

# Erosões localizadas junto de pilares de pontes sobre leitos aluvionares

Lúcia Couto

*Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Lisboa*

Cristina Fael

*Universidade da Beira Interior, Faculdade de Engenharia, Covilhã*

Rui Lança

*Universidade do Algarve, Instituto Superior de Engenharia, Faro*

António H. Cardoso

*Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa*

**RESUMO:** Esta comunicação reúne contribuições recentes de estudos dos autores sobre os efeitos da altura relativa do escoamento, da dimensão relativa dos sedimentos do leito, do tempo, da forma dos pilares e do seu ângulo de viés em relação à direção do escoamento na profundidade de equilíbrio de cavidades de erosão que se desenvolvem junto de pilares simples. Estas contribuições baseiam-se em campanhas experimentais de características únicas, no sentido em que foram sistematicamente conduzidas com durações superiores às da vasta maioria dos trabalhos publicados na literatura. A caracterização de parte daqueles efeitos é claramente mais completa e rigorosa por comparação com o que se encontra publicado em literatura da especialidade enquanto, noutros casos, se confirmam resultados anteriormente publicados. Sugerem-se critérios de previsão da profundidade de erosão que incorporam as novas contribuições dos autores.

## 1 INTRODUÇÃO

É amplamente reconhecido que as erosões localizadas na proximidade das fundações de pontes são uma causa frequente de queda ou de rotura parcial de pontes.

Apesar da importância do problema e das várias formulações existentes com vista à determinação da profundidade das cavidades de erosão, as correspondentes previsões nem sempre se têm revelado satisfatórias. Este insucesso decorre, em parte, da dificuldade em considerar a complexidade dos fenómenos envolvidos, designadamente a influência da estrutura do escoamento na proximidade dos obstáculos. Neste contexto, o conhecimento da evolução temporal da profundidade das cavidades de erosão localizada e do seu valor de equilíbrio permanece um motivo de preocupação para investigadores e engenheiros hidráulicos.

A investigação no tema das erosões localizadas tem sido realizada essencialmente através de experimentação em laboratório. A revisão do estado da arte tem sido apresentada por vários autores, *e.g.*, Couto e Cardoso [2001 (a) e (b)]. Estes autores, incluíram a revisão de conceitos sobre a estrutura do escoamento em torno dos pilares, a análise dimensional para o enquadramento do estudo de variação dos diversos fatores intervenientes no processo numa situação de referência definida, designadamente o efeito do tempo, o efeito da altura do escoamento e das dimensões dos pilares e, numa perspetiva de passagem da situação de referência à prática, o

efeito da velocidade média do escoamento de aproximação e da granulometria do material do fundo, o efeito da forma dos pilares, do seu alinhamento e da contração da secção do escoamento.

Esta comunicação reúne contribuições recentes de estudos dos autores baseadas em campanhas experimentais de características únicas, no sentido em que foram sistematicamente conduzidas com durações superiores às da quase totalidade dos trabalhos publicados na literatura. Nestes trabalhos, a duração dos ensaios reportados poderá não ter sido suficiente para se ter a garantia de que as cavidades de erosão atingiram ou se aproximaram suficientemente do equilíbrio. Além disso, muitos dos estudos cobriram uma gama de variação da dimensão dos sedimentos relativamente às dimensões dos pilares,  $D_p/D_{50}$  ( $D_p$  = diâmetro do pilar;  $D_{50}$  = diâmetro mediano da granulometria dos sedimentos) consideravelmente reduzida. Estas limitações de tempo e de dimensão relativa dos sedimentos nos estudos experimentais, podem estar entre as causas das discrepâncias registadas entre observações de campo e as previsões obtidas pelas formulações derivadas da experimentação. Essa conclusão é mencionada no Programa Nacional dos Estados Unidos “*National Cooperative Highway Research Program*” (NCHRP) [2011] e enquadra os aspetos em que se apresentam contribuições recentes dos autores, designadamente de Lança *et al.* [2013].

