

## CONTRIBUIÇÃO DOS COMPONENTES DE UM PILAR COMPLEXO PARA A PROFUNDIDADE DE EROSÃO LOCALIZADA Contribution of Complex Pier Components on Local Scour Depth

MARIO MORENO <sup>(1)</sup>, RODRIGO MAIA <sup>(2)</sup>, JOÃO PEDRO PÊGO <sup>(3)</sup>, LÚCIA COUTO <sup>(4)</sup> e ANTÓNIO CARDOSO <sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> Estudante de Doutoramento, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, dec10007@fe.up.pt

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

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

<sup>(4)</sup> Investigadora Auxiliar, LNEC,  
Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, lcouto@lnec.pt

<sup>(5)</sup> Professor Catedrático, IST,  
Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, antonio.cardoso@tecnico.ulisboa.pt

### Resumo

Realizou-se uma campanha experimental de 11 ensaios de longa duração para o estudo das erosões localizadas junto a pilares complexos no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Os ensaios foram conduzidos em regime permanente num canal com fundo móvel sem transporte sólido generalizado. O objetivo consistiu em avaliar a contribuição dos componentes do pilar complexo na profundidade total da cavidade de erosão. Os resultados experimentais foram usados para descrever a evolução temporal da profundidade máxima de erosão. É sugerida uma nova abordagem para avaliação da profundidade de erosão, associada ao conceito de subtração da erosão correspondente a diferentes conjuntos de componentes do pilar complexo. Os resultados da aplicação deste conceito foram comparados com os resultados obtidos através de ensaios com componentes isolados do pilar complexo e que constituem a base do conceito de sobreposição (abordagem utilizada nos métodos de previsão do FDOT e HEC-18), concluindo-se que as diferenças mais significativas entre os dois conceitos correspondem à contribuição do grupo de estacas na profundidade de erosão.

**Palavras-chave:** Erosão localizada, pilares complexos, fundações de pontes, profundidade de erosão, ensaios laboratoriais.

### Abstract

An experimental campaign of 11 long-duration tests on scouring at complex piers was performed at the Hydraulics Laboratory of the Engineering Faculty in Porto University. The tests were carried out in a movable bed flume under steady clear-water flow conditions. The aim was to evaluate the contribution of complex pier components on the total local scour depth. Experimental results were used to describe the temporal evolution of maximum scour depth. A new approach to evaluate the maximum scour depth associated with a subtraction concept is suggested which considers the different sets of complex piers components. The results of this concept were compared with results obtained by tests with isolated components of complex pier that constitute the basis of the superposition concept (approach used in the predictors of FDOT eHEC-18), concluding that the most marked differences between both concepts correspond to the contribution of the pile group on the scour depth.

**Keywords:** Local scour, complex pier, bridge foundation, scour depth, laboratory tests.

### 1. Introdução

Os principais danos em pontes fluviais ocorrem, em geral, por diversas razões, durante as cheias. A principal dessas razões decorre das erosões localizadas do leito fluvial junto às fundações de pilares e de encontros de pontes. As erosões localizadas são um fenómeno complexo induzido pelo campo de escoamento gerado em redor dos pilares e dos encontros. Considerações de ordem física e económica têm levado a que, cada vez mais, as fundações de pontes sejam constituídas por colunas fundadas em maciços de encabeçamento suportados por estacas, como esquematizado na Figura 1.

Os pilares com esse tipo de configuração estrutural de fundação associada são designados por pilares complexos. Os estudos de erosão em pilares complexos foram, na sua maioria, realizados durante os últimos anos, fornecendo a base dos modelos de previsão da profundidade de erosão.

Atualmente, são comumente utilizados três modelos de previsão da profundidade máxima de erosão: método de Auckley (Coleman 2005), método do FDOT (Sheppard e Renna, 2010) e método do HEC-18 (Arneson *et al.*, 2012).

Os dois últimos métodos de previsão referidos foram desenvolvidos de acordo com o conceito da sobreposição da erosão dos componentes do pilar complexo.

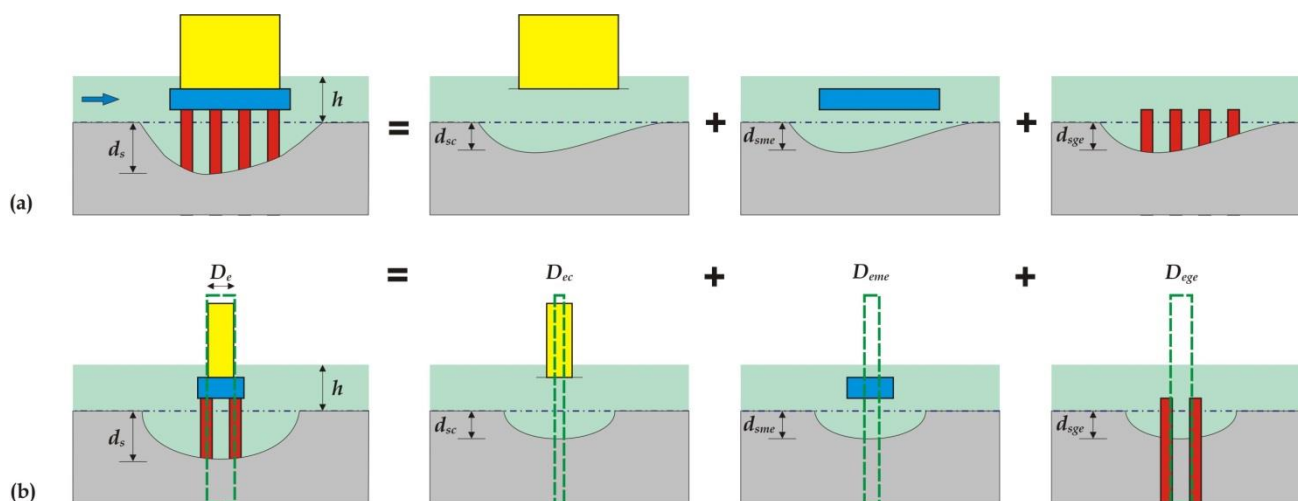


Figura 1. Hipótese conceptual da contribuição dos componentes do pilar complexo na profundidade de erosão, de acordo com o modelo de previsão do: (a) HEC-18 e (b) FDOT.

Neste conceito as contribuições individuais de cada componente (*i.e.*, coluna, maciço, agrupamento de estacas) podem somar-se para obter a previsão da profundidade de erosão da estrutura completa.

O objetivo deste estudo é analisar a contribuição dos diferentes componentes estruturais do pilar complexo na profundidade máxima de erosão, através de um conceito desenvolvido no estudo, alternativo ao usado nos métodos de referência mais recentes (FDOT e HEC-18).

