

## ESTUDO EXPERIMENTAL DE EROSÕES LOCALIZADAS JUNTO DE PILARES COMPLEXOS Experimental Study of Localized Scour at Complex Pillars

LUÍS BRITO <sup>(1)</sup>, JOÃO PEDRO PÊGO <sup>(2)</sup> e RODRIGO MAIA <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Estudante do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, ec041110@fe.up.pt

<sup>(2)</sup> Professor Auxiliar, FEUP,  
Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, jppego@fe.up.pt

<sup>(3)</sup> Professor Associado, FEUP,  
Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, rmaia@fe.up.pt

### Resumo

Os principais danos em pontes ocorrem, por diversas razões, durante a ocorrência de cheias. A principal dessas razões decorre das erosões localizadas do leito fluvial junto às fundações dos pilares e dos encontros. As erosões localizadas são um fenómeno complexo induzido pelo escoamento gerado em redor dessas singularidades.

Com o presente estudo pretendeu-se caracterizar a erosão localizada em grupos de estacas de fundação de pilares complexos, estudando o efeito do espaçamento entre estacas e o alinhamento destas com a direção do escoamento. O comportamento, considerando estacas circulares sem qualquer encabeçamento, é similar ao de um conjunto de pilares circulares.

O estudo teve como base a realização de ensaios no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade Porto onde estiveram em análise as profundidades máximas de erosão junto aos pilares nos diversos ensaios. A análise destes resultados é obtida por comparação entre as correspondentes configurações estudadas e a previsão da profundidade máxima de erosão proposta por diversas metodologias de previsão da erosão em pilares complexos.

Foram utilizadas as metodologias de previsão da profundidade máxima de erosão em pilares complexos propostas por Jones e Sheppard (1998), Melville e Coleman (2000), Richardson e Davis (2001) e pelo Bridge Scour Manual - Florida Department of Transportation (2005), pretendendo-se deste modo comparar o presente estudo com a bibliografia existente.

**Palavras-chave:** Erosão localizada, hidráulica fluvial, pilar complexo, grupos de estacas.

### Abstract

The erosion in a stream occurs in an usual form and it is more significant in periods of higher flow. This occurs locally in the presence of elements that disturb the flow, as pillars.

It is intended to characterize the local scouring on complex pillars, simulating the presence of a set of pillars with different spacing. It was also considered the influence of the angle of incidence of the flow variation.

The study was based on experiments proceeded in the Hydraulics Laboratory of the Engineering Faculty in Porto University, where the maximum depths of scour in the various cases studied were reviewed. Analysis of these results are obtained by comparing the studied experiments as by applying methods proposed for predicting the erosion pillars complex.

Methods of predicting the maximum depth of erosion in complex pillars proposed by Jones and Sheppard (1998), Melville and Coleman (2000), Richardson and Davis (2001), Bridge Scour Manual - Florida Department of Transportation (2005) were used, trying to achieve a study contemplating the existing literature.

**Keywords:** Local scour, river hydraulics, complex pillars, groups of piers.

### 1. Introdução

O fenómeno da erosão no leito aluvionar dos rios ocorre sempre que surgem velocidades do escoamento capazes de arrastar o material granular dos fundos.

A existência de obstáculos no leito do rio, para além das características topográficas do curso de água, bem como da variação natural de caudais, são fatores que influenciam e fomentam a erosão.

Esta pode ser generalizada, quando verificado um abaixamento dos fundos ao longo do leito, ou localizada, devida especificamente à presença de obstáculos ao escoamento, como curvas no traçado do leito, contração do escoamento ou pilares de pontes. O último exemplo é a causa comum do colapso de pontes. Um dos exemplos mais relevantes desse tipo ocorreu, infelizmente, em Portugal, no dia 4 de Março de 2001, em que se deu a queda da ponte Hintze Ribeiro, que fazia a ligação sobre o rio Douro, entre Entre-os-Rios e Castelo de Paiva, e de que resultaram 59 vítimas mortais.

A problemática da erosão em torno de pilares já foi abordada por vários autores que, desde meados do século passado, têm vindo a publicar diversos métodos de previsão da erosão máxima expectável a montante dos pilares. Contudo, a sua aplicação é praticamente exclusiva a pilares simples. A adoção de pilares complexos nestas estruturas teve, entre outros, fundamentos geotécnicos e económicos. No entanto, o fenómeno de erosão correspondente a estes casos é muito mais difícil de prever dada a variabilidade de configurações utilizadas, daí resultando a necessidade de aprofundar o seu estudo. Esta comunicação apresenta os resultados da investigação em relação à quantificação da profundidade máxima de erosão em redor de um conjunto de estacas, tendo sido focados o afastamento entre estacas e o seu alinhamento em relação ao escoamento.

## 2. Erosão Localizada em Pilares Isolados de Pontes

As erosões localizadas resultam da alteração do escoamento devido à introdução de um obstáculo no leito do rio, tais como pilares de pontes.

As cavidades de erosão são o resultado desses fenómenos e, nomeadamente, pelas particularidades das trajetórias do escoamento em redor do obstáculo. Como ilustrada na Figura 1, o escoamento ao incidir no pilar é conduzido em direção à sua fundação erodindo a zona a montante. Este escoamento, ao incidir no fundo, forma vórtices em forma de ferradura. No decorrer do tempo a cavidade de erosão aumenta, principalmente por efeito dos vórtices em ferradura que, entre a indução da suspensão das partículas para transporte e o deslizamento dos taludes, formam uma cavidade mais ampla e profunda.

