

EROSÕES LOCALIZADAS EM PONTES SUBMERSAS

Vânia C.J. Bastardo*¹, Rui M.M. Lança², Pedro G.F.L.B. de Almeida¹, Cristina M.S. Fael¹

¹Universidade da Beira Interior, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura (DECA) - Covilhã, Portugal

²Universidade do Algarve, Instituto Superior de Engenharia (UALG-ISE) - Faro, Portugal

³Universidade da Beira Interior, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura (DECA) - Covilhã, Portugal

⁴Universidade da Beira Interior, Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura (DECA) - Covilhã, Portugal

*Email: vcjbastardo@gmail.com

RESUMO: Nesta comunicação analisam-se os efeitos da submersão de uma ponte na profundidade máxima da cavidade de erosão junto de um pilar cilíndrico, para escoamentos sem transporte sólido generalizado. Comparam-se os resultados obtidos com equações publicadas na literatura, tendo-se concluído que a formulação proposta por MELVILLE & COLEMAN [2000] é a mais adequada, apresentando um desvio inferior a 10%.

1. INTRODUÇÃO

A relevância do tema das erosões localizadas encontra-se reflectida nos inúmeros estudos desenvolvidos nas últimas décadas, com o objectivo de caracterizar o processo erosivo e de quantificar a profundidade das cavidades de erosão. A maioria desses estudos está direccionada para erosões localizadas junto de pilares e encontros de pontes, para escoamentos com superfície livre. Poucas referências são feitas a estudos de erosões localizadas para escoamentos sob pressão, originadas pela submersão da ponte.

De acordo com UMBRELL [1998], quando a altura da superfície da água excede a cota da superfície inferior do tabuleiro da ponte, o escoamento entra em pressão. Nesta situação, a contracção vertical do escoamento agrava a magnitude das erosões localizadas. Situação que pode comprometer a estabilidade da estrutura, uma vez que esta passa a estar submetida a solicitações para as quais não foi dimensionada.

Actualmente, a submersão de pontes tem vindo a verificar-se com mais frequência em diversos países, pode cita-se o caso de Moçambique, que por se encontrar na zona de desembocadura dos grandes rios da zona austral de África, os quais provocam inundações na época chuvosa, constituindo uma ameaça para as populações e para o desenvolvimento do país [MATUSSE, 2009]. Como exemplo, refere-se o caso das cheias ocorridas em Fevereiro de 2000, em que o vale do rio Limpopo atingiu máximos históricos, tendo inundado entre outras localidades, a cidade de Xai-Xai e a ponte que aí o atravessa, como se pode observar na figura 1, onde (a) e (b) mostram a ponte antes e durante a cheia, respectivamente.

Esta comunicação centra-se, justamente, na análise da profundidade máxima da cavidade de erosão localizada junto de um pilar central de uma ponte, devido à submersão desta, considerando os efeitos do pilar e do tabuleiro separadamente, e o seu efeito de conjunto.

Os dados utilizados são resultados de ensaios realizados no Canal de Morfologia Fluvial existente no Laboratório de Hidráulica e Recursos Hídricos (LHRH) do Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura da Universidade da Beira Interior (UBI), para condições de movimento incipiente do material do fundo, isto é, situações em que a velocidade média do escoamento de aproximação, U , é igual à velocidade média crítica ou de início do movimento do material do fundo, U_c .



Figura 1 - Ponte sobre o rio Limpopo em Xai-Xai, Moçambique [http://www.travel-images.com/photo-mozambique33.html; Ministério da Administração Estatal, *Perfil do distrito de Xai-Xai Província de Gaza*, Moçambique, 2005]

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com MELVILLE & COLEMAN [2000] as cavidades de erosão originadas por uma ponte submersa podem ser consideradas como tendo duas componentes:

- Uma correspondente às erosões localizadas, que podem ser estimadas desprezando os efeitos da submersão da ponte;
- Outra correspondente à submersão da superestrutura, ou seja, correspondente aos efeitos de um escoamento sob pressão, que também pode ser denominada como sendo erosão devido à contração vertical do escoamento.

