongado c/ vane de 6cm	2940	Inicial	48	180
		Principal	312	180
		Equilíbrio	2580	2580

Tabela 4.14 Duração das fases do processo erosivo

4.1.5 Comparação com estudos anteriores

Com o objetivo de estudar a eficiência das medidas de alteração do escoamento implementadas no presente estudo, procedeu-se à comparação com os resultados obtidos por Azevedo (2014) obtidos para as mesmas condições de escoamento em pilares simples. A análise comparativa será feita entre pilares com medidas de alteração de escoamento e pilares simples. De seguida apresenta-se e compara-se a evolução das profundidades máximas da

cavidade de erosão (determinada na extremidade de montante do pilar) obtidas no presente estudo e no de Azevedo (2014).

A figura 4.20 representada evolução temporal das profundidades máximas da cavidade de erosão no caso de pilares cilíndricos com *vane* de 2 cm acoplado (presente estudo) e pilares cilíndricos simples (Azevedo, 2014). Embora na fase inicial e fase principal o presente estudo tenha obtido uma menor erosão localizada na extremidade de montante do pilar, à medida que nos vamos aproximando da fase de equilíbrio os resultados vão convergindo.

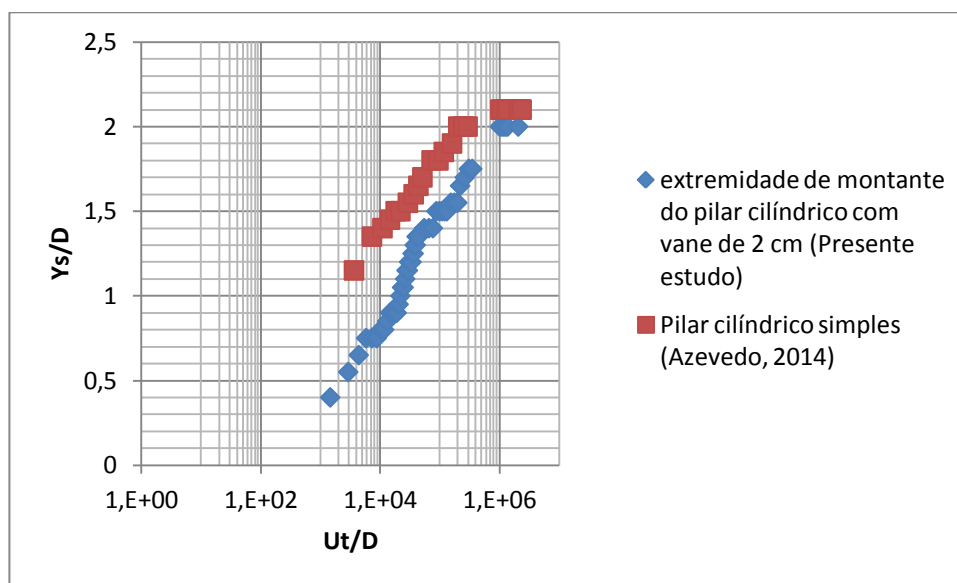


Figura 4.20 Análise comparativa do presente estudo com estudo de Azevedo (2014) no caso de pilar cilíndrico com *vane* de 2 cm

A figura 4.21 apresenta a comparação entre os resultados obtidos no presente estudo e o estudo de Azevedo (2014), no caso de pilar alongado com *vane* de 2 cm. Na fase inicial o presente estudo revelou menores valores de erosão localizada em comparação com Azevedo (2014). A fase principal apresenta uma ligeira concordância nos valores de erosão obtidos. Na fase de equilíbrio volta novamente a haver uma menor erosão para o presente estudo em comparação com Azevedo (2014).

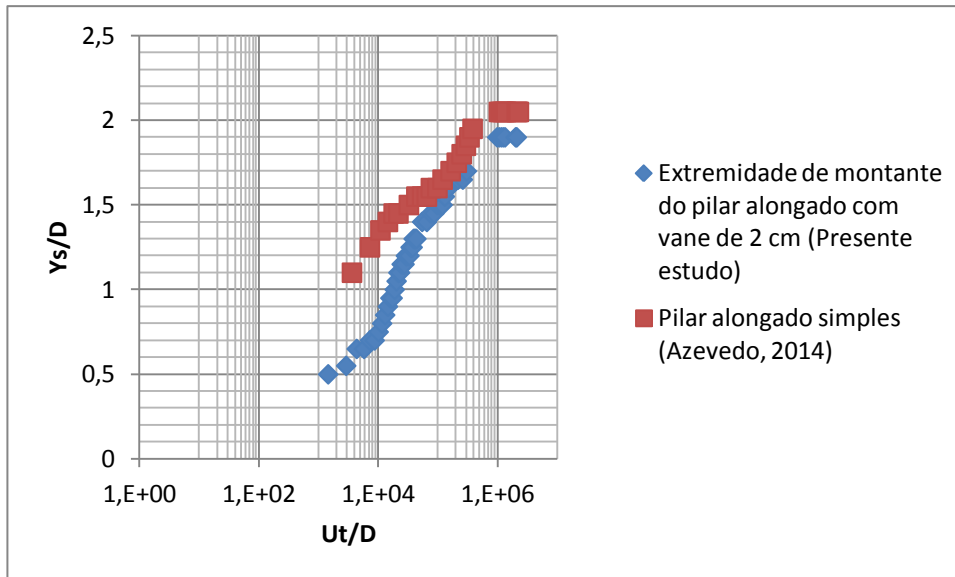


Figura 4.21 Análise comparativa do presente estudo com estudo de Azevedo (2014) no caso de pilar alongado com *vane* de 2 cm

Na análise comparativa entre o presente estudo com o estudo de Azevedo (2014) no caso de pilar cilíndrico com *vane* de 4 cm, observa-se que os valores da profundidade máxima da cavidade de erosão localizada na extremidade de montante do pilar cilíndrico com *vane* acoplado apenas superaram os do estudo de Azevedo (2014) na fase de equilíbrio (figura 4.22).

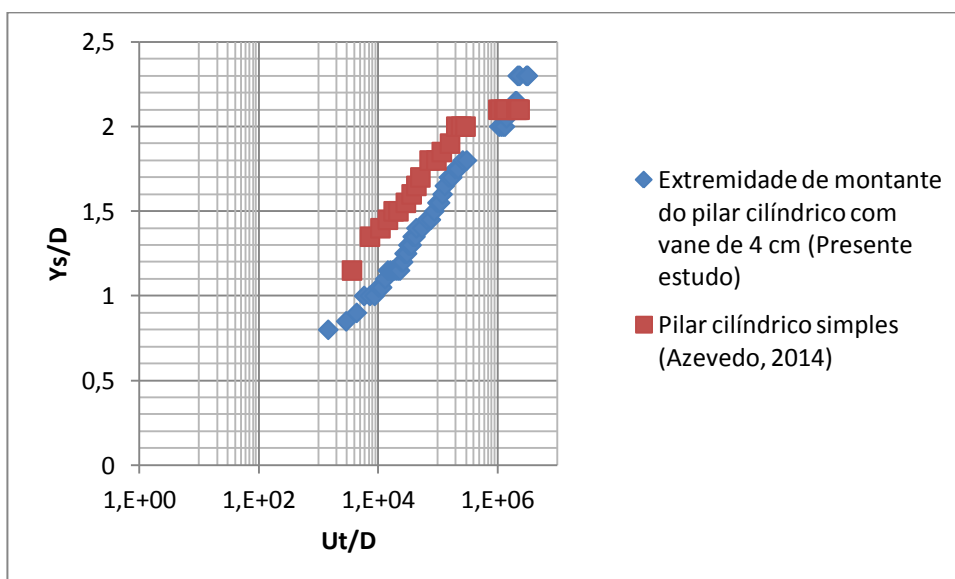


Figura 4.22 Análise comparativa do presente estudo com estudo de Azevedo (2014) no caso de pilar cilíndrico com *vane* de 4 cm

Na presente análise comparativa entre pilar alongado com *vane* aplicada e pilar alongado simples no caso de pilar alongado com *vane* de 4 cm (figura 4.23), observa-se que a cavidade de erosão do presente estudo começa a evoluir mais cedo do que o estudo de Azevedo (2014), mantendo no entanto sempre valores inferiores durante todas as fases.

