

EROSÕES LOCALIZADAS JUNTO DE ALINHAMENTOS DE PILARES CILÍNDRICOS

Rui LANÇA

Professor Adjunto, Universidade do Algarve, rlanca@ualg.pt

Cristina FAEL

Professora Auxiliar, Universidade da Beira Interior, cfael@ubi.pt

Rodrigo MAIA

Professor Associado, Universidade do Porto, rmaia@fe.up.pt

João Pedro PÊGO

Professor Auxiliar, Universidade do Porto, jppego@fe.up.pt

António H. CARDOSO

Professor Catedrático, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, ahc@civil.ist.utl.pt

RESUMO

É conhecido o facto de os pilares fundados em leitos aluvionares poderem dar origem a cavidades de erosão que, em circunstâncias excepcionais, induzem a queda desses pilares e o colapso ou a rotura parcial das pontes em que se integram. A previsão da profundidade de equilíbrio de cavidades de erosão constitui-se, por isso, num aspecto importante do projecto de pontes. Este desiderato, não sendo de concretização trivial para pilares isolados, é mais complexo no caso de alinhamentos de pilares, em face das interacções de vórtices e da interdependência de cavidades de erosão que tais alinhamentos originam.

Este estudo centra-se na caracterização de cavidades de erosão junto de alinhamentos de pilares constituídos por quatro pilares cilíndricos. Analisa-se, em concreto, o efeito do espaçamento entre pilares e o efeito do ângulo de enviesamento. O estudo foi realizado para a situação mais desfavorável de profundidade e de velocidade do escoamento de aproximação, definida para a condição de início de movimento do material do fundo.

Concluiu-se que, para ângulos de enviesamento de 0° e 15°, a profundidade de erosão é cerca de 15% superior à que se observa num pilar isolado e quase não varia com o espaçamento. Em contrapartida, para ângulos de 30°, 45° e 90°, as cavidades de erosão são sucessivamente menos profundas à medida que o espaçamento aumenta. Para espaçamentos (entre eixos de pilares) iguais ou superiores a seis vezes o diâmetro dos pilares, a profundidade de erosão é praticamente independente do ângulo de enviesamento. Quando o espaçamento é igual ao diâmetro do pilar, os alinhamentos podem ser tratados como um pilar de secção rectangular e topos arredondados que envolva os pilares justapostos; excluindo esta situação de espaçamento, as maiores profundidades de erosão obtêm-se para o ângulo de enviesamento de 30°. Pôde constatar-se que existem métodos de cálculo da profundidade de erosão para alinhamentos de pilares que podem conduzir a previsões largamente por defeito.

Palavras-chave: erosão localizada, alinhamento de pilares cilíndricos.

1 – INTRODUÇÃO

Os tabuleiros de pontes são frequentemente suportados por pilares que, em face da respectiva disposição, se organizam em alinhamentos ortogonais, em planta, ao eixo principal do tabuleiro. É conhecido o facto de os pilares fundados em leitos aluvionares poderem dar origem a cavidades de erosão que, em circunstâncias excepcionais, induzem a queda desses pilares e o colapso ou a rotura parcial das pontes em que se integram. A previsão da profundidade de equilíbrio de potenciais cavidades de erosão constitui-se, por isso, num aspecto importante do projecto de pontes. Este desiderato, não sendo de concretização trivial para pilares isolados, é mais complexo no caso de alinhamentos de pilares em face das interações de vórtices e da interdependência de cavidades de erosão que tais alinhamentos originam.

O estudo das erosões localizadas junto de pilares isolados foi iniciado nos anos cinquenta do século passado e os resultados estão amplamente divulgados na literatura da especialidade, que inclui manuais de grande circulação (e.g., Breusers e Raudkivi (1991); Melville e Coleman (2000); Richardson e Davis (2001) ou Sheppard e Renna (2010)).

A caracterização das erosões localizadas junto de alinhamentos de pilares carece de investigação adicional. Por comparação com a investigação relativa a pilares simples, conhecem-se relativamente poucos trabalhos sobre o assunto. Em rigor, tais trabalhos foram concebidos e realizados tendo em vista a caracterização de cavidades de erosão junto de grupos de estacas que resultam de alinhamentos paralelos. Os grupos de estacas são geralmente utilizados como fundação de pilares complexos; foram alvo dos estudos de Hannah (1978), Salim e Jones (1996), Zhao e Sheppard (1998), Ataie-Ashtiani e Beheshti (2006) e Amini *et al.* (2011). Naturalmente, sempre que estão em causa alinhamentos de pilares ou grupos de estacas de pilares complexos, os manuais disponíveis baseiam os respectivos métodos de cálculo no reduzido número de resultados de alguns destes cinco estudos, o que potencia importantes incertezas de previsão da profundidade de equilíbrio das cavidades de erosão.

Este estudo centra-se na caracterização de cavidades de erosão junto de alinhamentos de pilares constituídos por quatro pilares cilíndricos. Analisa-se, em concreto, o efeito do espaçamento entre pilares e o efeito do ângulo de enviesamento, entendido como o ângulo formado pela direcção do escoamento de aproximação com o plano que contém os eixos verticais dos pilares do alinhamento. O estudo foi realizado para a situação mais desfavorável de profundidade e de velocidade do escoamento de aproximação, definida para a condição de início de movimento do material do fundo.