Adicionalmente, pode afirmar-se que poucos estudos da literatura reportam a análise dos efeitos da forma dos pilares e do seu alinhamento, ou seja, do seu ângulo de viés em relação à direção do escoamento na profundidade de equilíbrio de cavidades de erosão. Tais efeitos são geralmente expressos pelos fatores  $K_f$  e  $K_\theta$ , respetivamente. Assim, a presente comunicação inclui também a contribuição recente dos autores para o conhecimento da influência destes fatores, apresentada em Fael *et al.* [2014].

Em face das referidas contribuições, esta comunicação inclui a equação de previsão das profundidades de erosão de equilíbrio,  $h_{se}$ , função da relação da altura do escoamento,  $h/D_p$  (em que  $h$  = altura do escoamento uniforme de aproximação), de  $D_p/D_{50}$ , de  $K_f$  e  $K_\theta$ . Esta equação adimensional de previsão da profundidade de erosão de equilíbrio é válida para escoamentos uniformes completamente desenvolvidos em canais retangulares muito largos cujo fundo seja constituído por areia de granulometria uniforme e não suscetível de dar origem à formação de rugas no fundo, admitindo que a erosão local ocorre sem transporte generalizado do material sólido no trecho de aproximação, para intensidade do escoamento constante,  $U/U_c \approx 1$  ( $U$  é a velocidade média do escoamento de aproximação e  $U_c$  é a velocidade média crítica de início do movimento do fundo móvel), e que o escoamento é turbulento rugoso no interior das cavidades de erosão.

O tempo desempenha um papel importante no processo de erosão, sendo frequentes as discussões encontradas na literatura sobre o tempo necessário para que seja atingido o equilíbrio. Incluem-se neste trabalho considerações sobre o conceito do equilíbrio, que é, aliás, bastante subjetivo, e as posições conhecidas para lidar com este conceito são díspares.

As referidas contribuições baseiam-se em estudos experimentais conduzidos em dois canais de grandes dimensões, na Universidade da Beira Interior e na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Os ensaios foram de longa duração (ensaios contínuos com duração igual ou superior a 7 dias) para permitir observar os processos até uma fase próxima da de equilíbrio. Os valores das profundidades de erosão de equilíbrio,  $h_{se}$ , foram obtidos por extrapolação dos valores máximos medidos, recorrendo a uma metodologia recentemente adaptada pelos autores e descrita em Simarro *et al.* [2011].

## 2 ENQUADRAMENTO

A profundidade máxima da cavidade de erosão junto de um pilar,  $h_s$ , num dado instante,  $t$ , pode ser descrita pelo seguinte conjunto de variáveis independentes:

$$h_s(t) = \varphi \left[ \begin{array}{l} \text{escoamento } (h, J, g), \text{ fluido } (\rho, \nu), \\ \text{material do leito } (D_{50}, \sigma_D, \rho_s), \\ \text{pilar } (D_p, \theta, K_f), \text{ canal } (B, i, K_g), \text{ tempo } (t) \end{array} \right] \quad (1)$$

O grupo de variáveis referentes ao escoamento de aproximação inclui a altura média,  $h$ , a perda de carga unitária,  $J$ , e a aceleração da gravidade,  $g$ ; nas variáveis características do fluido incluem-se a massa volúmica,  $\rho$ , e a viscosidade cinemática,  $\nu$ ; do grupo das variáveis relativas ao material de fundo fazem parte o diâmetro mediano,  $D_{50}$ , o coeficiente de graduação da curva granulométrica,  $\sigma_D$ , e a massa volúmica,  $\rho_s$ ; das variáveis descritivas do pilar, o diâmetro de um pilar cilíndrico,  $D_p$ , o ângulo entre o alinhamento do eixo do pilar e a direção principal do escoamento,  $\theta$ , e o fator de forma do pilar,  $K_f$ ; nas variáveis referentes à geometria do canal incluem-se a largura da secção transversal,  $B$ , o declive do fundo,  $i$ , e o fator de forma da secção transversal,  $K_g$ ; intervém ainda o tempo,  $t$ .