## 2. Base Conceptual dos Modelos de Previsão

O modelo de previsão do HEC-18 para pilares complexos foi sugerido por Richardson e Davis (2001) e revisto por Arneson *et al.* (2012). Neste método adotou-se o conceito de sobreposição (Jones e Sheppard, 2000), que compreende a separação conceptual dos elementos do pilar complexo (ou seja, coluna, maciço de encabeçamento e grupo de estacas) e da correspondente contribuição para a profundidade de erosão, como se observa na Figura 1(a).

A profundidade de erosão total é calculada pela soma das profundidades de erosão produzidas por cada um dos elementos do pilar complexo expostos ao escoamento, isoladamente, tal como é ilustrado na Figura 1(a).

Relativamente ao método FDOT (Sheppard e Renn, 2010), a profundidade de erosão associada a cada elemento do pilar complexo pode ser estimada como a profundidade de erosão de um pilar cilíndrico equivalente que induz a mesma profundidade de erosão do elemento do pilar, para o mesmo leito sedimentar e idênticas condições de escoamento.

O pilar equivalente, por sua vez, depende da forma, dimensão e localização do elemento do pilar e do alinhamento deste em relação à direção do escoamento, assim como das características do escoamento e propriedades dos sedimentos.

O diâmetro equivalente do pilar complexo pode ser calculado, aproximadamente, pela soma dos diâmetros equivalentes de cada um dos elementos do pilar como é ilustrado na Figura 1(b).

Os dois modelos de previsão foram desenvolvidos com base em diferentes tipos de ensaios experimentais, entre os quais se destacam, ensaios com colunas suspensas no escoamento, ensaios com maciços de encabeçamento suspensos no escoamento, ensaios com grupos de estacas submersos e ensaios com colunas fundadas em maciços. Estes ensaios foram realizados para diferentes posições do respetivo componente relativamente ao nível inicial do leito. Os principais estudos foram conduzidos por Jones (1989), Salim e Jones (1996), Smith (1999) e Jones e Sheppard (2000).

## 3. Conceito de Subtração. Uma nova abordagem

Os ensaios experimentais com elementos isolados usados no desenvolvimento dos dois referidos modelos de previsão, aplicando em ambos o conceito da sobreposição, conduzem a uma perda de interação da estrutura do escoamento entre a coluna e o maciço, assim como entre o maciço e o grupo de estacas (Moreno *et al.*, 2014).

Neste contexto, o escoamento descendente gerado no pilar e no maciço de encabeçamento é o mais afetado. As interações da estrutura de escoamento com os elementos do pilar complexo podem aumentar ou diminuir a profundidade de erosão, dependendo da geometria do pilar (incluindo o posicionamento dos respetivos elementos em relação ao nível inicial do leito) e das características do escoamento.

A Figura 2 representa esquematicamente a estrutura do escoamento em torno de um pilar complexo e dos correspondentes elementos, isolados.

Sendo certo que a consideração da interação dos componentes do pilar complexo é uma questão relevante, o presente estudo apresenta uma nova abordagem, que se crê permitir reter as interações da estrutura do escoamento em torno dos diferentes elementos do pilar complexo. Com esta finalidade, foram estudadas três configurações básicas para uma determinada posição do pilar complexo: a primeira, integrando os três componentes (C1); a segunda, sem a coluna (C2), e; a terceira sem o grupo de estacas (C3), tal como ilustrado na Figura 3.

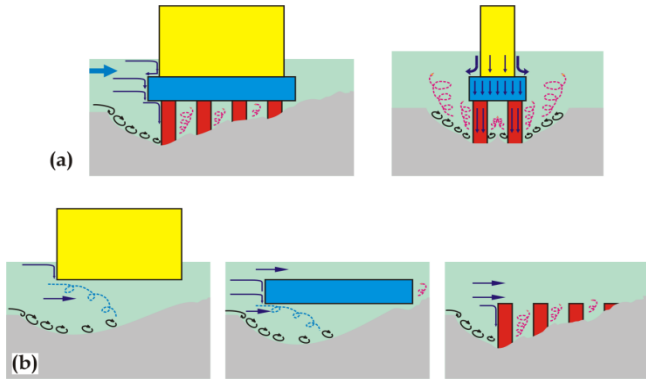


Figura 2. Interpretação da estrutura de escoamento em torno do(s): (a) pilar complexo e (b) elementos isolados.

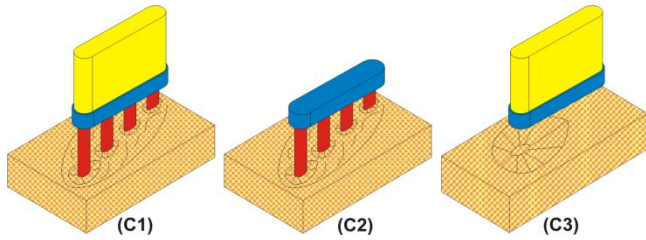


Figura 3. Configurações básicas do pilar complexo.

As configurações C2 e C3, embora não correspondam a situações reais de pilar complexo, representam configurações experimentais utilizadas para calcular, por subtração, a contribuição do componente do pilar complexo em falta numa dessas configurações para a profundidade de erosão total – corporizando o que, daqui em diante, será denominado por conceito de subtração. Por conseguinte, a contribuição na profundidade de erosão dos três componentes é calculada a partir das seguintes equações:

$$d_{sc} = d_{sc1} - d_{sc2} \quad [1]$$

$$d_{sge} = d_{sc1} - d_{sc3} \quad [2]$$

$$d_{sme} = d_{sc1} - d_{sc} - d_{sge} \quad [3]$$

em que  $d_{sc}$ ,  $d_{sge}$  e  $d_{sme}$  são as contribuições da coluna, do grupo de estacas e do maciço de encabeçamento, respetivamente, e  $d_{sc1}$ ,  $d_{sc2}$  e  $d_{sc3}$  representam as profundidades de erosão correspondentes às configurações C1, C2 e C3, respetivamente. Parece razoável supor, por exemplo, que a contribuição da coluna para a profundidade de erosão total de equilíbrio pode ser isolada subtraindo a profundidade de erosão de equilíbrio devida à configuração C2 (sem coluna) à profundidade de erosão de equilíbrio associada ao pilar complexo (com os três elementos, C1), na condição de que permaneçam inalterados o escoamento de aproximação, as características dos sedimentos, a configuração geométrica do pilar e o seu alinhamento.

## 4. Instalação Experimental

### 4.1. Descrição do canal de ensaio

Os ensaios experimentais para determinar a contribuição dos componentes do pilar complexo na profundidade de erosão localizada, foram realizados no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

O canal tem 33,2 m de comprimento, 1,0 m de largura e 1,0 m de máxima profundidade. O canal foi provido de um fundo falso de modo a corporizar duas caixas, com 3,2 m e 2,5 m de comprimento respetivamente, 0,35 m de altura e uma largura igual à do canal, como se apresenta na Figura 4(a).

Os obstáculos C1, C2 e C3 foram instalados na caixa de montante, sendo a caixa de jusante utilizada para reter o material resultante da erosão local do leito devida a cada configuração ensaiada.