2 – ENQUADRAMENTO DO ESTUDO

No caso de escoamento uniformes completamente desenvolvidos em canais rectangulares muito largos, cujo fundo seja constituído por areia uniforme insusceptível de dar origem à formação de rugas, admitindo que o fenómeno de erosão localizada em torno de um pilar cilíndrico isolado ocorre sem transporte generalizado de material sólido no trecho de aproximação e que o escoamento é

turbulento rugoso na proximidade do pilar, pode mostrar-se que a profundidade de erosão é descrita pela função genérica (Fael 2007):

$$\frac{h_s}{D_p} = \varphi_1 \left(\frac{h}{D_p}; \frac{U}{U_c}; \frac{D_p}{D_{50}}; \frac{Ut}{D_p} \right) \quad (1)$$

em que h_s é a profundidade de erosão no instante t , D_p é o diâmetro do pilar, U é a velocidade média do escoamento de aproximação de profundidade h , D_{50} o diâmetro mediano do material do fundo e U_c o correspondente valor da velocidade média para a situação crítica de início do movimento do material do fundo no escoamento de aproximação.

Cabe aqui referir i) que se entende por escoamento completamente desenvolvido aquele em que, verificando-se auto-similaridade, a camada limite ocupa toda a respectiva altura, ii) que se considera muito largo todo o canal que preserva uma distribuição de velocidades bi-dimensional na respectiva zona central (o que requer $B/h > 5$, sendo B a largura do canal), iii) que a areia se considera uniforme quando o coeficiente de graduação da respectiva curva granulométrica é inferior a 1,5, iv) que essa areia não é compatível com a formação de rugas quando o diâmetro mediano é superior a 0,6 mm e v) que, sendo o escoamento turbulento rugoso na proximidade do pilar, se pode admitir que a viscosidade da água não influencia o processo erosivo.

No caso de alinhamentos de pilares, tendo presentes as definições contidas na Figura 1, a equação anterior passa a incluir novos parâmetros e pode ser generalizada da seguinte forma:

$$\frac{h_s}{D_p} = \varphi_2 \left(\frac{h}{D_p}; \frac{U}{U_c}; \frac{D_p}{D_{50}}; \frac{Ut}{D_p}; \frac{s}{D_p}; \alpha; k_f; m \right) \quad (2)$$

em que s é o espaçamento entre eixos de pilares, α é o ângulo de enviesamento, k_f o coeficiente de forma dos pilares e m o número de pilares do alinhamento.

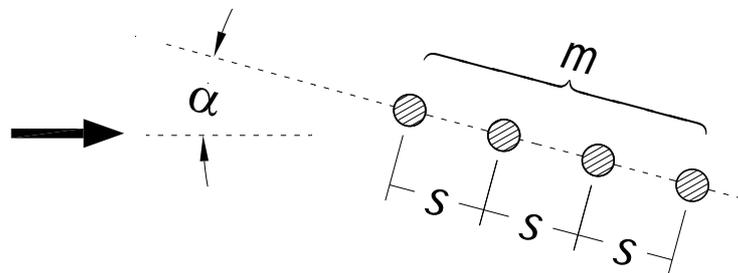


Figura 1 – Representação esquemática de um alinhamento de pilares

A existência de n alinhamentos paralelos origina grupos de estacas similares aos usualmente utilizados na fundação de pilares complexos. Neste caso, a generalização da equação (2) é dada por:

$$\frac{h_s}{D_p} = \varphi_3 \left(\frac{h}{D_p}; \frac{U}{U_c}; \frac{D_p}{D_{50}}; \frac{Ut}{D_p}; \frac{s}{D_p}; \alpha; k_f; m; n \right) \quad (3)$$

Para i) valores suficientemente elevados de h/D_p ($\geq \approx 4$), que maximizam a profundidade de erosão, ii) pilares cilíndricos ($k_f = 1$) e iii) na situação de equilíbrio, em que h_s deixa de depender do tempo – tomando o valor máximo, h_{se} – a equação anterior escreve-se:

$$\frac{h_{se}}{D_p} = \varphi_4 \left(\frac{U}{U_c}; \frac{D_p}{D_{50}}; \frac{s}{D_p}; \alpha; m; n \right) \quad (4)$$

Se, além disso, se admitir que $U/U_c = \text{constante}$ e que D_p/D_{50} varia numa gama relativamente estreita de valores, a equação (4) simplifica-se, vindo:

$$\frac{h_{se}}{D_p} = \varphi_5 \left(\frac{s}{D_p}; \alpha; m; n \right) \quad (5)$$

De referir que, para $U/U_c \approx 1$, se obtêm os valores mais desfavoráveis da profundidade de equilíbrio. Além disso, é sempre possível reintroduzir o efeito de um ou mais dos parâmetros que foram sendo eliminados na análise anterior, e, em particular, da equação (3), sempre que isso seja pertinente para o estudo de uma situação concreta.

Os parâmetros das equações (4) e (5) permitem enquadrar e caracterizar os estudos conhecidos e anteriormente referidos (ver Quadro 1).

Quadro 1 – Principais parâmetros de controlo dos estudos conhecidos

Autor	α (°)	s/D_p	n	m	U/U_c	T_d (h)	Forma ⁽¹⁾
Hannah (1978)	0 – 90	1 – 21	1	2	0,72	≈ 7	circular
Salim e Jones (1998)	0 – 50	1 – 10	3	3	1,0	4	quadrada
Zhao e Sheppard (1999)	0 – 90	3	3	8	0,65	26	circular e quadrada
Ataie-Ashtiani e Beheshti (2006)	0	1 – 11	1; 2; 3	1; 2; 3	0,66 – 0,88	≈ 8	circular
Amini <i>et al.</i> (2011) ⁽²⁾	0	1 – 6	2; 3	2; 4; 5	0,95	≈ 8	circular

⁽¹⁾ – entendida como a da secção recta de cada pilar do alinhamento;

⁽²⁾ – dados referentes a grupos de pilares não submersos e com espaçamento uniforme.

