



CARATERIZAÇÃO DA EROÇÃO EM TORNO DE UM PILAR COMPLEXO

Ana Margarida, BENTO¹; Pedro Xavier, RAMOS²; Rodrigo, MAIA³; João Pedro, PÊGO⁴

1 – Estudante de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil, SHRHA, Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia, FEUP, Rua Dr. Roberto Frias, Porto 4200-465, Portugal, anabento@fe.up.pt, +351 968875200

2 – Junior Assistant, Hydraulics Laboratory, Department of Civil Engineering, Ghent University, Belgium, pedro.ramos@ugent.be, +32 489963637

3 – Professor Associado, Departamento de Engenharia Civil, SHRHA, Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia, FEUP, Rua Dr. Roberto Frias, Porto 4200-465, Portugal, rmaia@fe.up.pt

4 – Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, SHRHA, Universidade do Porto – Faculdade de Engenharia, FEUP, Rua Dr. Roberto Frias, Porto 4200-465, Portugal, jppego@fe.up.pt

Resumo (300 palavras)

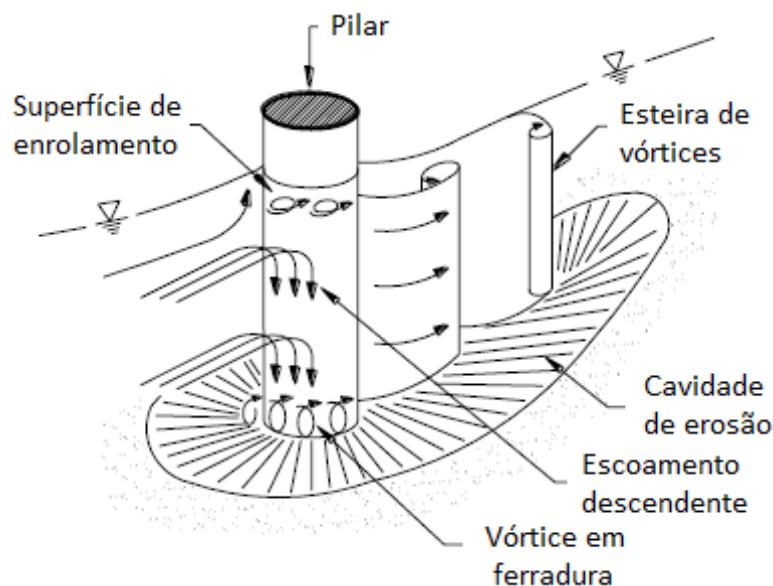
A presença de pilares e encontros de pontes no seio de escoamentos propicia a ocorrência de processos erosivos junto daqueles obstáculos. Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo a caracterização da evolução temporal da cavidade de erosão junto a um pilar complexo de uma ponte. O trabalho experimental consistiu na reprodução, em modelo físico, de um escoamento na proximidade do pilar complexo fundado num leito de sedimentos uniformes e sem transporte generalizado de sedimentos. As 15 experiências realizadas decorreram num canal hidráulico do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A duração de cada ensaio foi previamente estabelecida por forma a permitir uma análise gradual do processo erosivo junto ao pilar complexo. A evolução temporal da profundidade máxima de erosão e dos volumes de escavação foram obtidos com precisão submilimétrica através da aplicação de fotogrametria de pequena amplitude. Desta análise resultaram equações empíricas para as mesmas grandezas, profundidade de erosão e volume de escavação ao longo de todo o processo erosivo, para a configuração do pilar complexo adotada.

Palavras-chave: pilar complexo, erosão localizada, cavidade de erosão, fotogrametria, transporte de sedimentos.

Tema: 7) Avaliação, controlo e gestão do risco

1. INTRODUÇÃO

Em diversos casos, a estrutura de uma ponte tem os seus pilares fundados no leito do rio que transpõe. A presença deste tipo de obstáculos na água é responsável pelo aparecimento de erosões localizadas em torno dos mesmos, o que pode comprometer a sua estabilidade e, conseqüentemente, levar ao colapso, parcial ou mesmo total, da estrutura a que pertencem. O escoamento, quando deflete na superfície do pilar, descreve uma trajetória descendente, resultando no vórtice em ferradura, que se gera na base do pilar e move-se para jusante (Figura 1). Simultaneamente, o pilar induz a separação do escoamento, resultando na formação de vórtices de esteira que se propagam para jusante. Estes mecanismos interferem com o leito do rio, levando ao transporte dos sedimentos do leito e conseqüente formação e desenvolvimento da cavidade de erosão na vizinhança do



pilar.

Figura 1. Escoamento em torno de um pilar circular simples (adaptado de Hammil, 1999).