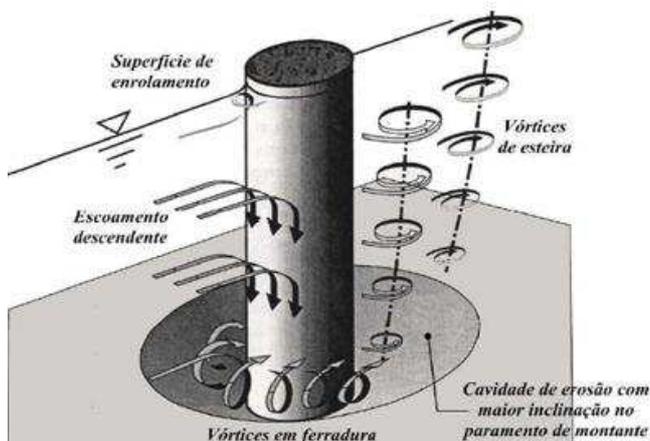


Figura 1. Escoamento, trajetórias e velocidades na proximidade de um pilar (Adaptado de Melville e Coleman, 2000).

O transporte das partículas para jusante é influenciado pelos vórtices de esteira, cujo efeito de sucção auxilia na suspensão e arrastamento das partículas. Estes acompanham o escoamento principal e apresentam sentidos de rotação alternadamente opostos ao longo do percurso até se dissiparem. A cavidade de erosão é caracterizada por apresentar um declive muito acentuado a montante e uma inclinação inferior a jusante do pilar. A profundidade máxima ou de equilíbrio, verifica-se a montante, junto ao pilar, numa zona muito restrita.

### 2.1. Fatores que influenciam a erosão localizada

A construção de barragens, dragagem de areias, derivação de caudais, e construção de pilares de pontes produzem variações aos diversos níveis, alterando assim as características naturais dos rios e influenciando em grande escala o fenómeno erosivo.

A erosão localizada, nomeadamente em pilares, está presente normalmente em regimes de cheia, visto que ocorre um aumento de caudais e de velocidades de escoamento e, deste modo, um aumento do potencial de transporte de sedimentos.

### 2.2. Pilares complexos

São denominados pilares complexos a associação de componentes do pilar (fundação, maciço de encabeçamento e pilar propriamente dito) ou um pilar de secção transversal variável.

A erosão dos pilares é afetada pela forma mais ou menos complexa que estes podem tomar. Segundo Melville e Coleman (2000) e estudos posteriores demonstraram, a variação na forma do pilar nem sempre resulta numa contribuição negativa.

Nos casos em que o pilar está fundado num elemento de grandes dimensões, o efeito pode ser positivo desde que a fundação esteja abaixo do nível do leito do rio, dada a interceção do escoamento descendente a montante do pilar. Esta particularidade pode causar efeitos contrários aos explicitados se o elemento de fundação atingir o nível do fundo ou ficar num nível superior, pois nestes casos o escoamento incide na superfície de montante ou pode até surgir escoamento sob o maciço de encabeçamento das estacas.

Para os pilares complexos, as estimativas de erosão são baseadas, respetivamente, na largura do pilar e das fundações, sendo que além da largura destas há que avaliar, também, a altura e a velocidade do escoamento junto do topo da fundação. Melville e Coleman (2000) estabelecem cinco casos de erosão local que são possíveis de ocorrer:

- Caso I - O topo da sapata, do maciço de encabeçamento ou do caixão de fundação encontra-se abaixo da base da cavidade de erosão. A profundidade de erosão não é afetada pelo elemento de maiores dimensões, ou seja comporta-se como um pilar simples.
- Caso II - O topo da sapata, do maciço de encabeçamento ou do caixão de fundação encontra-se acima da base da cavidade de erosão, mas a um nível inferior à cota geral do leito. A profundidade de erosão é, geralmente, reduzida devido à interceção do escoamento descendente pelo elemento de fundação.
- Caso III - O topo da sapata, do maciço de encabeçamento ou do caixão de fundação encontra-se acima do nível geral do leito do rio. Neste caso, a profundidade tanto pode ser reduzida como aumentada em relação à situação padrão. No caso de o elemento de fundação ser um caixão ou um maciço de encabeçamento, verificar-se-á um aumento da profundidade de erosão.

- Caso IV - O topo da sapata, do maciço de encabeçamento ou do caixão de fundação encontra-se acima do nível da superfície livre do escoamento. Este caso corresponde à máxima profundidade de erosão para o conjunto formado pelo pilar e o elemento de fundação. Contudo, no caso de o pilar estar fundado em estacas, isto poderá não se verificar.
- Caso V - As estacas nas quais o pilar está fundado estão acima do nível da superfície livre do escoamento. Hannah (1978) indicou que a profundidade máxima de erosão que se verifica nesta situação é função da dimensão do grupo de estacas.

Resume-se então que, para o Caso I, a profundidade de erosão é inalterada pela presença das fundações, enquanto para o Caso II, a erosão localizada é reduzida devido à interação por parte das fundações do escoamento descendente, o que produz um efeito benéfico. Já no Caso III verifica-se um aumento da erosão. O Caso IV é o que apresenta maior erosão máxima sobre a dimensão do pilar, sendo um caso de risco, pois as fundações da estrutura são afetadas.

### 3. Ensaio Laboratoriais

Com este estudo pretende-se quantificar as profundidades máximas de erosão decorrentes da introdução de estacas de pilares complexos no leito de um escoamento turbulento. Os ensaios decorreram no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Os resultados aqui apresentados fazem parte de um conjunto mais vasto obtidos no âmbito do projeto de investigação PTDC/ECM/101353/2008 - "Estudo experimental de erosões localizadas junto de pilares complexos", financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

#### 3.1. Descrição das instalações

Os ensaios foram realizados num canal horizontal de 1 m de largura com 32,3 m de comprimento. Este é materializado em betão e possui janelas laterais, possibilitando a visualização lateral do fenómeno de erosão.

O canal é dotado de uma caixa de sedimentos onde se realizaram as experiências e uma segunda caixa a jusante desta, para a retenção do material transportado.

#### 3.2. Velocidade crítica de início do movimento

Os ensaios decorreram para condições de escoamento próximas da velocidade crítica ( $U/U_c < 1$ ), já que são as que conduzem à maior profundidade de escavação.

Para definição da velocidade crítica de movimento do material,  $U_c$ , foram consideradas as fórmulas de Neil (1967), de Garde (1970) e do Florida Department of Transportation (2005), Quadro 1.