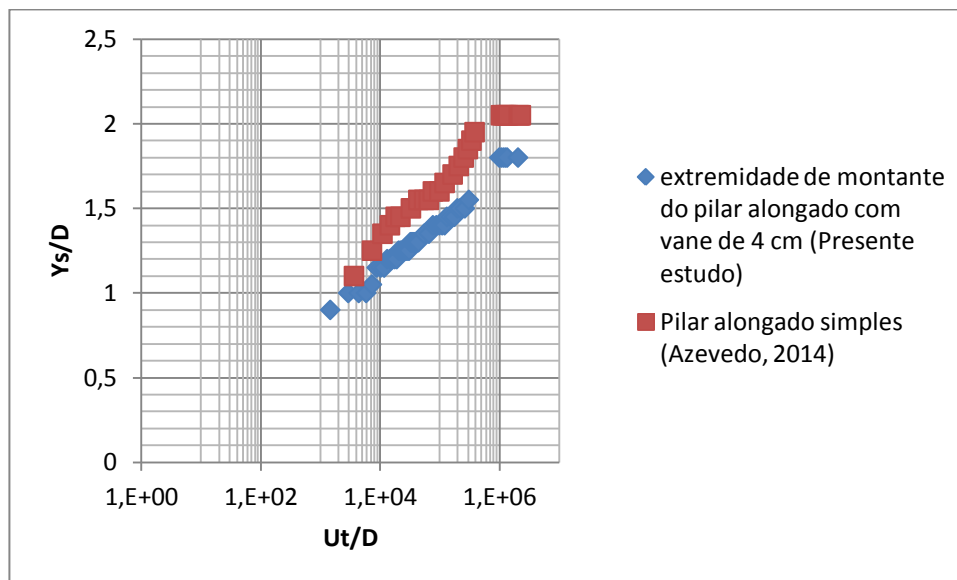


Figura 4.23 Análise comparativa do presente estudo com estudo de Azevedo (2014) no caso de pilar alongado com *vane* de 4 cm

Na presente análise comparativa entre o presente estudo e o estudo levado a cabo por Azevedo (2014) no caso de pilar cilíndrico com *vane* de 6 cm (figura 4.24), verifica-se uma ligeira aproximação na fase inicial do ensaio e na fase de equilíbrio. O presente estudo manteve sempre os valores de cavidade erodida inferiores em relação a Azevedo (2014).

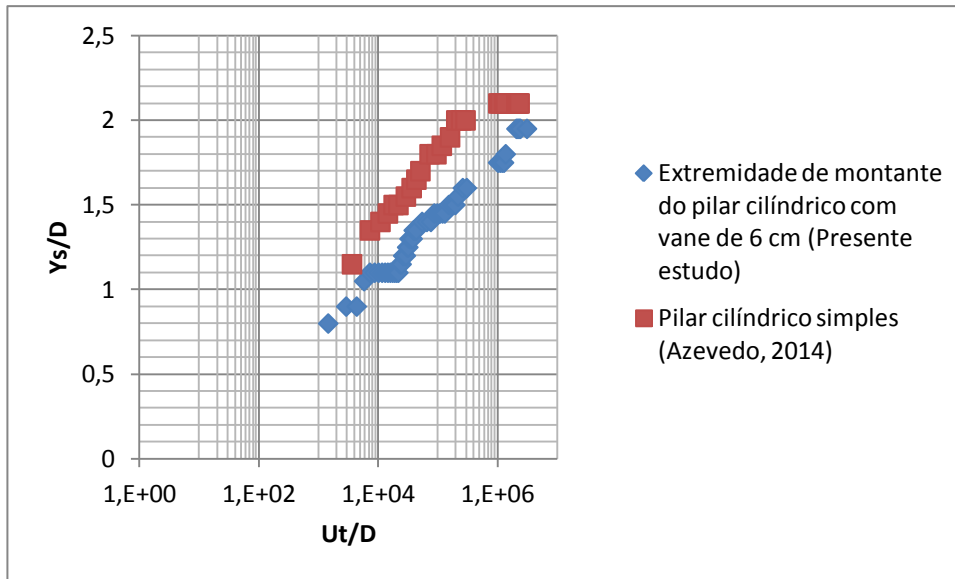


Figura 4.24 Análise comparativa do presente estudo com estudo de Azevedo (2014) no caso de pilar cilíndrico com *vane* de 6 cm

Nesta análise comparativa no caso de pilar alongado com *vane* de 6 cm (figura 4.25) é possível verificar que a cavidade erodida do presente estudo se iniciou mais cedo em relação a Azevedo (2014). Em ambos os ensaios os valores obtidos mostraram-se muito semelhantes nas duas primeiras fases. Na fase de equilíbrio os resultados da cavidade erodida do presente estudo superaram o estudo de Azevedo (2014).

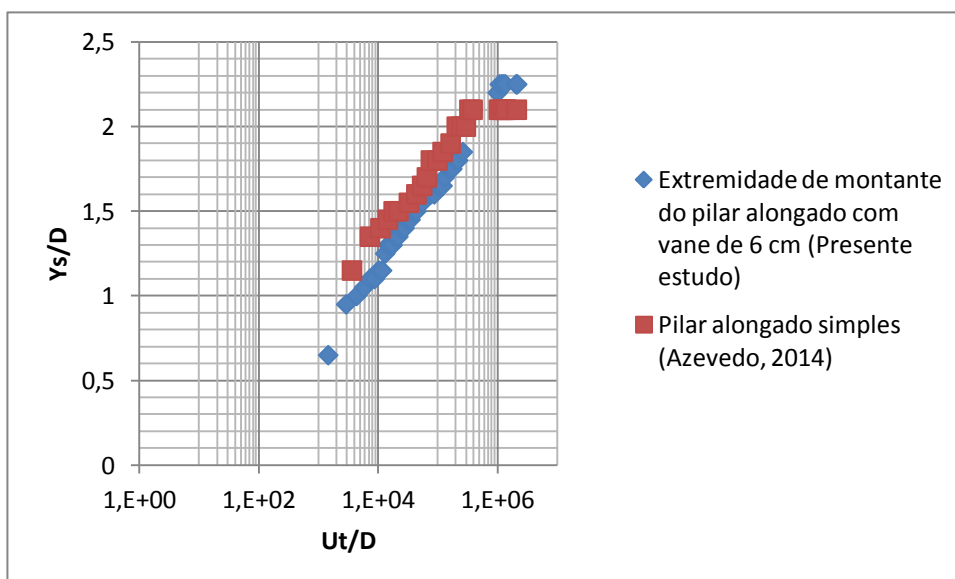


Figura 4.25 Análise comparativa do presente estudo com estudo de Azevedo (2014) no caso de pilar cilíndrico com *vane* de 6 cm

Para assegurar uma melhor análise comparativa entre os resultados obtidos nos dois estudos, procedeu-se à elaboração da tabela 4.27 onde se apresentam os valores da profundidade máxima da cavidade de erosão na fase de equilíbrio, assim como a respetiva percentagem de redução (r).

Pilar	Presente estudo	Azevedo(2014)	$\frac{Ys\ cil\acute{m}drico - Ys}{Ys\ cil\acute{m}drico} \times 100$ r[%]
	Ys	Ys cil\acute{m}drico	
Cil\acute{m}drico c/ vane de 2cm	40	42	4,8
Cil\acute{m}drico c/ vane de 4cm	46		-
Cil\acute{m}drico c/ vane de 6cm	39		7,1
Pilar	Ys	Ys alongado	
Alongado c/ vane de 2cm	38	41	7,3
Alongado c/ vane de 4cm	36		12,2
Alongado c/ vane de 6cm	45		-

Tabela 4.15 Comparação de valores da profundidade máxima da cavidade de erosão do presente estudo com os do estudo efetuado por Azevedo (2014).

Através da análise dos gráficos pode-se verificar que, na fase inicial, os valores obtidos nos ensaios experimentais do presente estudo foram sempre inferiores aos obtidos no estudo realizado por Azevedo (2014) para pilares simples. Na fase de equilíbrio verifica-se uma ligeira discrepância nos resultados pois através dos dados recolhidos podemos observar que há uma aparente relação entre o tamanho da *vane* e a profundidade da escavação.

Comparando os resultados da escavação máxima obtida com a medida de alteração de escoamento implementada nos pilares cil\acute{m}dricos com os resultados obtidos no pilar cil\acute{m}drico simples por Azevedo (2014), podemos verificar que à medida que se aumenta a extensão da chapa acoplada existe uma redução da profundidade máxima da cavida. A exceção acontece

para o pilar cilíndrico com *vane* de 4 cm, caso em que a escavação máxima obtida foi superior ao pilar cilíndrico simples. Esta aparente divergência pode ter ocorrido devido, por exemplo, a uma má execução do ensaio experimental condicionando assim os resultados obtidos.

No que diz respeito aos resultados obtidos com medidas de alteração de escoamento aplicadas a pilares alongados, pode-se dizer que também há uma redução da escavação máxima comparativamente ao pilar alongado simples do estudo de Azevedo (2014). Mais uma vez regista-se uma exceção para o caso do pilar alongado com *vane* acoplado de 6cm, caso em que a máxima escavação supera o valor obtido no estudo de Azevedo (2014).

Os presentes resultados podem ainda ser comparados com os resultados de Tafarojnoruz *et al.* (2012) e Ghorbani e Kells (2008). Os resultados de Ghorbani e Kells (2008) mostram que em alguns casos, a utilização de *vanes*, até pode aumentar a cavidade de erosão, especialmente quando a altura do *vane*, medida do nível do leito inicial, é maior que zero. Na sua melhor configuração, ($lv/b = 1$, $hv/h = 0$, $\alpha_v = 18,5^\circ$, $\theta_v = 30^\circ$), Ghorbani e Kells (2008) obtiveram uma eficiência na redução de escavação até 87,7%. Tafarojnoruz *et al.* (2012) utilizaram os mesmos parâmetros geométricos recomendados por Ghorbani e Kells (2008). A máxima redução da escavação nas imediações do pilar obtida por Tafarojnoruz *et al.* (2012) foi de 12,4%. Os valores obtidos no presente estudo, no caso do pilar cilíndrico, são inferiores, o que indica que a presente configuração dos *vanes* é menos eficaz na redução da máxima cavidade de erosão.