O fenómeno da erosão localizada é, desde longa data, objeto de investigação científica. Melville e Raudkivi (1977) estenderam o conhecimento da aerodinâmica sobre o escoamento em torno de estruturas, compilado em Thwaites (1960), à investigação do mesmo sobre um fundo de sedimentos móveis para diferentes estágios do processo erosivo. Seguiu-se um vasto número de estudos onde foi visada a previsão da profundidade de equilíbrio junto a pilares de pontes (Breusers et al., 1977; Breusers et al. 1991, entre outros). Trabalhos mais aprofundados foram apresentados por Melville (1988) e por Dargahi (1990). Mais tarde, Melville e Coleman (2000) surge como uma referência no domínio da erosão em pilares de pontes. Da maioria dos estudos supracitados resultaram fórmulas semi-empíricas de estimativa da máxima profundidade de erosão. Visando uma melhor compreensão do fenómeno erosivo e dos mecanismos que o provocam e mantêm, vários autores estudaram o campo do escoamento em torno de cilindros (Dargahi, 1989; Graf e Yulistiyanto, 1998; Ettema et al. 2006; Dey e Raykar, 2007; Ramos et al. 2014). A maioria destes estudos foca-se em pilares simples. Contudo, é cada vez mais frequente a adoção de pilares complexos (constituído por coluna, maciço de encabeçamento e estacas) como fundação da ponte. Nestes casos, a aplicação das fórmulas usadas no projeto de pilares simples pode não ser totalmente válida (Landers e Mueller, 1996). Assim, Coleman (2005), Ataie-Ashtiani et al.

(2010) e Moreno et al. (2012) empenharam-se no estudo da erosão localizada em torno de pilares complexos (Figura 2). A investigação de Fael et al. (2014) consiste numa completa revisão dos últimos avanços no estudo experimental da erosão local em torno de pilares de pontes.

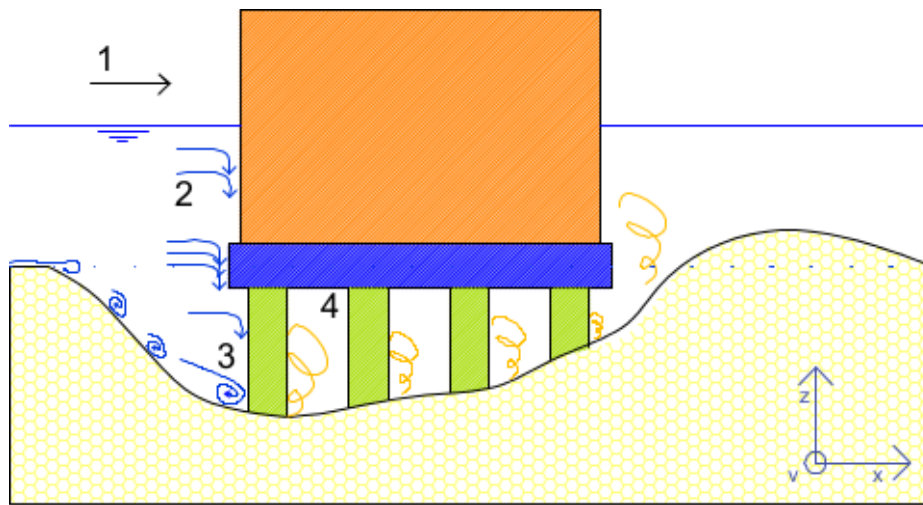


Figura 2. Escoamento em torno de um pilar complexo: 1 – sentido do escoamento, 2 – escoamento descendente, 3 – vórtice de ferradura, 4 – esteira de vórtices (adaptado de Moreno, 2012).

A erosão localizada em pilares é um fenómeno complexo e o seu estudo tem sido maioritariamente experimental. No entanto, tem-se verificado uma aposta crescente em estudos através de simulações numéricas, para as quais são necessários dados para validação e calibração. Neste contexto, desenvolveram-se vários modelos numéricos, na área CFD (*Computational Fluid Dynamics*), visando o estudo do processo erosivo em torno de pilares de pontes. Olsen e Melaaen (1993) desenvolveram um modelo tridimensional para simular a erosão em torno de um pilar circular simples, obtendo uma satisfatória concordância com os dados experimentais. Tseng et al. (2000) usou o modelo LES (*large eddy simulation*) para estudar o escoamento em torno de um cilindro, validando-o com os resultados de Dargahi (1989). Abdelaziz (2011) simulou o escoamento e o transporte de sedimentos em torno de um pilar circular, comparando o campo de velocidades e a erosão do leito móvel com as medições efetuadas por Unger e Hager (2006). Uma completa revisão dos avanços numéricos nesta área é apresentada por Sumer (2015).

Para a calibração de futuros modelos de previsão de profundidade, mas também da cavidade de erosão, em torno de pilares complexos é fulcral a existência de dados experimentais no mesmo tópico, e é nesse contexto que surge este trabalho. O presente estudo fornece uma base de dados de evolução geométrica da cavidade de erosão em torno de um pilar complexo, desde o início do processo erosivo até ao estado de equilíbrio. O leito móvel é caracterizado por meios de fotogrametria de pequena amplitude, método testado e aplicado anteriormente por Pflieger et al. (2010), Eder et al. (2011), Rapp et al. (2012) e Ramos et al. (2015).

2. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

2.1 Canal hidráulico

Os ensaios experimentais realizaram-se num canal hidráulico, de 32,20 m de comprimento e 1,00 m de largura, do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). O canal possui janelas de vidro, que permitem a fácil visualização do escoamento, funcionando em circuito fechado. A água é bombada de dois reservatórios, situados a um nível inferior, por duas bombas associadas em paralelo. O caudal em circulação é regulado manualmente e controlado por dois caudalímetros eletromagnéticos, colocados a montante do canal. À entrada do canal existem macro rugosidades que garantem um escoamento turbulento bem desenvolvido. Na extremidade de jusante do canal, uma comporta plana vertical regula a altura do escoamento. O canal dispõe de duas caixas de areia: uma, onde se instalou o pilar complexo, e outra, mais a jusante, onde os sedimentos transportados foram retidos, ambas com 3,30 m de comprimento e 0,35 m de profundidade. Para a realização dos ensaios usou-se uma areia de granulometria uniforme ($\sigma_d = 1.4$), com diâmetro médio (D_{50}) de 0,86 mm e uma densidade (ρ) de 2650 kgm^{-3} . As experiências decorreram sem transporte generalizado de sedimentos, através da adoção de uma velocidade de aproximação igual a 97% da velocidade crítica do escoamento, obtida pela fórmula de Neil (1967). Foram, portanto, impostos um caudal de 59 Ls^{-1} e uma altura de escoamento de 0,18 m.

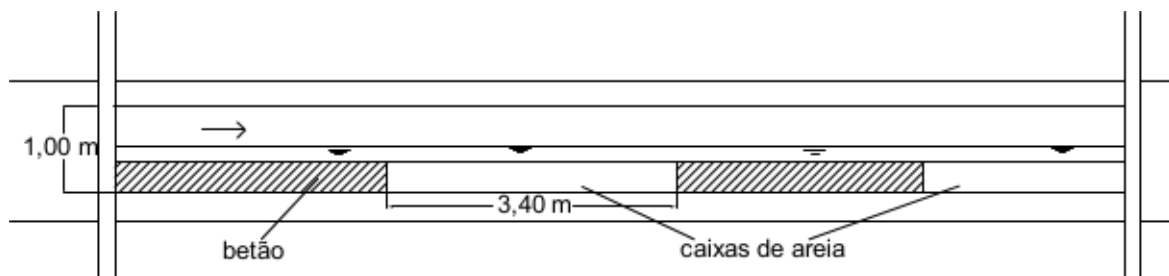


Figura 3. Vista longitudinal do canal hidráulico.

2.2 Pilar complexo

O modelo do pilar complexo, construído para o propósito deste estudo, é constituído por uma coluna, um maciço de encabeçamento e quatro estacas de fundação, conforme ilustra a Figura 4. A coluna e o maciço de encabeçamento são de vidro acrílico e possuem extremidades arredondadas. Por sua vez, as estacas de fundação são de policloreto de vinilo (PVC). O pilar complexo foi instalado na caixa de sedimentos, no alinhamento central do canal, e posicionado por forma a expor metade da altura do maciço de encabeçamento (0,029 m) ao escoamento de aproximação. Segundo Teixeira (2013) as maiores profundidades de erosão ocorreram para a presente configuração do pilar complexo.

2.3 Procedimento experimental

Procedeu-se à fixação do pilar complexo na caixa de areia, posteriormente preenchida com areia até atingir o nível superior da caixa. Após uma conveniente compactação e regularização da superfície de areia, protegeu-se a zona em redor do pilar complexo com duas grelhas metálicas, revestidas a geotêxtil, para evitar o aparecimento de erosão antes do escoamento atingir as características desejadas. Abriram-se, de forma gradual, as válvulas até atingir a altura de água e o caudal de entrada desejados. Removeram-se as

placas de geotêxtil com a ajuda de dois fios laterais, e iniciou-se o ensaio. Decorrido o tempo estipulado para a duração do ensaio, procedeu-se ao esvaziamento do canal e à secagem da areia. Este procedimento foi realizado para as seguintes durações de ensaio: 5, 10, 30, 60 min, 2, 4, 8, 12, 24 h, 3, 5, 8 e 11 dias.