A caixa de montante (Figura 4b), posicionada a 16,0 m da entrada do canal, foi preenchida com areia constituída por partículas com diâmetro mediano,  $d_{50} = 0,86$  mm, e desvio geométrico,  $\sigma_g = 1,34$ .

O início da caixa de jusante encontra-se a 5,0 m do final da primeira caixa.

O caudal foi monitorizado através de um medidor de caudal eletromagnético e a altura do escoamento foi medida regularmente com um hidrómetro de ponta direita.

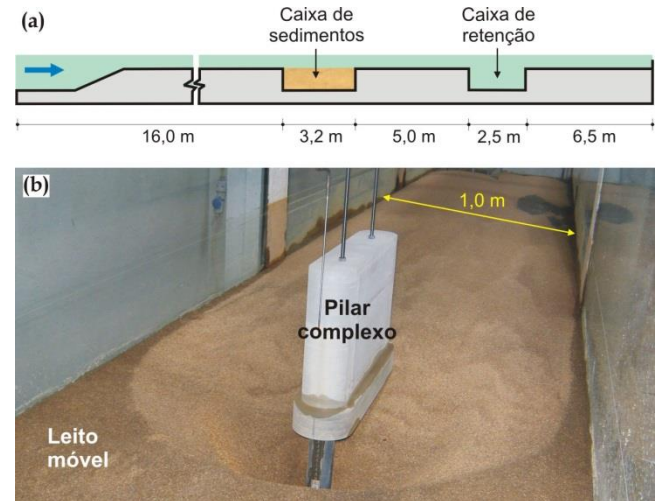


Figura 4. Canal de ensaio: (a) vista em corte longitudinal do canal de ensaios e (b) caixa de sedimentos com o pilar complexo.

Os ensaios foram realizados com uma velocidade de aproximação constante,  $U = 0,31$  m/s, próxima da velocidade crítica,  $U_c \approx 0,32$  m/s (calculada de acordo com a expressão sugerida por Neill, 1967), a fim de alcançar as condições mais desfavoráveis em termos da profundidade de erosão de equilíbrio.

Desse modo, a intensidade do escoamento foi de  $U/U_c \approx 0,97$ . A altura do escoamento,  $h$ , foi mantida constante e igual a 0,18 m em todos os ensaios.

### 4.2. Configuração do pilar complexo

O modelo do pilar complexo utilizado nos ensaios era constituído por (i) uma coluna retangular com extremidades semicirculares (ii) um maciço de encabeçamento retangular com extremidades semicirculares e (iii) um conjunto de 4 estacas agrupadas num alinhamento paralelo ao eixo do canal, de acordo com a Figura 5(a).

O modelo foi construído em acrílico (coluna e maciço) e PVC (estacas), e foi implantado no eixo do canal, no leito de areia conforme se apresenta nas Figuras 4(b) e 5(b).

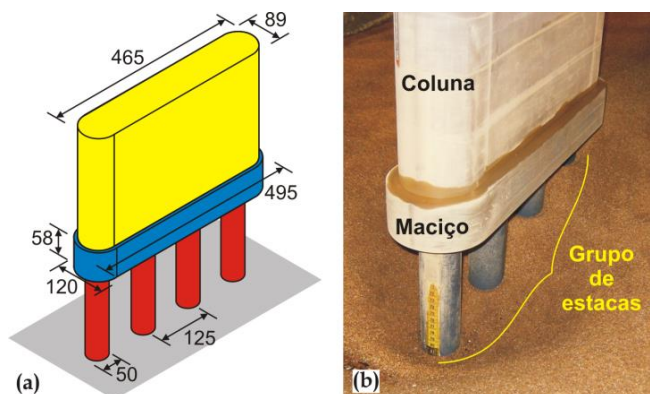


Figura 5. Pilar complexo: (a) dimensões do modelo (unidades em milímetros) e (b) implantação no leito (de areia) do canal.

Foram analisadas três diferentes posições do topo do maciço de encabeçamento relativamente ao nível inicial do leito,  $H_c$  (Figura 6): uma ( $H_c = 0,120$  m) em que o maciço se encontrava totalmente exposto e envolvido pelo escoamento, com a face inferior acima do nível inicial do leito; uma segunda posição ( $H_c = 0,058$  m) em que a face inferior do maciço foi posicionada ao nível inicial do leito de areia; e uma última posição ( $H_c = 0,029$  m) em que o maciço se encontrava parcialmente enterrado relativamente ao nível inicial do leito.

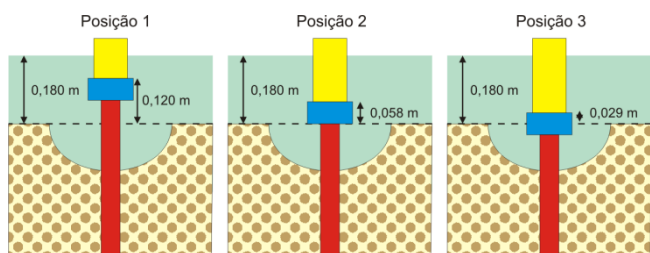


Figura 6. Posições do maciço de encabeçamento analisadas.

Para cada uma das posições acima referidas, foram realizados três ensaios, correspondentes às configurações C1, C2 e C3 estudadas (Figura 3). Foram ainda realizados dois ensaios adicionais, utilizados como ensaios de referência (Figura 7).

Num deles, apenas a coluna foi exposta ao escoamento, durante o ensaio – corresponde ao caso em que a parte superior do maciço permanece enterrada, abaixo do talvegue da cavidade de erosão, e que passará a ser referido como o ensaio de referência A.

No outro, apenas o grupo de estacas foi exposto ao escoamento e que corresponde ao caso em que a parte inferior do maciço está acima e fora do escoamento, e que passará a ser referido como o ensaio de referência B.

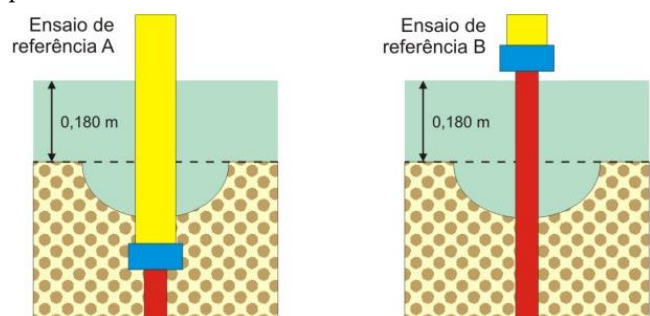


Figura 7. Esquema dos ensaios de referência.