4.2 Análise da configuração das cavidades de erosão localizada

Apresenta-se a configuração da cavidade de erosão para os pilares cilíndrico e alongado no caso de *vanes* de 2 cm (subsecção 4.2.1), *vanes* de 4 cm (subsecção 4.2.2) e *vanes* de 6 cm (subsecção 4.2.3). A comparação entre os diferentes casos estudados é apresentada na subsecção 4.2.4, enquanto que na subsecção 4.2.5 se comparam os resultados obtidos com os de Azevedo (2014).

Através dos dados provenientes da digitalização efetuada com o equipamento *Roland's 3D Laser Scanner LPX-600* e com a ajuda do software *AutoCAD 2016* e *Geomagic Design*, foi possível a visualização em 3D dos moldes resultantes de cada ensaio, tendo sido efetuada a análise da topografia da cavidade de erosão recorrendo ao traçado das respectivas curvas de nível.

4.2.1 *Vane* de 2 cm

- **Pilar cilíndrico**

As figuras 4.26 e 4.28 representam imagens obtidas do estudo da configuração da cavidade de erosão do pilar circular com *vane* de 2 cm, através do *software* Geomagic Design. É possível observar que a cavidade de erosão é simétrica em relação ao plano de simetria longitudinal do pilar. Verifica-se também uma maior escavação a montante do pilar, atingindo aproximadamente uma profundidade de 4 cm, do que a jusante deste (figura 4.27).

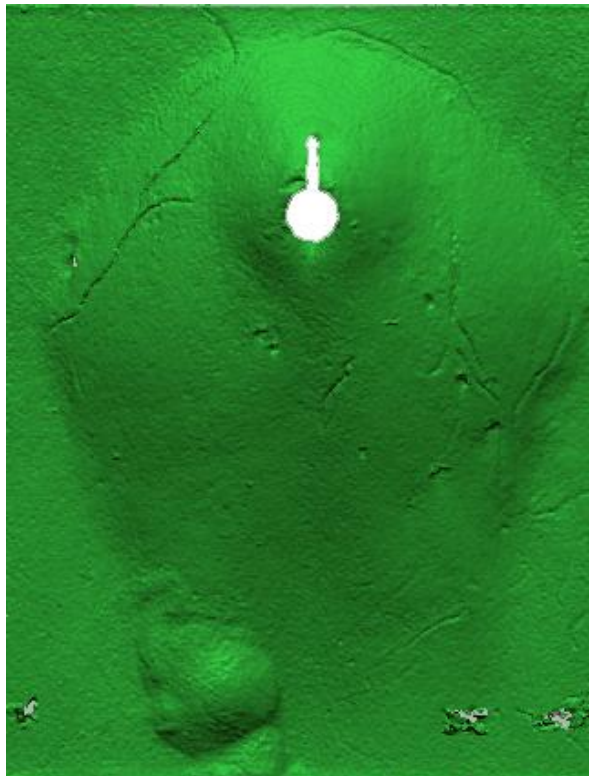


Figura 4.26 Molde da cavidade de erosão do pilar cilíndrico com *vane* de 2 cm

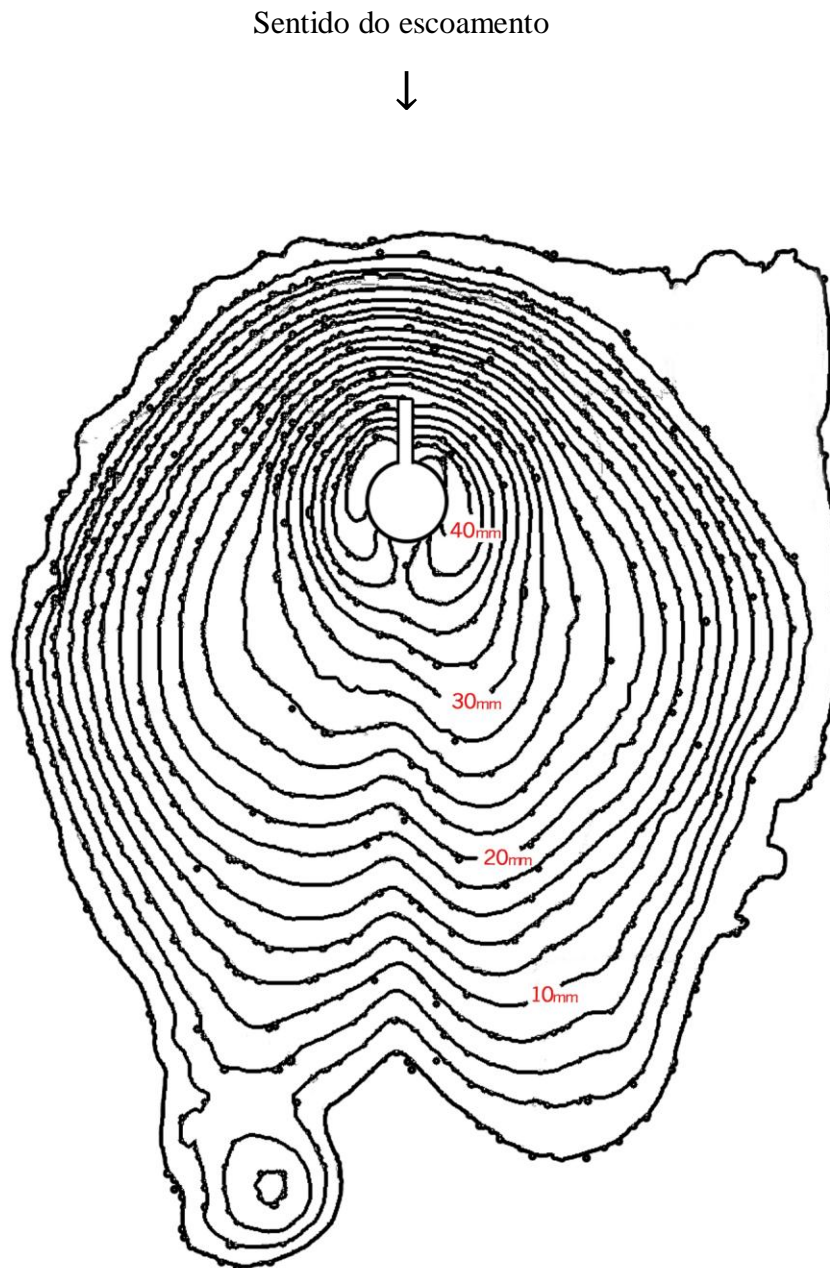


Figura 4.27 Curvas de nível com espaçamento de 2 mm (pilar cilíndrico com *vane* de 2 cm).

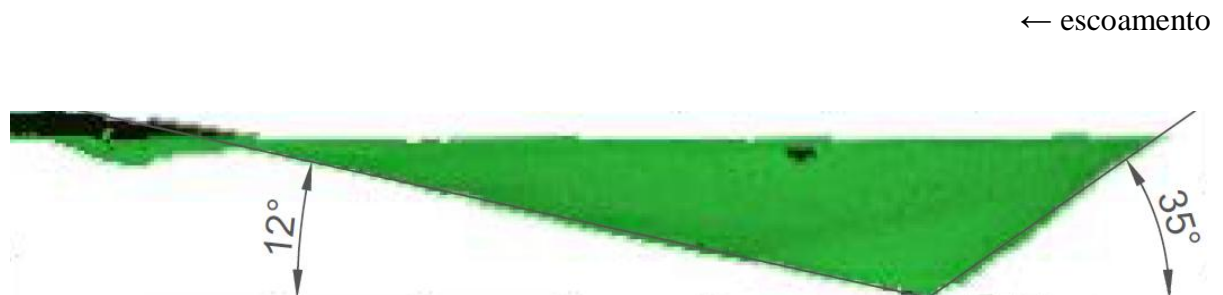


Figura 4.28 Medição dos ângulos formados no perfil longitudinal (pilar cilíndrico com *vane* de 2 cm)

Através da figura 4.28 pode-se verificar que há uma maior erosão a montante do pilar o que origina, conseqüentemente, uma maior inclinação do talude comparativamente com a observada a jusante do pilar. É também verificado que a extensão da cavidade de erosão não está confinada exclusivamente a imediatamente a montante do pilar mas também atinge grande parte da sua extensão longitudinal. Em análise à figura 4.27 é ainda possível verificar que, imediatamente a jusante do pilar, existe uma deposição de sedimentos conseqüente dos vórtices de esteira. Verifica-se também que a extensão lateral da cavidade erosiva é maior a jusante do pilar do que a montante deste. Como é possível observar na figura 4.28 o ângulo formado imediatamente a montante do pilar entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial de areia é de aproximadamente 35° , enquanto que a jusante é de 12° .