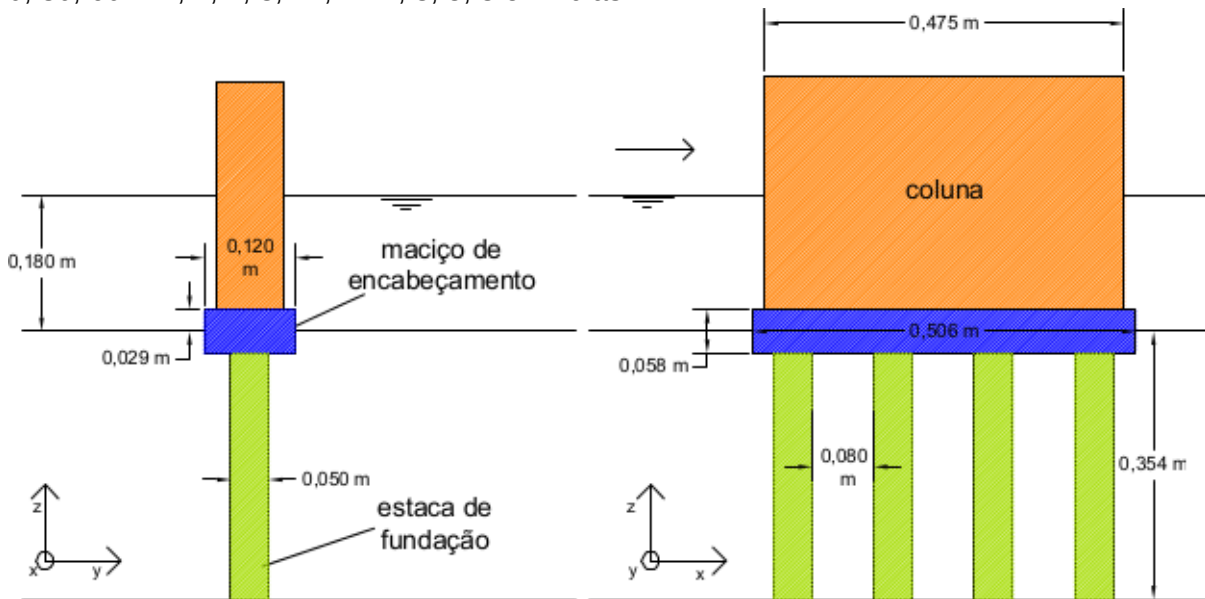


Figura 4. Configuração geométrica do modelo do pilar complexo em estudo.

2.4 Metodologia experimental

Os ensaios experimentais permitiram: (i) a avaliação da evolução da profundidade máxima de erosão junto dos componentes do pilar complexo, (ii) a reconstrução tridimensional da cavidade de erosão, e (iii) a derivação de equações empíricas para avaliação da taxa de volume erodido e da profundidade de erosão.

A evolução da profundidade de erosão, imediatamente a montante do maciço de encabeçamento, foi avaliada através de um limnómetro de olho catódico (cruz laranja na Figura 5). Junto de cada estaca de fundação, a profundidade de erosão foi medida através da leitura de uma escala graduada acoplada às mesmas.

A cavidade de erosão, ao fim de cada ensaio experimental, foi reconstruída por aplicação de fotogrametria de pequena amplitude. Esta técnica, de precisão submilimétrica, permitiu a quantificação da distribuição espacial da erosão em torno do pilar complexo. Para a obtenção de resultados fidedignos foi necessário conceber um esquema de captura fotográfica e de posicionamento de elementos de referência espacial, conforme o apresentado na Figura 5.

Foi usada uma câmara digital (Canon PowerShot SX 160 IS) para fotografar a cavidade de erosão e a zona circundante, em diversos pontos, sobre uma plataforma horizontal a aproximadamente 0,60 m do nível inicial do leito de areia. Os elementos de referência espacial, círculos azuis na Figura 5, consistiram em determinadas marcas efetuadas em duas réguas graduadas, colocadas junto às paredes do canal. Utilizou-se o software Agisoft PhotoScan Professional (versão 1.0.4) para o processamento fotogramétrico e obtenção dos correspondentes modelos digitais de elevação (DEMs). A introdução dos DEMs no software de sistema de informação geográfica Global Mapper (versão 15.0) permitiu o cálculo do

nível do leito e a medição do volume da cavidade de erosão. Esta informação conduziu à derivação de expressões empíricas para a avaliação de ambos, concretizando, deste modo, o objetivo definido em (iii).

