

ESTUDO EXPERIMENTAL SOBRE EROSÕES LOCALIZADAS JUNTO DE ESPORÕES FLUVIAIS

Lúcia T. COUTO⁽¹⁾; Gabriela S. ACABADO⁽²⁾; António H. CARDOSO⁽³⁾

RESUMO

Iniciou-se recentemente, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), um estudo experimental sobre erosões localizadas junto de esporões fluviais em canais de fundo móvel. O principal objectivo desta comunicação consiste na apresentação de resultados já obtidos e na sua discussão à luz de literatura existente. Realizaram-se duas séries de ensaios em regime uniforme, caracterizadas por duas areias diferentes como material de fundo, para situações com e sem transporte sólido generalizado. Obtiveram-se, por análise de regressão múltipla, equações para a previsão da profundidade máxima das cavidades de erosão. A comunicação apresenta ainda a caracterização das cavidades de erosão, estabelecendo uma relação entre a extensão em largura e a altura do escoamento e evidenciando que o volume escavado é função da profundidade máxima atingida no processo.

Palavras-chave: erosões localizadas; esporões fluviais.

(1) – *Engenheira Civil; Assistente de Investigação do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.*

(2) – *Engenheira Civil; Técnica Superior Principal do Instituto da Água, Lisboa, Portugal.*

(3) – *Engenheiro Civil; Doutor em Engenharia Civil; Professor Auxiliar do Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.*

1 – INTRODUÇÃO

Os esporões fluviais estão entre as obras de regularização fluvial genericamente consideradas ambientalmente aceitáveis. Por isso, os respectivos critérios de dimensionamento voltaram, recentemente, a ser um tópico de interesse e de investigação. Além disso, têm vindo a ser objecto de novos estudos analíticos e experimentais os mecanismos associados às erosões localizadas provocadas por esporões construídos em leitos aluvionares. Neste contexto, iniciou-se recentemente, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa, um estudo experimental sobre o assunto, beneficiando da existência de um canal expressamente construído para o efeito nos anos sessenta.

O primeiro objectivo desta comunicação é a apresentação de alguns resultados do estudo, discutidos à luz da literatura existente no que se refere à previsão da profundidade máxima das cavidades de erosão. O segundo objectivo, induzido pela necessidade prática de, para dimensionar esporões, se preverem áreas ou mesmo volumes erodidos, é a caracterização da extensão planimétrica das referidas cavidades.

2 – INSTALAÇÃO E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O canal utilizado nos ensaios tem 18 m de comprimento (sendo o comprimento útil igual a 10 m), 2 m de largura e 0,6 m de profundidade. A montante existe um tanque de nível constante que dá acesso a um descarregador Bazin utilizado para medir o caudal líquido, disponível até um valor máximo de $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$. Deve salientar-se que, na zona central do trecho útil do canal e em toda a sua largura, existe uma caixa paralelepípedica rebaixada 0,4 m em relação ao fundo do canal, viabilizando assim o desenvolvimento de erosões localizadas mais profundas do que a espessura do fundo móvel colocado fora da caixa (0,15 m neste estudo).

O declive inicial do fundo móvel é ajustável ao valor pré-estabelecido para cada ensaio, com o auxílio de um carro de instrumentos. Existe uma tremonha de alimentação em material sólido sobre a entrada do trecho útil que pode ser manobrada de forma a fornecer caudais sólidos pré-determinados. A profundidade do escoamento é regulada por uma comporta de segmento instalada na secção de jusante do canal.

O equipamento de medição inclui um limnómetro electrónico (medição de níveis da superfície livre) e um seguidor de fundos, instalados no carro de instrumentos que se desloca ao longo do canal. Os níveis da superfície livre podem também ser medidos por dois hidrómetros de ponta direita montados em dois poços laterais existentes numa parede do canal, perto das secções de montante e de jusante. O seguidor de fundos pode deslocar-se na direcção transversal, cobre praticamente toda a largura do canal e permite levantar a topografia do fundo. Estes dois instrumentos electrónicos estão integrados num sistema automático de aquisição de dados.

O esporão utilizado no estudo tem a forma representada na Figura 1, sendo igual a um dos obstáculos utilizados por VEIGA DA CUNHA 1973; foi colocado perpendicularmente ao escoamento, dentro da caixa paralelepípedica acima referida, 5 m a jusante da secção de entrada da zona útil do canal.

De acordo com o procedimento experimental adoptado neste estudo, o caudal, Q , e a altura do escoamento, h_0 , são definidos para cada ensaio. Tendo em vista o estabelecimento do regime uniforme, estimam-se os correspondentes valores do declive do fundo, i_b , e do caudal

sólido de equilíbrio, Q_s , recorrendo, respectivamente, ao critério de resistência ao escoamento de BROWNLIE 1983 e à fórmula de transporte sólido de KARIM e KENNEDY 1990, que mostraram, em estudos anteriores, conduzir a bons resultados.