O quadro anterior põe em evidência a curta duração, T_d , dos ensaios conhecidos, muito embora a maioria dos autores tenha realizado um número reduzido de ensaios mais extensos para validar os respectivos procedimentos experimentais. Em caso algum, porém, a duração se aproximou dos 7 dias, como sugerido por Simarro *et al.* (2011) para o caso de pilares isolados. Por isso, os resultados referenciados não permitem inferir conclusões garantidas quanto à profundidade de equilíbrio de cavidades de erosão junto de grupos de estacas, onde é plausível que o efeito da duração dos ensaios seja ainda mais relevante do que no caso de pilares isolados.

O material de fundo utilizado nos cinco referidos estudos foi areia uniforme; com excepção de Hannah (1978), Amini *et al.* (2011) e, em parte, Ataie-Ashtiani e Beheshti (2006), os restantes autores utilizaram areias finas susceptíveis de proporcionar a formação de rugas no fundo do escoamento de aproximação, o que, no caso particular de Salim e Jones (1998), terá dado origem a formas de fundo a montante das estacas, uma vez que $U/U_c \approx 1,0$.

De um modo geral, os vários autores concluíram que a profundidade máxima das cavidades de erosão decresce com o aumento do espaçamento entre estacas. Excepcionalmente, Ataie-Ashtiani e Beheshti (2006) referiram que, no grupo de duas estacas alinhadas com o escoamento de aproximação ($\alpha = 0^\circ$), a máxima profundidade de erosão se observa para $s/D_p = 3$; os mesmos autores concluíram também que, para $\alpha = 90^\circ$, a maior cavidade de erosão ocorre para $s/D_p = 1$.

Para o cálculo da profundidade de erosão em grupos de estacas caracterizados por $\alpha = 0^\circ$, Salim e Jones (1998) – que utilizaram pilares individuais de secção quadrada – sugeriram que a cavidade de erosão é igual à que se obtém num pilar equivalente rectangular em que o comprimento dos lados é igual à soma dos lados dos pilares individuais. Estes autores concluíram ainda que o efeito do ângulo de enviesamento num grupo de estacas e no pilar rectangular equivalente é semelhante, e que o ângulo de enviesamento que origina as maiores cavidades de erosão é $\alpha = 30^\circ$; segundo Zhao e Sheppard (1999), para estacas cilíndricas o correspondente valor de α é 25° .

Amini *et al.* (2011) – que só estudaram situações em que $\alpha = 0^\circ$ – sugeriram que, para $s/D_p = 1$, o grupo funciona como um pilar isolado, com um único vórtice de ferradura. Para $s/D_p \leq 3,5$, observa-se uma única cavidade de erosão. Para $s/D_p > 3,5$, a interferência entre pilares vizinhos diminui e é possível distinguir cavidades de erosão individuais, associadas a cada pilar. Estas cavidades separam-se progressivamente com o aumento do espaçamento até que, para $s/D_p > 5$, deixam de estar interligadas e a profundidade deixa de diminuir com o incremento do espaçamento.

No que se refere à previsão da profundidade de equilíbrio de cavidades de erosão junto de alinhamentos de pilares, utilizam-se, por vezes, métodos de cálculo desenvolvidos para pilares isolados. Neste contexto, assume particular importância o conceito de diâmetro equivalente, D_{pg} , e que correspondente ao diâmetro do pilar isolado que, por definição, origina uma cavidade de erosão igual à que se observa junto do alinhamento de pilares. O diâmetro equivalente é função da soma das larguras dos pilares, projectadas, sem sobreposição, num plano normal ao escoamento de aproximação, L_{pg} , e de coeficientes relativos ao espaçamento entre pilares, K_g , e ao ângulo de enviesamento do grupo, K_α . Esta abordagem é utilizada em alguns dos métodos mais utilizados na prática da engenharia (e.g. Richardson e Davis (2001); Sheppard e Renna (2010)).

Em face do reduzido número de estudos e, em particular, à curta duração dos correspondentes ensaios, decidiu-se visitar o tema das erosões localizadas junto de alinhamentos de pilares, procedendo pela via experimental e garantindo a realização de ensaios significativamente mais longos. Podendo encarar-se os alinhamentos de pilares como um caso particular de grupos de estacas, eles apresentam, enquanto alinhamentos, a relevância prática invocada na Introdução.

3 – INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste estudo foi utilizado um canal com 28,00 m de comprimento, 4,00 m de largura e 1,00 m de altura. No respectivo trecho central, a 14,00 m da entrada, existe uma reentrância paralelepípedica no fundo com 3,00 m de comprimento, 4,00 m de largura e 0,60 m de profundidade que foi cheia com areia. O canal foi seccionado longitudinalmente, a meia largura, por um septo fino, o que viabilizou a realização de dois ensaios em simultâneo. Na prática, tudo se passou como se existissem dois canais com largura $B = 2,00$ m, nos quais se observaram as mesmas condições de escoamento.

No canal, o escoamento é estabelecido, por bombagem, a partir de um tanque de abastecimento com 100 m³ de capacidade. As bombas, accionadas por motores de velocidade variável, integram-se num circuito hidráulico e podem impulsionar caudais até 270 ls⁻¹. À entrada do canal, a água, proveniente do tanque através desse circuito, passa por duas fiadas de dispositivos de tranquilização do tipo favo de abelha, que garantem a distribuição uniforme do escoamento e permitem tranquilizar a superfície livre em toda a largura do canal. Imediatamente a jusante destes dispositivos, o fundo dos dois canais foi coberto por uma camada fina de gravilha solta, numa extensão de 5,00 m, de modo a garantir o desenvolvimento completo da camada limite antes de o escoamento dar entrada no trecho com a reentrância do fundo. Na extremidade de jusante do canal existe uma comporta pendular que possibilita a regulação dos níveis do escoamento e a passagem da água, de regresso ao tanque de abastecimento.

A areia utilizada para encher a reentrância do fundo é de quartzo ($\rho_s =$ massa volúmica = 2650 kgm⁻³) com uma curva granulométrica caracterizada pelo diâmetro mediano $D_{50} = 0,86$ mm e pelo coeficiente de graduação $\sigma_D = 1,36$.

