

## CARACTERIZAÇÃO DA CAVIDADE DE EROSÃO EM TORNO DE FUNDAÇÕES DE PONTES. RELAÇÃO ENTRE VOLUME ERODIDO E PROFUNDIDADE DE EROSÃO

Ana Margarida, BENTO<sup>1</sup>; Teresa, VISEU<sup>2</sup>; Lúcia, COUTO<sup>3</sup>; João Pedro, PÊGO<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Estudante de doutoramento, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa / Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, Portugal, ana.bento@fe.up.pt

<sup>2</sup> Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, tviseu@lnec.pt

<sup>3</sup> Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, lcouto@lnec.pt

<sup>4</sup> Professor Auxiliar, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, Portugal, jppego@fe.up.pt

### Resumo

O desenvolvimento da cavidade de erosão junto de pilares e encontros de pontes coloca, frequentemente, em risco a sua estabilidade estrutural, o que poderá conduzir a perdas patrimoniais e/ou humanas como consequência do seu colapso parcial ou total. É, portanto, fundamental conhecer a morfologia do leito em torno dos elementos que constituem a fundação de pontes. Embora o fenómeno da erosão localizada tenha sido amplamente investigado nas últimas décadas, poucas formulações foram desenvolvidas para a previsão do volume erodido com base na profundidade máxima de erosão, principal parâmetro usado no dimensionamento das fundações de pontes. As equações existentes na literatura resultam essencialmente de estudos desenvolvidos em ambiente laboratorial. A presente comunicação tem como objetivo apresentar as formulações descritas na literatura que relacionem o volume erodido com a profundidade máxima de erosão ao longo do tempo bem como a aplicação de tais formulações em contribuições recentes dos autores, provenientes também de estudos laboratoriais. O trabalho experimental apresentado na presente comunicação consistiu na reprodução de um escoamento na proximidade de um pilar circular de 0,05 m de diâmetro, fundado num leito de sedimentos uniformes e sem transporte sólido generalizado. As experiências decorreram num canal do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A evolução temporal da profundidade máxima de erosão e dos volumes erodidos foram obtidos com precisão submilimétrica através da aplicação de fotogrametria de pequena amplitude. Desta análise resultou uma equação empírica para a profundidade de erosão e o volume de escavação ao longo de todo o processo erosivo. A aplicabilidade da equação resultante é avaliada confrontando com resultados de equações descritas na literatura.

**Palavras-chave:** Erosão localizada, cavidade de erosão, fundações de pontes, profundidade de erosão, volume erodido.

**Tema:** Investigação em hidráulica e recursos hídricos

## 1. INTRODUÇÃO

O fenómeno de erosão localizada resulta da complexa interação entre o escoamento e o leito móvel de um rio em resultado das perturbações que se desenvolvem devido à presença de obstáculos nesse escoamento. A presença de obstáculos, como pilares e encontros de pontes, induz uma significativa alteração do campo de velocidades, resultando na erosão do leito envolvente (Melville e Coleman, 2000). Este processo erosivo constitui a principal causa de instabilidade estrutural de pontes e está frequentemente associada à rotura parcial ou total, ameaçando valores patrimoniais e, em casos mais extremos, vidas humanas (Flint et al., 2017). Uma rigorosa previsão da morfologia do leito reveste-se, assim, de grande importância para um projeto seguro e económico de novas pontes, bem como para a manutenção das já existentes (Johnson e Jones, 1993).

Este tópico tem sido amplamente investigado por recurso a campanhas experimentais, observações de campo e modelações numéricas. Uma grande parte desses estudos focou-se na previsão da profundidade máxima de erosão em torno de encontros e pilares até as condições de equilíbrio serem alcançadas, após algumas horas ou mesmo vários dias de ensaio (Kothyari et al., 2007). No entanto, diversos investigadores concordam que o equilíbrio não é representativo das condições de campo, devido à longa duração necessária de eventos de cheia que poderia proporcionar as condições para atingir a fase de equilíbrio, o que leva a uma frequente sobre-estimação da profundidade de erosão. Apesar disso, alguns investigadores concentraram-se na análise da evolução temporal da profundidade de erosão (Oliveto e Hager, 2005; Pandey et al., 2017). Embora se registe um elevado esforço da comunidade científica em fornecer informações importantes sobre o efeito de vários parâmetros na avaliação da profundidade de erosão, a compreensão física do fenómeno erosivo permanece ainda incompleta. Para melhor descrever este fenómeno deve dispor-se, ainda, de informação detalhada da morfologia da cavidade de erosão que se desenvolve, nomeadamente, sobre a relação entre a profundidade máxima de erosão e o volume erodido.

Nas últimas décadas, alguns trabalhos laboratoriais têm sido realizados com o objetivo de fornecer formulações empíricas que relacionam as profundidades máximas de erosão e os volumes erodidos, baseando-se sobretudo no balanço de massa de sedimentos à escala da cavidade de erosão experimentalmente obtida. Yanmaz e Altinbilek (1991) foram os primeiros autores a associar a geometria da cavidade de erosão à de um cone invertido de base circular ou quadrada, fornecendo uma aproximação razoável do volume erodido. Esta abordagem foi estendida a encontros de pontes por Yanmaz e Köse (2007). Couto (2000) obteve dados de profundidades de erosão e respetivos volumes erodidos na vizinhança de encontros de pontes. Funções parabólicas têm também vindo a ser apresentadas para pilares simples, de secção circular e quadrangular, fundados em diferentes tipos de sedimentos (Link e Zanke, 2004; Link et al., 2008; Diab et al., 2010; Diab, 2011), demonstrando um melhor ajuste à forma real da cavidade de erosão do que a primeira aproximação. Outros investigadores, como Dey (1999) e Ramos et al. (2016), assumiram que o volume apresenta uma função polinomial de terceira ordem da profundidade máxima de erosão, tanto para um pilar circular como para um pilar de geometria composta. Embora razoáveis, algumas dessas descrições empíricas não

são totalmente suportadas por medições experimentais extensas, podendo comprometer a fiabilidade e resolução das mesmas.