No caso de escoamentos uniformes, tem-se  $J=i$ ; tratando-se de canais retangulares muito largos,  $K_g = 1$  e  $B$  não influencia a erosão. Neste contexto, os canais muito largos são aqueles em que os efeitos da contração do escoamento pela presença dos pilares assim como os efeitos da margem (ou efeitos de parede) são negligenciáveis, pelo que se considera muito largo todo o canal que preserva uma distribuição de velocidades bidimensional na respetiva zona central (o que requer  $B/h > 5$ ). Para escoamentos de aproximação em fundo móvel plano sem transporte sólido generalizado,  $J$ , pode ser substituído pela velocidade de atrito junto ao fundo,  $u_*$ , dada por  $u_* = \sqrt{ghJ} = \sqrt{ghi}$  ou pela velocidade média do escoamento de aproximação,  $U$ . Se o material do leito for composto por areia uniforme, o que ocorre quando o coeficiente de graduação da respetiva curva granulométrica é tal que  $\sigma_D < 1,5$ , se essa areia não for compatível com a formação de rugas, o que se verifica quando o diâmetro mediano é  $D_{50} > \approx 0,6$  mm e, por último, se a densidade  $\rho_s = \text{constante}$ , então  $\sigma_D$  e  $\rho_s$  e podem ser eliminados da equação (1).

A variável  $u_{*c}$  representa o valor crítico de  $u_*$ , correspondente ao início do movimento. O parâmetro  $u_*/u_{*c}$  pode ser substituído pelo parâmetro  $U/U_c$ , em que  $U_c$  é o valor crítico da velocidade média ou de início do movimento. Esta substituição é praticamente exata no caso de escoamentos completamente desenvolvidos sobre fundos planos rugosos com ou sem transporte sólido generalizado (ver Lança *et al.* [2013]). Entende-se por escoamento completamente desenvolvido aquele em que, verificando-se auto-semelhança, a camada limite ocupa toda a respetiva altura. Admitindo ainda que o escoamento é turbulento rugoso no interior das cavidades de erosão, qualquer que seja o regime do escoamento de aproximação, pode-se admitir que a viscosidade cinemática da água,  $\nu$ , não influencia o processo de desenvolvimento da erosão.

Sob estas hipóteses, a aplicação do teorema de Vaschy-Buckingham conduz à seguinte versão adimensional da equação (1):

$$\frac{h_s}{D_p} = \varphi \left( \frac{h}{D_p}, \frac{U}{U_c}, \frac{D_p}{D_{50}}, \frac{Ut}{D_p}, K_f, K_g \right) \quad (1)$$

Admitindo que a intensidade de escoamento,  $U/U_c$ , é constante (geralmente na vizinhança de 1,0 nos estudos laboratoriais, para maximizar as profundidades de erosão localizada) e que se pretende caracterizar a profundidade de equilíbrio da cavidade de erosão,  $h_{se}$ , situação em que o tempo deixa de influenciar o processo, a equação (2) toma a forma:

$$\frac{h_{se}}{D_p} = \varphi_1 \left( \frac{h}{D_p}, \frac{D_p}{D_{50}}, K_f, K_\theta \right) \quad (2)$$

A presente comunicação inclui contribuições recentes de caracterização das equações (2) e (3) com base nos estudos mencionados em 1.

### 3 EFEITO DO TEMPO

O tempo desempenha um papel importante no processo erosivo e o seu efeito está muito ligado ao efeito da velocidade média do escoamento de aproximação.