- Pilar alongado

As figuras 4.29 e 4.31 representam imagens obtidas do estudo da configuração da cavidade de erosão do pilar alongado com *vane* de 2 cm, através do *software* Geomagic Design. É possível verificar que, tal como no ensaio anterior, a cavidade de erosão é simétrica em relação ao plano de simetria longitudinal do pilar.

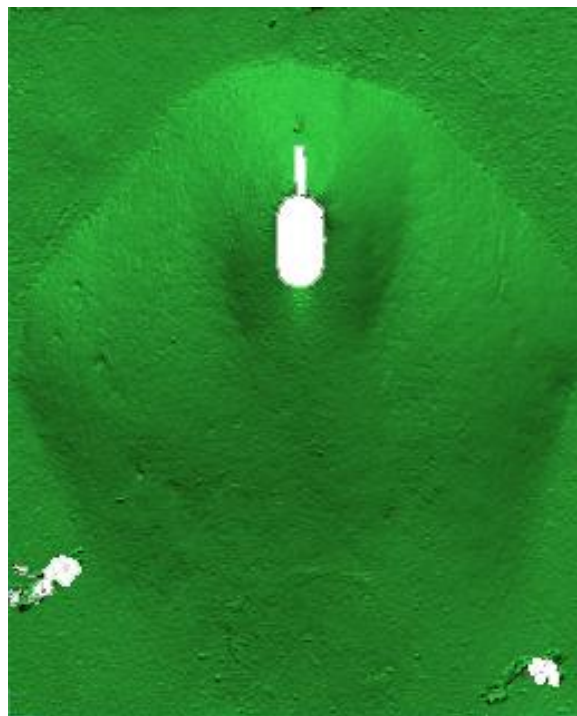


Figura 4.29 Molde da cavidade de erosão do pilar alongado com *vane* de 2 cm.

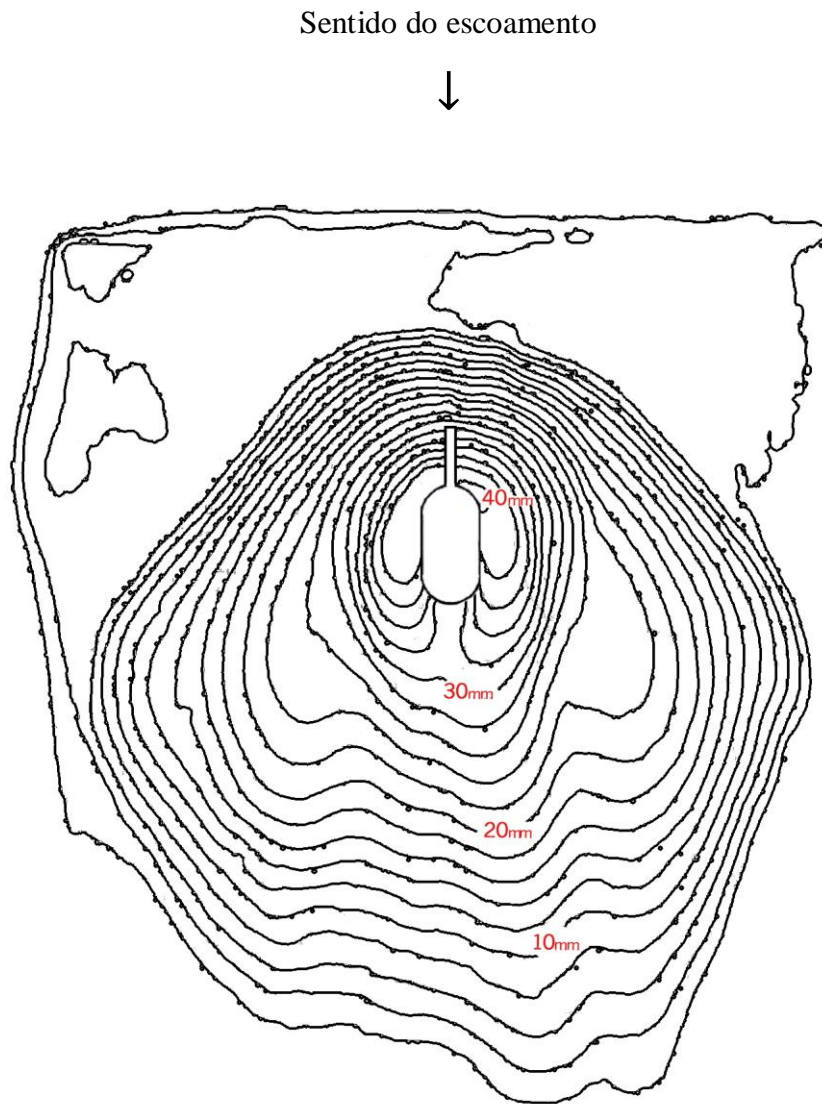


Figura 4.30 Curvas de nível com espaçamento de 2 mm (pilar alongado com *vane* de 2 cm).

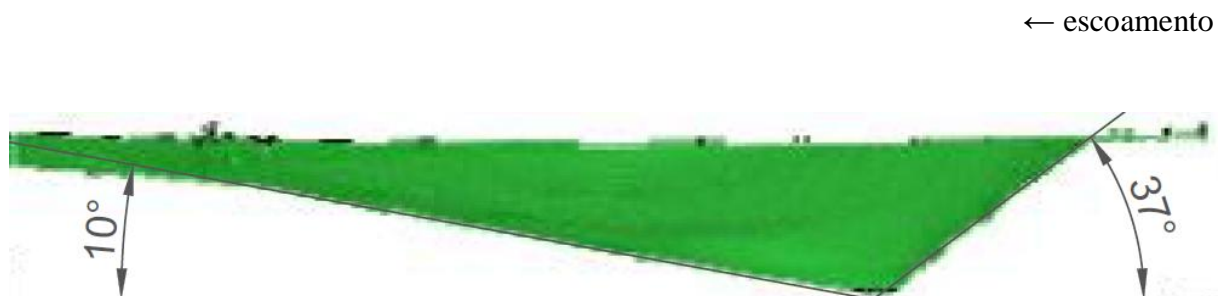


Figura 4.31 Medição dos ângulos formados no perfil longitudinal (pilar alongado com *vane* de 2 cm)

Na figura 4.30 observa-se uma maior profundidade de escavação imediatamente a montante do pilar, atingindo cerca de 4 cm, correspondendo aproximadamente ao valor determinado através da medição na régua do *vane*, do que a jusante do pilar. Com a ajuda da imagem é facilmente perceptível uma escavação significativamente mais acentuada imediatamente a montante do pilar comparativamente à observada a jusante do mesmo. Assim como no ensaio anterior, podemos observar que a extensão lateral da cavidade erosiva é maior a jusante do pilar do que a montante deste. Pode-se observar na figura 4.31 que o ângulo formado entre o talude da cavidade de erosão e o nível inicial de areia a montante do pilar origina um ângulo de valor aproximado de 37° , já a jusante o valor fica-se pelos 10° .

4.2.2 Vane de 4 cm

- Pilar cilíndrico

As figuras 4.32 e 4.34 representam imagens obtidas do estudo da configuração da cavidade de erosão do pilar circular com *vane* de 4 cm, através do *software* Geomagic Design. De acordo com a figura 4.32, a escavação não é aparentemente simétrica em relação ao plano de simetria longitudinal do pilar.

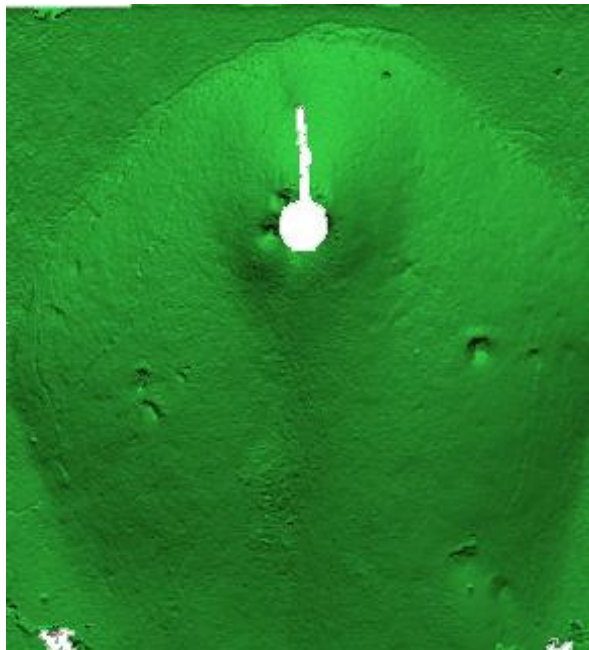


Figura 4.32 Molde da cavidade de erosão do pilar cilíndrico com *vane* de 4 cm.