Em contraste com a maioria dos trabalhos onde os levantamentos do interior da cavidade de erosão são essencialmente pontuais, o que condiciona representações mais detalhadas da superfície erodida, existem trabalhos mais recentes onde a evolução temporal da cavidade de erosão em torno de pilares circulares se processa sem interrupção da experiência, através da aplicação de técnicas de imagem avançada (Bouratsis et al., 2013, 2017). Estas técnicas possibilitaram uma análise contínua e não-intrusiva da evolução temporal da cavidade de erosão, com resolução espacial e temporal bastante significativa, resultando em novas formulações empíricas da morfologia da cavidade de erosão. Aliada a alguns avanços da tecnologia de instrumentação laboratorial, tem-se assistido a um crescente desenvolvimento da modelação numérica do processo erosivo em torno de fundações de pontes, nomeadamente de ferramentas de dinâmica de fluidos computacional (CFD), para a qual é fundamental dispor de dados da morfologia do leito que permitam a calibração e a validação desses modelos. Uma descrição recente e mais completa das características do leito envolvente e sua relação com o campo de escoamento é, entre outros, feita por Escauriaza e Sotiropoulos (2011), cujo modelo numérico foi validado com resultados experimentais de Dargahi (1990). Uma revisão recente dos avanços numéricos nesta área é apresentada por Sumer (2015).

Não obstante estes avanços, há ainda falta de dados experimentais sobre a geometria da cavidade de erosão. Por outro lado, na impossibilidade de caracterizar tridimensionalmente a cavidade de erosão, é necessário dispor de formulações que permitam uma reprodução, ainda que aproximada, da geometria dessa cavidade e da sua relação com a profundidade de erosão, parâmetro tão comumente usado no dimensionamento das fundações de pontes.

Neste sentido, a presente comunicação apresenta uma compilação de equações existentes na literatura e procede à sua aplicação a dados experimentais. O trabalho experimental realizado consistiu na reprodução de um escoamento na proximidade de um pilar circular de 0,05 m de diâmetro, fundado num leito de sedimentos uniformes e sem transporte sólido generalizado. Os ensaios decorreram na instalação experimental do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

As formulações disponíveis na literatura são descritas na secção 2. A instalação experimental, o modelo de pilar, o procedimento e metodologia experimental são brevemente apresentados na secção 3. Os resultados experimentais são sistematizados e discutidos na secção 4. Na secção 5 procede-se à aplicação e análise comparativa das formulações empíricas, derivada e recolhidas da literatura, que relacionam a profundidade máxima de erosão com o volume erodido. Por fim, as principais conclusões são remetidas à secção 6.

## 2. FORMULAÇÕES EXISTENTES E CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO

A revisão literária efetuada indica que são poucos os dados que fundamentam as formulações empíricas, provenientes de trabalhos experimentais, que relacionam a profundidade máxima de erosão com o volume erodido junto de pilares e encontros de pontes. A Tabela 1 apresenta as condições de escoamento e as propriedades dos sedimentos usadas na derivação de algumas formulações existentes. Da análise destes elementos, verifica-se que estas formulações foram obtidas numa gama de intensidades de escoamento ( $U/U_c$ ) variando de 0,5 (início do transporte sólido) a 1,5 (condições de transporte sólido generalizado). A altura de escoamento de aproximação varia entre uma a duas vezes a dimensão do elemento de fundação (exposta ao escoamento). A gama de variação da granulometria dos sedimentos do leito variam de  $D_{50} = 0,26$  mm (areia) a  $D_{50} = 3,25$  mm (gravilha). Os coeficientes de gradação em causa indicam distribuições uniformes dos sedimentos ( $\sigma_D$  inferiores a 1,5), à exceção de alguns ensaios de Couto (2000). Segue-se uma breve descrição sobre a obtenção das formulações disponíveis na literatura e indicadas na Tabela 1.

Yanmaz e Altinbilek (1991) foram os primeiros autores a associar a forma da cavidade de erosão à de um cone invertido (*frustum of an inverted cone*, na literatura inglesa) de base circular ou quadrada, consoante a secção do pilar. A formulação empírica, presente na Tabela 1, resultou de um conjunto de experiências em modelos de pilar de secção circular e quadrada, de 0,067 m de diâmetro e de comprimento lateral, respetivamente. As experiências foram interrompidas ao fim de diferentes durações, nomeadamente aos 5 min, 20 min, 60 min, 100 min e 150 min, para a caracterização da evolução da cavidade de erosão. Os modelos de pilar foram fundados em areia uniforme e sem transporte sólido generalizado. Concluíram que a geometria da cavidade permanece praticamente inalterada com o tempo, sendo a inclinação dos taludes laterais da cavidade de erosão aproximadamente igual ao ângulo de repouso da areia usada.

Link e Zanke (2004) estudaram experimentalmente a variação temporal do volume da cavidade de erosão em torno de um pilar circular, fundado numa areia de granulometria uniforme. A geometria da cavidade de erosão foi medida por recurso a um sensor de distância a laser (*laser distance sensor - LDS*, na literatura inglesa) inserido num pilar acrílico de 0,2 m de diâmetro. Oito perfis verticais, tomados em quatro direções diferentes em torno do pilar ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  and  $135^\circ$ ), permitiram o cálculo do volume erodido para os instantes medidos. Foram consideradas três diferentes intensidades de escoamento ( $U/U_c$ ), incorporando condições sem e com transporte sólido generalizado. As experiências foram realizadas numa instalação com 26 m de comprimento, 2 m de largura e 1 m de profundidade por um período de 20 horas e 6 horas, sem e com transporte sólido generalizado, respetivamente. Para cada conjunto de ensaios, a profundidade de escoamento variou de um a dois diâmetros do pilar testado.

Link et al. (2008), por sua vez, caracterizaram somente uma condição hidráulica para o mesmo pilar circular, aumentando significativamente o número de perfis verticais usados na caracterização da cavidade de erosão, 24 (em intervalos de  $15^\circ$ ) ao invés dos 8 usados por Link e Zank (2004). Diab et al (2010) conduziram ensaios na mesma instalação experimental

e segundo a mesma metodologia de análise experimental usada em Link et al. (2008). Nesse estudo, estenderam a análise a pilares, de base circular e quadrada, fundados em gravilha uniforme. Neste âmbito, Diab (2011) desenvolveu novas formulações adimensionais relacionando os volumes erodidos com as profundidades máximas de erosão junto de pilares de secção quadrada com diferentes alinhamentos (ângulos de ataque); na Tabela 1 apresenta-se somente a formulação empírica resultante para o pilar quadrado alinhado com a direção do escoamento. A técnica de medição usada foi a mesma que em Link e Zanke (2004). Foram sugeridas formulações empíricas de determinação do volume erodido de acordo com o melhor ajuste feito aos respetivos resultados experimentais; as equações apresentam sobretudo uma relação polinomial de segunda ou terceira ordem (Tabela 1). Contrariamente aos ensaios preconizados por Link e Zanke (2004), as experiências subsequentes de Link et al. (2008), Diab et al. (2010) e Diab (2011) desenvolveram-se até aos últimos estágios de ensaio (estados considerados de equilíbrio).