Para valores muito baixos da velocidade não se observam erosões junto dos pilares, e tudo se passa como se se tratasse de um escoamento com fundo fixo. Mantendo a altura do escoamento e para velocidades maiores, designadamente quando se ultrapassa localmente a velocidade crítica de início do movimento do material do fundo, inicia-se o processo de escavação da cavidade e de transporte do material sólido erodido. A profundidade da cavidade de erosão aumenta rapidamente na fase inicial do processo. Nas zonas em que o ângulo do talude da cavidade em formação tende a ser superior ao ângulo de repouso do material submerso, ocorre o deslizamento de quantidades consideráveis de partículas para o fundo da cavidade. Essas partículas ficam disponíveis para serem transportadas para jusante. Através do processo de deslizamento, os limites da cavidade vão-se propagando lateralmente e para montante. Os sedimentos são transportados em suspensão e por arrastamento e são depositados, formando-se um depósito que vai sendo empurrado para jusante durante o desenvolvimento da cavidade.

No processo descrito, o ritmo com que se atinge a fase de equilíbrio depende da existência ou não de transporte sólido generalizado do escoamento no trecho de aproximação a montante. Não havendo transporte, a progressão da cavidade de erosão em profundidade induz a diminuição das velocidades e das tensões tangenciais no seu interior até se atingirem valores que são insuficientes para arrastar o material sólido da cavidade para o escoamento a jusante, o que acontece ao fim de um intervalo de tempo consideravelmente alargado. À medida que a cavidade de erosão se desenvolve, o ritmo da escavação reduz-se gradualmente e a profundidade da cavidade atinge assintoticamente o valor de equilíbrio.

No caso de haver transporte sólido generalizado, há simultaneamente remoção de sedimentos do fundo original e de sedimentos transportados de montante para o interior da cavidade. Na fase inicial, a quantidade de material que sai da cavidade excede a quantidade de material que nela entra, pelo que a erosão progride. Ao fim de algum tempo, a quantidade de material que entra na cavidade é praticamente igual à que sai. Neste caso, o equilíbrio é atingido muito mais rapidamente do que quando não há transporte sólido generalizado. Trata-se de um equilíbrio dinâmico, no qual a profundidade de erosão oscila entre certos limites.

Uma cavidade de erosão está em equilíbrio quando a quantidade de material sólido removido dessa cavidade, pelo escoamento, iguala a quantidade de material arrastado

de montante para o seu interior, ou seja, quando há uma cavidade de erosão estável, sem progredir nem regredir.

É plausível que seja durante as cheias que se observam as maiores erosões localizadas (situação suscetível de ocorrer com transporte sólido generalizado), mas há circunstâncias em que essas erosões em escoamentos sem transporte sólido, para caudais moderados mas persistentes, podem ser igualmente importantes.

Em situações em que não há transporte sólido generalizado do fundo, as erosões localizadas desenvolvem-se a um ritmo muito lento. Diversos autores identificam três fases neste processo evolutivo: a fase inicial, geralmente curta e com uma taxa de erosão muito elevada; a fase principal que pode ser muito longa; e a fase de equilíbrio que se considera quando já não se observa praticamente aumento da profundidade de erosão. Neste contexto, o equilíbrio é atingido num tempo finito (Melville e Chiew [1999]; Kothiyari *et al.* [2007]). Segundo um número crescente de autores, a profundidade de equilíbrio, sendo finita, nunca é atingida, o que equivale a dizer-se que é atingida assintoticamente ao fim de tempo infinito. Há ainda quem implicitamente defenda que a profundidade da cavidade de erosão tende para infinito quando  $t \rightarrow \infty$ .