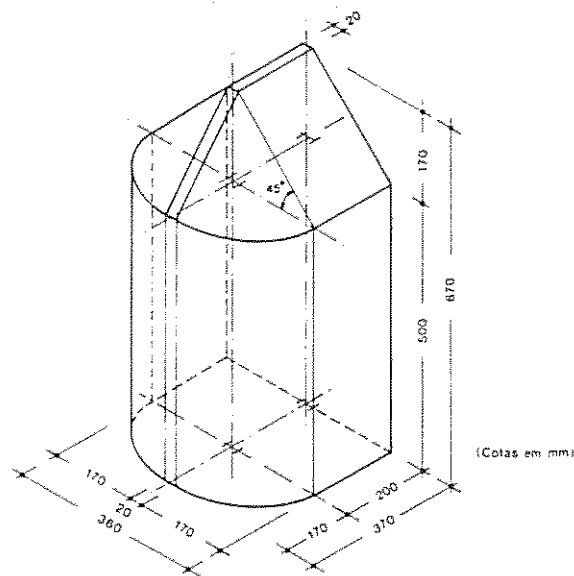


Fig. 1 – Forma do esporão utilizado no estudo

Antes de se iniciar um dado ensaio, o fundo é alisado com o declive pré-determinado. Seguidamente, dá-se início ao escoamento do correspondente caudal, Q , e regula-se a comporta de jusante de modo a garantir um valor de h_0 próximo do escolhido *a priori*. Deixa-se o escoamento ajustar livremente o declive do fundo e a altura do escoamento. As respostas do fundo e da superfície livre são, então, observadas e registadas. Sempre que necessário, actua-se, simultaneamente, sobre a tremonha de alimentação de caudal sólido e sobre a comporta de jusante até que os declives do fundo e da superfície livre se possam considerar razoavelmente aproximados, ou seja, até que o escoamento seja praticamente uniforme; o declive do fundo é estimado por regressão aplicada às cotas médias das secções levantadas pelo seguidor de fundos e o da superfície livre obtém-se a partir das medições do limnómetro. Segue-se então a evolução temporal da profundidade máxima da cavidade de erosão até que essa evolução seja desprezável ou se verifique uma oscilação em torno do valor de equilíbrio. Suspende-se o escoamento e termina-se o ensaio procedendo ao levantamento de 29 perfis transversais do fundo na zona da erosão localizada de modo a permitir uma boa representação da sua topografia final.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizaram-se duas séries de ensaios caracterizadas por materiais de fundo (areias) diferentes: série A1, em que o diâmetro mediano é $D_{50} = 0,37$ mm e o coeficiente de gradação é $\sigma_g = 1,58$; série A2, em que $D_{50} = 0,96$ mm e $\sigma_g = 1,29$.

Na Tabela 1, apresentam-se os valores finais, de equilíbrio, das variáveis e parâmetros mais relevantes para cada ensaio. A tabela inclui, para o escoamento não perturbado (fora da

zona em que há influência do esporão e da erosão localizada), os valores da altura média do escoamento, h_0 , do caudal líquido, Q , do correspondente raio hidráulico, R , da velocidade média do escoamento, U_0 , do declive médio do fundo, i_b , do declive da superfície livre, i_s , e do caudal sólido de alimentação, Q_s .

Tabela 1 – Valores de equilíbrio das variáveis e parâmetros mais relevantes dos ensaios