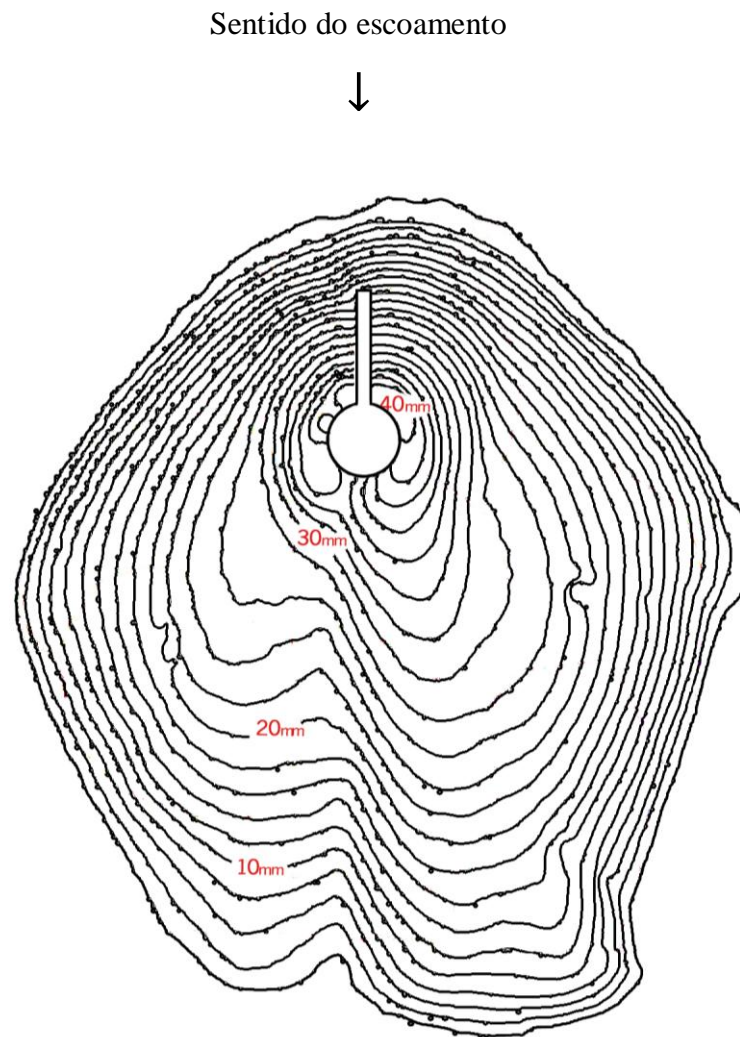


Figura 4.33 Curvas de nível com espaçamento de 2 mm (pilar cilíndrico com *vane* de 4 cm).

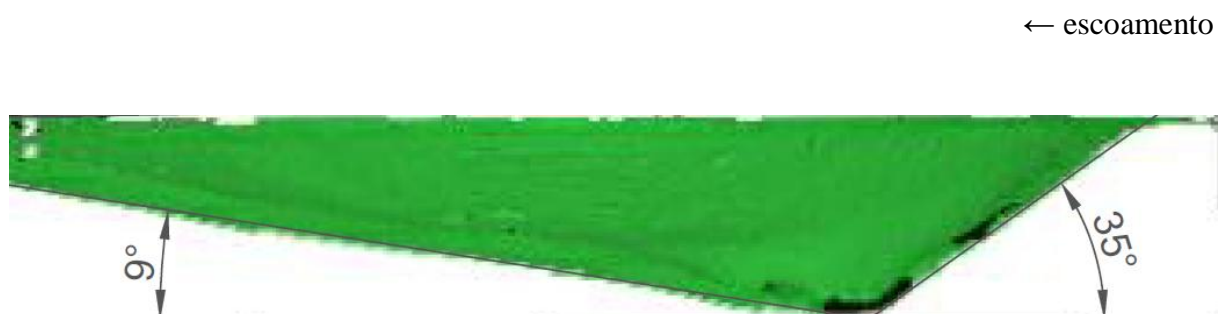


Figura 4.34 Medição dos ângulos formados no perfil longitudinal (pilar cilíndrico com *vane* de 4 cm)

Como facilmente se verifica através da figura, ocorreu uma erosão mais acentuada imediatamente a montante do pilar do que a jusante do mesmo, o que origina por consequência um maior declive da cavidade erodida. Através da figura 4.33 verifica-se que a escavação a montante do pilar atingiu um valor de 4,4 cm ao contrário do valor de 4,6 cm determinado através da medição na régua do *vane*. Esta não simetria e disparidade entre os valores determinados pela régua e pelo molde pode explicar o facto de quando se utilizou essa medida da profundidade máxima da cavidade de erosão não se ter obtido uma redução face aos resultados em pilares cilíndricos simples (subsecção 4.1.5). Verifica-se ainda que a extensão lateral da cavidade de erosão é significativamente maior a jusante do pilar do que a montante deste. Pode-se verificar igualmente deposição de sedimentos de esteira, à semelhança dos casos dos pilares anteriormente apresentados. Na figura 4.34 apresenta-se o perfil longitudinal da cavidade de erosão e os ângulos formados pelas cavidades erodidas, entre o fundo do leito da concavidade e o talude formado. A montante foi obtido aproximadamente um ângulo de 35°, a jusante o ângulo obtido foi de 9°.

- Pilar alongado

As figuras 4.35 e 4.37 representam imagens obtidas do estudo da configuração da cavidade de erosão do pilar alongado com *vane* de 4 cm, através do *software Geomagic Design*.

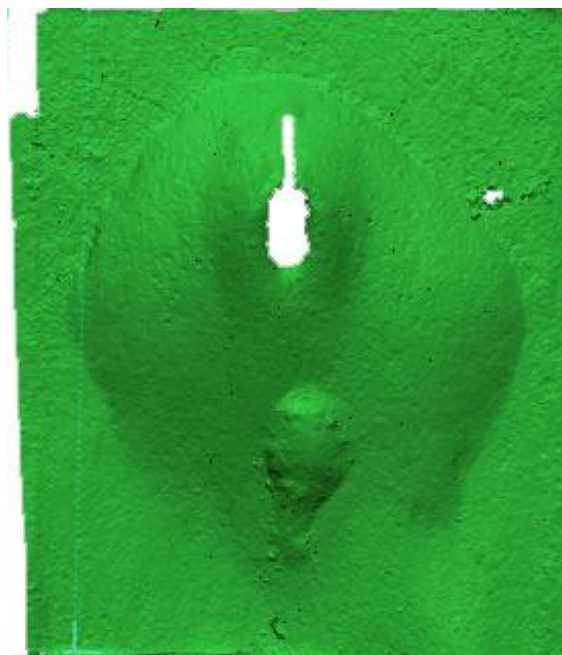


Figura 4.35 Molde da cavidade de erosão do pilar alongado com *vane* de 4 cm.

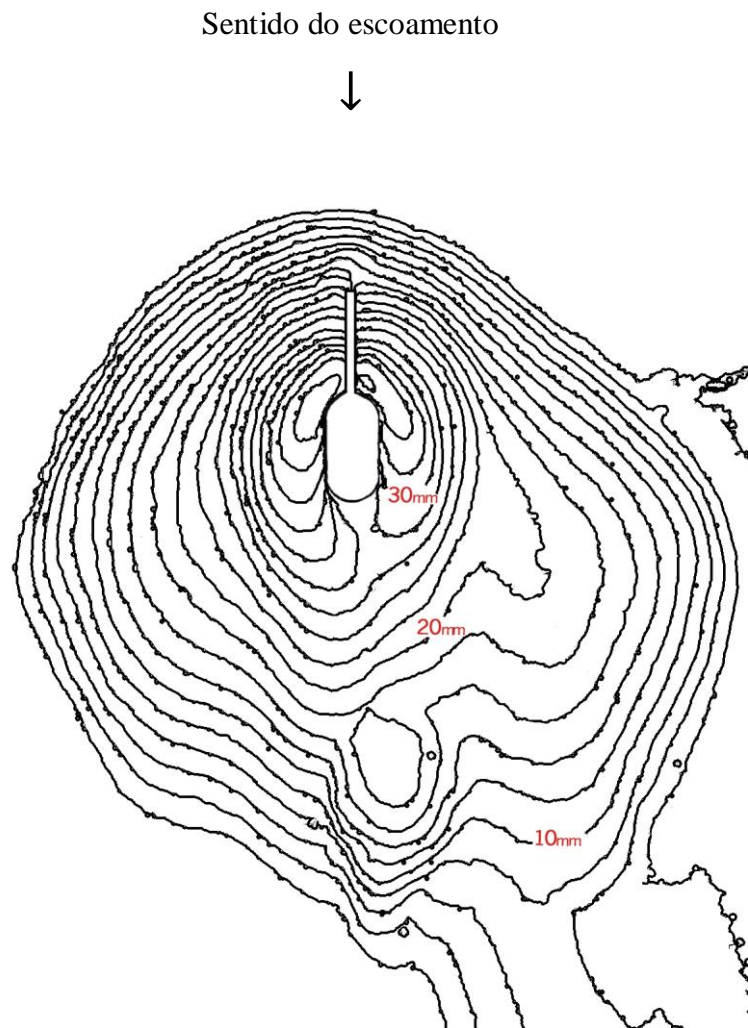


Figura 4.36 Curvas de nível com espaçamento de 2 mm (pilar alongado com *vane* de 4 cm).