Os ensaios foram feitos com valores constantes da altura do escoamento de aproximação, $h = 0,20$ m, e da respectiva velocidade média, U , sensivelmente igual à velocidade crítica de início do movimento da areia, $U_c \approx 0,33$ ms⁻¹. Para este valor da velocidade, serão atingidos os maiores valores da profundidade de equilíbrio das cavidades de erosão para valores invariantes dos restantes parâmetros da equação (3).

Os pilares foram construídos com tubos de PVC com 50 mm de diâmetro, colocados na vertical; os alinhamentos foram centrados no fundo da reentrância, fazendo variar, de ensaio para ensaio, o ângulo de enviesamento e o espaçamento. A escolha de alinhamentos com quatro pilares decorre do facto de se admitir que, para número de pilares superior, a variável m (ver Figura 1) deixa de influenciar significativamente o processo.

Antes de iniciar cada ensaio, a areia era nivelada com o fundo do canal; a zona envolvente dos pilares era coberta com uma chapa metálica fina para inibir o desenvolvimento descontrolado de erosões enquanto se estabelecia o escoamento. Posteriormente, o canal era cheio gradualmente com recurso a um circuito hidráulico secundário de enchimento (cujo caudal é igual a 5 ls^{-1} e que dá entrada no canal em três bocais localizados no fundo), após o que se accionavam as bombas do circuito hidráulico principal e se impunha gradualmente o caudal de 248 ls^{-1} , medido em caudalímetros electromagnéticos existentes no circuito principal. A altura de escoamento era então ajustada por manobra da comporta de jusante. Quando o caudal e a altura do escoamento estavam estabilizados nos valores pretendidos, a chapa metálica era removida e dava-se início ao ensaio.

A profundidade da cavidade de erosão junto de cada pilar do alinhamento foi sistematicamente medida com um hidrómetro, com uma precisão de $\pm 1 \text{ mm}$. Efectuavam-se várias medições junto de cada pilar durante o primeiro dia e duas ou três nos dias seguintes, até fim do ensaio. A duração dos ensaios variou entre 6,9 e 17,1 dias.

Verificou-se que o fundo de areia situado a montante dos pilares não era erodido no decorrer dos ensaios, garantindo-se, assim, que as cavidades de erosão não eram alimentadas por areia provenientes de montante.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizaram-se vinte ensaios. Um deles foi conduzido para um pilar isolado (com $D_p = 50 \text{ mm}$); dezanove foram feitos para outros tantos alinhamentos de quatro pilares. Caracterizam-se no Quadro 2 estes dezanove ensaios. Incluem-se, além do ângulo de enviesamento, α , a largura dos alinhamentos de pilares projectados num plano normal à direcção do escoamento de aproximação, L_{pg} , o espaçamento entre eixos de pilares, s , a duração dos ensaios, T_d , e o parâmetro s/D_p ($D_p = 50 \text{ mm}$). De referir que, enquanto para $\alpha = \{0^\circ; 30^\circ; 45^\circ; 90^\circ\}$ já se testaram os quatro espaçamentos previstos, $s/D_p = \{1; 2; 3; 6\}$, para $\alpha = 15^\circ$ ainda faltará realizar o ensaio definido por $s/D_p = 6$.

Os ensaios caracterizam-se por $h/D_p = 4,00$, valor acima do qual o parâmetro h/D_p deixa de influenciar significativamente a profundidade de erosão, maximizando-a. O mesmo acontece com U/U_c e D_p/D_{50} . De facto, é incontroverso que as maiores profundidades de erosão se obtêm para condições próximas da de início do movimento do material do fundo no escoamento de aproximação e estudos recentes (e.g. Sheppard *et al.* (2004)) ilustram que o mesmo é verdade para $D_p/D_{50} = 50$ a 100, intervalo que inclui o valor adoptado neste estudo ($D_p/D_{50} \approx 58$). A relação $B/h = 10$ garante a ausência de efeitos de parede e $B/L_{pg} \geq 10$ evita efeitos de erosão por contracção do escoamento.

Neste estudo, e em acordo com as razões explicitadas por Lança *et al.* (2010), postula-se que a profundidade de equilíbrio é atingida assintoticamente. Por isso, tendo por base os registos da evolução temporal da profundidade de erosão medida junto dos pilares do alinhamento e dos pilares isolados, procedeu-se ao cálculo das respectivas profundidade de equilíbrio, para $t = \infty$, ajustando polinómios de 6 parâmetros às medições, nos termos da proposta de Lança *et al.* (2010), reiterada por Simarro *et al.* (2011). No Quadro 2 registam-se também os valores de h_{seg} e de h_{seg}/h_{se1} . Neste contexto, h_{se1} ($= 0,136 \text{ m}$) é a profundidade de equilíbrio de referência, correspondente ao pilar isolado ($D_p = 50 \text{ mm}$), e h_{seg} é a profundidade de equilíbrio máxima correspondente a cada alinhamento de pilares, independentemente do local para onde esta foi obtida (após extrapolação para $t = \infty$).

