

# APLICAÇÃO DE MODELOS ANALÍTICOS AO ESTUDO DA DEPOSIÇÃO EM CANAIS COM FUNDO MÓVEL

Elsa ALVES <sup>(1)</sup>

## RESUMO

A erosão e a deposição generalizadas dos leitos dos cursos de água aluvionares são consequências de alterações do regime de caudais líquidos e de caudais sólidos transportados. Essas alterações podem ser induzidas por intervenções humanas nos cursos de água pelo que a previsão das modificações a que estarão sujeitos os leitos aluvionares constitui um dos aspectos mais importantes no planeamento e exploração de obras fluviais.

Esta comunicação tem como objectivo verificar a aplicabilidade do modelo parabólico linear à previsão da deposição devida ao aumento repentino do caudal sólido afluente a uma dada secção de um escoamento aluvionar previamente em equilíbrio. Os modelos analíticos, de que o modelo parabólico linear é um exemplo, são obtidos introduzindo algumas hipóteses simplificativas nas equações de base que governam os escoamentos em canais com fundo móvel. As previsões do modelo são confrontadas com os resultados experimentais obtidos num canal de grandes dimensões, parecendo ser bastante aceitáveis. A qualidade do modelo parece estar relacionada com a relação entre o caudal sólido de sobrealimentação e o caudal sólido de equilíbrio.

**Palavras-chave:** Escoamentos em desequilíbrio, deposição, fundo móvel, modelos analíticos.

---

<sup>(1)</sup> Engenheira Civil, M.Sc. em Hidráulica e Recursos Hídricos, Assistente de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal.



## 1 - INTRODUÇÃO

Nos cursos de água aluvionares a permanência do caudal líquido e do caudal sólido conduz a que ao fim de um tempo suficientemente longo se estabeleça o equilíbrio entre a capacidade de transporte do escoamento, a disponibilidade de sedimentos e a morfologia do fundo. Este equilíbrio diz-se dinâmico porque podem ocorrer temporariamente erosões e deposições provocadas por variações locais das características médias do escoamento.

As intervenções humanas nos cursos de água aluvionares, designadamente a extracção de areias ou a construção de barragens, podem induzir alterações do respectivo regime de transporte sólido e destruir equilíbrios morfológicos previamente existentes, conduzindo a erosões ou a deposições com consequências negativas para o ambiente fluvial.

Nas últimas décadas, procedeu-se ao desenvolvimento de modelos matemáticos que procuram simular os processos fluviais. O sistema de equações a resolver compreende três equações que exprimem a conservação do caudal líquido, do caudal sólido e da quantidade de movimento da mistura e duas equações que exprimem relações entre o caudal sólido e alguns parâmetros do escoamento e entre a resistência ao escoamento e esses mesmos parâmetros. Os modelos podem classificar-se em *numéricos* quando utilizam um esquema de resolução numérica, obtido a partir da discretização do sistema resolvente, e em *analíticos* quando se baseiam na resolução analítica desse sistema.

De um modo geral, as soluções analíticas só podem ser obtidas mediante hipóteses simplificativas. No entanto, para situações reais em que a natureza do problema permita a simplificação das condições de fronteira e das características dos sedimentos, as soluções analíticas podem fornecer indicação aproximada da magnitude dos fenómenos da erosão ou da deposição.

Desde os trabalhos pioneiros de DE VRIES (1973) têm sido sucessivamente propostos vários modelos analíticos para o estudo dos fenómenos da erosão e da deposição em leitos aluvionares, confirmando o interesse que a aplicação destes modelos continua a merecer. Na maioria dos casos, avalia-se a qualidade das previsões de cada modelo mediante a comparação dos resultados com observações de laboratório. Os estudos experimentais de SONI (1975) e de MEHTA (1980) sobre a sobrealimentação de sedimentos a escoamentos inicialmente em equilíbrio são frequentemente referidos na literatura e utilizados para esse fim. Apesar da diversidade de modelos analíticos disponíveis, a elevada dispersão de resultados a que conduzem não permite ainda definir a solução analítica mais adequada à previsão da deposição em canais de fundo móvel.

Recentemente, foi realizado um estudo experimental sobre a deposição devida à sobrealimentação de sedimentos a escoamentos em canais com fundo móvel inicialmente em equilíbrio ALVES (1997). Este estudo teve como objectivo esclarecer sobre as modificações que ocorrem nas dimensões e cinemática das configurações de fundo, na resistência ao escoamento e no transporte sólido quando a afluência de material sólido é superior à capacidade de transporte do escoamento.

Pretende-se nesta comunicação verificar a aplicabilidade do modelo parabólico linear na previsão da evolução de um fundo móvel num escoamento sujeito à sobrealimentação de sedimentos. Apesar da simplicidade deste modelo, vários autores (e.g. MOSCONI, 1988) referem que a sua utilização conduz a resultados com uma dispersão semelhante à obtida quando se utilizam soluções analíticas mais sofisticadas mas de difícil resolução matemática. A análise baseia-se na comparação das previsões fornecidas pelo modelo com os resultados experimentais obtidos por ALVES (1997).