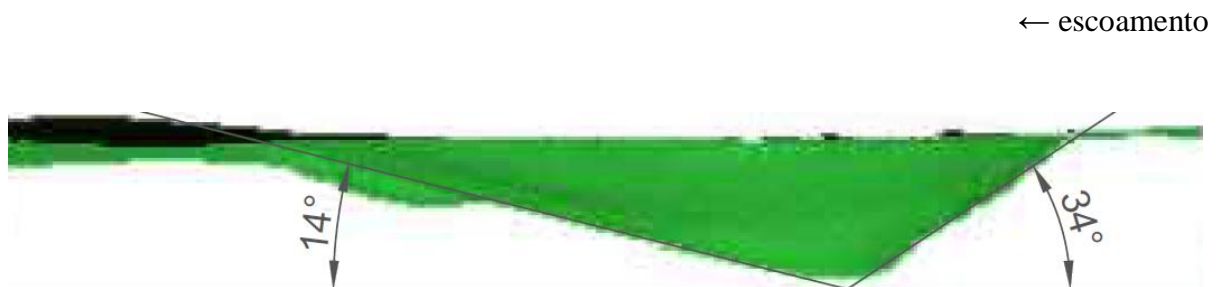


Figura 4.37 Medição dos ângulos formados no perfil longitudinal (pilar alongado com *vane* de 4 cm)

Pela análise da figura 4.35 pode-se verificar que a configuração da cavidade de erosão não é totalmente simétrica. Mantendo o padrão dos anteriores ensaios, tanto a profundidade de erosão como a acentuação do declive, é maior imediatamente a montante do pilar do que a jusante. A extensão lateral erodida é maior a jusante do pilar do que a montante deste. Através da imagem 4.36 observa-se que a erosão atingiu uma profundidade de 3,6 cm, o que está em conformidade com o valor determinado através da medição na régua do *vane*. Na imagem 4.37 apresentam-se os ângulos formados entre o fundo do leito da cavidade erodida e nível inicial de areia, aproximadamente iguais a 34° a montante e 14° a jusante.

4.2.3 *Vane* de 6 cm

- Pilar cilíndrico

As figuras 4.38 e 4.40 representam imagens obtidas do estudo da configuração da cavidade de erosão do pilar circular com *vane* de 6 cm, através do software *Geomagic Design*. A configuração apresentada na figura 4.38 evidencia igualmente uma cavidade de erosão simétrica.

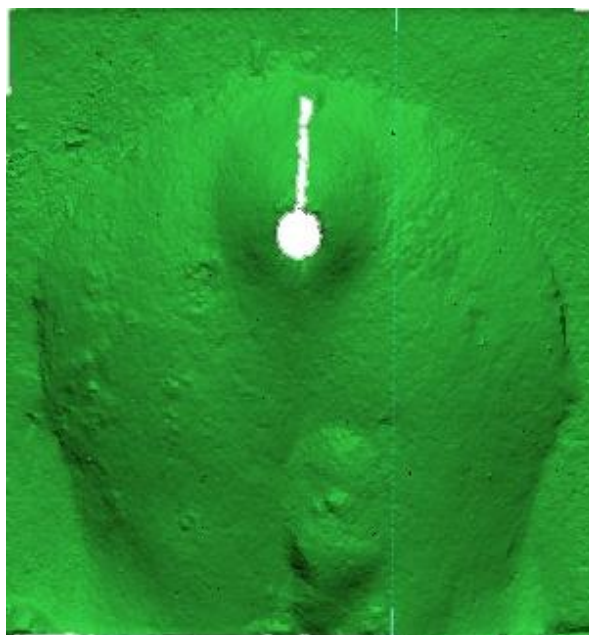


Figura 4.38 Molde da cavidade de erosão do pilar cilíndrico com *vane* de 6 cm

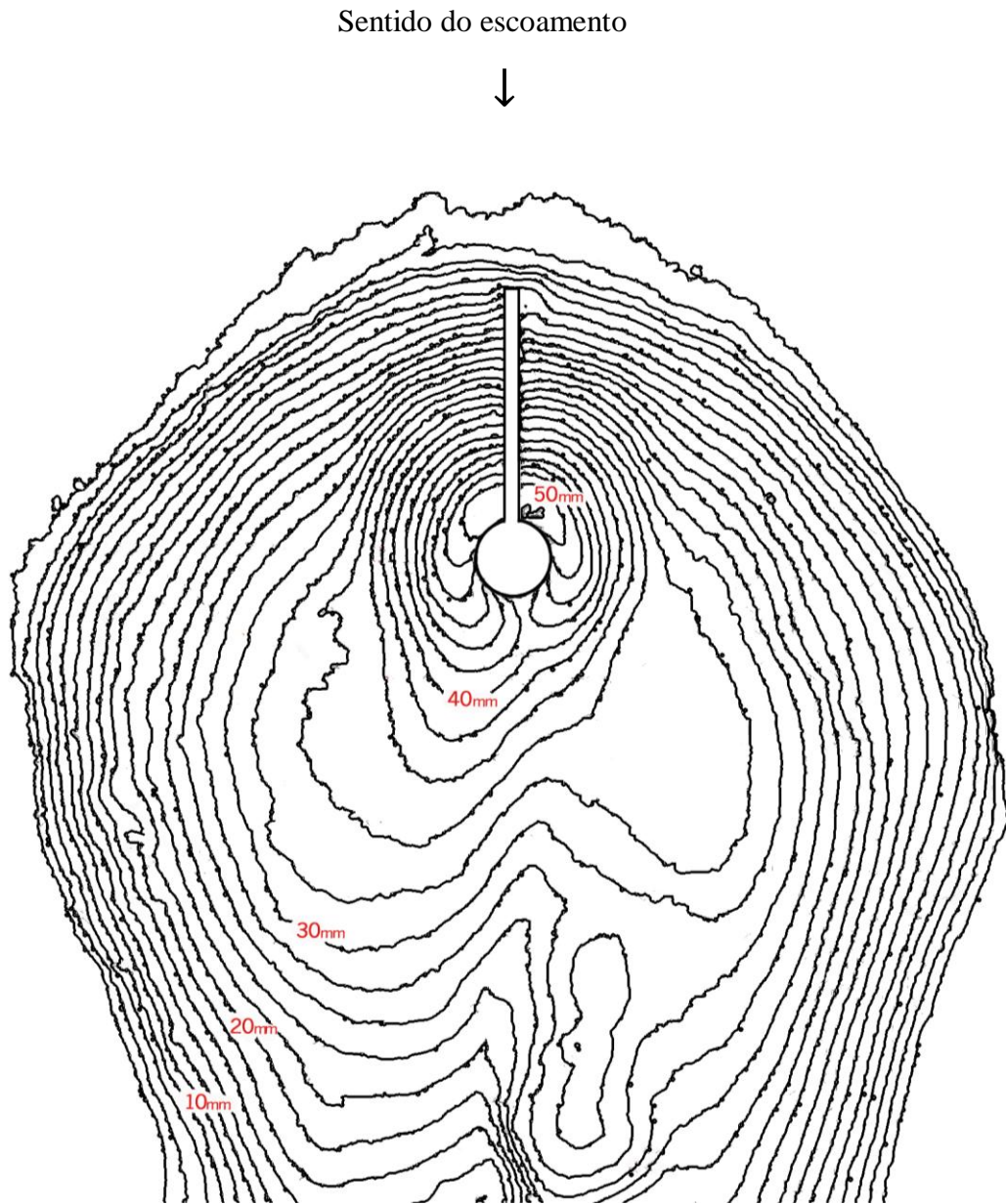


Figura 4.39 Curvas de nível com espaçamento de 2 mm (pilar cilíndrico com vane de 6 cm).



Figura 4.40 Medição dos ângulos formados no perfil longitudinal (pilar cilíndrico com vane de 6 cm)

Tal como nos outros ensaios experimentais, a profundidade máxima da cavidade de erosão localiza-se imediatamente a montante do pilar. Com a ajuda da figura 4.40 pode-se verificar uma vez mais que a inclinação do talude da cavidade erodida é muito mais acentuada a montante do que a jusante. Na figura 4.39 é possível observar que houve maior erosão num dos lados do *vane*. A maior extensão lateral erodida localiza-se a jusante do pilar onde se verifica também a existência de deposição de sedimentos imediatamente a jusante deste. Através da figura 4.39 pode-se determinar um valor da profundidade de erosão de 5 cm, muito superior aos 3,9 cm determinados através da medição na régua do *vane* talvez por dificuldades em fazer a leitura ou por ter erodido mais no lado oposto ao daquele onde a medição era efetuada. Como é indicado na figura 4.40, o ângulo formado entre o fundo do leito da cavidade erodida e do nível inicial de areia é de aproximadamente 35° a montante do pilar e 14° a jusante do mesmo.