| Ensaio | h_0 (m) | Q $\times 10^3$ (m^3/s) | R (m) | U_0 (m/s) | i_b $\times 10^3$ | i_s $\times 10^3$ | Q_s $\times 10^6$ (m^3/s) | F_r | J $\times 10^3$ | R_e $\times 10^3$ | Z | U_0/U_c |
|--------|--------------|-------------------------------------|------------|----------------|------------------------|------------------------|---------------------------------------|-------|----------------------|------------------------|-----|-----------|
| A1.01 | 0,040 | 18,4 | 0,039 | 0,23 | 1,12 | 2,64 | 0,500 | 0,37 | 2,43 | 35 | 109 | 0,99 |
| A1.02 | 0,043 | 24,0 | 0,041 | 0,28 | 2,22 | 2,23 | 2,400 | 0,45 | 2,23 | 47 | 115 | 1,22 |
| A1.03 | 0,049 | 29,6 | 0,047 | 0,30 | 2,30 | 2,60 | 5,306 | 0,45 | 2,54 | 51 | 132 | 1,28 |
| A1.04 | 0,056 | 27,6 | 0,053 | 0,25 | 2,18 | 2,20 | 0,900 | 0,34 | 2,20 | 52 | 151 | 1,03 |
| A1.05 | 0,065 | 36,0 | 0,061 | 0,28 | 1,51 | 2,03 | 2,500 | 0,36 | 1,96 | 68 | 176 | 1,13 |
| A1.06 | 0,070 | 44,0 | 0,065 | 0,32 | 2,50 | 2,10 | (*) | 0,40 | 2,16 | 80 | 189 | 1,28 |
| A1.07 | 0,085 | 41,4 | 0,079 | 0,24 | 0,77 | 1,47 | 0,439 | 0,28 | 1,42 | 73 | 231 | 0,96 |
| A1.08 | 0,092 | 54,0 | 0,084 | 0,29 | 1,13 | 1,88 | 2,906 | 0,32 | 1,80 | 100 | 249 | 1,14 |
| A1.09 | 0,100 | 66,6 | 0,091 | 0,33 | 2,00 | 1,86 | (*) | 0,35 | 1,88 | 118 | 270 | 1,29 |
| A1.10 | 0,112 | 55,2 | 0,101 | 0,25 | 1,53 | 1,29 | (*) | 0,25 | 1,30 | 93 | 303 | 0,94 |
| A1.11 | 0,112 | 72,0 | 0,101 | 0,32 | 1,22 | 1,20 | 4,117 | 0,32 | 1,20 | 129 | 303 | 1,22 |
| A1.12 | 0,124 | 88,8 | 0,111 | 0,36 | 1,40 | 1,57 | 7,069 | 0,34 | 1,55 | 154 | 336 | 1,34 |
| A2.01 | 0,036 | 18,4 | 0,035 | 0,26 | 1,80 | 0,78 | 0,000 | 0,44 | 0,98 | 35 | 37 | 0,80 |
| A2.02 | 0,040 | 24,0 | 0,039 | 0,30 | 1,91 | 1,40 | 0,750 | 0,48 | 1,52 | 46 | 42 | 0,91 |
| A2.03 | 0,046 | 29,6 | 0,044 | 0,33 | 2,00 | 1,40 | 1,278 | 0,50 | 1,55 | 56 | 47 | 0,98 |
| A2.13 | 0,043 | 35,2 | 0,042 | 0,41 | 2,24 | 2,80 | 6,722 | 0,64 | 2,57 | 67 | 45 | 1,24 |
| A2.04 | 0,059 | 27,6 | 0,056 | 0,23 | 0,95 | 0,59 | 0,000 | 0,32 | 0,63 | 51 | 61 | 0,68 |
| A2.05 | 0,057 | 36,0 | 0,054 | 0,32 | 1,08 | 1,08 | 0,000 | 0,43 | 1,08 | 67 | 59 | 0,93 |
| A2.06 | 0,063 | 44,4 | 0,060 | 0,35 | 1,73 | 1,17 | 0,889 | 0,46 | 1,29 | 83 | 66 | 1,01 |
| A2.14 | 0,069 | 52,8 | 0,064 | 0,38 | 2,30 | 2,14 | 3,333 | 0,48 | 2,18 | 98 | 72 | 1,10 |
| A2.07 | 0,090 | 41,4 | 0,083 | 0,23 | 0,61 | 0,61 | 0,000 | 0,26 | 0,61 | 75 | 94 | 0,63 |
| A2.08 | 0,093 | 54,0 | 0,085 | 0,29 | 1,67 | 1,07 | 0,333 | 0,32 | 1,13 | 98 | 97 | 0,80 |
| A2.09 | 0,088 | 66,6 | 0,081 | 0,38 | 1,18 | 0,90 | 1,000 | 0,42 | 0,95 | 121 | 92 | 1,04 |
| A2.15 | 0,089 | 79,2 | 0,081 | 0,45 | 1,70 | 1,50 | 6,056 | 0,50 | 1,55 | 144 | 92 | 1,23 |
| A2.10 | 0,119 | 55,2 | 0,106 | 0,23 | 0,61 | 0,61 | 0,000 | 0,23 | 0,61 | 97 | 124 | 0,61 |
| A2.11 | 0,120 | 72,0 | 0,107 | 0,30 | 1,10 | 0,33 | 0,000 | 0,29 | 0,40 | 127 | 125 | 0,80 |
| A2.12 | 0,115 | 88,8 | 0,103 | 0,39 | 1,15 | 1,15 | 1,111 | 0,38 | 1,15 | 158 | 120 | 1,03 |
| A2.16 | 0,114 | 105,6 | 0,102 | 0,46 | 1,90 | 1,90 | 6,056 | 0,46 | 1,90 | 187 | 119 | 1,23 |

(*) – Valor não medido

O número de Froude, $F_r = U_0 / \sqrt{gR}$, cobre valores entre 0,23 e 0,64, isto é, situações de escoamento lento, em regime inferior. O declive da linha de energia J , calcula-se em função dos declives do fundo e da superfície livre pela equação $J = F_r^2 i_b + (1 - F_r^2) i_s$.