Quadro 2 – Principais variáveis e parâmetros característicos dos ensaios (alinhamentos de pilares)

Ensaio	α (°)	L_{pg} (m)	s (m)	T_d (dia)	s/D_p	h_{seg} (m)	h_{seg}/h_{se1}
1	0	0,05	0,05	11,01	1,0	0,153	1,13
2	0	0,05	0,10	16,00	2,0	0,160	1,18
3	0	0,05	0,15	13,66	3,0	0,152	1,12
4	0	0,05	0,30	17,10	6,0	0,166	1,22
5	15	0,09	0,05	11,18	1,0	0,157	1,15
6	15	0,13	0,10	13,19	2,0	0,152	1,12
7	15	0,17	0,15	15,39	3,0	0,162	1,19
8	30	0,13	0,05	6,92	1,0	0,246	1,81
9	30	0,20	0,10	6,92	2,0	0,242	1,78
10	30	0,20	0,15	7,67	3,0	0,246	1,81
11	30	0,20	0,30	7,67	6,0	0,177	1,30
12	45	0,16	0,05	7,94	1,0	0,316	2,33
13	45	0,20	0,10	6,95	2,0	0,174	1,28
14	45	0,20	0,15	9,92	3,0	0,149	1,09
15	45	0,20	0,30	7,95	6,0	0,144	1,06
16	90	0,20	0,05	10,34	1,0	0,354	2,61
17	90	0,20	0,10	6,91	2,0	0,190	1,40
18	90	0,20	0,15	9,44	3,0	0,175	1,29
19	90	0,20	0,30	7,76	6,0	0,127	0,94

Importa registar que as erosões junto dos alinhamentos definidos por $s/D_p = 1$ se podem conceptualizar como as que ocorreriam junto de um pilar simples com a forma assinalada a tracejado na Figura 2. Admite-se que esse alinhamento se comporta como um pilar rectangular de topos arredondados. No caso em estudo o rácio $L/D_p = 4$.

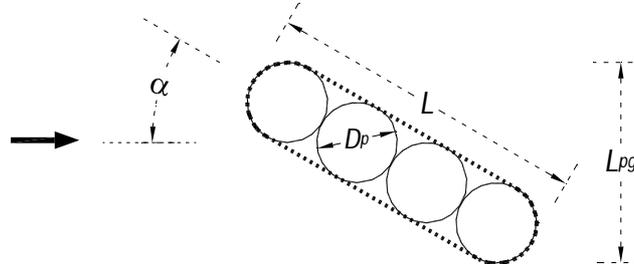


Figura 2 – Conceptualização do pilar equivalente para $s/D_p = 1$

De acordo com esta conceptualização, pode admitir-se, em primeira aproximação, que:

$$h_{seg} |_{\alpha} = K_{\alpha} K_f (h_{seg} |_{\alpha=0^{\circ}}) \quad (6)$$

em que K_{α} é o coeficiente que atende ao ângulo de enclividade, K_f é o coeficiente de forma do pilar e os restantes símbolos são auto-explicativos.

Na Figura 3 regista-se a evolução temporal da profundidade de erosão observada nos ensaios relativos a alinhamentos de pilares, explorando a influência dos parâmetros de controlo do presente estudo, ou seja, α e s/D_p . Por razões de comparabilidade dos registos, os ensaios mais longos foram truncados para $t = 200$ horas e a escala do eixo h_s é a mesma em todos os casos. O valor de $h_{se1} = 0,136$ m foi assinalado a tracejado de forma a evidenciar os desvios em relação à situação de referência. Com excepção do ângulo $\alpha = 90^{\circ}$ (por razões óbvias), o pilar P1 é o de montante e o pilar P4 é o que se situa mais a jusante.