Neste estudo foi adaptado o método de Neil (1967), em concordância com o projeto PTDC/ECM/101353/2008, pois este critério apresentou uma maior aproximação com os resultados experimentais, anteriormente alcançados, em fase de publicação.

Quadro 1. Velocidades críticas.

Critério	$U_c$ [m/s]
Neil (1967)	0.3216
Garde (1970)	0.3319
F.D.T. (2005)	0.3378

Para os ensaios foi utilizado um caudal de 64L/s com uma altura de água de 20 cm conduzindo a uma velocidade média do escoamento de 0.32m/s.

#### 3.3. Caracterização do tempo de equilíbrio

O tempo ao fim do qual é atingida a profundidade máxima de erosão gera discussão entre os diversos autores. Nos vários estudos realizados observam-se três fases na evolução da cavidade: fase inicial, fase principal e fase de equilíbrio. Estas fases são identificadas graficamente representando a evolução temporal da profundidade de escavação numa escala logarítmica. As mudanças de declives correspondem às alterações entre fases (Figura 2). Assim sendo, é na fase de equilíbrio que vários autores consideram obtida a erosão de equilíbrio. Couto (2005) e Lança *et al.* (2010) entre outros realizaram vários ensaios de longa duração na tentativa de avaliar o tempo de equilíbrio de erosão.

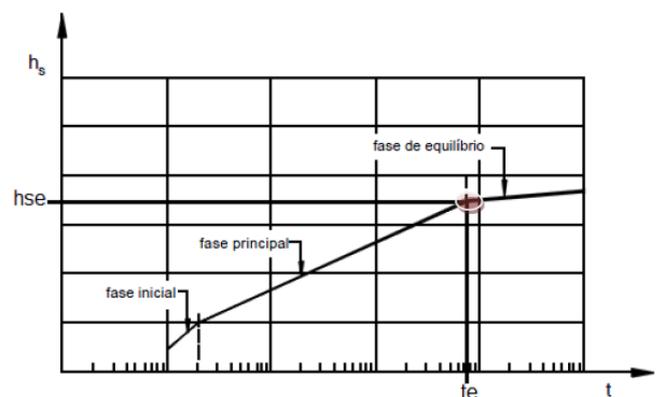


Figura 2. Definição de tempo de equilíbrio e da profundidade de equilíbrio segundo Cardoso e Bettess (1999).

Os métodos propostos para tentar estabelecer a profundidade de equilíbrio,  $h_{se}$ , tendo por base a evolução temporal das profundidades de erosão  $h_s(t)$  dos ensaios e um método baseado numa formulação de previsão do tempo de equilíbrio, estão resumidos no quadro 2.  $D_c$  representa o diâmetro do pilar,  $D_{50}$  o diâmetro médio do material do leito,  $U$  a velocidade média do escoamento e  $t_M$  o tempo de duração do ensaio.

As metodologias propostas visam a sua aplicação em pilares isolados. Este estudo tem como objetivo a caracterização das profundidades máximas de erosão em 4 estacas ou pilares cilíndricos. Assim sendo, a metodologia a aplicar será validada quando o critério se verificar em simultâneo em todas as estacas.

Atendendo a todas as propostas consideradas, optou-se pelo critério de paragem utilizado em Pinheiro (2010), ou seja, os ensaios foram terminados quando a profundidade de erosão não se alterava mais de 1 mm num período de 24 horas.

Quadro 2. Resumo dos critérios de paragem.

Metodologia	Critério de paragem	Aplicação ao caso em estudo
Cardoso e Bettess (1999)	Identificação da zona de equilíbrio segundo o esquema da figura 3.1.	Esta análise torna-se complexa e difícil.
Melville e Chiew (1999)	$h_s(t + 24h) - h_s(t) < 0.05D_c$	$h_s(t + 24h) - h_s(t) < 2.5 \text{ mm}$
Fael (2007)	$h_s(t + 24h) - h_s(t) < 2D_{50}$	$h_s(t + 24h) - h_s(t) < 1.72 \text{ mm}$
Melville e Chiew (1999)	$t_M = 30.89 \frac{D_c}{U} \left( \frac{U}{U_c} - 0.4 \right) \left( \frac{h}{D_c} \right)^{0.25}$	$t_M = 4.1 \text{ dias}$
Correia (2010)	$h_s(t + 24h) - h_s(t) < 0.01 \text{ mm}$	$h_s(t + 24h) - h_s(t) < 0.01 \text{ mm}$

### 3.4. Efeito do tempo

Em escoamentos sem transporte de sedimentos a profundidade da cavidade de erosão é crescente assintoticamente até à profundidade de equilíbrio. Nos casos de ensaios laboratoriais com escoamentos sem transporte sedimentar, para que se possam obter condições de equilíbrio, é necessário desenvolver testes durante muitos dias. Segundo Lança *et al.* (2010) é possível obter valores fidedignos da erosão de equilíbrio com apenas 7 dias de medições através de uma extrapolação polinomial (equação 1), aplicável aos casos de pilares simples. A aplicação da equação 1 resulta na aplicação de métodos de aproximação da curva traduzida pela equação em questão, com a curva formada pelos resultados obtidos laboratorialmente.

$$h_s = p_1 \left( 1 - \frac{1}{1+p_1 p_2 t} \right) + p_3 \left( 1 - \frac{1}{1+p_3 p_4 t} \right) + p_5 \left( 1 - \frac{1}{1+p_5 p_6 t} \right) \quad [1]$$

Esta aproximação é obtida pela variação dos parâmetros  $p_1$  a  $p_6$ . A estimativa da profundidade de equilíbrio é dada por  $h_{se} = p_1 + p_3 + p_5$ , obtida quando se deixa o tempo tender para infinito ( $t \approx \infty$ ).