A partir da Tabela 1, pode verificar-se que, com poucas exceções, os valores de J e de i_b são razoavelmente semelhantes, o que significa que o regime uniforme é satisfatoriamente atingido. O número de Reynolds, $R_e = 4 RU_0/v$, varia entre $0,35 \times 10^5$ e $1,87 \times 10^5$, ou seja, o escoamento é turbulento. Para o cálculo de R_e , v foi avaliado em função da temperatura da água,

que oscilou entre 10,6 °C e 20,5 °C durante o estudo. A submersão relativa, $Z = h_0/D_{50}$, varia entre cerca de 37 e 336.

Na última coluna da Tabela 1 figura um parâmetro de medida da intensidade do escoamento, U_0/U_c (*flow intensity parameter*, segundo MELVILLE 1992), onde U_c é a velocidade média correspondente ao início de arrastamento do material sólido do fundo, ou seja, a velocidade média crítica. Esta variável foi calculada para cada ensaio em função de h_0 e das características do material sólido do fundo (D_{50} e γ_s) seguindo as formulações de Goncharov, de Neill e de Garde (ver GARDE e RAJU 1985, p. 58).

Os valores das variáveis mais relevantes para a caracterização da cavidade de erosão, nomeadamente a sua largura máxima, L_s , a área, A_s , o volume escavado, V_s , e a profundidade máxima de erosão, h_s , são dadas na Tabela 2 para as séries A1 e A2. A duração de cada ensaio, t_f , e o comprimento do obstáculo, L , estão também incluídos nas tabelas. As referidas variáveis foram obtidas a partir da representação da topografia da cavidade por linhas de nível traçadas com 1 cm de intervalo. Considerou-se o comprimento do obstáculo referente ao plano horizontal localizado a meia altura entre a cota do fundo inicial e a da superfície livre, de acordo com a sugestão de MELVILLE 1992.

Tabela 2 – Variáveis mais relevantes para a caracterização das cavidades de erosão

| Ensaio | t_f (h) | L (m) | L_s (m) | A_s (m ²) | V_s $\times 10^2$ (m ³) | h_s (m) |
|--------|--------------|----------|--------------|----------------------------|---|--------------|
| A1.01 | 14,00 | 0,350 | 0,23 | 0,79 | 0,76 | 0,085 |
| A1.02 | 14,00 | 0,349 | 0,38 | 0,85 | 1,31 | 0,121 |
| A1.03 | 12,50 | 0,346 | 0,20 | 1,00 | 1,52 | 0,139 |
| A1.04 | 26,00 | 0,342 | 0,38 | 1,17 | 1,88 | 0,130 |
| A1.05 | 3,00 | 0,337 | 0,33 | 1,34 | 2,96 | 0,155 |
| A1.06 | 2,33 | 0,335 | 0,35 | 1,08 | 2,37 | 0,144 |
| A1.07 | 19,00 | 0,327 | 0,33 | 0,75 | 2,33 | 0,158 |
| A1.08 | 5,83 | 0,324 | 0,38 | 1,27 | 3,73 | 0,176 |
| A1.09 | 2,00 | 0,320 | 0,33 | 1,02 | 3,21 | 0,166 |
| A1.10 | 21,00 | 0,314 | 0,38 | 0,93 | 3,55 | 0,182 |
| A1.11 | 5,50 | 0,314 | 0,38 | 1,29 | 4,69 | 0,191 |
| A1.12 | 5,00 | 0,308 | 0,41 | 1,06 | 4,71 | 0,214 |
| A2.01 | 19,00 | 0,352 | 0,16 | 0,13 | 0,25 | 0,072 |
| A2.02 | 5,67 | 0,350 | 0,33 | 0,33 | 1,12 | 0,145 |
| A2.03 | 4,75 | 0,347 | 0,30 | 0,43 | 1,47 | 0,155 |
| A2.04 | 41,00 | 0,341 | 0,20 | 0,23 | 0,71 | 0,109 |
| A2.05 | 56,00 | 0,342 | 0,36 | 1,23 | 5,42 | 0,229 |
| A2.06 | 3,83 | 0,338 | 0,36 | 0,68 | 2,66 | 0,170 |
| A2.07 | 40,50 | 0,325 | 0,30 | 1,02 | 4,16 | 0,140 |
| A2.08 | 26,33 | 0,324 | 0,43 | 1,33 | 6,84 | 0,243 |
| A2.09 | 5,00 | 0,326 | 0,38 | 1,25 | 4,99 | 0,203 |
| A2.10 | 34,25 | 0,310 | 0,32 | 0,40 | 1,90 | 0,153 |
| A2.11 | 17,50 | 0,310 | 0,43 | 1,03 | 5,83 | 0,213 |
| A2.12 | 11,08 | 0,313 | 0,48 | 1,33 | 7,77 | 0,237 |
| A2.13 | 6,58 | 0,348 | 0,33 | 1,85 | 1,08 | 0,156 |
| A2.14 | 3,50 | 0,336 | 0,33 | 1,52 | 2,80 | 0,165 |
| A2.15 | 7,25 | 0,326 | 0,40 | 1,63 | 5,78 | 0,228 |
| A2.16 | 6,83 | 0,313 | 0,46 | 1,22 | 7,71 | 0,246 |

A duração de cada ensaio varia entre 2 e 56 horas. São claramente mais demorados os ensaios sem transporte sólido generalizado ou em que este é incipiente.