- Pilar alongado
-

As figuras 4.41 e 4.43 representam imagens obtidas do estudo da configuração da cavidade de erosão do pilar alongado com *vane* de 6 cm, através do *software Geomagic Design*. A morfologia apresentada pela figura 4.41 é ligeiramente simétrica em relação ao plano de simetria longitudinal do pilar.

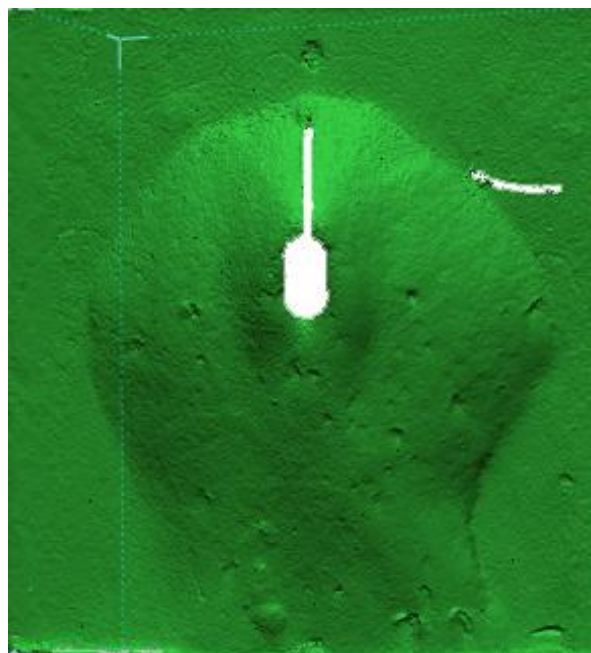


Figura 4.41 Molde da cavidade de erosão do pilar alongado com *vane* de 6 cm.

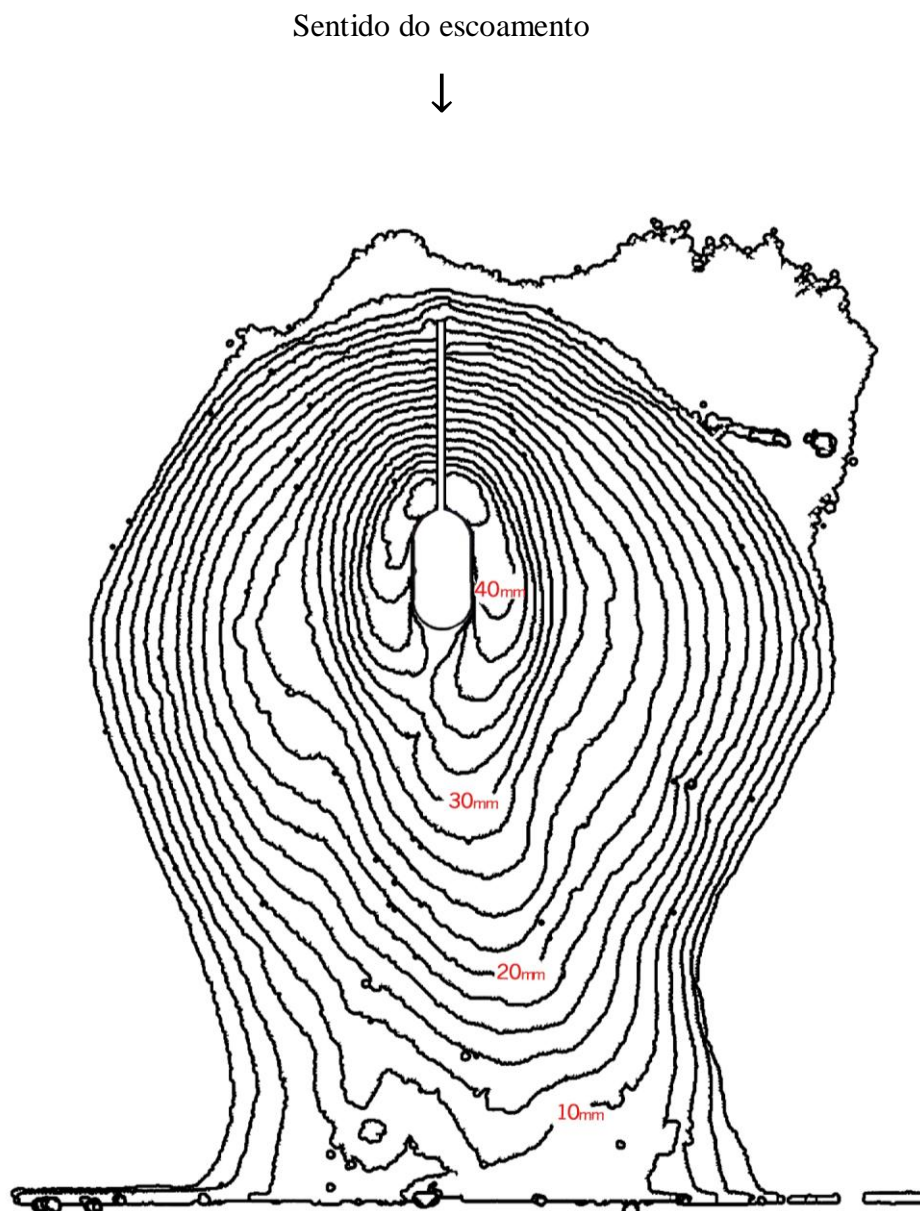


Figura 4.42 Curvas de nível com espaçamento de 2 mm (pilar alongado com vane de 6 cm).

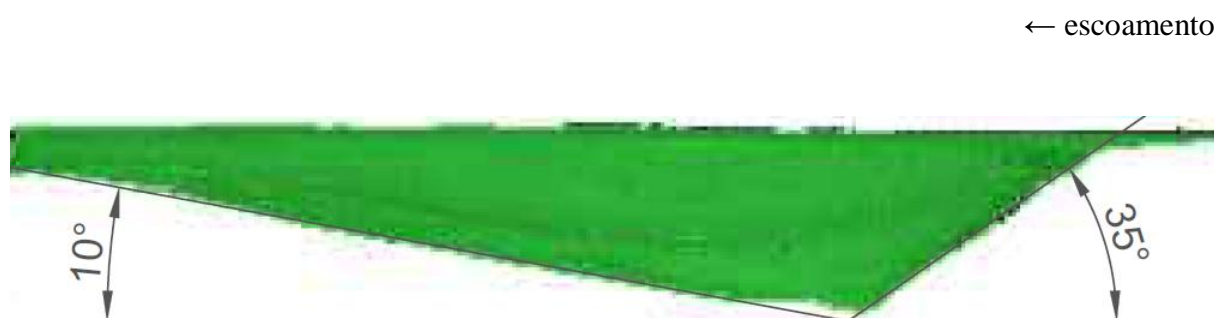


Figura 4.43 Medição dos ângulos formados no perfil longitudinal (pilar alongado com vane de 6 cm)

Como é facilmente perceptível na figura 4.43, a zona de maior erosão e de declive mais acentuado é imediatamente a montante do pilar. Neste ensaio experimental, a zona de erosão de maior extensão lateral localiza-se imediatamente a jusante do pilar. Com a ajuda da figura 4.42 é possível estimar uma profundidade de erosão igual a 4,2 cm imediatamente a montante do pilar. A figura 4.43 apresenta o perfil longitudinal da cavidade de erosão. Como é possível observar, o ângulo formado entre o fundo do leito da cavidade erodida e do nível inicial de areia é de aproximadamente 35° a montante do pilar e 10° a jusante deste.

4.2.4. Análise comparativa entre ensaios

De forma a comparar entre si os diferentes ensaios mediram-se os ângulos formados entre o fundo do leito da cavidade erodida e do nível inicial de areia, a montante e a jusante do perfil longitudinal do eixo do pilar. Os resultados estão apresentados na tabela 4.16.

Pilar	Ângulos formados	
	Jusante	Montante
Cilíndrico <i>c/ vane</i> 2cm	12°	35°
Alongado <i>c/ vane</i> 2cm	10°	37°
Cilíndrico <i>c/ vane</i> 4cm	9°	35°
Alongado <i>c/ vane</i> 4cm	14°	34°
Cilíndrico <i>c/ vane</i> 6cm	14°	35°
Alongado <i>c/ vane</i> 6cm	10°	35°

Tabela 4.16 Ângulos formados pelo talude imediatamente a montante e jusante do pilar

Apesar de serem utilizados *vanes* com diferentes dimensões acoplados a montante dos pilares, os valores dos ângulos do talude da cavidade de erosão formados apresentam alguma conformidade entre eles. O declive máximo a montante é-nos apresentado pelo pilar alongado com chapa de 2 cm com um valor de 37°. A jusante os resultados já apresentam uma maior variação nos valores. É significativa a diferença de inclinação máxima entre taludes formados a montante e jusante sendo que é a montante onde são apresentados declives mais acentuados. Pela observação dos perfis longitudinais da cavidade erodida é possível verificar-se que a extensão das cavidades é menor a montante do que a jusante dos pilares devido ao

desprendimento de vórtices de esteira, embora seja a montante apresentado onde se observa maior profundidade de escavação.