Yanmaz e Köse (2007) realizaram experiências em torno dos modelos de pilar circular e quadrado, bem como na vizinhança de modelos verticais de encontros de pontes, todos fundados em areia uniforme e sem transporte sólido generalizado. As durações consideradas para os ensaios foram as mesmas estipuladas no trabalho de Yanmaz e Altinbilek (1991). Do estudo resultaram formulações empíricas adimensionais para a variação temporal do volume da cavidade de erosão e da área de superfície erodida para cada elemento de fundação. As formulações propostas para o volume de escavação junto dos elementos de fundação foram adicionalmente validadas com as profundidades de erosão obtidas pela previsão de Oliveto e Hager (2005).

Ramos et al (2016) reuniram um conjunto de 15 ensaios para a caracterização da evolução temporal da cavidade de erosão em torno de um pilar de geometria composta. O modelo de pilar era constituído por uma coluna, maciço de encabeçamento e quatro estacas de fundação. A aplicação de fotogrametria de pequena amplitude (*close-range photogrammetry*, na literatura inglesa) permitiu o estudo do desenvolvimento da profundidade máxima de erosão e do volume da cavidade de erosão, culminando na formulação empírica presente na Tabela 1.

Couto (2000) desenvolveu um trabalho laboratorial de caracterização da geometria das cavidades de erosão associadas a obstáculos salientes de margens em canal com fundo móvel arenoso, de diferentes granulometrias, bem como composto por materiais de baixa densidade (pedra pomes moída e granulado plástico). Abordou a localização das profundidades máximas de erosão, a batimetria resultante do processo erosivo junto aos obstáculos e o volume de escavação final obtido para cada ensaio considerado no estudo. O levantamento batimétrico foi efetuado por intermédio de um seguidor de fundos durante o decurso do ensaio.

Um trabalho recentemente desenvolvido por Bouratsis (2017) tirou partido de técnicas experimentais avançadas para a caracterização, sem interrupção do ensaio, das cavidades de erosão em torno de um pilar circular de 0,152 m fundado num leito de gravilha por um período de 250 min. Apesar da extensa análise dos parâmetros geométricos da cavidade de



erosão ao longo do tempo, o estudo não devolveu uma formulação empírica que relacionasse as profundidades máximas de erosão com os volumes de escavação. Deste modo, os dados deste estudo não aparecem na Tabela 1.

Na presente comunicação, as cinco formulações desenvolvidas para relacionar a profundidade máxima de erosão com o volume erodido junto ao pilar circular (Tabela 1) são aplicadas aos resultados do estudo experimental na secção 4 e posteriormente analisadas gráfica e estatisticamente na secção 5.

**Tabela 1.** Base de dados, formulações e respetivas condições de aplicação.

Tipo de fundação	Referência	$U/U_c$	$h/b$	$D_{50}$ (mm)	$\sigma_D$	Formulação empírica
<b>Pilar circular</b>	Yanmaz e Altinbilek (1991)	<1	2,0	1,07	1,13	$V = \frac{\pi}{3 \tan \phi} \left( \frac{d_s^3}{\tan \phi} + \frac{3d_s^2 b}{2} \right)$
	Link e Zanke (2004)	0,5 1,0 2,0	1,00 1,25 1,50 1,75 2,00	0,97	1,4	$V = (7d_s^2 + 5d_s) \cdot 10^{-5}$
	Yanmaz e Köse (2007)	<1	2,0	1,07	1,13	$V = 1,738 \cdot \left[ \frac{t D_{50} (s g D_{50})^{0.5}}{b^2} \right]^{0.299} \times d_s \cdot \frac{\pi b^2}{4}$
	Link et al. (2008)	0,95	1,5	0,26	1,37	$\frac{V}{V_f} = 0,897 \left( \frac{d_s}{d_{sf}} \right)^2 + 0,021 \left( \frac{d_s}{d_{sf}} \right) + 0,046$
	Diab et al. (2010)	0,95	1,5	3,25	1,20	$\frac{V}{V_f} = 0,340 \left( \frac{d_s}{d_{sf}} \right)^3 + 0,680 \left( \frac{d_s}{d_{sf}} \right)^2 - 0,100 \left( \frac{d_s}{d_{sf}} \right) + 0,012$
<b>Pilar quadrado</b>	Yanmaz e Altinbilek (1991)	<1	2,0	1,07	1,13	$V = \frac{d_s}{3} \left[ \pi \left( \frac{d_s}{\tan \phi} + \frac{b}{2} \right)^2 + \left( \frac{2d_s b}{\tan \phi} + b^2 \right) \right] \ln \tan \left( \frac{3\pi}{8} \right) - 2b^2$
	Yanmaz e Köse (2007)	<1	2,0	1,07	1,13	$V = 1,279 \cdot \left[ \frac{t D_{50} (s g D_{50})^{0.5}}{b^2} \right]^{0.400} \times d_s \cdot \frac{\pi b^2}{4}$
	Diab et al. (2010)	0,95	1,5	3,25	1,20	$\frac{V}{V_f} = 0,340 \left( \frac{d_s}{d_{sf}} \right)^3 + 0,680 \left( \frac{d_s}{d_{sf}} \right)^2 - 0,100 \left( \frac{d_s}{d_{sf}} \right) + 0,012$