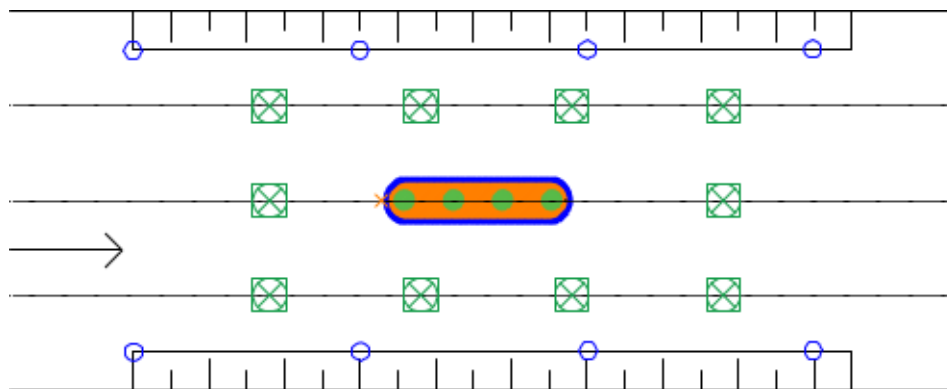
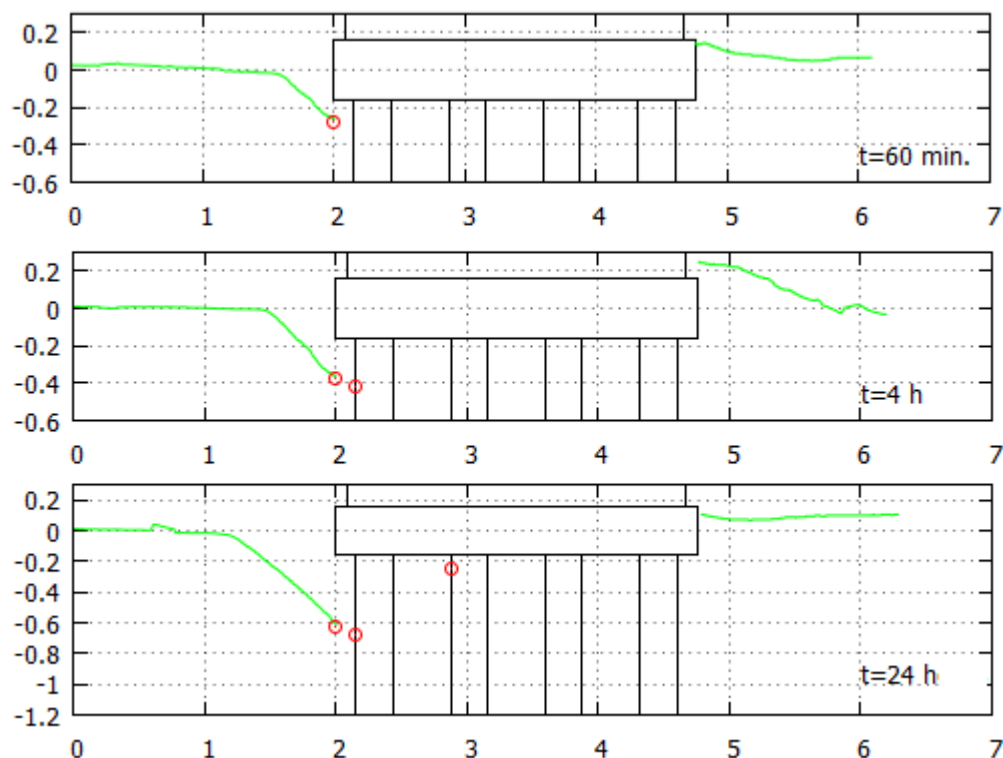


Figura 5. Esquema de recolha de dados experimentais: capturas da câmara (quadrados verdes), pontos de controlo (círculos azuis) e ponto de medição do limnómetro (cruz laranja).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A configuração do leito no alinhamento central do pilar complexo está ilustrado na Figura 6 para alguns dos instantes ensaiados. Considerou-se como critério de paragem do último ensaio a duração correspondente a um aumento da profundidade de erosão inferior a 5% do diâmetro da estaca de fundação num período de 24 horas (Melville and Chiew 1999). Deste modo, a Figura 7 apresenta a evolução temporal da profundidade de erosão junto dos componentes do pilar complexo (maciço de encabeçamento e estacas de fundação) para esse último ensaio (com duração de 11 dias).



(continua na página seguinte)

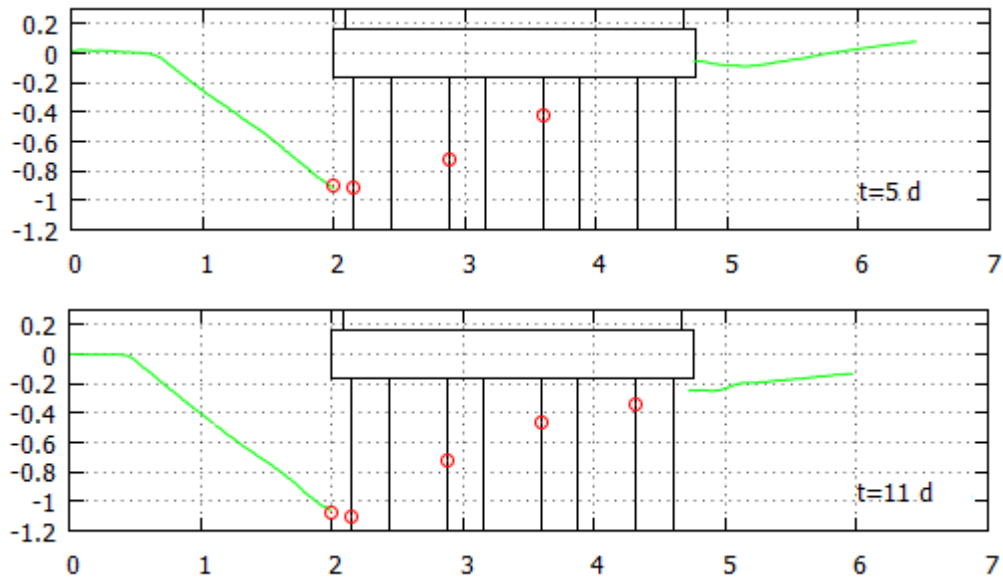


Figura 6. Perfis longitudinais do leito segundo o alinhamento central do pilar complexo.