Da segunda componente, faz parte a situação de total submersão do tabuleiro, onde o escoamento ocorre tanto na parte inferior como na superior do tabuleiro da ponte, e a situação de submersão parcial, onde apenas parte do tabuleiro se encontra submerso. De acordo com UMBRELL [1998], pode considerar-se:

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 \quad (1)$$

onde Q_{total} é o caudal total, Q_1 é o caudal que passa por cima da ponte e Q_2 é o caudal que passa por baixo desta. Pela equação da continuidade, tem-se:

$$Uy_1B = UwB + U_c(H_b + y_s)B \quad (2)$$

onde y_1 é a altura do escoamento de aproximação não perturbado, B é a largura da secção transversal do leito na secção da ponte, sem pilar, w é a altura da água acima do tabuleiro da ponte, H_b é a altura entre o solo e a superfície inferior do tabuleiro da ponte, e y_s é a profundidade máxima da cavidade de erosão que se desenvolve junto ao pilar.

A equação anterior é equivalente a:

$$(H_b + y_s) = \frac{U}{U_c}(y_1 - w) \quad (3)$$

Dividindo a Equação (3) pela altura da água, vem:

$$\frac{(H_b + y_s)}{y_1} = \frac{U}{U_c} \left(1 - \frac{w}{y_1}\right) \quad (4)$$

UMBRELL [1998], na sequência do trabalho experimental realizado, propôs a seguinte equação:

$$\frac{(H_b + y_s)}{y_1} = 1,102 \left[\frac{U}{U_c} \left(1 - \frac{w}{y_1}\right) \right]^{0,603} \quad (5)$$

A Equação (5) é igualmente recomendada por MELVILLE & COLEMAN [2000]. A análise da equação permite constatar que a profundidade da cavidade de erosão é máxima quando $w = 0$, ou seja, quando a água se encontra ao nível da face superior do tabuleiro, para tal condição obtém-se:

$$\frac{(H_b + y_s)}{y_1} = 1,102 \left(\frac{U}{U_c} \right)^{0,603} \quad (6)$$

Para a situação em que se considera o efeito do tabuleiro submerso, a metodologia proposta por RICHARDSON & DAVIS [2001] para a determinação da profundidade máxima da cavidade de erosão, é:

$$\frac{y_s}{y_1} = -5,08 + 1,27 \left(\frac{y_1}{H_b} \right) + 4,44 \left(\frac{H_b}{y_1} \right) + 0,19 \left(\frac{U_a}{U_c} \right) \quad (7)$$

onde U_a é a velocidade média do escoamento na secção da ponte, antes do de se iniciar o processo erosivo.

Encontram-se na literatura diversas equações para avaliar a profundidade máxima das cavidades de erosão desenvolvidas junto de um pilar sujeito a um escoamento com superfície livre, merecendo particular destaque as contribuições de RICHARDSON & DAVIS [2001] e de MELVILLE & COLEMAN [2000].

RICHARDSON & DAVIS [2001] propõem, no HEC-18, a equação de CSU (Colorado State University),

$$\frac{y_s}{y_1} = 2,0 K_1 K_2 K_3 K_4 \left(\frac{a}{y_1} \right)^{0,65} Fr^{0,43} \quad (8)$$

onde K_1 , K_2 , K_3 , e K_4 são, respectivamente, factores de correcção para a forma do pilar, do alinhamento do pilar com o escoamento, das configurações do fundo e do efeito de encouraçamento do material do leito, a é a largura do pilar, Fr é o número de Froude do escoamento de aproximação ($Fr = U/\sqrt{gy_1}$) e g a aceleração da gravidade.

MELVILLE & COLEMAN [2000] propõem uma equação que não difere em muito da equação proposta por RICHARDSON & DAVIS [2001],

$$y_s = K_1 K_2 K_{yb} K_l K_d K_t \quad (9)$$

onde K_{yb} , K_b , K_d , e K_t são, respectivamente, factores que têm em conta a profundidade do escoamento, a intensidade do escoamento de aproximação, a granulometria do material do fundo e o tempo.