7, 8 e 9  
Março 2018  
ÉVORA  
Évora Hotel

GESTÃO DOS  
RECURSOS HÍDRICOS:  
**NOVOS  
DESAFIOS**

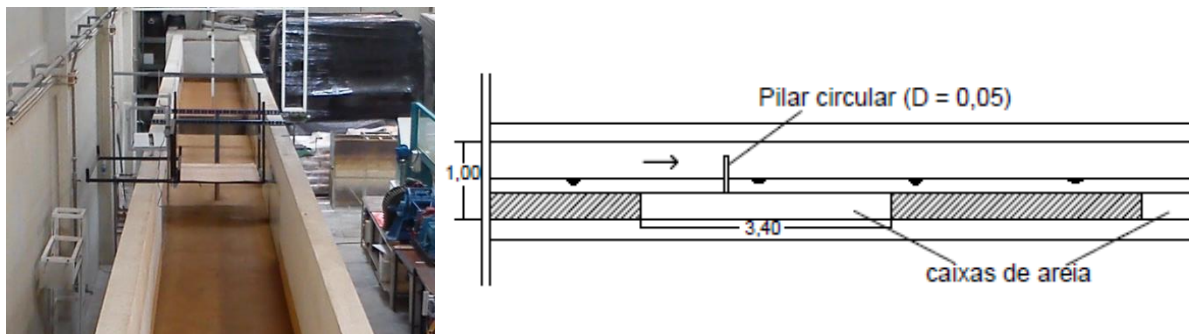
<b>Pilar de geometria composta</b>	Ramos et al. (2016)	0,97	1,5	0,86	1,4	$\frac{V}{V_f} = \left(\frac{d_s}{d_{sf}}\right)^3$
<b>Encontro</b>	Couto (2000)	<1 - >1	-	0,32 - 4,00	1,0 - 1,58	-
	Yanmaz e Köse (2007)	<1	-	1,8	<1,5	$V = 0,681 \cdot \left[ \frac{t D_{50} (s g D_{50})^{0.5}}{b^2} \right]^{0.265} \times d_s \cdot \frac{\pi b^2}{4}$

Nota:  $U$  - velocidade do escoamento de aproximação;  $U_c$  - velocidade crítica do escoamento;  $h$  - altura do escoamento de aproximação;  $b$  - dimensão do elemento de fundação (diâmetro ou comprimento lateral exposto ao escoamento);  $D_{50}$  - diâmetro médio do sedimento;  $\sigma_D$  - coeficiente de gradação do material;  $s$  - densidade relativa do sedimento;  $\phi$  - ângulo de repouso do sedimento;  $t$  - instante temporal;  $d_s$  - profundidade máxima na cavidade de erosão;  $d_{sf}$  - profundidade máxima na cavidade de erosão para o instante final;  $V$  - volume da cavidade de erosão;  $V_f$  - volume da cavidade de erosão para o instante final.

### 3. DESCRIÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL

#### 3.1. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E MODELO DE PILAR

Reproduziu-se experimentalmente um escoamento permanente na proximidade de um pilar circular de 0,05 m de diâmetro, fundado num leito de sedimentos uniformes e sem transporte sólido generalizado. Os ensaios realizaram-se no canal de 32,20 m de comprimento e 1,00 m de largura (Figura 1), no 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 elevada 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: a primeira, onde se instalou o pilar circular, e a segunda, mais a jusante, onde os sedimentos transportados são retidos, ambas têm 3,40 m de comprimento e 0,35 m de profundidade. Para a realização dos ensaios usou-se uma areia de granulometria uniforme ( $\sigma_D$ ) de 1,48, com diâmetro médio ( $D_{50}$ ) de 0,86 mm e uma densidade ( $\rho$ ) de 2650 kgm<sup>-3</sup>. As experiências decorreram sem transporte sólido generalizado, 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 ( $Q$ ) de 0,059 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> e uma altura de escoamento ( $h$ ) de 0,18 m. O pilar circular de 0,05 m de diâmetro, de policloreto de vinilo (PVC), foi instalado na primeira caixa de sedimentos segundo o alinhamento central do canal.



**Figura 1.** Canal de ensaios: fotografia (esquerda) e vista longitudinal (direita); dimensões em metros.

### 3.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Procedeu-se à fixação do pilar circular na primeira 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 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 escoamento e o caudal de entrada pretendidos. Removeram-se as placas de geotêxtil com a ajuda de dois cordéis laterais e iniciou-se o ensaio. Decorrido o tempo estipulado para a duração do ensaio, procedeu-se ao esvaziamento gradual do canal e à secagem da areia. Este procedimento foi realizado para as seguintes durações de ensaio: 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240, 480, 720, 1440, 4320 e 10080 minutos.

### 3.4. METODOLOGIA DE ESTUDO

Os ensaios experimentais permitiram: (i) a avaliação da evolução da profundidade máxima de erosão junto do pilar para a duração estipulada de cada ensaio, (ii) a representação tridimensional da cavidade de erosão, e (iii) a derivação da equação empírica para avaliação da taxa de volume erodido e da profundidade de erosão.

A cavidade de erosão, ao fim de cada ensaio experimental, foi caracterizada por aplicação de fotogrametria de pequena amplitude. Esta técnica, de precisão submilimétrica, permitiu a quantificação da distribuição espacial da erosão em torno do pilar circular em estudo. Para a obtenção de resultados fidedignos foi necessário conceber um esquema de captura fotográfica e de posicionamento de elementos de referência espacial. 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 0,6 m do nível inicial da caixa de areia. Os elementos de referência espacial 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 dos níveis do leito e a medição dos volumes de