A profundidade máxima de erosão, h_s , adimensionalizada por recurso à altura média do escoamento não perturbado, h_0 , e dividida pelo coeficiente de forma, K_s , está representado na Figura 2 em função de L/h_0 . Nesta figura, os dados estão separados em três grupos. Os dados dos ensaios em que $U_0/U_c \leq 0,9$ (ensaios, nitidamente, *sem transporte sólido*⁽⁴⁾) foram incluídos no primeiro gráfico; os ensaios em que $0,9 \leq U_0/U_c \leq 1,15$ foram escolhidos para representação da *situação de transição*⁽⁵⁾ próxima do início do movimento e estão representados no segundo gráfico; os ensaios em que $U_0/U_c \geq 1,15$ (ensaios, nitidamente, *com transporte sólido*⁽⁶⁾) estão representados no terceiro gráfico.

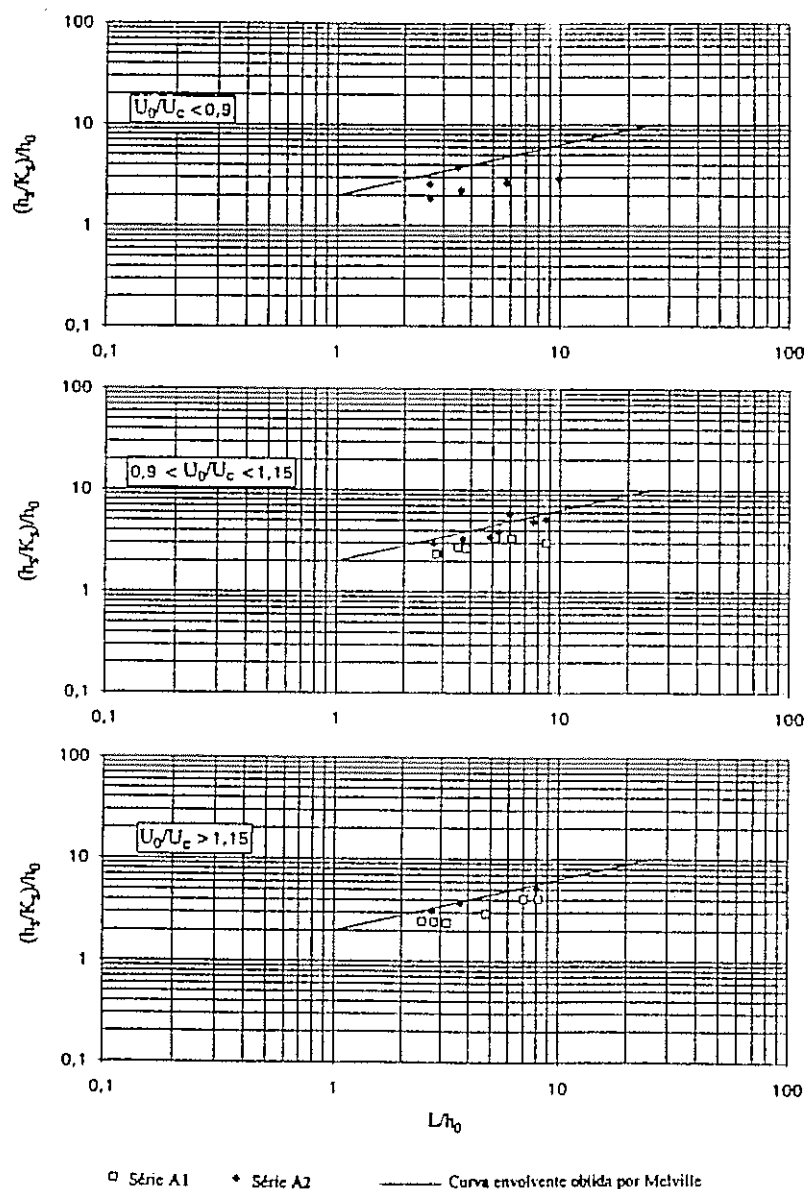


Fig. 2 – Profundidade máxima das cavidades de erosão nas coordenadas propostas por MELVILLE 1992

(4): (5): (6) – Respectivamente, "clear-water", "threshold condition" e "live-bed" na literatura Inglesa.