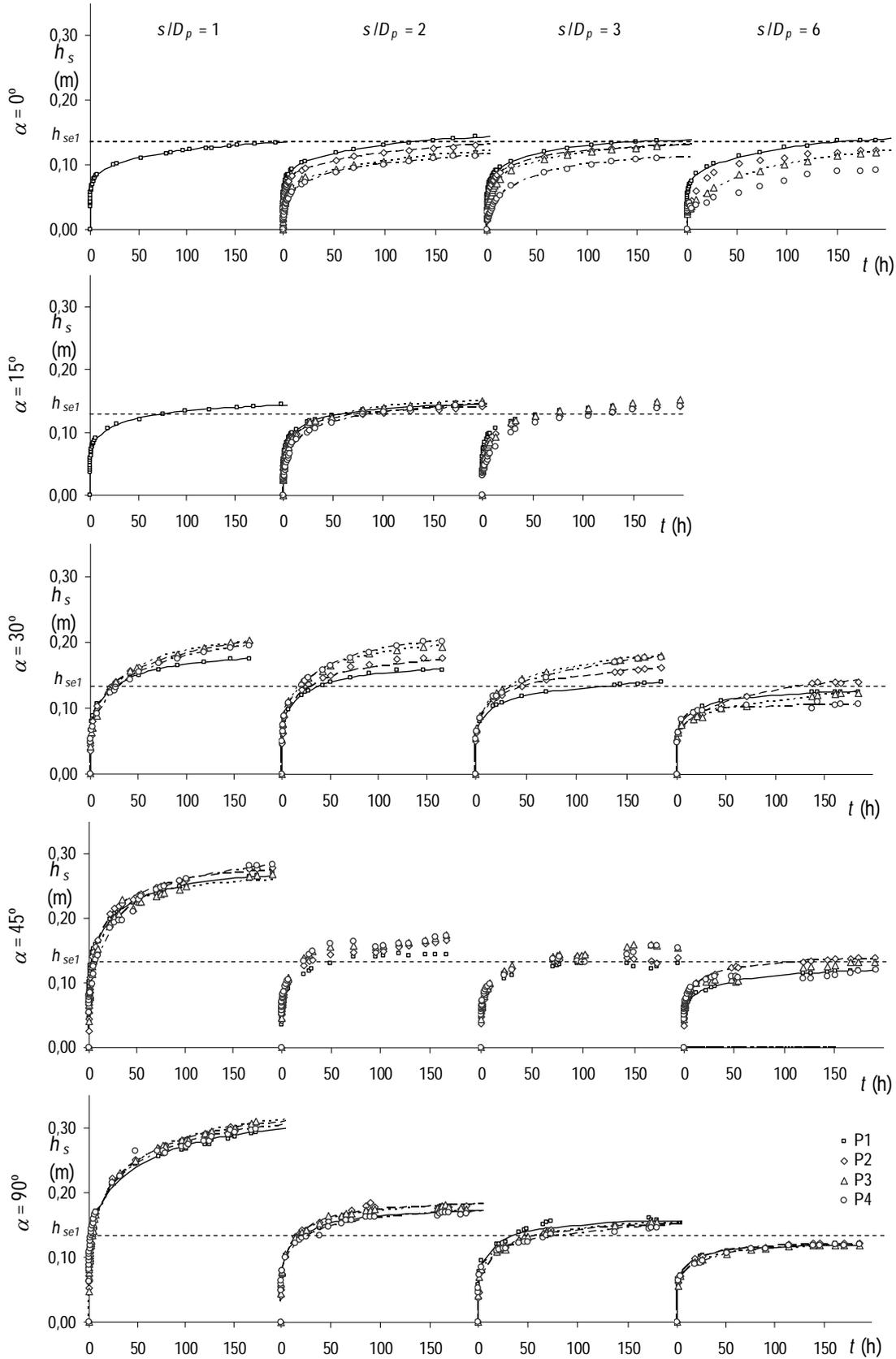


Figura 3 – Evolução temporal da profundidade das cavidades de erosão obtidas nos ensaios dos alinhamentos de pilares

A análise da Figura 3 e do Quadro 2 permitem extrair conclusões importantes para a prática da engenharia. Assim,

i) Para $\alpha = 0^\circ$, a profundidade máxima de erosão localiza-se sempre junto do pilar P1. As cavidades de erosão junto dos pilares seguintes são menos profundas, o que se pode atribuir à redução da velocidade do escoamento e da respectiva capacidade erosiva, induzida pelos pilares de montante, e à deposição de areia proveniente das cavidades que se formam junto destes mesmos pilares. A profundidade máxima de equilíbrio do alinhamento (registada junto de P1) é cerca de 15% superior à do pilar isolado e não parece depender de s/D_p . Este incremento é devido ao facto de, para espaçamentos mais pequenos, o vórtice de ferradura de um dado pilar interagir com o pilar imediatamente a montante, aumentando a profundidade da cavidade de erosão junto daquele (pilar de montante); além disso, independentemente do espaçamento, o desprendimento de sucessivos sistemas de vórtices de esteira dos pilares situados a jusante do pilar P1 (ver Figura 4) origina a aspiração e transporte da areia para jusante, enquanto, no caso de um pilar isolado, essa deposição é feita imediatamente a jusante da cavidade de erosão, o que contribui para estabilizar o talvegue dessa cavidade a cotas menos profundas.

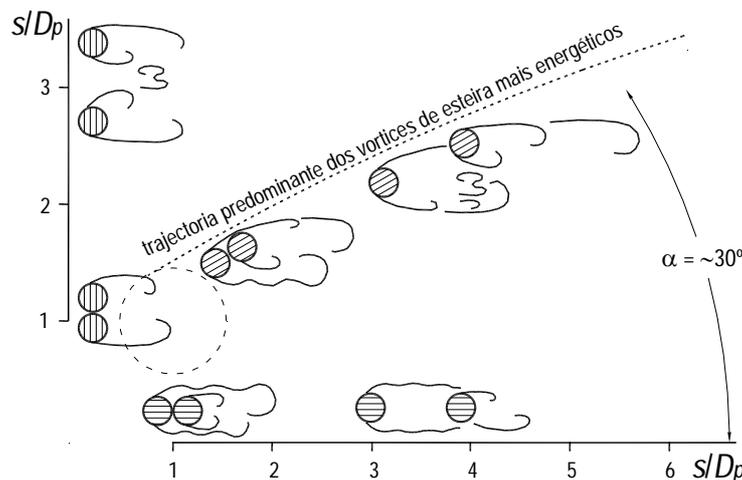


Figura 4 – Sistema de vórtices de esteira num alinhamento

ii) Para $\alpha = 15^\circ$, a evolução temporal da profundidade das cavidades de erosão é praticamente igual junto dos quatro pilares. Acima de tudo, contrariamente ao que seria de esperar e ao que decorre da literatura da especialidade, os valores de h_{seg}/h_{se1} são praticamente iguais aos que se obtêm para $\alpha = 0^\circ$. Esta conclusão é válida para $s/D_p = \{1; 2; 3\}$, carecendo de confirmação para $s/D_p = 6$.

iii) Na condição $s/D_p = 6$, a profundidade de erosão é pouco dependente do ângulo de enviesamento.

iv) Para $\alpha = \{30^\circ; 45^\circ; 90^\circ\}$, as cavidades são sucessivamente menos profundas à medida que s/D_p aumenta.

v) Excluindo o espaçamento $s/D_p = 1$, as maiores profundidades de erosão são obtidas para $\alpha = 30^\circ$, designadamente para $s/D_p = \{2; 3\}$. Exceptuando o pilar P1, os restantes pilares tendem a localizar-se na trajectória mais energética dos vórtices de esteira produzidos no pilar imediatamente a montante (ver Figura 4) pelo que a profundidade máxima das cavidades de erosão se observa junto dos pilares P3 ou P4, independentemente do espaçamento entre pilares.

vi) Quando $\alpha = 45^\circ$, a evolução temporal da profundidade das cavidades de erosão apresenta ligeiras oscilações, especialmente para os espaçamentos $s/D_p = \{2; 3\}$. Provavelmente, estas

oscilações devem-se a instabilidades da interacção dos braços dos vórtices em ferradura associados a um dado pilar com os vórtices de esteira mais energéticos provenientes do pilar de montante, segundo $\alpha \approx 30^\circ$. Esta explicação carece de comprovação experimental.