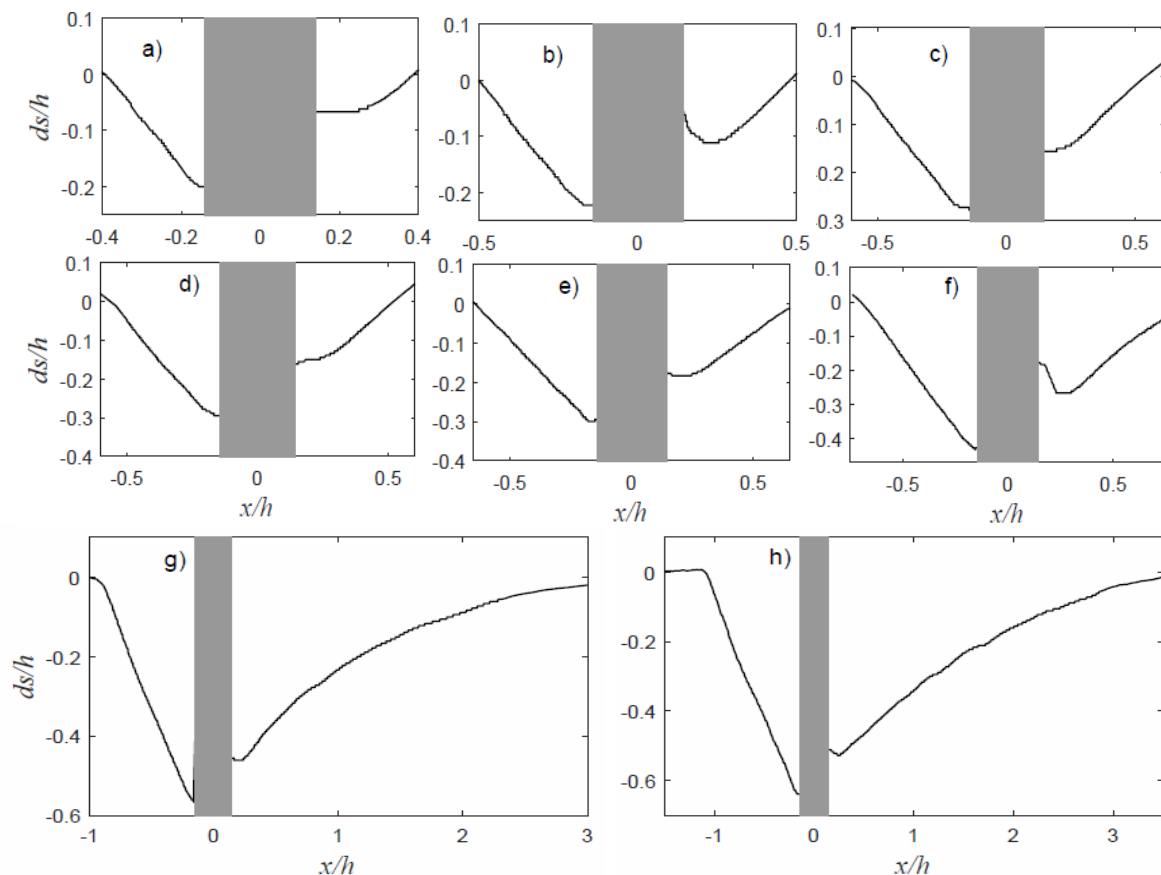


escavação. Esta informação conduziu à derivação da expressão empírica para a avaliação das profundidades máximas de erosão e dos volumes da cavidade, concretizando, deste modo, o objetivo (iii).

#### 4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

##### 4.1. EVOLUÇÃO DA PROFUNDIDADE DE EROSÃO

A configuração do leito no alinhamento central do pilar circular encontra-se ilustrada na Figura 2 para alguns dos instantes em que foram registados resultados nos ensaios. Considerou-se como critério de paragem do último estágio de ensaio, a duração correspondente a um aumento da profundidade de erosão inferior a 5% do diâmetro do pilar num período de 24 horas (Melville and Chiew, 1999). Para o ensaio final, segundo aquele critério, registou-se uma profundidade máxima de erosão de 0,115 m junto à face de montante do pilar. Este valor aproxima-se do valor de 0,11 m previsto pelo método de *Florida Department of Transportation* (FDOT, 2010).

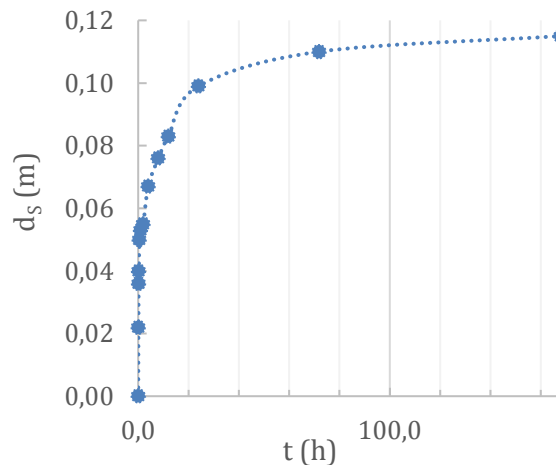


**Figura 2.** Perfis longitudinais do leito normalizados com a altura de escoamento, segundo o alinhamento central do pilar circular: a)  $t = 5$  min., b)  $t = 15$  min., c)  $t = 30$  min., d)  $t = 60$  min., e)  $t = 120$  min, f)  $t = 720$  min, g) 1440 min, e h) 10080 min.

As profundidades máximas de erosão observadas segundo o alinhamento central do pilar circular e para as durações de ensaio estipuladas são apresentadas na Tabela 2 e na Figura 3. Por simplicidade de leitura, os instantes temporais são expressos em minutos na Tabela 2 e em horas na Figura 3.

**Tabela 2.** Profundidades máximas de erosão registadas.

t (min)	5	10	15	30	60	120	240	480	720	1440	4320	10080
$d_s$ (m)	0,022	0,036	0,040	0,050	0,053	0,055	0,067	0,076	0,083	0,099	0,110	0,115

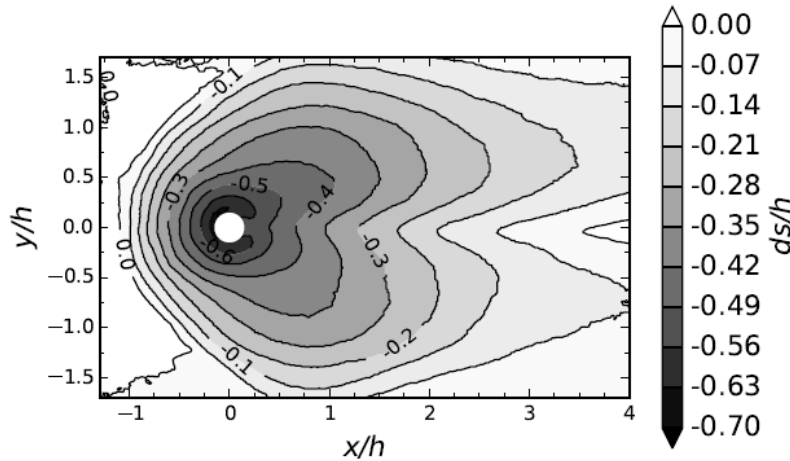


**Figura 3.** Evolução temporal da profundidade máxima de erosão. Instante temporal em escala logarítmica (direita).

#### 4.2. EVOLUÇÃO DA GEOMETRIA DA CAVIDADE DE EROSÃO

A aplicação da técnica de fotogrametria de pequena amplitude permitiu a obtenção da representação tridimensional das cavidades de erosão para os instantes considerados neste trabalho experimental. Na Figura 4 apresenta-se, a título exemplificativo, a cavidade de erosão para o ensaio final, que foi atingido ao fim de sete dias de ensaio, para  $t = 10080$  min, com o volume final ( $V_f$ ) de  $0,018 \text{ m}^3$ .