Para as situações em que ocorra a submersão do tabuleiro, RICHARDSON & DAVIS [2001] prevêm a soma algébrica dos efeitos do pilar e do tabuleiro na profundidade máxima da cavidade de erosão. Considerando, no entanto, que a estimativa da profundidade máxima da cavidade de erosão originada pelo pilar deve ser realizada para a altura de água corrigida, correspondente à altura da água mais a profundidade da cavidade de erosão provocada pelo tabuleiro submerso.

De acordo com ABED [1991], a profundidade máxima da cavidade de erosão em condições de escoamento sob pressão será 2,3-10 vezes maior que em condições de escoamento em superfície livre.

3. INSTALAÇÕES E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

O canal utilizado nos ensaios tem 28,00 m de comprimento, 4,00 m de largura e 1,00 m de altura. A estrutura do canal é essencialmente de betão armado, com excepção da parede lateral direita onde existem 10 painéis de vidro que permitem a observação do escoamento. No trecho central e a toda a largura do canal existe uma caixa paralelepipedica em escavação com 3,00 m de comprimento e 0,60 m de profundidade, de modo a permitir o desenvolvimento das cavidades de erosão.

Para a realização dos ensaios, o canal foi reduzido para 2,00 m de largura através da instalação de painéis amovíveis de aço inox e a caixa paralelepipedica foi preenchida com areia de quartzo ($\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$; $D_{50} \approx 0,86 \text{ mm}$; $\sigma_D \approx 1,46$). Onde, ρ_s é a massa volúmica; D_{50} é o diâmetro mediano do material do fundo; σ_D é o coeficiente de graduação da curva granulométrica. O pilar cilíndrico foi simulado com um tubo de PVC com 75 mm de diâmetro e o tabuleiro com um caibro de madeira com 75mm x 10mm, colocados a 1,0 m do início da caixa de areia, perpendicularmente à direcção do escoamento. Os ensaios decorreram para valores constantes da altura de escoamento, $y_l = 0,30 \text{ m}$, e de velocidades do escoamentos de aproximação, $U = 0,35 \text{ m/s}$.

O escoamento é estabelecido a partir do tanque de abastecimento, com 100 m^3 de capacidade. O circuito hidráulico é constituído pelo circuito de alimentação propriamente dito e por um circuito de enchimento do canal através do seu fundo. A função deste é permitir o enchimento lento e uniforme do canal, através de três saídas existentes no fundo do canal, com um caudal total de 5 l/s, evitando deste modo a ocorrência de fenómenos não controlados de erosão no início dos ensaios, que de outro modo ocorreriam se o canal fosse cheio com o circuito principal.

Na extremidade de jusante das tubagens do circuito de alimentação, à entrada no canal, existe um tubo difusor que tem como função distribuir uniformemente o caudal a toda a largura do canal. O circuito hidráulico pode movimentar caudais que variam entre 0 e 270 l/s.

Na extremidade de jusante do canal existe uma comporta pendular que possibilita a regulação dos níveis de água no canal, sendo accionada manualmente por meio de um guincho com cabo e roldana.

O canal encontra-se ainda equipado com um passadiço rolante apoiado em dois carris existente no topo das respectivas paredes laterais. O passadiço desloca-se ao longo do canal com o auxílio de um motor e com uma velocidade que pode variar entre 0 e 30 m/min. Permite realizar operações de arrasto e alisamento do fundo móvel com uma inclinação pré-definida e segundo uma faixa de largura variável até à largura total do canal. Pode, também, servir de suporte a equipamento de medição.

A medição da profundidade das cavidades de erosão foi realizada com um hidrómetro de ponta direita adaptado para o efeito. A visualização do interior do escoamento junto ao obstáculo era facilitada por um óculo que mergulhava ligeiramente a superfície livre. No final de cada ensaio, procedeu-se ao levantamento topográfico das cavidades de erosão recorrendo a um teodolito Leica TCR 307. O tratamento dos levantamentos topográficos foi realizado através do programa informático Aneba Cartomap.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na Tabela 1 apresentam-se os valores das principais variáveis características dos ensaios. A tabela inclui, além dos valores de H_b , e , y_l , e U , o diâmetro do pilar, D_p , a duração dos ensaios, T_d , e a máxima profundidade da cavidade de erosão, y_s . Os ensaios são identificados pelas iniciais dos respectivos elementos ensaiados: P para o pilar, T para o tabuleiro e T+P para o pilar mais o tabuleiro.