vii) Para $\alpha = 90^\circ$, a evolução temporal da profundidade das cavidades de erosão quase não varia de pilar para pilar; o talvegue tende a localizar-se junto dos pilares centrais, P2 e P3, aspecto que se acentua com a redução do espaçamento entre pilares. Pensa-se que, para espaçamentos relativamente reduzidos ($s/D_p < 3$), os vórtices de ferradura de cada pilar são comprimidos, por efeito da aceleração do escoamento nos espaços entre pilares, potenciando o aumento da profundidade das cavidades de erosão. Com o aumento do espaçamento entre pilares, este efeito de grupo desvanece-se e cada pilar tende a comportar-se como um pilar individual.

viii) Considerando o pilar equivalente definido na Figura 2, se i) se adoptar $K_r = 1$ (pelo facto de os respectivos topos serem arredondados) e ii) se considerarem os valores de K_α sugeridos por Richardson e Davis (2001) para a situação em apreço – $K_\alpha = \{2,0; 2,3 \text{ e } 2,5\}$ para $\alpha = \{30^\circ; 45^\circ \text{ e } 90^\circ\}$, respectivamente – obtêm-se profundidades de equilíbrio para o alinhamento de pilares definidos por $s/D_p = 1$ que diferem em menos de 10% das efectivamente medidas.

Parte das conclusões anteriores encontra reflexo na Figura 5 onde se apresenta a variação do coeficiente h_{seg}/h_{se1} com s/D_p e com α .

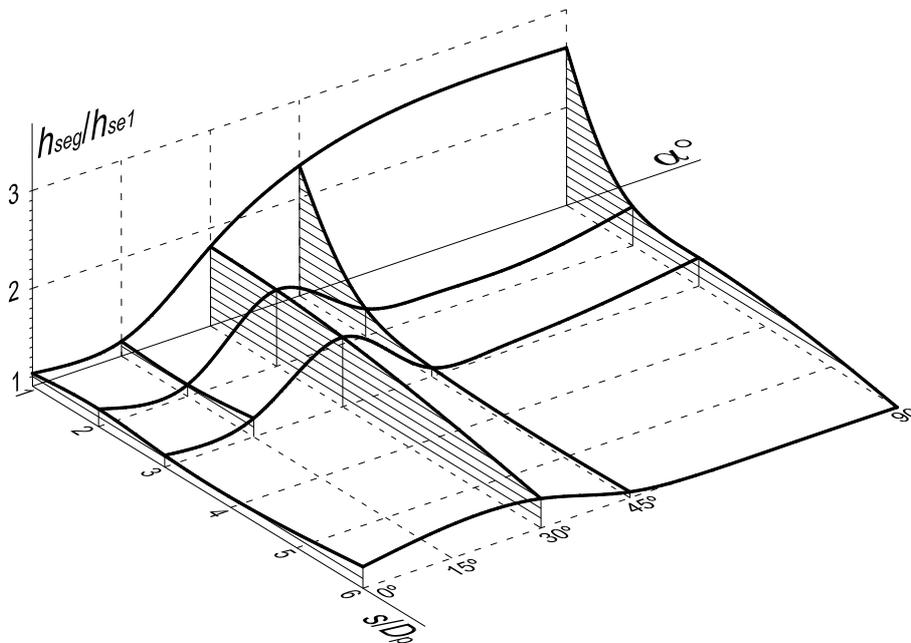


Figura 5 – Variação de h_{seg}/h_{se1} com s/D_p e com α

Importa finalmente reforçar e reter os seguintes resultados do presente estudo:

ix) para $\alpha = 30^\circ$, $h_{seg}/h_{se1} \approx 1,8$ no intervalo $1 \leq s/D_p \leq 3$; este coeficiente decresce ligeiramente com o aumento do espaçamento, até 1,3 para $s/D_p = 6$;

x) para $\alpha = 45^\circ$, $h_{seg}/h_{se1} \approx 2,4$ para $s/D_p = 1$ e o mesmo coeficiente decresce rapidamente com o aumento do espaçamento até 1,4 quando $s/D_p = 2$;

xi) para $\alpha = 90^\circ$, $h_{seg}/h_{se1} = 2,6$ quando $s/D_p = 1$; $h_{seg}/h_{se1} \approx 1,4$ para $s/D_p = \{2; 3\}$, $h_{seg}/h_{se1} \approx 1$ se $s/D_p = 6$.

Para os espaçamentos mais utilizados na prática da engenharia em alinhamentos de pilares, isto é, para $s/D_p > \approx 3$, observam-se aumentos da profundidade de erosão de $\{15\%; 15\%; 50\%; 10\%; 10\%\}$

para, respectivamente, $\alpha = \{0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ\}$ em relação à que seria observada num pilar cilíndrico isolado com diâmetro D_p .

Na Figura 6 comparam-se os valores de h_{seg}/h_{se1} medidos com os calculados de acordo com Richardson e Davis (2001) e com Sheppard e Renna (2010), respectivamente em a) e b); incluem-se bandas de 25% e de 40% de desvio em relação a previsões exactas. Pode constatar-se que um número importante de valores medidos é superior aos calculados. Em particular, no caso do critério de previsão de Richardson e Davis (2001), importa ter presente que algumas das medições excedem as previsões em cerca de 40%.