### 3.5. Descrição dos ensaios

Durante este estudo realizaram-se dez ensaios laboratoriais, variando o afastamento entre os quatro pilares e usando dois alinhamentos diferentes,  $\alpha=0^\circ$  e  $\alpha=15^\circ$ . No quadro 3 encontra-se um resumo das características dos ensaios realizados segundo a ordem apresentada. Aqui,  $Q$  representa o caudal escoado,  $h$  a altura do escoamento e  $S$  a distância entre eixos dos pilares.

Quadro 3. Resumo das características dos ensaios.

Ensaio	$D_c$ (mm)	$U$ (m/s)	$Q$ (l/s)	$h$ (m)	$D_{50}$ (mm)	$s$ (mm)	$\alpha$ (°)
LB1	4x50	0.32	64	0.2	0.86	50	0°
LB2	4x50	0.32	64	0.2	0.86	100	0°
LB3	4x50	0.32	64	0.2	0.86	150	0°
LB4	4x50	0.32	64	0.2	0.86	225	0°
LB5	4x50	0.32	64	0.2	0.86	300	0°
LB6	4x50	0.32	64	0.2	0.86	50	15°
LB7	4x50	0.32	64	0.2	0.86	100	15°
LB8	4x50	0.32	64	0.2	0.86	150	15°
LB9	4x50	0.32	64	0.2	0.86	225	15°
LB10	4x50	0.32	64	0.2	0.86	300	15°

## 4. Análise de Resultados

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos a partir da execução dos ensaios propostos, nomeadamente, a influência da alteração do espaçamento entre estacas e o seu alinhamento com o escoamento, na profundidade máxima de equilíbrio.

### 4.1. Análise geral dos resultados

A título de exemplo são descritos e analisados os dados referentes ao ensaio LB7, que possui um desvio no alinhamento das estacas com o escoamento de  $15^\circ$  e um afastamento de 100 mm entre eixos de estacas.

O gráfico da Figura 3 ilustra a evolução temporal da profundidade máxima. Esta análise pode ser elaborada em várias etapas. Embora não se possam introduzir as etapas reproduzidas na Figura 2, pois estas estão destinadas aos pilares simples, é possível verificar fases diferentes na evolução do ensaio.

Nos primeiros minutos, a profundidade verificada em cada estaca é praticamente independente, ou seja cada estaca possui a sua cavidade de erosão, embora com progressões diferentes (Figura 4).

Passada esta fase denota-se um abrandamento da taxa de crescimento ou até um decréscimo da profundidade de erosão das estacas, a jusante da primeira. Esta alteração na evolução verifica-se porque a cada estaca está imposta uma erosão localizada a montante da mesma, e posterior deposição dos sedimentos levantados/arrastados a jusante. Ou seja, ao fim de poucos minutos, a erosão localizada associada à primeira estaca utiliza a zona de erosão da estaca a jusante como local de deposição dos sedimentos e assim sucessivamente. Desta forma verifica-se um atraso temporal nas profundidades máximas de erosão registadas nas estacas mais a jusante (Figura 5).

A próxima fase é atingida quando as erosões progridem de igual forma, apresentando um declive semelhante numa representação temporal das profundidades máximas registadas. Nesta etapa é visível uma cavidade geral englobando todas as estacas e uma cavidade local em redor de cada uma (Figura 6).

A fase de equilíbrio é visualmente idêntica à anterior, verificando-se apenas uma proporção maior das cavidades referidas. Nos casos estudados, foram verificados os critérios adotados no ponto 3.3.

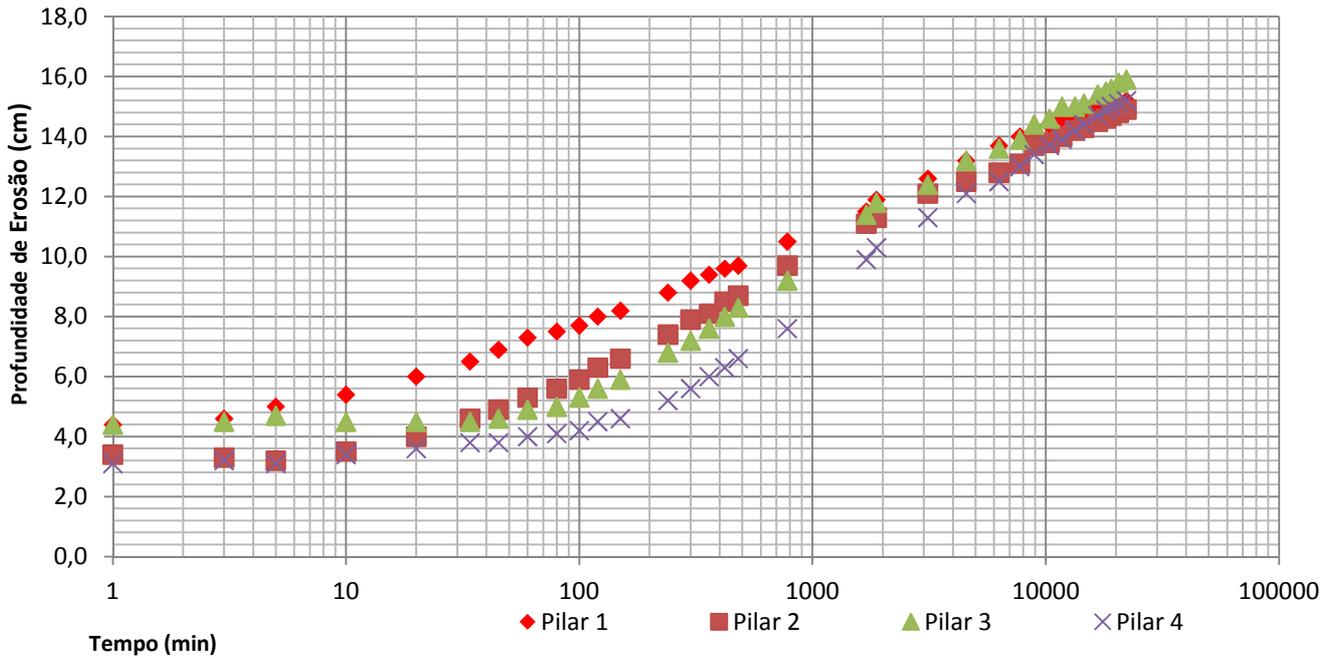


Figura 3. Evolução temporal do ensaio LB7 em escala logarítmica.