Tabela 1. Valores das variáveis características dos ensaios realizados no âmbito do presente estudo

Ensaio	H_b [m]	e [m]	D_p [m]	y_l [m]	U [m/s]	T_d [h]	y_s [m]
T	0,2	0,10	---	0,30	0,33	150,70	0,183
P	---	---	0,075	0,30	0,33	150,30	0,155
T+P	0,2	0,10	0,075	0,30	0,33	164,72	0,339

Os resultados obtidos experimentalmente estão em concordância com as conclusões apresentadas por ABED [1991]. Segundo o autor, a profundidade máxima da cavidade de erosão em condições de escoamento sob pressão será 2,3 a 10 vezes maior que em condições de escoamento em superfície livre. No presente estudo é de 2,2%.

Na Figura 2 apresenta-se a evolução temporal da profundidade máxima das cavidades de erosão para os três casos em estudo. Como se pode observar, a evolução temporal nos casos em estudo apresentam um comportamento análogo. O equilíbrio entre a capacidade erosiva e a resistência da areia ao movimento é progressivamente atingido à medida que a erosão se desenvolve.

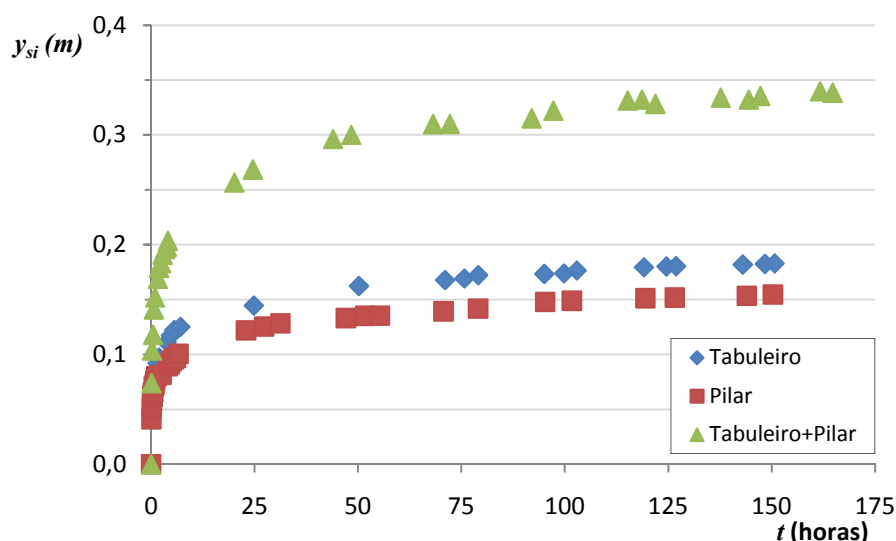


Figura 2 - Evolução temporal nos diferentes casos em estudo.

Na Figuras 3 apresenta-se um desenho esquemático do levantamento topográfico da cavidade de erosão obtida para o ensaio com o pilar mais o tabuleiro. Na Figura 4 apresentam-se os perfis longitudinais das cavidades de erosão para os três ensaios realizados.