Vários autores tentaram desenvolver equações para a previsão da evolução temporal da profundidade de erosão. Franzetti *et al.* [1982] propuseram uma equação exponencial,

$$\frac{h_s(t)}{h_{se}} = 1 - \exp\left[-a_1 \left(\frac{Ut}{D_p}\right)^{a_2}\right] \quad (4)$$

que envolve a profundidade de erosão de equilíbrio,  $h_{se}$ , e dois coeficientes  $a_1$  e  $a_2$ . Estes autores são dos que defendem que a erosão de equilíbrio não pode ser atingida em tempo finito. Para pilares cilíndricos propuseram  $a_1 = 0,028$  e  $a_2 = 1/3$ . Na prática, o uso desta função exponencial requiere o conhecimento *a priori* de  $h_{se}$ .

Nos estudos conduzidos pelos autores da presente comunicação, admite-se também que a erosão de equilíbrio é atingida num tempo infinito. Considera-se ainda que os coeficientes  $a_1$  e  $a_2$ , bem como a própria profundidade de equilíbrio dependem dos parâmetros que controlam a erosão. Neste contexto, para intensidade do escoamento  $U/U_c = \text{constante}$  e para pilares cilíndricos, os coeficientes  $a_1$  e  $a_2$  relacionam-se com os parâmetros da Equação (2) pelas equações:

$$a_1 = \varphi_2 \left( \frac{h}{D_p}, \frac{D_p}{D_{50}} \right) \quad (3)$$

$$a_2 = \varphi_3 \left( \frac{h}{D_p}, \frac{D_p}{D_{50}} \right) \quad (4)$$

Lança *et al.* [2013] evidenciaram claramente a dependência destes coeficientes em relação à dimensão relativa dos sedimentos, traduzida por  $D_p/D_{50}$ . Não identificaram qualquer variação dos mesmos coeficientes com  $h/D_p$ . As relações de variação de  $a_1$  e  $a_2$  com  $D_p/D_{50}$  são as seguintes:

$$a_1 = 1,22 \left( \frac{D_p}{D_{50}} \right)^{-0,764} \quad (7)$$

$$a_2 = 0,09 \left( \frac{D_p}{D_{50}} \right)^{0,244} \quad (8)$$

Deve salientar-se que esta contribuição é válida para pilares cilíndricos inseridos em escoamentos uniformes turbulentos rugosos, em canais retangulares muito largos, com leito móvel em fundo plano composto por areia uniforme que não proporcione a formação de rugas, próximo da condição crítica de início de movimento do material do fundo.

#### 4 EFEITO DA PROFUNDIDADE DO ESCOAMENTO E DA DIMENSÃO DOS SEDIMENTOS DO FUNDO

A quase totalidade dos estudos sobre erosões localizadas admitiram sistematicamente que a profundidade de erosão de equilíbrio normalizada,  $h_{se}/D_p$ , não depende da relação  $D_p/D_{50}$ , para valores elevados de  $D_p/D_{50}$  ( $> 50 - 100$ ) e, assim, as equações de previsão não incluíam este parâmetro sempre que ele tomava valores elevados. Este ponto de vista tem sido disputado na última década (ver, por exemplo, Lança *et al.* [2013]), com resultados que confirmam que há decréscimo de  $h_{se}/D_p$  para valores crescentes de  $D_p/D_{50}$  sempre que  $D_p/D_{50} > \approx 50$ .

De facto, há poucos trabalhos publicados com estudos experimentais que explorem relações elevadas de  $D_p/D_{50}$ , ou seja, pilares de grandes dimensões em face da granulometria do fundo, e a explicação é a seguinte: em escoamentos sem transporte sólido generalizado, em condição próxima da do início do movimento, as características dos sedimentos devem ser tais que  $D_{50} > \approx 0,6$  mm para evitar a formação de rugas no fundo; em consequência, valores elevados de  $D_p/D_{50}$  implicam valores elevados do diâmetro do pilar,  $D_p$ , e da altura do escoamento de aproximação,  $h$ , no sentido de satisfazer a necessidade simultânea de simular valores realistas de  $h/D_p$ . Adicionalmente, para evitar efeitos de parede e efeitos de contração para diâmetros elevados dos pilares, são necessários canais muito largos e caudais muito elevados, o que é difícil de concretizar em laboratório.