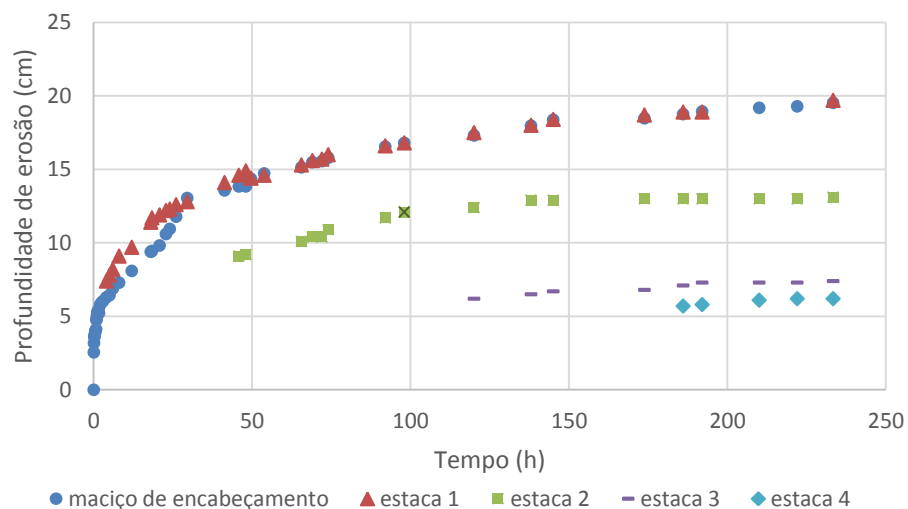


Figura 7. Último ensaio (11 dias): evolução da profundidade de erosão junto do maciço de encabeçamento e das estacas de fundação.

É de referir que as estacas foram numeradas de montante (estaca 1) para jusante (estaca 4). A leitura das réguas acopladas às estacas de fundação foi efetuada assim que o processo erosivo as atingia, enquanto o registo da profundidade de erosão, imediatamente a montante do maciço de encabeçamento, foi feito desde o início do ensaio.

No último ensaio (11 dias) observou-se uma profundidade de erosão de 19,48 cm junto ao maciço de encabeçamento, 19,80 cm na estaca 1, 13,10 cm na estaca 2, 7,50 cm na estaca 3 e 6,20 cm na estaca 4. Recorrendo a métodos de previsão da profundidade de erosão na

literatura, o valor de 19,80 aproxima-se bastante dos 19,80 e 20,50 cm, previstos por Richardson and Davis (2001) e FDT (2010), respetivamente.

Além da evolução temporal da profundidade de erosão, este estudo procurou, também, caracterizar a cavidade de erosão através da determinação do volume escavado ao fim de cada ensaio. A Figura 8 mostra essa evolução com respeito ao tempo de ensaio da última experiência (t_e).

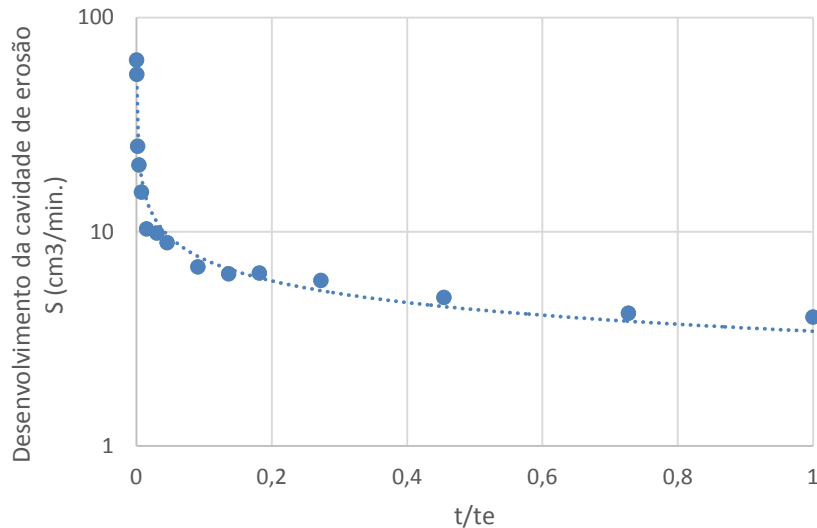


Figura 8. Evolução temporal do volume da cavidade de erosão.