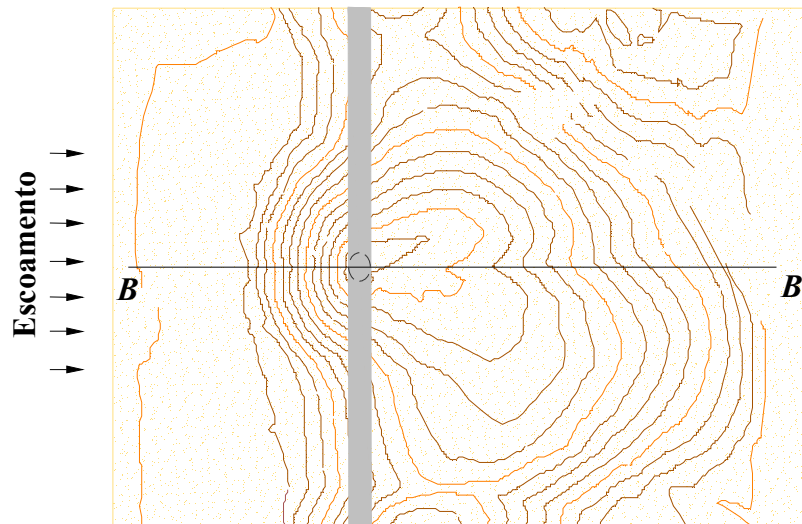


Figura 3 – Caracterização esquemática da cavidade de erosão para o ensaio T+P

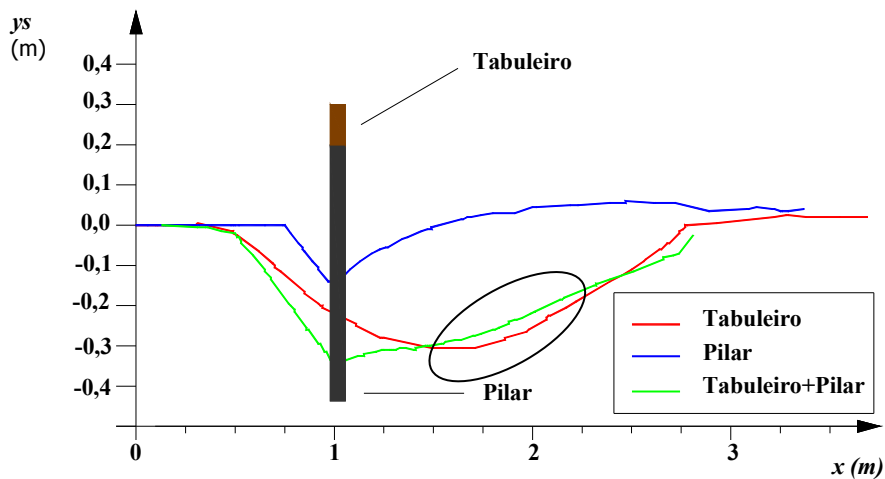


Figura 4 – Perfis longitudinais das cavidades de erosão

A análise dos perfis longitudinais das cavidades de erosão permite verificar que: a profundidade máxima da cavidade de erosão ocorre a montante do pilar, sendo o seu valor condicionado pela submersão do tabuleiro; a dimensão máxima em planta é condicionada exclusivamente pelo tabuleiro; o declive do talude da cavidade de erosão a montante do pilar é condicionado pelo pilar, apresentando o mesmo valor quer para o ensaio com o pilar quer para o ensaio com o tabuleiro mais o pilar.

Na secção assinalada, salienta-se o facto de a profundidade da cavidade de erosão obtida no ensaio só com o tabuleiro ser superior à obtida no ensaio com o tabuleiro mais o pilar. Esta situação pode ser justificada pelo facto de no ensaio só com o pilar ocorrer uma deposição de material e elevação do fundo no local onde ocorre a máxima profundidade de erosão no ensaio só como tabuleiro.

Na Tabela 2 apresentam-se os resultados obtidos da aplicação dos métodos propostos por MELVILLE & COLEMAN [2000] e RICHARDSON & DAVIS [2001] na previsão da profundidade máxima da cavidade de erosão.

Tabela 2. Resultados da aplicação dos métodos de previsão de y_s

Ensaio	Fr	U_a	$K_1;K_2;$ $K_4;K_I;$ K_d	K_t	K_3	K_{yb}	$\frac{H_b + y_s}{H_b + c}$	y_s [m]	
								Richardson & Davis [2001]	Melville & Coleman [2000]
	(-)	(m/s)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)		
T	0,192	0,495					0,128	0,132	0,174
P	0,192		1,0	0,965	1,1	0,18		0,021	0,131
T+P	0,192							0,153	0,305

Na Tabela 3 apresentam-se os desvios percentuais, δ , dos valores de y_s obtidos pelos métodos de MELVILLE & COLEMAN [2000] e RICHARDSON & DAVIS [2001] em relação aos valores obtidos experimentalmente.