Os modelos da cavidade de erosão permitem a extração de um conjunto de características geométricas, nomeadamente o volume erodido, parâmetro necessário à derivação da formulação empírica que melhor relaciona a profundidade máxima de erosão com o volume da cavidade de erosão para as condições experimentais ensaiadas. A Tabela 3 indica os valores das profundidades máximas de erosão e dos volumes erodidos, obtidos nos ensaios experimentais, normalizados pelos correspondentes valores para o ensaio de 7 dias (ensaio considerado de equilíbrio),  $d_{sf}$  e  $V_f$ , respetivamente.



**Figura 4.** Cavidade de erosão para  $t = 10080$  min.

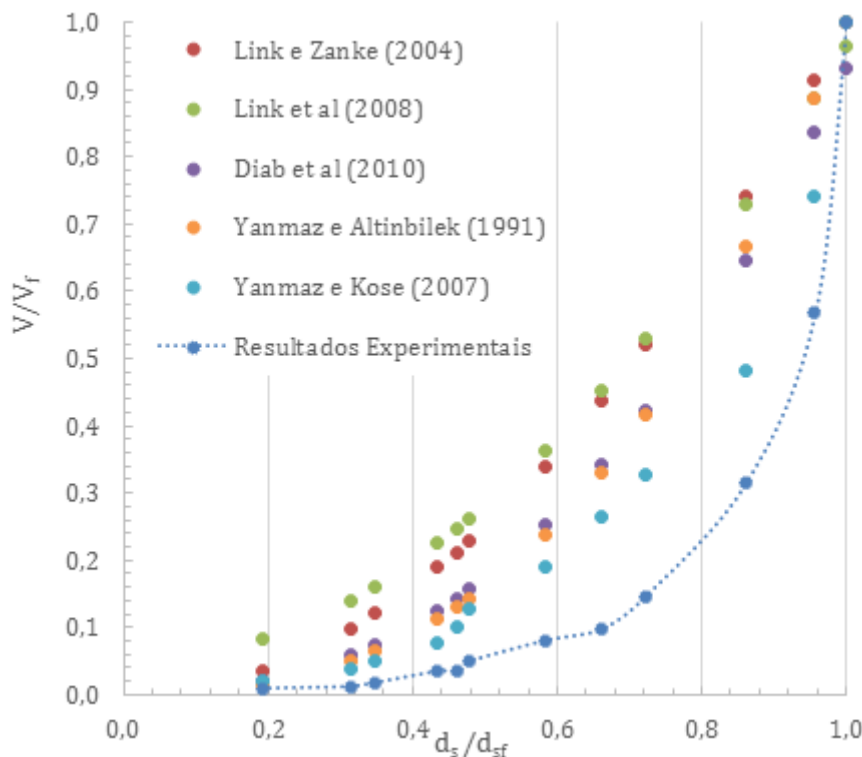
**Tabela 3.** Rácios da profundidade máxima de erosão ( $d_s/d_{sf}$ ) e do volume erodido ( $V/V_f$ ).

t (min)	5	10	15	30	60	120	240	480	720	1440	4320	10080
$d_s/d_{sf}$ (m)	0,19	0,31	0,35	0,43	0,46	0,48	0,58	0,66	0,72	0,86	0,96	1,00
$V/V_f$ (m³)	0,009	0,012	0,017	0,034	0,034	0,049	0,080	0,097	0,146	0,314	0,567	1,000

## 5. ANÁLISE COMPARATIVA DAS FORMULAÇÕES EMPÍRICAS

Os dados da Tabela 3, representados na Figura 5, são usados na derivação da formulação empírica que relaciona os rácios da profundidade máxima de erosão e do volume erodido do presente trabalho experimental. A curva de melhor ajuste aos pontos experimentais, exemplificada a traço interrompido na Figura 5, levou à derivação da Equação 1. Trata-se de uma função polinomial de terceira ordem, com um coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,963. As formulações recolhidas na literatura e constantes na Tabela 1, para o pilar circular, são aplicadas aos dados experimentais e os seus resultados mostrados na Figura 5.

$$\frac{V}{V_f} = 5,6704 \left( \frac{d_s}{d_{sf}} \right)^3 - 7,7411 \left( \frac{d_s}{d_{sf}} \right)^2 + 3,3858 \left( \frac{d_s}{d_{sf}} \right) - 0,429 \quad (1)$$



**Figura 5.** Aplicação das formulações empíricas aos resultados obtidos experimentalmente.

A representação conjunta dos resultados da aplicação dessas formulações com os dados experimentais na Figura 5 possibilitam a análise comparativa que se segue. De um modo geral, a aplicação das formulações empíricas apresentadas na Tabela 1, para pilares circulares, evidencia processos erosivos com evolução e desenvolvimento da cavidade mais acentuados do que os observados no presente trabalho experimental. Esta evidência verifica-se sobretudo para as experiências desenvolvidas por Link and Zanke (2004), Link et al. (2008) e Diab et al. (2010). Esta observação era expectável uma vez que a dimensão do modelo de pilar ensaiado em cada um dos trabalhos acima mencionados possuía o quadruplo do diâmetro usado nas experiências desenvolvidas no presente estudo (0,20 m em contraste com os 0,05 m). Para além da dimensão do obstáculo, também a reduzida dimensão média dos sedimentos, que compunham o fundo arenoso das experiências de Link et al. (2008), podem justificar em parte o desfaseamento observado já que essa dimensão ( $D_{50} < 0,6$  mm) conduz à formação de rugas, fenómeno que não se verificou nos ensaios preconizados no presente estudo.