Os valores da profundidade das cavidades de erosão foram, como se referiu, divididos pelo coeficiente de forma, K_s , para remover o efeito de forma do esporão e tornar os resultados comparáveis com os obtidos para um obstáculo em parede delgada vertical, seguindo a sugestão de MELVILLE 1992. Escolheu-se um valor de $K_s = 0,7$, de modo a que a curva envolvente obtida por aquele autor para as condições de movimento incipiente também fosse curva envolvente dos dados obtidos, neste estudo, para a *situação de transição*. Este valor de K_s está entre os recomendados para esporões de cabeça semi-circular ($K_s = 0,75$) e para esporões com declive das respectivas espaldas de 1:1 ($K_s = 0,5$). O valor $K_s = 0,7$ está mais próximo do de cabeças semi-circulares porque, neste estudo, o esporão tem uma parede vertical abaixo do nível do fundo inicial (cf. Figura 1) que vai ficando exposta à medida que a erosão prossegue.

De acordo com a literatura existente (e.g. MELVILLE 1992), a situação de transição conduz aos maiores valores de h_s/h_0 ; para ensaios *sem transporte sólido*, os valores correspondentes são consideravelmente menores. Este resultado pode ser confirmado no primeiro gráfico da Figura 2, onde se observam, relativamente aos do segundo, menores valores h_s/h_0 .

Autores como BREUSERS e RAUDKIVI 1991, p. 76, ou MELVILLE 1992, constataram que, especialmente em estudos experimentais sobre erosões localizadas junto a pilares de pontes, em ensaios *com transporte sólido*, a profundidade de erosão tende a decrescer para $U_0/U_c > 1$, voltando a aumentar para $U_0/U_c \geq 3,5$ até um valor próximo do valor correspondente ao de transição. A partir da Figura 2, pode concluir-se que, para os valores cobertos neste estudo ($0,61 \leq U_0/U_c \leq 1,34$), a profundidade de erosão nos ensaios *com transporte sólido*, $1,15 \leq U_0/U_c \leq 1,34$, não é diferenciável da profundidade obtida nos ensaios de transição. Esta conclusão não contradiz a literatura mencionada visto que o limite superior de U_0/U_c obtido no presente estudo é relativamente baixo ($U_0/U_c = 1,34$).

Parece existir uma ligeira influência de D_{50} no valor de h_s , visto que as medições correspondentes à série A1, na qual a areia é mais fina, mostram uma pequena tendência para se situar abaixo dos da série A2 (cf. Figura 2). Este resultado confirma uma conclusão de KANDASAMY 1989, p. 228, que se referiu a experiências preliminares indicando que a profundidade de erosão junto de encontros de pontes aumenta com o diâmetro do material do fundo para sedimentos uniformes.

Pode ainda argumentar-se que a referida tendência se deve a um ligeiro transporte selectivo de sedimentos, no caso da série A1, pelo facto de o coeficiente de gradação ($\sigma_g \approx 1,6$) ser mais elevado do que o da série A2 ($\sigma_g \approx 1,3$). Contudo, este argumento não é sustentado por BREUSERS e RAUDKIVI 1991, p. 78, que afirmam que o efeito de σ_g é desprezável para $\sigma_g < 2$.

Na discussão que se segue, os dados correspondentes aos ensaios de transição foram divididos pelos outros dois grupos de dados para facilitar a discussão à luz de literatura existente. Na série A2, o conjunto de ensaios *sem transporte sólido* corresponde à condição $Q_s = 0$ e ao ensaio A2.02, caracterizado pela observação de fundo plano e movimento incipiente; nos restantes ensaios desta série ocorreu transporte sólido com a formação de dunas. Na série A1, embora se verificasse a formação de rugas em todos os ensaios, quatro deles foram classificados como não tendo transporte sólido porque U_0/U_c resultou inferior a 1,05. O critério adoptado pode relacionar-se com o valor de t_f . De facto, verifica-se que os ensaios *com transporte sólido* duraram menos de 14 horas enquanto que os restantes duraram mais de 14 horas.

Os valores da profundidade máxima da erosão, h_s , foram tratados por análise de regressão. Uma das melhores equações de regressão para os dados *com transporte sólido* (coeficiente de correlação $r = 0,91$) foi a seguinte :

$$\frac{h_s}{h_0} = 2,25 \left(\frac{L}{h_0} \right)^{0,33} F_r^{0,49} \quad (1)$$

que é semelhante à equação de Liu *et al.* (CHANG 1988, p. 101), válida para as mesmas condições:

$$\frac{h_s}{h_0} = K' \left(\frac{L_1}{h_0} \right)^{0,4} F_r^{0,33} \quad (2)$$

Apesar de L e L_1 (comprimento do obstáculo medido na perpendicular ao escoamento ao nível de superfície livre) serem ligeiramente diferentes, as previsões fornecidas pelas equações (1) e (2) são praticamente coincidentes para os ensaios realizados neste estudo, desde que se adopte $K' = 1,9$. De referir que os valores dos expoentes de ambas as equações são da mesma ordem de grandeza e que Liu *et al.* sugeriram um valor de $K' = 2,15$ para esporões com paredes verticais. O valor ajustado, sendo mais próximo de 2,15 do que de 1,1 (sugerido pelos mesmos autores para declives suaves das espaldas) constitui mais uma evidência de que o esporão utilizado tem um comportamento próximo do dos esporões de cabeça semi-circular.