O estudo de Lança *et al.* [2013] reporta campanhas de ensaios conduzidos em dois canais que têm dimensões apreciáveis e que possibilitaram a obtenção de dados de erosão localizada para  $58 \leq D_p/D_{50} \leq 465$ , cobrindo condições relativas à altura do escoamento na gama  $0,5 \leq h/D_p \leq 5,0$ , nas condições de intensidade do escoamento próximas do movimento incipiente do fundo móvel,  $U/U_c \approx 1$ .

Identificou-se uma dupla dependência de  $h_{se}/D_p$  em relação a  $h/D_p$  e  $D_p/D_{50}$  que se traduz nas seguintes equações:

$$\frac{h_{se}}{D_p} = \begin{cases} 7,3 \left( \frac{D_p}{D_{50}} \right)^{-0,29} \left( \frac{h}{D_p} \right)^{0,12} & \text{para } 60 \leq \frac{D_p}{D_{50}} \leq 500 \\ 1,2 \left( \frac{h}{D_p} \right)^{0,12} & \text{para } \frac{D_p}{D_{50}} > 500 \end{cases} \quad (9)$$

Por razões de segurança não se sugere a utilização das equações (9) mas antes as que derivam da envolvente das medições:

$$\frac{h_{se}}{D_p} = K_h K_{D_{50}} \quad (5)$$

em que  $K_h$  é o preditor de Melville [1997] modificado e que passa a ser expresso por:

$$K_h = \begin{cases} 2,3 \left( \frac{h}{D_p} \right)^{1/3} & \text{para } 0,50 \leq \frac{h}{D_p} \leq 1,45 \\ 2,6 & \text{para } \frac{h}{D_p} > 1,45 \end{cases} \quad (11)$$

e  $K_{D_{50}}$  é dado por:

$$K_{D_{50}} = \begin{cases} 1,0 & 60 \leq \frac{D_p}{D_{50}} \leq 100 \\ 5,8 \left( \frac{D_p}{D_{50}} \right)^{-0,38} & 100 < \frac{D_p}{D_{50}} \leq 500 \\ 0,55 & 500 \leq \frac{D_p}{D_{50}} \end{cases} \quad (12)$$

A importância desta contribuição reside na caracterização da influência da dimensão relativa dos sedimentos, contrariando equações de previsão mais tradicionais em que se admite que, para  $D_p/D_{50} \geq 100$ , a profundidade de erosão de equilíbrio não varia com  $D_p/D_{50}$ .

De acordo com Sheppard [2004], os gradientes de pressão na proximidade de pilares de reduzidas dimensões são mais acentuados e induzem maiores tensões de arrastamento nos sedimentos do fundo do que junto a pilares maiores. Assim, para uma determinada granulometria do leito, há mecanismos de erosão localizada que diminuem de intensidade com o aumento da dimensão do pilar.

O uso das equações (10) a (12) para calcular um limite superior de segurança da previsão das profundidades de equilíbrio das cavidades de erosão requer ainda o uso de fatores multiplicativos apropriados para se ter em conta a influência da intensidade de escoamento (relação de velocidades), da forma do pilar, do alinhamento ao escoamento, do coeficiente de graduação dos sedimentos, da contração do escoamento na secção de inserção da obra e da forma dessa secção.

## 5 EFEITO DE FORMA DOS PILARES

O fator de forma dos pilares,  $K_f$ , é definido pela relação entre a profundidade de erosão localizada junto de um pilar com secção transversal de uma determinada forma e a profundidade de erosão localizada junto de um pilar cilíndrico.

O estudo experimental conduzido na Universidade da Beira Interior, descrito por Fael *et al.* [2014], incluiu ensaios com pilares circulares com quatro diâmetros  $D_p = 50, 100, 150$  e  $200$  mm, bem como ensaios com pilares de forma não circular e largura  $D_p = 50, 100, 150$  mm. As formas ensaiadas incluem a retangular com arestas vivas, a

retangular com extremidades arredondadas, a oblonga e a de envolvente retangular composta por estacas circulares contíguas.