Tabela 3. Desvios percentuais dos valores de y_{smax} obtidos pelos diferentes métodos

Ensaio	y_s [m]			δ [%]	
	Exp.	Richardson & Davis [2001]	Melville e Coleman [2001]	Richardson & Davis [2001]	Melville e Coleman [2001]
T	0,183	0,132	0,174	27,87	4,91
P	0,155	0,021	0,131	86,45	15,48
T+P	0,339	0,153	0,305	54,86	10,03

Da Tabela 3 é possível concluir que o método proposto por MELVILLE & COLEMAN [2000] é o que fornece resultados mais adequados, uma vez que apresenta um desvio máximo de $\approx 10\%$.

4. CONCLUSÕES

Do presente estudo podemos tirar as seguintes conclusões:

No ensaio realizado, a profundidade máxima da cavidade de erosão devido à submersão do tabuleiro, rapidamente se mostra na sua posição de equilíbrio que se encontra próximo da secção imediatamente a jusante do tabuleiro. Esta, é consideravelmente maior que a cavidade originada apenas pela presença do pilar. É ainda de salientar que nas secções onde a profundidade da cavidade é máxima são coincidentes nos ensaios só com o pilar e com o pilar mais tabuleiro, uma vez que a secção de máxima profundidade para o caso do pilar é imediatamente a montante deste.

A metodologia de cálculo da cavidade de erosão sugerida por RICHARDSON & DAVIS [2001], no HEC-18, em que, no cálculo da cavidade provocada pelo pilar, a altura da água corresponde à altura do escoamento antes do início do processo erosivo mais a profundidade da cavidade de erosão provocada apenas pelo efeito do tabuleiro, não corresponde à realidade, pois os efeitos do pilar e do tabuleiro combinados, fazem-se sentir ao mesmo tempo. Pela análise dos dados obtidos nos ensaios, constata-se que a

soma das cavidades de erosão obtidas a partir do pilar e do tabuleiro em separado apresentam um valor muito próximo do obtido no ensaio em que temos a combinação dos dois elementos da ponte. Pelo que é verificada a linearidade da soma dos efeitos.

Através da observação dos perfis longitudinais, pode-se afirmar que os taludes da cavidade de erosão são controlados pelos vórtices originados pela presença do pilar, ou seja, os taludes são dependentes da presença do pilar, uma vez que estes apresentam igual declive nos ensaios em que o pilar está presente, sem influência da presença do tabuleiro da ponte.

Estas considerações são válidas para os ensaios realizados, não cobrindo a situação em que a cavidade de erosão só com o pilar e só com o tabuleiro ocorrem na mesma secção, ou quando a cavidade de erosão causada pela interação entre o escoamento e o tabuleiro se desloca para montante do pilar. Para isto se verificar, será necessário realizar mais ensaios com valores inferiores para a altura livre sob o tabuleiro. Só deste modo será possível descrever e compreender as complexas interações existentes na sobreposição de efeitos.

REFERENCES

Abed, L. M., Local scour around bridge piers in pressure flow, PhD dissertation, Colorado State Univ., Fort Collins, Colo, 1991. *in Umbrell 1998*

Matusse, R. M. et al., *Defencil - V Seminário Internacional de Defesa Civil*, São Paulo, 2009.

Melville, B. W.; Coleman, S.E., *Bridge Scour*, Water Resources Publications, LLC, Colorado, 2000.

Ministério da Administração Estatal, *Perfil do distrito de Xai-Xai Província de Gaza*, Moçambique, 2005.

Umbrell, E.R. et al. *Clear water Contractions Scour Under Bridges in Pressure Flow*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 124, N° 2, 1998.

Richardson, E. V.; Davis, S. R., *Evaluating Scour at Bridges*; Rep. N° FHWA NHI 01-001 (HEC-18), 4th Ed. U.S. Dept of Transp, Washington DC, 2001.