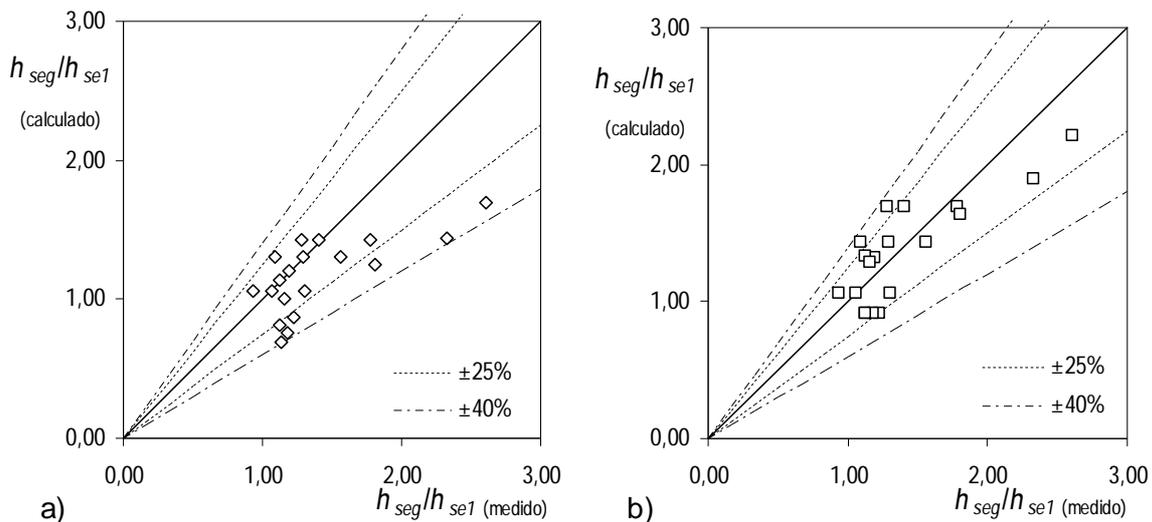


Figura 6 – Comparação de h_{seg}/h_{se1} medido com h_{seg}/h_{se1} calculado segundo a) Richardson e Davis (2001) e b) Sheppard e Renna (2010)

5 – CONCLUSÕES

Em face do exposto julga-se pertinente reter as seguintes conclusões mais importantes:

i) Para $\alpha = \{0^\circ; 15^\circ\}$, os valores de h_{seg}/h_{se1} são $h_{seg}/h_{se1} \approx 1,15$ e quase não variam com s/D_p . Em contrapartida, para $\alpha = \{30^\circ; 45^\circ; 90^\circ\}$, as cavidades de erosão são sucessivamente menos profundas à medida que s/D_p aumenta.

ii) Para $s/D_p = 6$, a profundidade de erosão é praticamente independente do ângulo de enviesamento, com excepção de $\alpha = 30^\circ$, em que $h_{seg}/h_{se1} \approx 1,30$, e de $\alpha = 90^\circ$, em que $h_{seg}/h_{se1} \approx 1,0$ (contra $h_{seg}/h_{se1} \approx 1,15$ nos restantes casos).

iii) Quando $s/D_p = 1$, os alinhamentos de pilares podem ser tratados como um pilar de secção rectangular e topos arredondados que envolva os pilares justapostos (ver Figura 2), desde que se adoptem adequados coeficientes de enviesamento, K_α .

iv) Excluindo o espaçamento $s/D_p = 1$, as maiores profundidades de erosão obtêm-se para $\alpha = 30^\circ$, designadamente para $s/D_p = \{2; 3\}$, sendo $h_{seg}/h_{se1} \approx 1,8$.

v) Existem métodos de cálculo da profundidade de erosão para alinhamentos de pilares que podem conduzir a previsões por defeito, com desvios que se podem cifrar até 40%.

AGRADECIMENTOS

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

BIBLIOGRAFIA

- AMINI, A.; MELVILLE, B.; ALI, T. M.; GHAZALI, A. H. – "Clearwater local scour around pile groups in shallow-water flow". *Journal of Hydraulic Engineering*, in press.
- ATAIE-ASHTIANI, B.; BEHASHTI, A. A. – "Experimental investigation of clear-water local scour at pile groups". *Journal of Hydraulic Engineering*, **132**, 10, 2006, pp. 1100 - 1104.
- BREUSERS, N. H. C.; RAUDKIVI, A. J. – *Scouring*. Rotherdam (The Netherlands), Balkema, 1991.
- FAEL, C.S. – *Erosões localizadas junto de encontros de pontes e respectivas medidas de protecção*. Covilhã (Portugal), Universidade da Beira Interior, 2007.
- HANNAH, C. R. - *Scour at pile groups*. Canterbury (New Zealand), University of Canterbury, 1978.
- LANÇA, R.; FAEL, C.; CARDOSO, A. H. – "Assessing equilibrium clear-water scour around single cylindrical piers", in *River Flow 2010 proceedings*, Braunschweig (Germany), 8 – 10 Set. 2010, pp. 1207-1213.
- MELVILLE, B. W.; COLEMAN, S. E. – *Bridge scour*, Colorado (EUA), Highlands Ranch Water Resources, 2000.
- RICHARDSON, E. V.; DAVIS, S. R. – *Evaluating scour at bridges*. Forth Colins (U.S.), Federal Highway Administration, 2001.
- SALIM, M.; JONES, J. S. – "Scour around exposed pile foundations", in *Proceedings of the American Society of Civil Engineers "North American Water and Environment Congress '96"*, Anaheim (U.S.), Jun. 1996.
- SHEPPARD, D. M.; ODEH, M.; GLASSER, T. - "Large scale Clearwater local pier scour experiments". *Journal of Hydraulic Engineering*, **130**(10), 2004, pp. 957 – 963.
- SHAPPARD, D. M.; RENNA, R. – *Florida Scour Manual*. Florida (U.S.), Florida Department of Transportation, 2010.
- SIMARRO, G.; FAEL, C.M.S.; CARDOSO, A. H. – "Estimating equilibrium scour depth at cylindrical piers in experimental studies". *Journal of Hydraulic Engineering*, **137**, 9, September 2011, pp. 1089 – 1093.
- ZHAO, G.; SHAPPARD, D. M. – "The effect of flow skew angle on sediment scour near pile groups", in *Stream Stability and Scour at Highway Bridges*, editado por Richardson E. V.; Lagasse, P. F., Reston (U.S.), ASCE, 1999, 1040 pp.