### 4.3. Procedimento experimental

Antes de cada ensaio experimental, a areia da caixa de sedimentos foi nivelada com o leito. A zona adjacente a toda a periferia do pilar complexo foi coberta com uma placa fina (composta por uma grelha metálica colada sobre um filtro de geotêxtil) para evitar erosões descontroladas no início de cada ensaio, como se apresenta na Figura 8(a). Após o enchimento prévio, lento e gradual do canal, e estabelecidos a altura de escoamento e caudal pretendidos, a placa fina foi cuidadosamente removida, sendo iniciado o correspondente ensaio. O consequente processo erosivo foi monitorizado, sendo periodicamente medida (com intervalos de tempo mais reduzidos nas primeiras horas, alargados a três ou quatro medições nos dias seguintes) a profundidade máxima de erosão atingida na cavidade desenvolvida. Utilizou-se um hidrómetro para efetuar as correspondentes medições na frente da coluna e do maciço, sendo usada uma fita métrica colada na estaca de montante para as medições junto à mesma, como ilustrado na Figura 8(b) e Figura 8(c), respetivamente. A duração mínima dos ensaios foi de 6 dias, tempo considerado como razoável para garantir que a cavidade de erosão se encontra próxima da condição de equilíbrio.

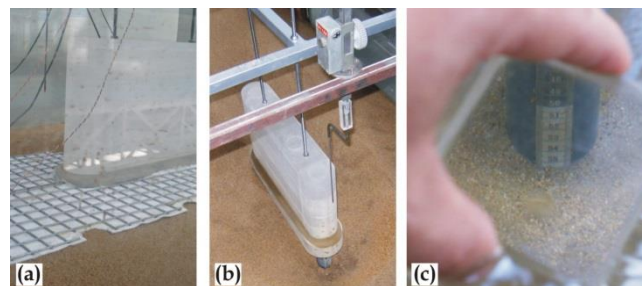


Figura 8. Procedimento experimental: (a) proteção do leito antes do início dos ensaios, (b) dispositivo para medição da profundidade de erosão na frente da coluna e do maciço e (c) dispositivo para medição da profundidade de erosão em frente às estacas.

## 5. Resultados e Discussão

### 5.1. Evolução temporal da profundidade de erosão

A evolução temporal da profundidade de erosão para as três posições do maciço, para o pilar complexo completo (*i.e.*, com os três componentes, configuração C1), é apresentada na Figura 9.

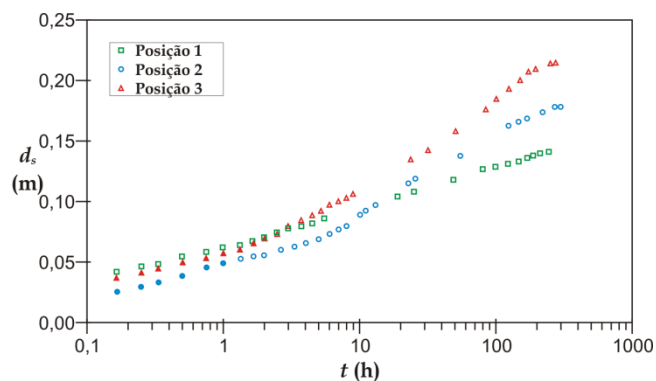


Figura 9. Configuração C1. Evolução temporal da profundidade máxima de erosão.

Na posição 1, correspondente ao caso em que o maciço se encontra totalmente envolvido pelo escoamento, acima do nível inicial do leito, a evolução da profundidade de erosão é semelhante à observada em ensaios de grupos de estacas (Lança *et al.*, 2013a), na qual a cavidade de erosão começa em frente à estaca de montante do grupo.

Na posição 2, que corresponde ao caso em que a face inferior do maciço se encontra ao nível inicial do leito, a evolução da profundidade de erosão não segue uma tendência única, conforme descrito para a posição 1, mas apresenta dois estádios diferentes: um, correspondente à primeira fase do processo erosivo, quando a profundidade máxima de erosão ocorre em frente ao maciço (representada por círculos azuis a cheio, na Figura 9, e que corresponderam aos primeiros 70 minutos do ensaio); outro, correspondente à fase da ocorrência da profundidade máxima de erosão em frente à estaca de montante.

Na posição 3, que corresponde ao caso em que o maciço está no início parcialmente enterrado relativamente no nível inicial do leito, a evolução da profundidade de erosão é análoga à observada na posição 2, em que são identificadas duas fases, como se apresenta na Figura 9 (a primeira fase representada por triângulos encarnados a cheio, e que corresponderam aos primeiros 140 minutos do ensaio).

Nos dois ensaios de referência (A e B), a evolução no tempo da profundidade máxima de erosão é caracterizada por uma tendência única (exponencial), semelhante ao observado e referido na bibliografia da especialidade para ensaios de pilares simples e agrupamentos de estacas (Moreno *et al.*, 2012; Lança *et al.*, 2013a, 2013b).

A Figura 10 apresenta a evolução temporal da profundidade de erosão e a configuração da respectiva cavidade de erosão no final dos ensaios, para cada uma das três posições consideradas, de modo a caracterizar as três configurações em análise (C1, C2 e C3).

Na primeira posição [Figura 10(a)], a evolução temporal da profundidade de erosão para a Configuração 2 (C2) mostra uma tendência semelhante à apresentada para a Configuração 1 (C1). Tal é devido ao facto de o maciço e o grupo de estacas serem os principais componentes do pilar complexo que contribuem para o processo erosivo nesta posição. À Configuração 3 (C3) corresponde uma evolução temporal singular, caracterizada por uma baixa taxa de erosão. Poderá inferir-se que tal ocorre como resultado de uma baixa intensidade dos vórtices de ferradura criados abaixo da base do maciço. Estes vórtices correspondem ao resultado da interação do escoamento descendente gerado na coluna e no maciço com o escoamento (horizontal) predominante abaixo da base do maciço.