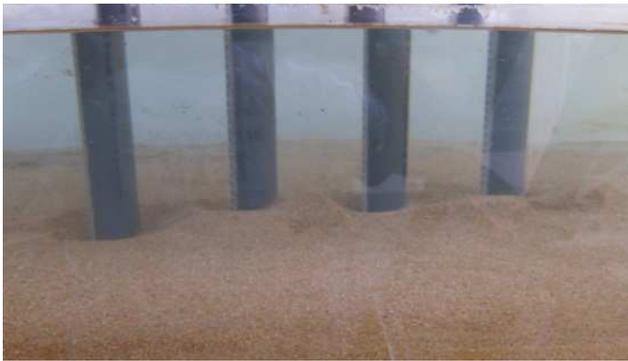


Figura 4. Primeira etapa da erosão.



Figura 5. Segunda etapa da erosão.



Figura 6. Duna criada a jusante da cavidade de erosão resultante do transporte sedimentar (foto de jusante para montante).

Verificou-se que este critério de paragem ocorria com uma duração de ensaio tanto maior quanto o espaçamento das estacas.

Este facto deve-se principalmente ao conseqüente transporte de sedimentos de montante para jusante, e assim, um aumento do espaçamento entre estacas resulta numa maior duração do ensaio.

De forma a demonstrar a evolução da profundidade de erosão e melhor visualizar as fases de erosão já enunciadas, foi efetuada uma caracterização individual dos pilares. A Figura 7 ilustra a evolução individualizada de cada pilar no ensaio LB7 (ensaio usado como exemplo).

Como é possível verificar a duração das diversas fases nos distintos pilares é distinta. Deste modo, confirma-se que a fase inicial tem uma duração mais reduzida no pilar mais a montante (Pilar 1) e esta aumenta de um pilar a montante para um pilar a jusante.

A *fase principal* é identificável em todos os pilares, contudo devido ao atraso da fase inicial esta inicia-se tanto mais tardiamente quanto mais para jusante estiver o pilar em relação ao primeiro.

A *fase de equilíbrio* torna-se, neste caso, mais difícil de identificar, pois tem uma duração reduzida, na qual se tentou verificar os critérios de paragem, de forma a concluir o ensaio.

Neste ensaio (LB7), a *fase de equilíbrio* no pilar 4 (o pilar mais a jusante) não é fácil de identificar.

Neste caso o critério de paragem associado à mudança de declives das leituras das profundidades máximas não foi verificado.

A sua identificação requereria maior duração de ensaio para além da verificação do critério de paragem.

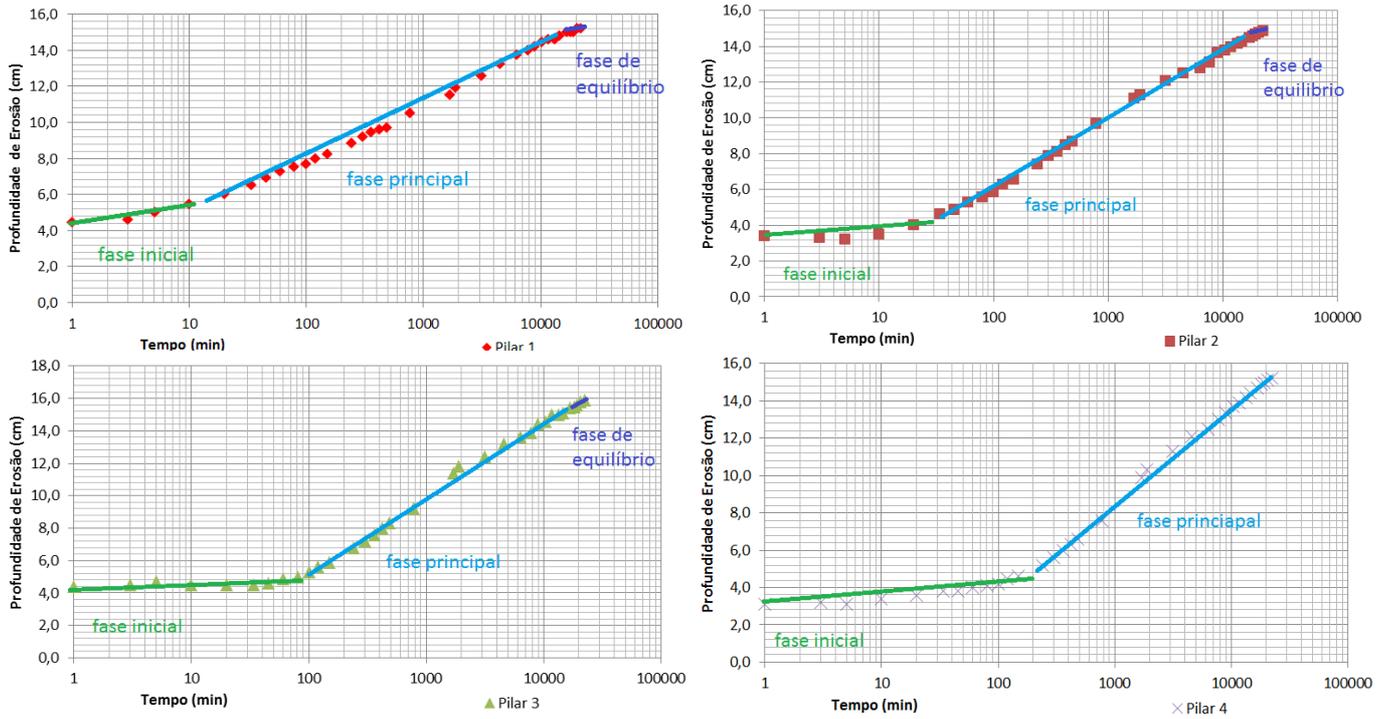


Figura 7. Evolução temporal do pilar 1 no ensaio LB7 em escala logarítmica.