Os valores do fator de forma foram obtidos nos termos da respetiva definição, respeitando iguais valores de  $D_p/D_{50}$ , assim como dos restantes parâmetros que controlam o processo erosivo.

Concluiu-se que o fator de forma de pilares oblongos ou de pilares retangulares de extremidades arredondadas é aproximadamente igual a 1,0 e que, para pilares retangulares com arestas vivas e pilares de envolvente retangular constituídos por estacas, o fator  $K_f$  é aproximadamente igual a 1,2.

## 6 EFEITO DO ALINHAMENTO DOS PILARES

O fator de alinhamento dos pilares ou fator de ângulo de viés,  $K_\theta$ , é definido pela relação entre a profundidade de erosão localizada junto de um pilar alinhado com determinado ângulo  $\theta$  em relação à direção principal do escoamento e a profundidade de erosão localizada junto de um pilar idêntico alinhado com a direção do escoamento, ou seja, com  $\theta = 0^\circ$ .

O estudo experimental conduzido na Universidade da Beira Interior, mencionado na secção anterior e descrito em Fael *et al.* [2014], incluiu ensaios para  $\theta = 0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 60^\circ; \text{ e } 90^\circ$ . O comprimento maior dos pilares,  $L$ , foi 200 mm, enquanto a largura,  $D_p$  foi  $D_p = [50, 100, 150, 200]$  mm.

Os resultados, representados na Figura 1, foram comparados com os coeficientes recomendados em Richardson e Davis [2001].

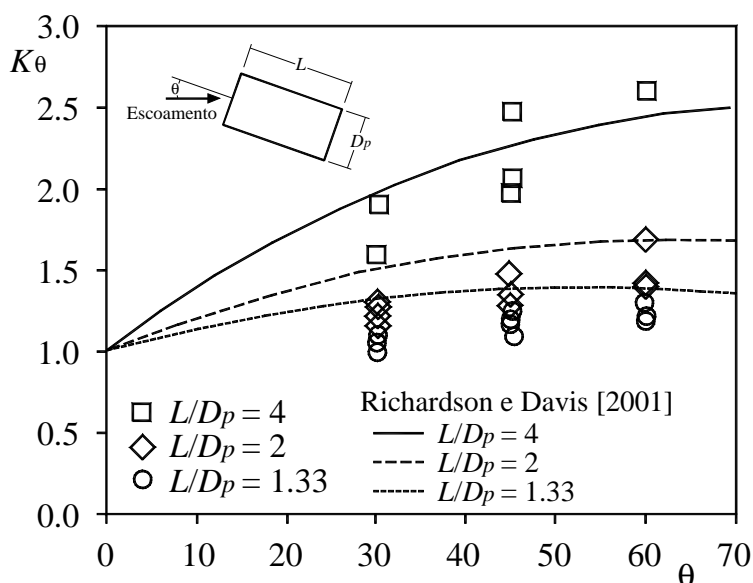


Figura 1. Fator de alinhamento dos pilares,  $k_\theta$ , (adaptada de Fael *et al.* [2014])

O estudo permitiu concluir que o método de previsão sugerido por aqueles autores produz uma previsão precisa de  $K_\theta$  para  $L/D_p = 4,0$  e que o mesmo método sobrestima  $K_\theta$  para  $L/D_p = [1,33; 2,0]$ .