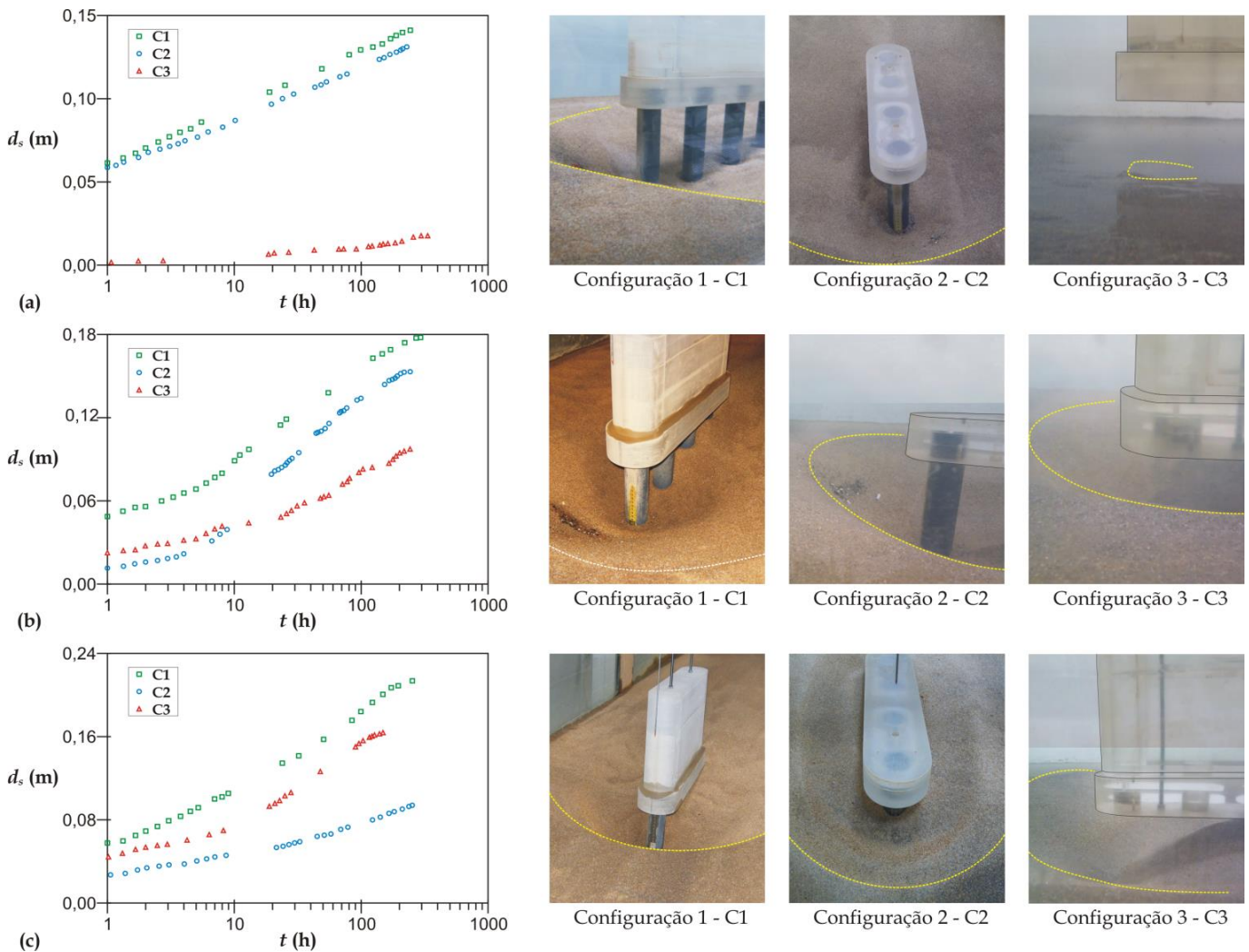


Figura 10. Evolução temporal da profundidade de erosão e cavidade final de erosão correspondentes às três configurações estudadas (C1, C2 e C3), para a: (a) Posição 1, (b) Posição 2 e (c) Posição 3.

Na segunda posição, a evolução temporal da profundidade de erosão para as configurações 2 (C2) e 3 (C3) mostra uma tendência semelhante à apresentada para a Configuração 1 (C1), como se indica na Figura 10(b).

Por outro lado, os valores da profundidade de erosão na Configuração 3 são aproximadamente metade dos valores observados na Configuração 1, o que traduz a grande importância do grupo de estacas no processo erosivo, também nesta posição.

Na terceira posição, a evolução temporal da profundidade de erosão para a Configuração 3 (C3) mostra uma tendência semelhante à apresentada para a Configuração 1 (C1), como indica a Figura 10(c). Tal é devido ao facto de, nesta posição, a coluna e o maciço serem os componentes do pilar complexo com maior influência no processo erosivo.

A taxa de erosão na Configuração 2 (C2) é de aproximadamente 40% da obtida para a Configuração 1, provavelmente devido ao facto de a maior parte do processo erosivo na configuração C2 ser atribuível apenas ao maciço de encabeçamento, sendo certo que, no início do processo erosivo, só parte (neste caso, metade) da espessura do maciço se encontra exposta ao escoamento (*i.e.*, existe uma menor/pequena área para gerar o escoamento descendente).

## 5.2. Profundidades de erosão

As profundidades máximas de erosão medidas no final dos ensaios,  $d_{sm}$ , assim como a sua duração,  $t_d$ , são apresentadas no Quadro 1 para as três posições analisadas, nas diferentes configurações (C1, C2 e C3).

Quadro 1. Duração e profundidade de erosão medidas nos ensaios.

| POSIÇÃO | CONFIG. 1 |          | CONFIG. 2 |          | CONFIG. 3 |          |
|---------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|         | $t_d$     | $d_{sm}$ | $t_d$     | $d_{sm}$ | $t_d$     | $d_{sm}$ |
| 1       | 245,2 h   | 0,141 m  | 226,0 h   | 0,131 m  | 335,8 h   | 0,028 m  |
| 2       | 291,0 h   | 0,178 m  | 243,0 h   | 0,153 m  | 219,3 h   | 0,096 m  |
| 3       | 273,0 h   | 0,213 m  | 246,2 h   | 0,094 m  | 149,0 h   | 0,163 m  |

O ensaio de referência A foi conduzido durante 334,7 h e obteve-se uma profundidade máxima de erosão de 0,167 m, enquanto o ensaio de referência B durou 264,5 h e obteve-se uma profundidade máxima de erosão de 0,134 m.

Admiti-se que a fase de equilíbrio na evolução temporal da profundidade de erosão é atingida assintoticamente (Ettema, 1980).

Em conformidade, os valores das séries experimentais da profundidade de erosão foram extrapolados para tempo infinito através da equação de Franzetti *et al.* (1982), tal como sugerido por Moreno *et al.* (2014), para obter as profundidades de erosão de equilíbrio,  $d_{se}$ .

O Quadro 2 apresenta as profundidades de erosão de equilíbrio (valores extrapolados) para as três posições estudadas, nas diferentes configurações (C1, C2 e C3). Os valores obtidos, do mesmo modo, para a profundidade de erosão de equilíbrio dos ensaios de referência A e B foram 0,179 m e 0,139 m, respetivamente.

Quadro 2. Profundidades de erosão de equilíbrio associadas às configurações estudadas (C1, C2 e C3).

|           | CONFIG. 1 | CONFIG. 2 | CONFIG. 3 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
|           | $d_{se}$  | $d_{se}$  | $d_{se}$  |
| POSIÇÃO 1 | 0,150 m   | 0,135 m   | 0,031 m   |
| POSIÇÃO 2 | 0,188 m   | 0,158 m   | 0,119 m   |
| POSIÇÃO 3 | 0,230 m   | 0,119 m   | 0,178 m   |

O Quadro 3 apresenta as profundidades de erosão de equilíbrio associadas a cada um dos componentes do pilar complexo para as três posições estudadas. Estes valores foram calculados de acordo com o estabelecido nas equações [1] a [3] (conceito de subtração) utilizando os valores das profundidades de erosão de equilíbrio obtidos para cada uma das três configurações (Quadro 2).