#### 4.2. Análise comparativa

Nesta análise são comparados os resultados obtidos experimentalmente com os verificados pela aplicação das metodologias propostas já referidas. Será necessário ter em conta a erosão demasiado elevada no ensaio LB4, que apresenta valores superiores ao esperado.

O ensaio LB9 foi interrompido prematuramente por instabilidade dos fundos na transição betão/areia. O ensaio LB10 não foi concluído, tendo terminado ao fim de 3 dias, sendo assim considerado como não válido.

No Quadro 4 encontram-se os valores das profundidades para os quais foi verificado o parâmetro de paragem, sendo considerados os valores máximos da profundidade de erosão ou os valores de profundidade de erosão de equilíbrio.

Quadro 4. Resumo das profundidades de equilíbrio registadas.

		Pilar 1 (cm)	Pilar 2 (cm)	Pilar 3 (cm)	Pilar 4 (cm)
$\alpha=0^\circ$	LB1	13,8			
	LB2	14,6	13,7	12,8	12,6
	LB3	14,4	13,4	13,7	12
	LB4	16,7	15,7	13,6	10,5
	LB5	14,9	13,6	13,7	11,2
$\alpha=15^\circ$	LB6	14,7			
	LB7	14,8	14,5	15,7	15,1
	LB8	15,2	14,9	15,9	15,2
	LB9	11,6	12,8	13,6	13,5
	LB10				

Aplicando a equação 1, Lança (2010), aos valores máximos atingidos no pilar mais a montante (pilar 1) obtêm-se os resultados indicados no Quadro 5.

Quadro 5. Registos laboratoriais do primeiro pilar vs. extrapolação proposta para t=fim do ensaio.

		Valores registados no Pilar 1 (cm)	Extrapolação para t=fim do ensaio (cm)	Varição (%)
$\alpha=0^\circ$	LB1	13,8	13,79	-0,07
	LB2	14,6	14,52	-0,55
	LB3	14,4	14,38	-0,14
	LB4	16,7	16,91	1,26
	LB5	14,9	15,06	1,07
$\alpha=15^\circ$	LB6	14,7	14,68	-0,14
	LB7	14,8	14,72	-0,54
	LB8	15,2	15,17	-0,20
	LB9	11,6	12,23	5,43

A extrapolação para os ensaios com  $\alpha=0^\circ$  proporciona excelentes resultados, registando um máximo de variação entre os valores máximos registados no primeiro pilar e os extrapolados de 1.26%.

Isto significa que os ensaios foram interrompidos quando a profundidade da cavidade de erosão estava perto do seu valor final. No caso dos restantes ensaios, com  $\alpha=15^\circ$ , (excetuando o ensaio LB9 por não se considerar válido), verifica-se que continua a haver uma boa concordância.

O Quadro 6 regista assim a aproximação da curva proposta por Lança (2010), para extrapolações para  $t=\infty$ .

Quadro 6. Registos laboratoriais do primeiro pilar vs. extrapolação proposta para  $t=\infty$ .

		Valores registados no Pilar 1 (cm)	Extrapolação para $t=\infty$ (cm)	Variação (%)
$\alpha=0^\circ$	LB1	13,8	15,18	10,00
	LB2	14,6	16,02	9,73
	LB3	14,4	15,23	5,76
	LB4	16,7	20,38	22,04
	LB5	14,9	16,6	11,61
$\alpha=15^\circ$	LB6	14,7	15,94	8,44
	LB7	14,8	15,31	3,45
	LB8	15,2	16,04	5,53
	LB9	11,6	12,41	6,98

Em concordância com o esperado segundo esta extrapolação, os ensaios não se desenvolveram até ocorrer uma profundidade de equilíbrio.

A utilização de um critério de paragem bastante restritivo não conseguiu evitar que alguns ensaios apresentassem variações na ordem de 10% entre a profundidade máxima obtida e a extrapolada para tempo infinito (excetuando o ensaio LB4 pelos valores anormais registados).

O quadro 7 foi elaborado com o objetivo de obter um valor de profundidade máxima mais credível para o pilar 1 no ensaio LB5, visto que ocorreu um escorregamento de um talude da cavidade de erosão a montante do pilar, preenchendo a cavidade de erosão de sedimentos e inviabilizando os dados obtidos posteriormente.

Deste modo calculou-se a extrapolação da profundidade máxima para tempo infinito extraíndo os últimos dias de medições dos ensaios. Verificou-se que até sete dias de medições retiradas dos dados de amostragem, ainda se obtêm estimativas aceitáveis.

No caso de se retirarem os últimos 10 dias de medições para o cálculo da extrapolação, verifica-se que os ensaios com duração pouco superior a 10 dias são significativamente afetados, obtendo-se resultados muito pouco satisfatórios, como no ensaio LB1 e LB6.

No entanto esta extrapolação está condicionada ao número de medições obtidas, bem como à imprecisão das medições iniciais devido à grande instabilidade do fundo no início do ensaio.

Deste modo analisou-se também a variação da extrapolação quando alterado o espectro temporal de medições. O ensaio LB5, por outro lado, durou 18 dias e sendo-lhe retirados os últimos 10 dias de medições é extraída a parte das medições influenciada pelo escorregamento do talude da cavidade de erosão no pilar 1. Assume-se então que as extrapolações neste caso específico, em que lhe são retirados os 10 últimos dias, originam um resultado mais credível.

Quando analisada a aplicação das metodologias propostas de previsão da profundidade máxima de erosão (Quadro 8) verifica-se que não existe concordância com os resultados obtidos experimentalmente.

Embora a metodologia de Richardson e Davis (2001) apresente um gradiente crescente de profundidades máximas de erosão, em função do espaçamento entre estacas/pilares, estes valores não seguem as extrapolações apresentadas.

Na aplicação da metodologia proposta por Jones e Shepard (1998) o gradiente de crescimento em função do afastamento das estacas é verificado novamente, embora apresente valores ligeiramente inferiores.