Como era de esperar, ocorre um significativo volume de sedimentos transportados durante os primeiros instantes do processo erosivo, com taxas de erosão de $63,4$ e $54,4 \text{ cm}^3\text{min}^{-1}$, para os dois primeiros pontos mais à esquerda da Figura 8. A aproximação ao último ensaio mostra uma redução assintótica até atingir os $4 \text{ cm}^3\text{min}^{-1}$. A relação apresentada na Figura 8 é bem representada pela expressão exponencial da Equação 1, onde λ assume o valor de 3,43 no presente estudo.

$$S = \lambda \left(\frac{t}{t_e} \right)^{-0.336} \quad (1)$$

A Figura 9 mostra a relação do volume da cavidade de erosão (V) com a profundidade máxima de erosão (ds), ao longo do processo de erosão. Estas grandezas foram normalizadas pelos correspondentes valores para o ensaio final, V_f e ds_f . A curva, expressa pela Equação 2, demonstra que o volume erodido é proporcional à profundidade de erosão a uma potência de 3, como tem sido relatado por diversos autores.

$$\frac{V}{V_e} = \left(\frac{ds}{ds_e} \right)^3 \quad (2)$$

As mesmas grandezas estão representadas na Figura 10, onde a evolução temporal dos rácios é analisada ao longo do tempo normalizado com a duração da experiência final.

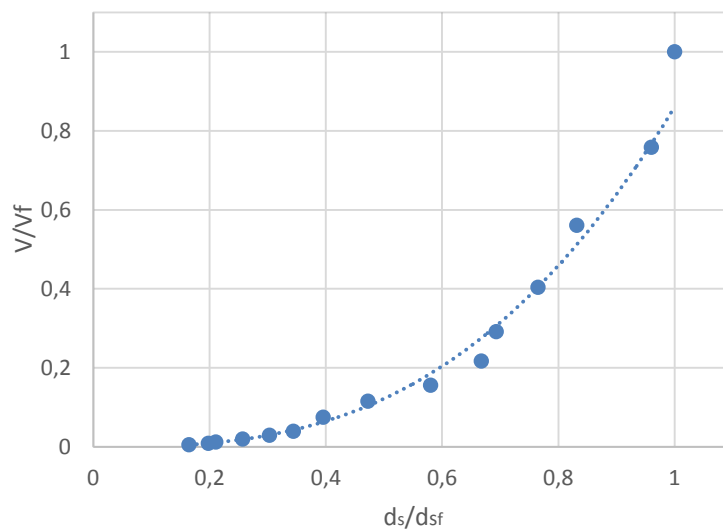


Figura 9. Relação entre os rácios da profundidade de erosão e o volume escavado para cada ensaio.

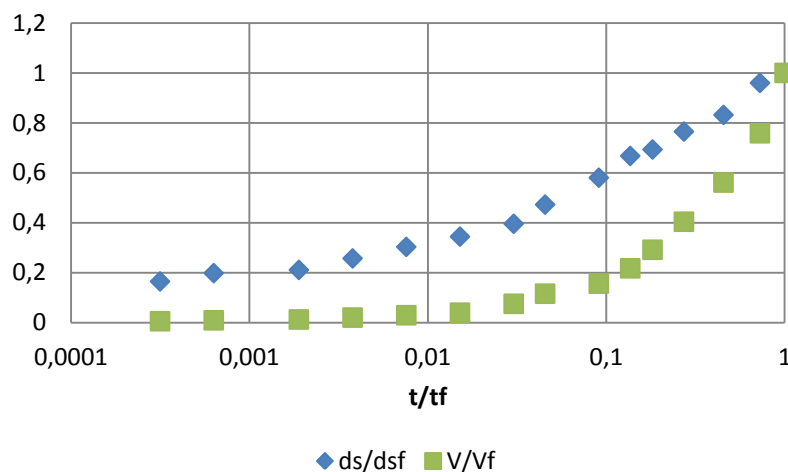


Figura 10. Relação entre a máxima profundidade de erosão e volume escavado ao longo do tempo.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho reúne um conjunto de 15 ensaios realizados num canal hidráulico do Laboratório de Hidráulica da FEUP para caracterização da evolução temporal da cavidade de erosão em torno de um pilar complexo. A análise englobou o estudo do desenvolvimento da profundidade máxima de erosão e do volume da cavidade de erosão.

A análise fotogramétrica permitiu a obtenção de expressões empíricas para a taxa de transporte de sedimentos, volume escavado e profundidades de erosão para a configuração do pilar complexo em estudo.

Considera-se adequada a metodologia experimental adotada, nomeadamente no que diz respeito ao levantamento das características da cavidade de erosão através da aplicação de fotogrametria de pequena amplitude, para a análise em modelo físico deste fenómeno.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi parcialmente suportado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através de fundos do programa COMPETE, e por fundos nacionais da Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo projeto “Numerical and experimental study of the flow around complex bridge piers” [EXPL/ECM-HID/1663/2013].