As formulações propostas por Link et al. (2008) e Diab et al. (2010) diferem unicamente no tipo de sedimento usado para o leito móvel; em Link et al. (2008) trata-se de uma areia fina enquanto em Diab et al. (2010) o leito é constituído por gravilha. Embora os resultados analisados tenham sido obtidos para diferentes granulometrias (incluindo a da areia usada no presente estudo), a relação entre o diâmetro do pilar e a dimensão média dos sedimentos

( $b/D_{50}$ ) toma os valores de 61,54 e 769,23; no presente estudo experimental a relação foi de 58,14. De acordo com Lee and Sturm (2009), a profundidade de erosão é afetada pelo tipo de sedimento para  $b/D_{50} < 200$ ; só em Diab et al. (2010) a profundidade de erosão e consequente volume de escavação não são afetados pela granulometria do sedimento.

Relativamente às condições de escoamento, verifica-se uma aproximação do valor da intensidade de escoamento desses estudos com as características hidráulicas da presente comunicação - 0,95 para Link et al. (2008) e Diab et al. (2010), 1.0 para Link e Zanke (2004), e 0,97 no presente estudo. No entanto, a relação entre a altura do escoamento de aproximação e o diâmetro do pilar diferem em 58,3%. Apesar da elevada percentagem, os pilares usados nos quatro casos (os três recolhidos da literatura e o do presente estudo) classificam-se como estreitos (Melville e Coleman, 2000). Para estes casos, a formação e o desenvolvimento da cavidade de erosão está intrinsecamente dependente do diâmetro do pilar. Seriam, portanto, necessários mais ensaios com diferentes diâmetros de pilares circulares (neste caso) para alargar a gama de aplicabilidade das equações empíricas de Link et al. (2008) e Diab et al. (2010).

As características do escoamento consideradas no trabalho de Link e Zanke (2004) são em muito semelhantes às utilizadas nos trabalhos da literatura mencionados acima. Apesar do modelo de pilar ter sido o mesmo que nos estudos supracitados, circular de 0,20 m de diâmetro, a formulação empírica desenvolveu-se a partir de um conjunto de onze ensaios. Para estes onze ensaios a formulação, apesar de não incluir explicitamente a dimensão do pilar, considera maiores relações entre a altura do escoamento de aproximação e o diâmetro do pilar (caso em que a altura do escoamento de aproximação toma duas vezes o valor do diâmetro do pilar). Este valor aproxima-se um pouco mais dos 3,6 assinalados para o caso experimental aqui estudado. Além deste fator, também as características dos sedimentos explica uma melhor aproximação aos dados, quando comparados com os resultados das investigações de Link et al. (2008) e de Diab et al. (2010).

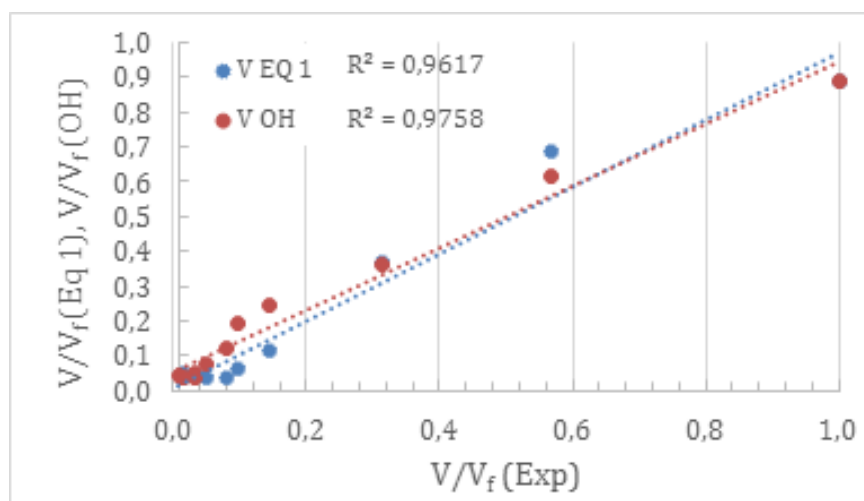
No que respeita ao tipo de formulações empíricas, desenvolvida para os dados experimentais e para os estudos já mencionados, deve referir-se que se traduzem por funções polinomiais de segundo ou terceiro grau.

Os resultados da aplicação da equivalência do volume da cavidade de erosão à de um cone invertido, inicialmente proposto por Yanmaz e Altinbilek (1991), retornou valores mais aproximados dos valores observados no presente estudo experimental. Este facto deve-se essencialmente à dimensão do modelo de pilar (no caso, o diâmetro do pilar). Embora o conceito subjacente à formulação do volume de escavação pareça simplificado ou até mesmo redutor ao assumir que a forma da cavidade de erosão permanece praticamente igual ao longo do tempo, a mesma aproxima-se relativamente bem aos volumes erodidos, nomeadamente nos primeiros estágios do processo erosivo. Esse facto estará também relacionado com a duração dos ensaios que estiveram na base da formulação desenvolvida por Yanmaz e Altinbilek (1991).



Para as mesmas condições hidráulicas e sedimentológicas usadas em Yanmaz e Altinbilek (1991), Yanmaz e Köse (2007) propõem uma nova formulação para pilar circular, que é posteriormente validado com outras previsões da profundidade de erosão, nomeadamente a previsão de Oliveto e Hager (2005). Por análise da Figura 5 esta formulação é a que apresenta menores discrepâncias quando comparada aos resultados do presente estudo experimental.

Como verificação adicional, avaliaram-se os rácios dos volumes erodidos, medidos experimentalmente,  $V/V_f (Exp)$ , versus, os rácios provenientes da aplicação da Equação 1,  $V/V_f (Eq 1)$ , e os estimados pela mesma equação considerando o rácio das profundidades máximas de erosão dadas pela previsão de Oliveto e Hager (2005),  $V/V_f (OH)$ . A Figura 6 mostra essa comparação, bem como as regressões lineares de melhor ajuste e correspondentes coeficientes de correlação.



**Figura 6.** Comparação dos rácios dos volumes erodidos para o pilar circular do presente estudo.

Analisando a Figura 6 é possível concluir que os rácios dos volumes erodidos  $V/V_f (OH)$  apresentam valores ligeiramente superiores aos obtidos em laboratório,  $V/V_f (Exp)$ . Os coeficientes de correlação, apresentados juntamente com a grandeza correspondente, são ambos superiores a 0,95, registando-se uma diferença pouco significativa de 1,4%. Assim sendo, as profundidades máximas de erosão medidas experimentalmente apresentam boa concordância com as estimadas pela equação de Oliveto e Hager (2005). Conclusão semelhante havia sido também extraída para os dados experimentais de Yanmaz e Köse (2007).