A aplicação da metodologia proposta por Melville e Coleman (2000) regista uma previsão constante para as situações em que  $\alpha=0^\circ$  e apresenta valores entre 7.6 cm e 51 cm para as erosões com  $\alpha=15^\circ$ .

A metodologia de FDT (2005), embora sendo uma proposta mais recente e completa, apresenta resultados incompatíveis com o verificado nos ensaios laboratoriais.

Quadro 7. Extrapolação proposta para  $t=\infty$ , com diversos intervalos de amostragem das medições.

		Extrapolação do pilar 1 para $t=\infty$												
		Com todas as medições	sem o último dia		sem os últimos 2 dias		sem os últimos 3 dias		sem os últimos 5 dias		sem os últimos 7 dias		sem os últimos 10 dias	
			Dados	Variação	Dados	Variação	Dados	Variação	Dados	Variação	Dados	Variação	Dados	Variação
$\alpha=0^\circ$	LB1	15,18	15,34	1,05%	15,35	1,12%	15,39	1,38%	15,32	0,92%	14,33	-5,60%	52,81	247,89%
	LB2	16,02	15,96	-0,37%	15,90	-0,75%	15,92	-0,62%	15,93	-0,56%	15,93	-0,56%	14,50	-9,49%
	LB3	15,23	15,21	-0,13%	15,22	-0,07%	15,24	0,07%	15,26	0,20%	15,21	-0,13%	14,26	-6,37%
	LB4	20,38	20,58	0,98%	20,70	1,57%	20,95	2,80%	21,23	4,17%	21,23	4,17%	28,89	41,76%
	LB5	16,63	16,77	0,84%	16,69	0,36%	16,63	0,00%	15,88	-4,51%	15,06	-9,44%	14,94	-10,16%
$\alpha=15^\circ$	LB6	15,94	15,93	-0,06%	15,90	-0,25%	15,69	-1,57%	15,62	-2,01%	15,79	-0,94%	67,35	322,52%
	LB7	15,31	15,29	-0,13%	15,27	-0,26%	15,23	-0,52%	15,10	-1,37%	15,13	-1,18%	15,43	0,78%
	LB8	16,04	16,03	-0,06%	15,78	-1,62%	15,98	-0,37%	15,91	-0,81%	15,92	-0,75%	15,72	-2,00%
	LB9	12,41	12,51	0,81%	12,69	2,26%	12,74	2,66%	12,82	3,30%	13,09	5,48%	13,09	5,48%

Quadro 8. Resumo das erosões máximas (cm).

	Pilar 1	Pilar 2	Pilar 3	Pilar 4	Pilar 1 Extrapolação	Richardson e Davis (2001)	Jones e Sheppard (1998)	Melville e Coleman (2000)	FDT (2005)
LB1	13,8				13,79	10,1	9,1	13,4	38,7
LB2	14,6	13,7	12,8	12,6	14,52	14,0	12,7	13,4	29,9
LB3	14,4	13,4	13,7	12	14,38	17,3	15,8	13,4	25,2
LB4	16,7	15,7	13,6	10,5	16,91	21,8	19,8	13,4	20,9
LB5	14,9	13,6	13,7	11,2	15,06	25,9	23,5	13,4	18,0
LB6	14,7					10,1	9,1	7,6	33,1
LB7	14,8	14,5	15,7	15,1		14,0	12,7	16,0	25,7
LB8	15,2	14,9	15,9	15,2		17,3	15,8	18,4	21,9
LB9	11,6	12,8	13,6	13,5		21,8	19,8	37,9	18,5
LB10						25,9	23,5	51,0	16,4

### 4.3. Análise da influência do espaçamento entre estacas

O espaçamento entre estacas foi estudado tendo em conta os grupos de 5 ensaios para cada ângulo de incidência do escoamento. A Figura 8 mostra os valores de profundidade de erosão de equilíbrio para o pilar 1. É visível o aumento da profundidade com o aumento do espaçamento entre estacas. O ensaio LB4 sai fora desta tendência, o que remete para uma diminuição na passagem de um afastamento  $s=4.5$  para  $s=6$ .

No caso dos ensaios com  $\alpha=15^\circ$ , nota-se um aumento menos significativo do que o anterior, pertencendo o valor mais baixo da série ao ensaio LB9 que, como já foi referido anteriormente, não foi considerado válido.

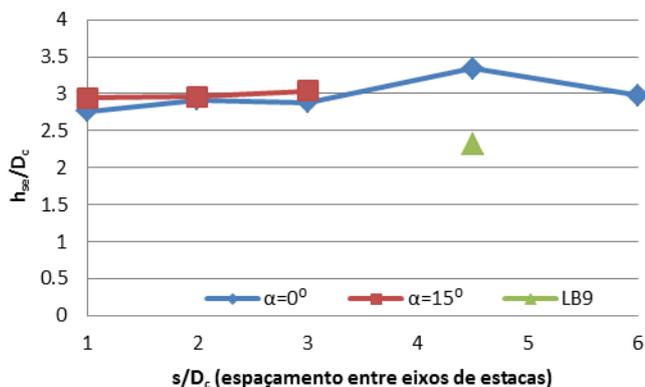


Figura 8. Variação da profundidade máxima de erosão com o aumento do afastamento, utilizando os valores registados no pilar mais a montante.

Quando a análise é feita com os valores das profundidades máximas registadas em cada ensaio (Figura 9), verifica-se um comportamento semelhante para os 3 pares de ensaios com as configurações de menor afastamento.

Embora semelhante, a configuração de  $\alpha=15^\circ$  apresenta sempre valores superiores. Nestes casos verifica-se que o 3º pilar (de montante para jusante) regista a maior profundidade de erosão.