REFERÊNCIAS

- Abdelaziz, A. A. (2011) Minimizing of scour downstream hydraulic structures [M.Sc. dissertation]. Benha: Benha University.
- Ataie-Ashtiani, B.; Baratian-Ghorghi, Z. e Beheshti, A. (2010) Experimental investigation of clear-water local scour of compound piers. *J. Hydraul. Eng.* 136 (6) 343–351.
- Breusers, H. e Raudkivi, A. (1991) *Scouring: Volume 2*, IAHR Hydraulic Design Manual, Rotterdam: Balkema.
- Breusers, H., Niccollet, G. e Shen, H. (1977) Local scour around cylindrical piles. *J. Hydraul. Res.* 15 (3) 211–252.
- Coleman, S. (2005) Clearwater local scour at complex piers, *J. Hydraul. Eng.* 131 (4) 330–334.
- Dargahi, B. (1989) The turbulent flow field around a circular cylinder. *Exp. Fluids* 8 1–12.
- Dargahi, B. (1990) Controlling Mechanism of Local Scouring, *Journal of Hydraulic Engineering*, 116 (10): 1197-1214.
- Dey, S. e Raikar, R. (2007) Characteristics of horseshoe vortex in developing scour holes at piers, *J. Hydraul. Eng.* 133 (4) 399–413.
- Eder, K., Rapp, C., Kohl, V., Hanrieder, B. e U. Stilla (2011) Photogrammetric monitoring of underwater erosion in the vicinity of cylindrical bridge piers. Munich: International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing e Spatial Information Sciences.
- Ettema, R., Kirkil, G., & Muste, M. (2006) Similitude of large-scale turbulence in experiments on local scour at cylinders. *Journal of Hydraulic Engineering*, 132(1), 33-40.
- Fael, C., R. Lança, Couto, L., Cardoso, A. H. 2014. Local scour at single piers revisited. 3rd IAHR Europe Congress, Book of Proceedings, 2014, Porto, Portugal.
- Graf, W. e Yulistiyanto, B. (1998) Experiments on flow around a cylinder: the velocity and vorticity fields. *J. Hydraul. Res.* 36 (4) 637–653.
- Hammil, L. (1999) *Bridge Hydraulics*. E & F Spon, London and New York.
- Landers, M. e Mueller, D. (1996) *Channel scour at bridges in the United States*. McLean, Virginia, Turner Fairbanks Hwy. Res. Ctr.
- Melville, B. & Coleman, S. (2000) *Bridge Scour*. Water Resources Publications LLC, Colorado, USA.

- Melville, B.W. e Chiew, Y.M. (1999) Time scale for local scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, AS CE, 125 (1), 59–65.
- Melville, B.W. e Coleman, S. (2000) *Bridge Scour*. Colorado: Water Resources Publications LLC.
- Moreno, M., Maia, R., Couto L. e Cardoso. H. (2012) Evaluation of local scour depth around complex bridge piers. *River Flow - International Conference on Fluvial Hydraulics*, San Jose (Costa Rica).
- Neil, C.R. 1967. Mean Velocity criterion for scour of coarse uniform bed material, *Proceedings of the XII IAHR*, Fort Collins, Colorado.
- Olsen, N.R.B. e Melaan, M.C. (1993) Three dimensional calculation of scour around cylinders". *J. Hyd. Eng.*, ASCE, 119(9), 1048-1054.
- Pfleger, F., Rapp, C. e Manhart, M. (2010) Analysis of the temporal evolution of the sediment movement in the vicinity of a cylindrical bridge pier. In S. E. Burns, S. K.
- Ramos, P. X., Pêgo, J. P., Maia, R. (2014) Numerical simulation of the flow around a pier using openFOAM. *3rd IAHR Europe Congress, Book of Proceedings*, 2014, Porto, Portugal.
- Ramos, P. X., Bento, A. M., Pêgo, J. P., Maia, R. (2015) Characterization of the scour cavity evolution around a complex bridge pier. *Journal of Applied Water Engineering and Research*.
- Rapp, C. e Eder, K. (2012) 3D determination of the sour evolution around a bridge pier by photogrammetric means. *Proc. Int. Conf. River Flow 2012*, 943-950, R.M. Munoz, eds.
- Sumer, B. M. 2015. A review of recent advances in numerical modelling of local scour problems. *Scour and Erosion – Cheng, Draper & An (Eds)*, London.
- Teixeira, J. 2013. *Modelação experimental de erosões localizadas junto de pilares complexos (Physical modelation of local scour near complex pier)* [MSc Dissertation] Faculty of Engineering of University of Porto, Portugal.
- Tseng, M.H., Yen, C.L. Song, C.C.S. (2000) Computation of three-dimensional flow around square and circular piers. *Intl J. Numer. Methods Fluids* 34, 207–227.
- Thwaites, B. 1960. *Incompressible aerodynamics*. University Press, Oxford.
- Unger, J., e Hager, W. H. (2006) Temporal flow evolution of sediment embedded circular bridge piers. *River Flow 2006*, 1, pp. 729-739, Taylor & Francis Group, London.