Quadro 3. Profundidades de erosão de equilíbrio associadas a cada um dos componentes do pilar complexo.

|           | COLUNA   | MACIÇO    | GRUPO DE ESTACAS | TOTAL    |
|-----------|----------|-----------|------------------|----------|
|           | $d_{sc}$ | $d_{sme}$ | $d_{sge}$        | $d_{se}$ |
| POSIÇÃO 1 | 0,015 m  | 0,016 m   | 0,119 m          | 0,150 m  |
| POSIÇÃO 2 | 0,030 m  | 0,089 m   | 0,069 m          | 0,188 m  |
| POSIÇÃO 3 | 0,111 m  | 0,067 m   | 0,052 m          | 0,230 m  |

## 5.3. Contribuição dos componentes do pilar complexo

### 5.3.1. Introdução

Neste estudo admite-se que a profundidade de erosão de equilíbrio em torno do pilar complexo,  $d_{se}$ , pode ser calculada como a soma das contribuições associadas a cada uma das suas três componentes. Assim:

$$d_{se} = d_{sc} + d_{sme} + d_{sge} \quad [4]$$

De acordo com o modelo do HEC-18, as contribuições dos diferentes componentes do pilar complexo podem ser estimadas através do produto de um fator, que tem em conta a posição relativa do componente em relação ao nível inicial do leito, com a profundidade de erosão associada a um pilar simples com as mesmas dimensões do componente em questão, fundado diretamente no leito e exposto totalmente ao escoamento. A Eq [4] pode, assim, reescrever-se como:

$$d_{se} = (K_{hc} \cdot d_{sc*}) + (K_{hm} \cdot d_{sme*}) + (K_{hge} \cdot d_{sge*}) \quad [5]$$

em que  $K_{hc}$ ,  $K_{hm}$  e  $K_{hge}$  são os fatores que têm em conta a posição relativa da coluna, do maciço e do grupo de estacas em relação ao nível inicial do leito, respetivamente, e  $d_{sc*}$ ,  $d_{sme*}$  e  $d_{sge*}$  representam as profundidades de erosão associadas, respetivamente, a uma coluna, a um maciço e a um grupo de estacas fundados diretamente no leito e completamente expostos ao escoamento. Nas secções seguintes (5.3.2 a 5.3.4) são avaliadas as contribuições de cada um dos três componentes do pilar complexo utilizando ensaios de elementos isolados (Salim e Jones, 1996; Smith, 1999; Jones e Sheppard, 2000; Dey *et al.*, 2008; Muto, 2008; Amini *et al.*, 2011, 2012, 2014) e os ensaios do presente estudo, de acordo com o designado conceito de subtração.

É importante mencionar que alguns dos ensaios com elementos isolados foram realizados com durações menores do que as necessárias para atingir a condição de equilíbrio. Como os ensaios referidos na literatura (com elementos isolados) foram conduzidos com diferentes geometrias e características de sedimentos e distintas condições de escoamento relativamente aos do presente estudo, a avaliação será realizada com base nos fatores adimensionais  $K_{hc}$ ,  $K_{hm}$  e  $K_{hge}$ .

### 5.3.2. Contribuição da coluna

Poucos estudos têm sido publicados sobre a contribuição da coluna no processo erosivo. Jones e Sheppard (2000) e Amini *et al.* (2014) apresentaram dados experimentais relativos a colunas isoladas parcialmente suspensas no escoamento. Estes dois estudos também integram ensaios em que a face inferior da coluna se encontra abaixo do nível inicial do leito, uma vez que esta pode ficar descoberta e exposta na cavidade durante o processo erosivo.

Combinando as Eqs [4] e [5] pode estabelecer-se uma expressão para calcular o fator  $K_{hc}$ , ou seja,

$$K_{hc} = \frac{d_{sc}}{d_{sc*}} \quad [6]$$

em que  $d_{sc}$  corresponde à contribuição da coluna (*i.e.*, profundidade de erosão medida em ensaios de colunas parcialmente suspensas no escoamento ou profundidade de erosão correspondente às obtidas nos ensaios do presente estudo, apresentadas no Quadro 3).

No caso dos estudos com colunas isoladas,  $d_{sc*}$  foi medido em cada ensaio, enquanto no caso do presente estudo  $d_{sc*}$  corresponde à profundidade de equilíbrio do ensaio de referência A, cujo valor é de 0,179 m.

A Figura 11 apresenta a variação do fator  $K_{hc}$  com a posição relativa da coluna,  $H_c/h$  ou  $H_c/d_{sc*}$ , para os ensaios com colunas isoladas assim como para as três posições dos ensaios do presente estudo (P1, P2 e P3). A figura mostra também a curva envolvente dos dados relativos a colunas isoladas – a qual é relevante pelo efeito da duração dos ensaios, conforme já referido –, para fins de comparação. É importante salientar que a contribuição da coluna na profundidade de erosão, obtida de acordo com o conceito de subtração, apenas pode ser considerada no intervalo  $0 < H_c/h < 1$ , pois este é o intervalo em que se podem fazer os ensaios da Configuração 2 (pilar complexo sem coluna, Figura 3).

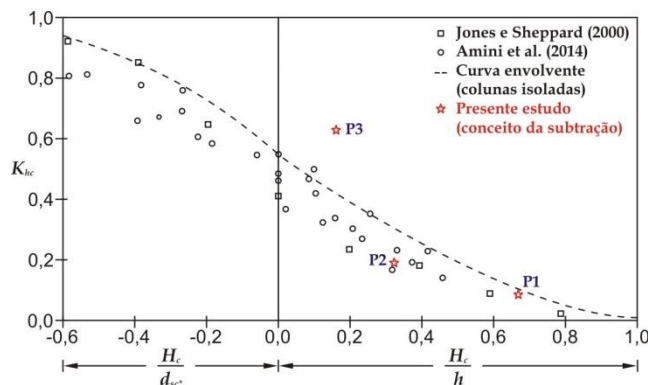


Figura 11. Dependência funcional do fator  $K_{hc}$  com a posição relativa da coluna.

Os resultados revelam que, para  $H_c/h > 0,2$ , a contribuição da coluna na profundidade de erosão, representada pelo fator  $K_{hc}$ , é aproximadamente igual nos ensaios de colunas isoladas e nos ensaios do presente estudo (conceito de subtração). No caso da posição 3 (P3), o conceito de subtração conduz a um valor do fator  $K_{hc}$  (e, portanto, da contribuição da coluna) ligeiramente maior do que o obtido para as colunas isoladas. Isto pode estar associado ao facto de que o topo do maciço encontra-se perto do nível inicial do leito. Para essa situação as profundidades máximas de erosão na Configuração 2 tendem para um valor muito baixo o qual implica um valor grande de  $d_{sc}$  (Eq [1]) e, portanto, um valor grande de  $K_{hc}$  (Eq [6]).