A tabela 4.17 apresenta os valores obtidos sobre a máxima extensão erodida a montante e jusante do pilar:

Tipo de pilar	Extensão erodida a montante(cm)	Extensão erodida a jusante(cm)
Cilíndrico c/ <i>vane</i> de 2cm	6,6	19
Alongado c/ <i>vane</i> de 2cm	4,8	17
Cilíndrico c/ <i>vane</i> de 4cm	6	14,6
Alongado c/ <i>vane</i> de 4cm	5	14,8
Cilíndrico c/ <i>vane</i> de 6cm	6,4	18
Alongado c/ <i>vane</i> de 6cm	7,2	19,8

Tabela 4.17 Extensão da erosão obtida a montante e jusante do pilar

Na secção a montante do pilar foi obtida uma extensão máxima de erosão de 7,2 cm para o pilar alongado com *vane* de 6 cm. No que diz respeito à mínima extensão obtida a montante, foi conseguida para o pilar alongado com *vane* de 2 cm com uma extensão de erosão de 4,8 cm. A máxima extensão erodida a jusante foi conseguida com o pilar alongado com *vane* de 6 cm onde foi obtida uma extensão de 19,8 cm. A mínima extensão obtida a jusante do pilar pertence ao pilar cilíndrico com *vane* de 4 cm com um valor de 14,6 cm.

4.2.5 Comparação com os resultados de Azevedo (2014)

Procedeu-se a uma análise comparativa entre os ângulos dos taludes formados no presente estudo e os determinados no estudo feito por Azevedo(2014) (tabela 4.18). Como pode ser verificado da tabela, a implementação da medida de mitigação do presente estudo não originou uma mudança significativa dos ângulos formados entre o fundo do leito da cavidade erodida e o nível inicial de areia.

	Presente estudo		Azevedo	
Pilar	Ângulo(°)		Ângulo(°) cilíndrico	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Cilíndrico c/ vane de 2cm	35°	12°	37°	13°
Cilíndrico c/ vane de 4cm	35°	9°		
Cilíndrico c/ vane de 6cm	35°	14°		
Pilar	Ângulo(°)		Ângulo(°) alongado	
Alongado c/ vane de 2cm	37°	10°	35°	13°
Alongado c/ vane de 4cm	34°	14°		
Alongado c/ vane de 6cm	35°	10°		

Tabela 4.18 Comparação entre os ângulos do talude formados pela escavação nas imediações do pilar no presente estudo de Azevedo (2014).

5. CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente capítulo apresenta um resumo das principais conclusões da dissertação bem como algumas sugestões para a realização de futuros trabalhos.

5.1 Conclusões

A fase inicial do presente trabalho teve como objetivo a análise da evolução da profundidade máxima da cavidade de erosão com a utilização de pilares de diferentes geometrias e medidas de alteração do escoamento. Deste modo foi possível concluir que:

- a profundidade da cavidade de erosão evolui mais rapidamente na fase inicial do processo erosivo;
- a fase de menor duração do processo erosivo é sempre a fase inicial;
- exceto para o pilar cilíndrico com *vane* de 4 cm acoplado, a fase de maior duração para todos os ensaios é a fase de equilíbrio;
- no geral, em comparação com o estudo de Azevedo (2014) para pilares simples, foi conseguida uma redução da profundidade máxima da cavidade de erosão tanto para pilares alongados como para cilíndricos;
- foi obtida uma maior profundidade da cavidade de erosão para o pilar cilíndrico com *vane* de 4 cm acoplado;
- no âmbito geral o pilar alongado apresentou melhores resultados do que o pilar cilíndrico, para as mesmas medidas de mitigação implementadas.

No que diz respeito à extração e levantamento das características dos moldes da profundidade máxima da cavidade erodida foi possível concluir que:

- devido à utilização de moldes vaselina e parafina foi possível efetuar uma análise topográfica da cavidade de erosão;

- embora com algumas discrepâncias pontuais, as profundidades de erosão determinadas com base nos moldes estavam em concordância com valores medidos na régua do *vane*, evidenciando um grau de aproximação razoável;
- a profundidade máxima da cavidade erodida situa-se sempre imediatamente a montante de cada pilar;
- os ângulos dos taludes originados devido à atividade erosiva são sempre maiores imediatamente a montante dos pilares do que a jusante;
- em comparação com o estudo dos pilares cilíndricos simples de Azevedo (2014), houve uma ligeira diminuição do ângulo do talude formado imediatamente a montante dos pilares cilíndricos com medidas de alteração do escoamento. Nos pilares alongados os resultados não foram tão conclusivos;
- a extensão da cavidade erodida é sempre maior a jusante dos pilares do que a montante destes.

5.2 Sugestões para futuros trabalhos

De forma a se poder obter um conhecimento mais abrangente sobre o fenómeno da erosão localizada, deixam-se as seguintes sugestões:

1. utilização de equipamentos de medição da profundidade máxima da cavidade de erosão e/ou de registo contínuo de maior sofisticação;
2. utilização de pilares compostos por material semelhante ao utilizado nos rios para perceber se a rugosidade do material irá influenciar a escavação;
3. utilização de medidas de mitigação da erosão localizada inovadoras;
4. variações do valor do caudal durante o ensaio experimental;

BIBLIOGRAFIA

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

Breusers, H. N. C. e Raudkivi, A. J. (1991). Scouring, hydraulic structures design manual. *IAHR, AA Balkema, Rotterdam, 143.*

Chadwick, A., Morfett, J. e Borthwick, M. (2013). *Hydraulics in civil and environmental engineering*. Crc Press.

Chiew, Y. (1992). Scour Protection at Bridges Piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, vol.118, no.9, pp. 1260-9

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

Dey, S., Sumer, B. M. e Fredsøe, J. (2006). Control of scour at vertical circular piles under waves and current. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(3), 270-279.

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

El-Ghorab, E. A. S. (2013). Reduction of scour around bridge piers using a modified method for vortex reduction. *Alexandria Engineering Journal*, 52(3), 467-478.

Grimaldi, C., Gaudio, R., Calomino, F. e Cardoso, A. H. (2009). Countermeasures against local scouring at bridge piers: slot and combined system of slot and bed sill. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(5), 425-431.

Gaudio, R., Tafarjnoruz, A. e Calomino, F. (2012). Combined flow-altering countermeasures against bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Research*, 50(1), 35-43.

Hill, D. F., e Younkin, B. D. (2006). PIV measurements of flow in and around scour holes. *Experiments in fluids*, 41(2), 295-307.

Jahangirzadeh, A., Hossein, B., Akib, S., Karami, H., Naji, S. e Shamshirband, S. (2014). Experimental and Numerical Investigation of the Effect of Different Shapes of Collars on the Reduction of Scour around a Single Bridge Pier, *Scholarly Journals PLoSOne*, vol. 9, no. 6

Lima, M. M. C. L. (2008). Estudo Experimental da Erosão Localizada na Proximidade de Pilares de Pontes, *Revista Engenharia Civil da Universidade do Minho*, 33, 41–52

Lima, M. M. C. L. e Costa, D. F. (2009). Configuração e Evolução Temporal da Cavidade de Erosão Localizada na Proximidade de Pilares de Pontes, In *III Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia-MEFTE 20109*.

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

Leite, E. P. M. (2010). Estudo Experimental da Erosão Localizada na Proximidade de Pilares de Pontes. Dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil da Universidade do Minho.

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. e Coleman E. S. (2000). Bridge Scour. *Highlands Ranch: Water Resources Publications, LLC*.

Beg, M. e Beg, S. (2013). Scour reduction around bridge piers: A review. *International Journal of Engineering Inventions*, 2(7), 7-15

Ramos, P. X., Pêgo, J. P. e Maia, R. (2012). Modelação Numérica do Escoamento em Torno de um Pilar , 7.^{as} *Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente*, 70–78.

Richardson, E. V. e Davis, S. R. (2001).Evaluating Scour At Bridges, *Hydraulic Engineering Circular*, (18), 378.

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.

Simarro, G., Teixeira, L. e Cardoso, A. H. (2007). Flow intensity parameter in pier scour experiments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(11), 1261-1264.

Tafarojnoruz, A., Gaudio, R. e Dey, S. (2010). Flow-altering countermeasures against scour at bridge piers: a review. *Journal Hydraulic Research*

Tafarojnoruz, A., Gaudio, R. e Calomino, F. (2012). Evaluation of flow-altering countermeasures against bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(3), 297-305.

(2017). *Roland DG Corporation*. Acedido a 19 April 2017, através de <http://www.rolanddg.com/product/3d/3d/lpx-ds/index.html>

(2017). *Gunt.de*. Acedido a 19 April 2017, através de http://www.gunt.de/index.php?option=com_gunt&task=gunt.list.category&lang=es&category_id=179&product_id=722