O tratamento dos dados por análise de regressão múltipla permitiu ainda obter as seguintes equações:

$$\frac{h_s}{h_0} = 38,3 \left(\frac{L}{h_0} \right)^{-0,56} Z^{0,23} F_r^{2,76} \quad \text{para ensaios sem transporte sólido} \quad (3)$$

$$\frac{h_s}{h_0} = 4,30 \left(\frac{L}{h_0} \right)^{0,29} Z^{-0,21} \quad \text{para ensaios com transporte sólido} \quad (4)$$

Os parâmetros que figuram no segundo membro da equação (3) reflectem a influência das principais variáveis intervenientes no fenómeno: o comprimento do esporão, o diâmetro da areia ($Z = h_0/D_{50}$), a aceleração da gravidade e a velocidade e altura médias do escoamento não perturbado. Todos os comprimentos são adimensionalizados com h_0 ; o efeito da gravidade é considerado através do número de Froude. Este parâmetro não aparece na equação (4) (cujo coeficiente de correlação é $r = 0,96$), estabelecida para os ensaios *com transporte sólido*, por se ter verificado que a sua influência é desprezável, enquanto que o número de Froude desempenha um papel importante na explicação dos resultados dos ensaios *sem transporte sólido* (ver equação (3), em que $r = 0,93$). Podem encontrar-se na literatura (cf. WONG 1982) valores menores do expoente do número de Froude em equações para *escoamentos com transporte* do que em equações semelhantes para *escoamentos sem transporte sólido*, o que está na linha dos resultados do presente estudo em termos das equações (3) e (4). Por exemplo, para encontros de parede vertical, Liu *et al.* obtiveram um valor de 0,33 para expoente de F_r para dados *com transporte* e de 1,0 para dados *sem transporte sólido*. Do mesmo modo, VEIGA DA CUNHA 1973, p. 142, concluiu que a profundidade das cavidades de erosão aumenta com a velocidade do escoamento (i.e. com F_r) no caso de ensaios *sem transporte sólido*, enquanto que é praticamente independente da velocidade no caso de ensaios *com transporte*.

Na Figura 3 apresentam-se os resultados relativos à largura máxima das cavidades de erosão, L_s , obtidos neste estudo para ensaios *com transporte sólido*. Embora estes sejam resultados preliminares, mostram uma clara tendência de crescimento de L_s/L com h_0/L .

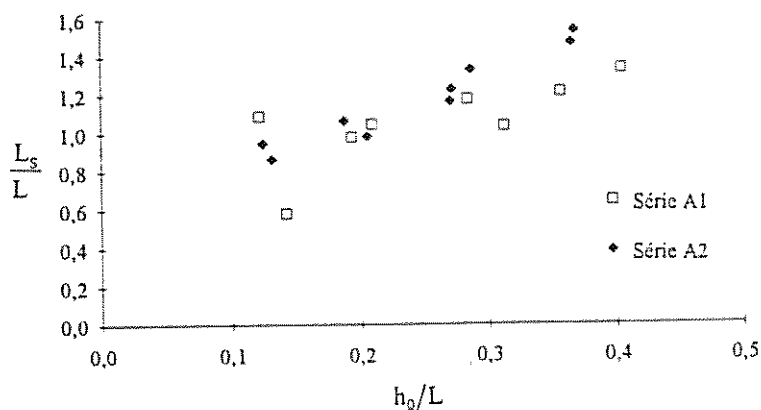


Fig. 3 – Largura máxima das cavidades de erosão em ensaios *com transporte sólido*

Constatou-se também que as relações entre a largura, L_s , e a profundidade, h_s , das cavidades de erosão (de que depende o ângulo, β , do talude com a horizontal) são aproximadamente constantes e iguais a 2,0 ($\beta \approx 27^\circ$) e a 2,3 ($\beta \approx 24^\circ$), respectivamente para as séries A_1 e A_2 . Este resultado está de acordo com as conclusões de Izzard e Bradley (cf. GARDE e RAJU, p. 416), segundo as quais β é função da geometria do esporão e das características dos sedimentos do fundo, podendo variar entre 20° e 30° . Como a geometria do esporão não se alterou neste estudo, pode, aparentemente, concluir-se que o valor de β diminui com o aumento de D_{50} .

Segundo VEIGA DA CUNHA 1973, p. 146, as cavidades de erosão provocadas por um esporão com uma dada forma são geometricamente semelhantes, ou seja, os valores de A_s e de V_s só dependem de h_s . Na Figura 4 apresenta-se, em coordenadas logarítmicas, a variação de V_s com h_s .