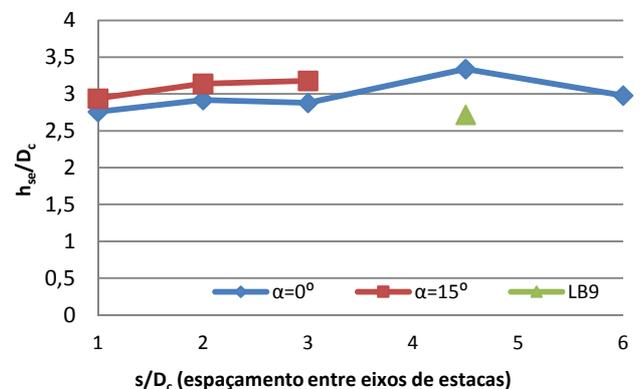


Figura 9. Variação da profundidade máxima de erosão com o aumento do afastamento, utilizando os valores máximos registados em cada ensaio.

### 4.4. Análise da influência do ângulo de incidência do escoamento

Nesta análise só é possível a utilização da metodologia proposta por FDT (2005) e Melville e Coleman (2000). Embora as outras metodologias referidas no capítulo 3 abordem a questão, o resultado da proposta é igual para ângulos de incidência do escoamento diferentes, em consequência das simplificações utilizadas para adaptar metodologias de pilares complexos apenas à parcela da estaca.

O Quadro 9 demonstra a dificuldade em prever erosões máximas em pilares complexos constituídos apenas por estacas. A adaptação do método aplicado é simples, já que foi apenas considerado que o maciço de encabeçamento se encontrava fora de água bem como o pilar propriamente dito. No entanto verifica-se que os resultados são bastante distintos do registado em laboratório.

Numa análise direta verifica-se que ao contrário do esperado quando rodados de  $15^\circ$  em relação ao escoamento, o pilar mais a montante, supostamente mais exposto ao escoamento, não é o que apresenta maior profundidade de erosão. Neste caso é o 3º pilar que apresenta maior profundidade de erosão.

Quadro 9. Quadro resumo das profundidades máximas registadas e as obtidas pelo método de Melville (2000) e FDT (2005).

	Pilar 1 (cm)	Pilar 2 (cm)	Pilar 3 (cm)	Pilar 4 (cm)	Melville e Coleman (2002) (cm)	FDT (2005) (cm)
LB1	13,8				13,4	38,7
LB2	14,6	13,7	12,8	12,6	13,4	29,9
LB3	14,4	13,4	13,7	12	13,4	25,2
LB4	16,7	15,7	13,6	10,5	13,4	20,9
LB5	14,9	13,6	13,7	11,2	13,4	18
LB6	14,7				7,6	33,1
LB7	14,8	14,5	15,7	15,1	16	25,7
LB8	15,2	14,9	15,9	15,2	18,4	21,9
LB9	11,6	12,8	13,6	13,5	37,9	18,5
LB10					51	16,4

## 5. Conclusões

O trabalho realizado demonstrou a dificuldade de caracterização do fenómeno de erosão em pilares complexos. Em leitos naturais onde existe uma variabilidade dos vários fatores envolvidos, o problema está sempre presente e em constante transformação.

No âmbito dos objetivos do trabalho experimental, foram efetuados 10 ensaios com 4 estacas em linha, divididos em 2 grupos com alinhamentos de 0° e 15° com o escoamento. Nestes ensaios, considerando todas as observações referidas no ponto 4, foram apresentados resultados consistentes.

Nos grupos em estudo foram ensaiados 5 espaçamentos diferentes, verificando-se um ligeiro aumento da erosão máxima à medida que se alargava o espaçamento entre as estacas.

Observou-se também que nos ensaios com  $\alpha=15^\circ$ , o 3º pilar de montante para jusante apresentava a maior profundidade de erosão. Isto quando o expectável seria o primeiro pilar registar maior profundidade de erosão, supostamente mais exposto, tal como verificado nos ensaios cujas estacas estavam alinhadas com o escoamento.

No caso dos ensaios onde as estacas foram dispostas paralelamente ao escoamento verificou-se que a profundidade máxima de erosão se registava no elemento mais a montante, e era decrescente no sentido de montante para jusante, sendo o último pilar o que apresentou menor erosão.

A equação usada para extrapolar as medições experimentais para tempo infinito demonstrou uma grande consistência em relação aos resultados e constitui uma ferramenta fiável para estimar a profundidade de erosão de equilíbrio. Isto permite que se executem ensaios laboratoriais de menor duração, obtendo resultados para a erosão de equilíbrio através de extrapolações.

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

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e Tecnologia através do projeto de investigação PTDC/ECM/101353/2008.

## Referências

- Cardoso, A.H., Bettess, R. (1999). *Effects of time and channel geometry on scour at bridge abutments*. ASCE Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 125 n° 4, Abril.
- Couto, L.T., *Erosões localizadas junto de esporões fluviais e encontros de pontes*, Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2005
- FDT (2005). *Bridge Scour Manual*, Florida Department of Transportation, State of Florida.
- Garde, R.J. (1970), *Initiation of motion on a hydrodynamically rough surface*. Critical Velocity approach, JIP (India), vol.6, no.2.
- Jones, J. Sterling; Sheppard, D. Max (1998). *Local scour at complex pier geometries*. Federal Highway Administration; University of Florida
- Lança, Rui; Fael, C.; Cardoso, A. (2010). *Assessing Equilibrium Clear-Water Scour Around Single Cylindrical Piers*. Portugal.
- Neil, C.R. (1967), *Mean Velocity criterion for scour of coarse uniform bed material*, Proceedings of the XII IAHR, Fort Collins, Colorado.
- Melville, Bruce W.; Coleman, Stephen E. (2000). *Bridge Scour*. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colorado.
- Melville, B.W.; Chiew Y.M. (1999). *Time scale for local scour at bridge piers*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.125, N°1, 59-65.
- Pinheiro, Rui Correia (2010). *Estudo experimental da erosão de pilares de pontes*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Richardson, E.V.; Davis, S.R. (2001), *Evaluating Scour At Bridge - Fourth Edition*, Hydraulic Engineering Circular N°18, Publication, N° FHWA NHI 01-001, U.S. Department of Transportation, USA.