### 5.3.3. Contribuição do maciço

São também poucos os estudos que têm sido publicados sobre a contribuição do maciço de encabeçamento no processo erosivo. Jones e Sheppard (2000) e Amini *et al.* (2011) apresentaram dados experimentais de maciços isolados parcialmente suspensos no escoamento. Os ensaios de Amini consideram também maciços em que a sua base se encontra parcialmente enterrada relativamente ao nível inicial do leito.

De modo semelhante ao considerado no caso da contribuição da coluna, podem-se combinar as Eqs [4] e [5] para estabelecer uma expressão para calcular o fator  $K_{hm}$ , isto é,

$$K_{hm} = \frac{d_{sme}}{d_{sme*}} \quad [7]$$

em que  $d_{sme}$  corresponde à contribuição do maciço (*i.e.*, profundidade de erosão medida em ensaios de maciços parcialmente suspensos no escoamento ou profundidade de erosão correspondente às obtidas nos ensaios do presente estudo, apresentadas na Tabela 3).

Para todos os ensaios (elementos isolados e os do presente estudo), o valor de  $d_{sme*}$  foi estimado através da equação proposta por Sheppard *et al.* (2014) para prever a profundidade de erosão de pilares simples. No caso do presente estudo, este valor correspondeu a 0,214 m.

A Figura 12 apresenta a variação do fator  $K_{hm}$  com a posição relativa do maciço,  $H_m/h$  ou  $H_m/T$  (em que  $H_m$  é a distância medida desde o nível inicial do leito até a base do maciço e  $T$  é a espessura do maciço), para os ensaios com maciços isolados, assim como para as três posições dos ensaios do presente estudo (P1, P2 e P3).

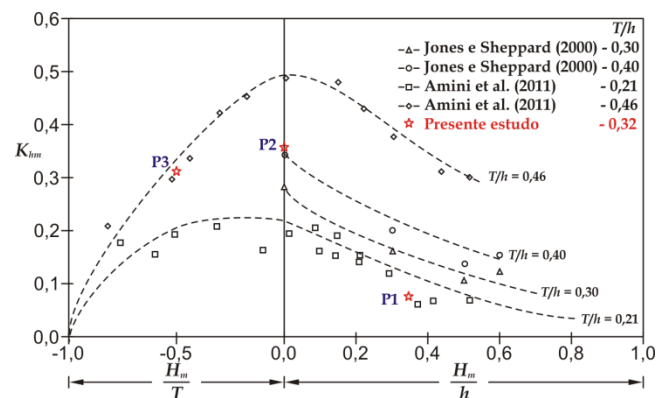


Figura 12. Dependência funcional do fator  $K_{hm}$  com a posição relativa do maciço de encabeçamento.

Para tal, foram selecionados dos estudos de Jones e Sheppard (2000) e Amini *et al.* (2011) os ensaios com relações  $T/h$  semelhantes às consideradas nos ensaios do presente estudo. A Figura 12 ilustra que os valores de  $K_{hm}$  obtidos com ensaios de maciços isolados e com o conceito de subtração (presente estudo) não seguem a mesma tendência. Para a posição 1 (P1) o valor de  $K_{hm}$  obtido através do conceito de subtração é menor, enquanto nas posições 2 e 3 (P2 e P3) o valor de  $K_{hm}$  obtido com base nesse conceito é maior do que os valores obtidos através dos ensaios com maciços isolados.

As diferenças poderão estar relacionadas com a interação da estrutura do escoamento com cada um dos componentes do pilar complexo, a qual e não é considerada no caso dos ensaios com maciços isolados.

No pilar complexo, essas interações correspondem: (i) à deflexão do escoamento descendente da coluna ao atingir o topo do maciço e (ii) ao confinamento dos vórtices formados pelo impacto do escoamento principal (horizontal) com o escoamento descendente do maciço, em torno do agrupamento de estacas.

#### 5.3.4. Contribuição do grupo de estacas

Nos últimos anos têm sido realizados alguns estudos para avaliar a contribuição do grupo de estacas na profundidade de erosão, através do fator  $K_{hge}$ . Dey *et al.* (2008) e Muto (2008) realizaram ensaios com pilares cilíndricos submersos no escoamento enquanto Salim e Jones (1996), Smith (1999) e Amini *et al.* (2012) conduziram ensaios com diferentes configurações de agrupamentos de estacas submersas no escoamento. Tal como nos casos anteriores à análise das outras duas componentes, o fator  $K_{hge}$  pode ser representado pela seguinte expressão:

$$K_{hge} = \frac{d_{sge}}{d_{sge*}} \quad [8]$$

em que  $d_{sge}$  corresponde à contribuição do grupo de estacas (*i.e.*, profundidade de erosão medida em ensaios de cilindros/grupos de estacas submersas no escoamento ou profundidades de erosão correspondente às obtidas nos ensaios do presente estudo, apresentadas no Quadro 3).

No caso dos estudos com cilindros/grupos de estacas isolados,  $d_{sge*}$  foi medido em cada ensaio, enquanto no caso do presente estudo  $d_{sge*}$  corresponde à profundidade de equilíbrio do ensaio de referência B, cujo valor é de 0,139 m.

A Figura 13 apresenta a variação do fator  $K_{hge}$  com a posição relativa do grupo de estacas,  $H_{ge}/h$  ou  $H_{ge}/D_c$  (em que  $H_{ge}$  é a distância medida desde o nível inicial do leito até ao topo do agrupamento de estacas e  $D_c$  é a largura da coluna), para os ensaios com cilindros/grupos de estacas isoladas assim como para as três posições dos ensaios do presente estudo (P1, P2 e P3).

A figura mostra também a curva envolvente dos dados de cilindros/grupos de estacas isoladas – a qual é relevante pelo efeito da duração dos ensaios, conforme já referido –, para fins de comparação. Torna-se evidente que a contribuição do grupo de estacas na profundidade de erosão, obtida de acordo com o conceito de sobreposição (elementos isolados), apenas é válida para  $H_{ge}/h > 0$ .

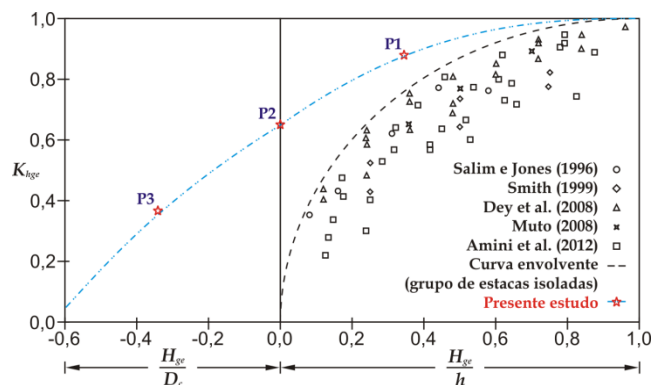


Figura 13. Dependência funcional do fator  $K_{hge}$  com a posição relativa do grupo de estacas.