## 7 CONCLUSÕES

Nos termos do exposto, pode-se concluir o seguinte:



1. A equação de Franzetti *et al.* [1982] descreve apropriadamente a evolução temporal da profundidade de erosão desde que os coeficientes  $a_1$  e  $a_2$  sejam especificados pelas Equações (7) e (8) respetivamente. Esta formulação aplica-se para  $U/U_c \approx 1$ ,  $60 < D_p/D_{50} < 500$  e  $0,5 \leq h/D_p \leq 5,0$ .
2. A profundidade de erosão de equilíbrio diminui com  $D_p/D_{50}$  para valores  $D_p/D_{50} > \approx 100$ . O fator que traduz o efeito da dimensão dos sedimentos,  $K_{D50}$ , pode ser obtido pela Equação (12).
3. O parâmetro  $K_{D50}$  pode ser utilizado conjuntamente com o parâmetro  $K_h$  dado pela Equação (11) para calcular pela Equação (10) um majorante da profundidade de equilíbrio junto de pilares cilíndricos.
4. O fator de forma,  $K_f$ , é aproximadamente igual a 1,0, para pilares oblongos e pilares retangulares com extremidades arredondadas e igual a 1,2 para pilares retangulares com arestas vivas e para pilares de envolvente retangular constituídos por estacas.
5. O método de previsão sugerido por Richardson e Davis [2001] produz uma previsão precisa de  $K_\theta$  para  $L/D_p = 4,0$ , enquanto o mesmo método sobrestima  $K_\theta$  para  $L/D_p = [1,33; 2,0]$ .

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) através do projeto de investigação PTDC/ECM/101353/2008 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), no programa COMPETE, com fundos nacionais (FCT) através do projeto de investigação RECI/ECM-HID/0371/2012.

## REFERÊNCIAS

- Couto, L., Cardoso, A. 2001 (a). Erosões localizadas junto de encontros e de pilares de pontes. Parte I – Caracterização da situação de referência. Recursos Hídricos. 22 (1), 65 – 74.
- Couto, L., Cardoso, A. 2001 (b). Erosões localizadas junto de encontros e de pilares de pontes. Parte II - Da situação de referência à prática. Recursos Hídricos. 22 (1), 75 – 86.
- Fael, C., Lança, R., Cardoso, A. 2014. Pier shape and alignment effects on local scour. In SHF Conference: “Small scale morphological evolution of coastal, estuarine and river systems”. Nantes 6 & 7 October 2014.
- Franzetti, S., Larcán, E., Mignosa, P. 1982. Influence of tests duration on the evaluation of ultimate scour around circular piers. Proc., Int. Conf. on the Hydraulic Modeling of Civil Engineering Structures, BHRA Fluid Engineering, Coventry, England, 381–396.
- Kothyari, U. C., Hager, W. H., Oliveto, G. 2007. Generalized approach for clear-water scour at bridge foundation elements. J. Hydraul. Eng., 133(11), 1229–1240.
- Lança, R., Fael, C., Maia, R., Pêgo, J., Cardoso, A. 2013. Clear-water scour at comparatively large cylindrical piers. J. Hydraulic Eng., 139 (11), 1117-1125.
- Melville, B. W. 1997. Pier and abutment scour: integrated approach. J. Hydraul. Eng., 123(2), 125–136.
- Melville, B. W.; Chiew, Y. M. 1999. Time scale for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering, 125(1), 59–65.
- Nacional Cooperative Highway Research Program (NCHRP). 2011. Scour at wide piers and long skewed piers. Rep. 682, Transportation Research Board, Washington, DC.
- Richardson, E. V., Davis, S. R. 2001. Evaluating scour at bridges. Hydraulic Engineering Circular No. 18. 4<sup>th</sup> edition. Federal Highway Administration. National Highway Institute. U.S. Department of Transportation.
- Simarro, G., Fael, C., Cardoso, A. H. 2011. – Estimating equilibrium scour depth at cylindrical piers in experimental studies. J. Hydraul. Eng., 137(9), 1089–109.
- Sheppard, D. M. 2004. Overlooked local scour mechanism. Transportation Research Record 1890, Transportation Research Board, Washington, DC, 107–111.