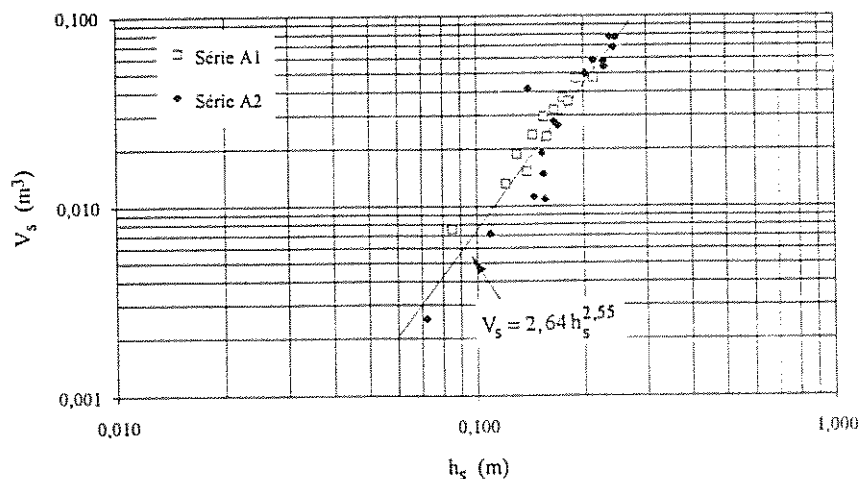


Fig. 4 – Variação do volume de escavação com a profundidade máxima da cavidade

Como se pode verificar, os pontos representativos dos ensaios estão praticamente alinhados segundo uma recta, sendo os maiores afastamentos correspondentes a situações em que $U_0/U_c \leq 0,9$, ou seja, a ensaios *sem transporte sólido*. A equação de regressão ($r = 0,92$) é:

$$V_s = 2,64 h_s^{2,55} \quad (5)$$

Para condições de ensaio semelhantes às do presente estudo e utilizando um esporão em parede delgada, VEIGA DA CUNHA 1973, p. 148 propôs a relação:

$$V_s = 5,5 h_s^{3,08} \quad (6)$$

As diferenças entre as duas equações, particularmente no que se refere à constante multiplicativa, dever-se-ão ao efeito de forma dos esporões.

Tentou-se obter uma relação semelhante para as áreas A_s . Porém, devido à dificuldade em estabelecer o nível zero das cavidades de erosão, ou seja, em medir as respectivas áreas a esse nível, a relação alcançada apresentou uma dispersão considerável, carecendo, por isso, de uma análise mais aprofundada.

4 – CONCLUSÕES

De acordo com os resultados e discussão apresentados e para a gama de ensaios realizados pode concluir-se o seguinte:

- a envolvente das profundidades máximas de erosão proposta por MELVILLE 1992 para a *situação de transição* ($U_0/U_c \approx 1$) também é uma envolvente adequada para os resultados dos ensaios *com transporte sólido*;
- mantendo todas as restantes variáveis, a profundidade das cavidades de erosão *sem transporte* é menor do que *com transporte*;
- existe uma ligeira influência da granulometria do material do fundo na profundidade das cavidades de erosão;
- a equação de Liu *et al.*, proposta para situações em que ocorre transporte sólido, conduz a previsões aceitáveis;
- as equações (3) e (4) obtidas neste estudo são equações alternativas para a previsão das profundidades máximas da cavidade de erosão;
- o ângulo do talude das cavidades de erosão, para um dado esporão, só depende das características do material do fundo;
- o volume de escavação depende da profundidade máxima de erosão.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se o apoio financeiro providenciado pela Junta Nacional de Investigação Científica e Tecnológica (JNICT), de Portugal, através do projecto de investigação PEAM/C/CNT/60/91.

BIBLIOGRAFIA

- BREUSERS, H. N. C; RAUDKIVI, A. J. – *Scouring*. Balkema, Rotterdam, Netherlands, 1991.
- BROWNLIE, W. R. – *Flow depth in sand-bed channels*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 109, No. 7, July, 1983, pp. 959-990;
- CHANG, H. H. – *Fluvial processes in river engineering*. John Willey & Sons, USA, 1988;
- GARDE, R. J.; RANGA RAJU, K. G. – *Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems*, (second edition). Wiley Eastern Limited, New Delhi, India, 1985;
- KANDASAMY, J. K. – *Abutment scour*. Report N^o 458, Department of Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 1989;
- KARIM, M. F.; KENNEDY, J. F. – *Menu of coupled velocity and sediment-discharge relations for rivers*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 116, No. 8, August, 1990, pp. 978-996;
- MELVILLE, B. W. – *Local scour at bridge abutments*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 118, N^o 4, April, 1992, pp 615 - 631;
- VEIGA DA CUNHA, L. – *Erosões localizadas junto de obstáculos salientes de margens*, Memória LNEC n^o 428, 1973.
- WONG, W. H. – *Scour at bridge abutments*. Report N^o 275, Department of Civil Engineering, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 1982.