## **6. CONCLUSÕES**

Nesta comunicação, foi feita uma resenha das formulações empíricas descritas na literatura, que, relacionam a profundidade máxima de erosão com o volume da cavidade de erosão, junto de fundações de pontes (pilares e encontros de pontes).

As formulações respeitantes a pilares circulares foram aplicadas aos dados experimentais obtidos num canal experimental do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. A aplicação de fotogrametria de pequena amplitude, na caracterização das cavidades de erosão, permitiu obter a evolução temporal dos volumes escavados, e, das profundidades máximas de erosão, com posterior derivação de uma nova formulação empírica.

Os pares de valores de profundidade máxima de erosão, e de volume erodido, foram comparados com as estimativas dadas por cinco formulações empíricas, para os registos experimentais obtidos neste trabalho. Os desfasamentos encontrados entre estimativas foram fundamentados; a formulação que mais se aproximou dos resultados experimentais foi a de Yanmaz e Köse (2007).

Da análise comparativa entre as formulações, recolhidas da literatura e a obtida neste estudo, pode concluir-se que estas podem fornecer indicações/orientações preliminares sobre a profundidade dos elementos de fundação, que podem ficar expostos à ação erosiva do escoamento. Podem ainda ser utilizadas para uma pré-quantificação do volume que tal cavidade de erosão pode vir a atingir ao longo do tempo. Estas informações são essenciais quer para uma abordagem mais física do fenómeno, através do uso desses resultados na modelação numérica, quer para uma vertente mais prática, usando-as como base para o dimensionamento de medidas de proteção (tapetes de enrocamento, por exemplo). Contudo, as formulações empíricas foram na maioria das vezes desenvolvidas para condições experimentais muito específicas, o que requer alguma cautela e análise crítica.

Por fim, a precisão dos rácios dos volumes erodidos por aplicação da equação desenvolvida neste estudo, e, dos rácios estimados por recurso à equação de evolução temporal de previsão da profundidade máxima de Oliveto e Hager (2005) foram avaliados confrontando-os com os coeficientes de correlação respeitantes, constatando-se uma boa correlação.

## **Agradecimentos**

Este trabalho foi financiado pela Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT) através da bolsa de doutoramento PD/BD/127798/2016, no âmbito do Programa Doutoral INFRARISK - Analysis and Mitigation of Risks in Infrastructures. O trabalho experimental foi desenvolvido durante o projeto exploratório “Numerical and experimental study of the flow around complex bridge piers” [EXPL/ECM-HID/1663/2013] financiado pela Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bouratsis, P.P., Diplas, P., Dancey, C.L., Apsilidis, N. (2013). High-resolution 3D monitoring of evolving sediment beds. *Water Resources Research*, 49(2), 977-992.
- Bouratsis, P., Diplas, P., Dancey, C.L., Apsilidis, N. (2017). Quantitative Spatio-Temporal Characterization of Scour at the Base of a Cylinder. *Water*, 9(3), 227.
- Couto, L.T. (2000). Erosões localizadas junto de esporões fluviais e encontros de pontes. Universidade Técnica de Lisboa.
- Dargahi, B. (1990). Controlling mechanism of local scouring. *Journal of Hydraulic Engineering*, 116(10), 1197-1214.
- Dey, S. (1999). Time-variation of scour in the vicinity of circular piers. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Maritime and Energy*, 136(2), 67-75.
- Diab, R. (2011). Experimental Investigation on scouring around piers of different shape and alignment in gravel (Doctoral dissertation, TU Darmstadt), 202p.
- Diab, R., Link, O., Zanke, U. (2010). Geometry of developing and equilibrium scour holes at bridge piers in gravel. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(4), 544-552.
- Escauriaza, C., Sotiropoulos, F. (2011). Initial stages of erosion and bed form development in a turbulent flow around a cylindrical pier. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F3).
- FDOT. (2010). Bridge Scour Manual. Florida: Florida Department of Transportation.
- Flint, M.M., Fringer, O., Billington, S.L., Freyberg, D., Diffenbaugh, N.S. (2017). Historical Analysis of Hydraulic Bridge Collapses in the Continental United States. *Journal of Infrastructure Systems*, 23(3), 04017005.
- Johnson, P A., Jones, J.S. (1993). Merging laboratory and field data in bridge scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(10), 1176-1181.
- Kothyari, U.C., Hager, W.H., Oliveto, G. (2007). Generalized approach for clear-water scour at bridge foundation elements. *Journal of hydraulic Engineering*, 133(11), 1229-1240.
- Lee, S.O., Sturm, T.W. (2009). Effect of sediment size scaling on physical modeling of bridge pier scour. *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(10), 793-802.
- Link, O., Pfleger, F., Zanke, U. (2008). Characteristics of developing scour-holes at a sand-embedded cylinder. *International Journal of Sediment Research*, 23(3), 258-266.
- Link, O., Zanke, U. (2004). On the time-dependent scour-hole volume evolution at a circular pier in uniform coarse sand. In *Proceedings 2nd International Conference on Scour and Erosion (ICSE-2)*. November 14.–17., 2004, Singapore.

Melville, B.W., 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., Coleman, S.E. (2000). *Bridge scour*. Water Resources Publication.

Neil, C.R. (1967). Mean Velocity criterion for scour of coarse uniform bed material, *Proceedings of the XII IAHR*, Fort Collins, Colorado.

Oliveto, G., Hager, W.H. (2005). Further results to time-dependent local scour at bridge elements. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(2), 97-105.

Pandey, M., Sharma, P.K., Ahmad, Z., Singh, U.K. (2017). Evaluation of existing equations for temporal scour depth around circular bridge piers. *Environmental Fluid Mechanics*, 17(5), 981-995.

Ramos, P.X., Bento, A.M., Maia, R., Pêgo, J.P. (2016). Characterization of the scour cavity evolution around a complex bridge pier. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 4(2), 128-137.

Sumer, B. M. (2015). A review of recent advances in numerical modelling of local scour problems. In *Proc., 7th Int. Conf. on Scour and Erosion*, 61-70.

Yanmaz, A.M., Altinbilek, H.D.G. (1991). Study of time-dependent local scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(10), 1247-1268.

Yanmaz, A.M., Köse, Ö. (2007). Surface characteristics of scouring at bridge elements. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 31(2), 127-134.