Os resultados revelam que a contribuição do grupo de estacas na profundidade de erosão, representada pelo fator  $K_{hge}$ , é substancialmente inferior quando obtida com base nos ensaios realizados com agrupamentos isolados comparativamente como os valores obtidos pela aplicação do conceito de subtração (presente estudo). De facto, as maiores diferenças ocorrem quando a posição do topo do agrupamento de estacas se encontra perto do nível inicial do leito ( $H_{ge}/h \approx 0$ ). É evidente que, neste caso, e quando o topo do maciço de encabeçamento se encontra abaixo do nível inicial do leito, o valor do fator  $K_{hge}$  é aproximadamente zero nos ensaios com elementos isolados (conceito de sobreposição), pelo que se infere que o grupo de estacas não contribui para o processo erosivo. No entanto, e de acordo com as Figuras 10 (b e c), é evidente que para as correspondentes situações (posições 2 e 3), o grupo de estacas fica progressivamente exposto no interior da cavidade de erosão ao longo do desenvolvimento do processo erosivo, pelo que se espera que esta componente contribua para a profundidade de erosão, como é patente com a aplicação do conceito de subtração.

## 6. Conclusões

Com base nos resultados obtidos na análise anterior, podem retirar-se as seguintes conclusões mais relevantes:

1. Para pilares complexos com uma única fiada de estacas (correspondente ao caso utilizado no presente estudo), a evolução temporal da profundidade de erosão é semelhante à obtida em ensaios de pilares simples ou grupos de estacas alinhados com o escoamento, a qual é caracterizada por uma tendência de desenvolvimento exponencial única;
2. Os resultados do presente estudo permitem estabelecer que o conceito de subtração pode ser considerado como uma abordagem alternativa, e adequada, para determinar a contribuição dos componentes do pilar complexo na profundidade de erosão de equilíbrio; e;
3. A comparação entre os valores dos fatores  $K_{hc}$ ,  $K_{hm}$  e  $K_{hge}$  obtidos com base nos ensaios com componentes isolados e com base nos resultados do presente estudo (utilizando o conceito de subtração) mostra que: (i) a contribuição da coluna é semelhante nos dois conceitos para as posições 1 e 2 (correspondentes à base do maciço estar coincidente ou acima do nível inicial do leito);

(ii) a contribuição do maciço de encabeçamento não segue a mesma tendência nos dois conceitos, o que pode estar associado à interação da estrutura do escoamento com cada um dos componentes do pilar complexo, e que no caso dos ensaios com maciços isolados não é considerada, e; (iii) a contribuição do grupo de estacas é substancialmente inferior considerando os ensaios conduzidos de acordo com o conceito de sobreposição, o que pode levar a uma subestimação da profundidade máxima de erosão do pilar complexo.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, FCT, através da bolsa de doutoramento SFRH/BD/76396/2011 e do cofinanciamento da FCT no projeto de investigação PTDC/ECM/101353/2008. O trabalho experimental foi realizado em Portugal, utilizando o canal hidráulico do Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

## Referências

- Amini, A., Melville, B.W. e Ali, T.M. (2014). *Local scour at piled bridge piers including an examination of the superposition method*, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 41, Nº 5, 461 – 471.
- Amini, A., Melville, B.W., Ali, T.M. e Ghazali, A.H. (2012). *Clear-water local scour around pile groups in shallow-water flow*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 138, Nº 2, 177 – 185. ISSN: 0733-9429.
- Amini, S.A., Mohammad, T.A., Aziz, A.A., Ghazali, A.H. e Huat, B.B.K. (2011). *A local scour prediction method for pile caps in complex piers*, Water Management, 164, Nº 2, 73 – 80. ISSN: 1741-7589.
- Arneson, L.A., Zevenbergen, L.W., Lagasse, P.F. e Clopper, P.E. (2012). *Evaluating scour at bridges*, fifth edition, U.S. Department of Transportation, FHWA, Colorado, 340 p.
- Coleman S.E. (2005). *Clearwater local scour at complex piers*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 131, Nº 4, 330 – 334. ISSN: 0733-9429.
- Dey, S., Raikar, R.V. e Roy, A. (2008). *Scour at submerged cylindrical obstacles under steady flow*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 134, Nº 1, 105 – 109. ISSN: 0733-9429.
- Ettema, R. (1980). *Scour at bridge piers: Report No. 236*, University of Auckland, School of Engineering, New Zealand.
- Franzetti, S., Larcán, E. e Mignosa, P. (1982). *Influence of tests duration on the evaluation of ultimate scour around circular piers*, International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, Vol. 1, Nº 304.
- Jones J.S. (1989). *Laboratory studies of the effects of footings epile groups on bridge pier scour*, Proceedings of the Bridge Scour Symposium, Vol. 1, 340 – 359.
- Jones J.S. e Sheppard D.M. (2000). *Local scour at complex pier geometries*, Proceedings of World Environmental eWater Resources Congress 2000, Vol. 1, 1 – 9. ISBN 978-3540657699.
- Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pêgo, J. e Cardoso, A. (2013a). *Clear-water scour at pile groups*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 139, Nº 10, 1089 – 1098. ISSN: 0733-9429.
- Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pêgo, J. e Cardoso, A. (2013b). *Clear-water scour at comparatively large cylindrical piers*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 139, Nº 11, 1117 – 1125. ISSN: 0733-9429.
- Moreno, M., Maia, R., Couto, L. e Cardoso, A. (2012). *Evaluation of local scour depth around complex bridge piers*, Proceedings of River Flow 2012, Vol. 2, 935 – 942. ISBN 978-0-415-62129-8.
- Moreno, M., Maia, R., Couto, L. e Cardoso, A. (2014). *Contribution of complex pier components on local scour depth*, Proceedings 3rd IAHR Europe Congress, Vol. 1, 1 – 10. ISBN 978-989-96479-2-3.
- Muto, Y. (2008). *Local scour around a submerged cylindrical pier*, Proceedings of International Conference on Scour eErosion 2008, Vol. 1, 180 – 185.
- Neill, C. R. (1967). *Mean velocity criterion for scour of coarse uniform bed-material*, Proceedings 12th IAHR Congress, Vol. 1, 46 – 54.
- Richardson, E.V. e Davis, S.R. (2001). *Evaluating scour at bridges*, fourth edition, U.S. Department of Transportation, FHWA, Colorado, 378 p.
- Salim, M. e Jones, J.S. (1996). *Scour around exposed pile foundations*, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 1, 335 – 345.
- Sheppard, D.M. e Renna, R. (2010). *Florida bridge scour manual*, Florida Department of Transportation, Tallahassee, 144 p.
- Sheppard, D.M., Melville, B. e Demir, H. (2014). *Evaluation of existing equations for local scour at bridge piers*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 140, Nº 1, 14 – 23. ISSN: 0733-9429.
- Smith, W.L. (1999). *Local structure-induced sediment scour at pile groups*, MSc Thesis, Florida University, Gainesville, 83 p.