## 2 - MODELO PARABÓLICO LINEAR

Considere-se um escoamento uniforme num canal rectangular com fundo móvel. O escoamento é caracterizado pela velocidade média,  $U_o$ , pela altura média,  $h_o$ , pelo declive do fundo,  $i_{fo}$ , e pelo valor do caudal sólido de equilíbrio,  $Q_{so}$ <sup>(2)</sup>. Admita-se que na secção  $x = 0$  o caudal sólido aumenta repentinamente para o valor de  $Q_{so} + \Delta Q_s$ . Como a disponibilidade de sedimentos é superior à capacidade de transporte do escoamento, parte do excesso de sedimentos deposita-se a jusante dessa secção (secção de alimentação), provocando a diminuição da altura do escoamento e o aumento do declive do fundo e da velocidade média do escoamento. Mais a jusante, o fundo mantém as características do escoamento em equilíbrio até que aí chegue a onda de deposição. Na Figura 1 esquematiza-se a situação em estudo.

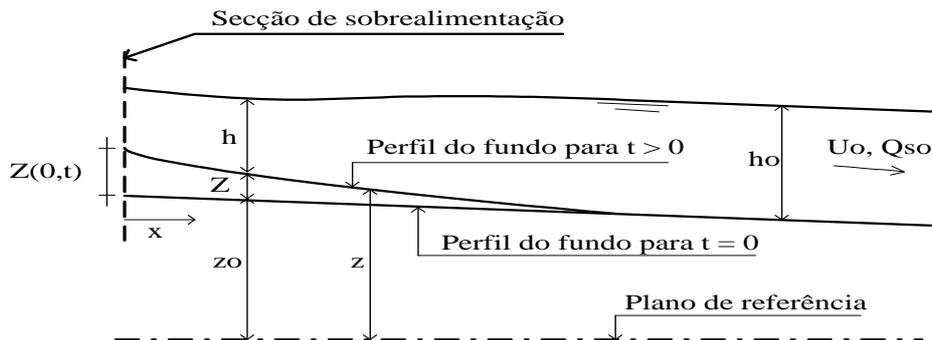


Figura 1 - Deposição devida a sobrealimentação de sedimentos. Esquema de definição.

No caso geral, a modelação matemática de um escoamento num canal de fundo móvel baseia-se no seguinte conjunto de equações que traduzem os princípios da conservação da quantidade de movimento, da continuidade da fase líquida e da continuidade da fase sólida:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} + g \frac{\partial z}{\partial x} + gJ = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + U \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial U}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q_s}{\partial x} = 0 \quad (3)$$

Nas equações anteriores,  $B$  é a largura superficial do escoamento,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $h$  é a altura média do escoamento,  $J$  é o declive da linha de energia,  $Q_s$  é o caudal sólido,  $t$  é o tempo,  $U$  é a velocidade média do escoamento,  $x$  é a coordenada longitudinal medida na direcção principal do escoamento e  $z$  é a elevação da cota do fundo em relação a um plano horizontal de referência.

As Eqs. (1) a (3) possuem cinco incógnitas:  $U$ ,  $h$ ,  $z$ ,  $J$  e  $Q_s$  pelo que é necessário considerar duas equações complementares referentes, respectivamente, ao caudal sólido e à resistência ao escoamento. Para a análise que se segue considerou-se que o caudal sólido pode ser determinado a partir da velocidade média do escoamento através de uma relação do tipo:

<sup>(2)</sup> O índice “o” é relativo ao escoamento em equilíbrio.

$$Q_s = aU^b \quad (4)$$

onde  $a$  e  $b$  são constantes susceptíveis de se determinarem experimentalmente. Por outro lado, considera-se a seguinte equação de resistência:

$$J = \frac{U^3 Bf}{8gQ} \quad (5)$$

em que  $f$  é o factor de atrito de Darcy-Weisbach e  $Q$  o caudal da mistura água e sedimentos.

Refira-se que as Eqs. (4) e (5) são estritamente válidas para escoamentos em equilíbrio. A sua utilização no estudo de escoamentos variáveis ou permanentes gradualmente variados constitui uma simplificação aceite pela maioria dos autores.

No caso particular da deposição devida à sobrealimentação de sedimentos, é possível obter uma solução analítica do sistema de Eqs. (1) a (5) considerando algumas hipóteses simplificativas e adequadas condições inicial e de fronteira do problema.

De acordo com DE VRIES (1973), quando o número de Froude do escoamento ( $Fr$ ) é inferior à unidade, a evolução do fundo móvel pode ser estudada admitindo que o escoamento da fase líquida é quasi-permanente, ou seja, que o termo de aceleração local ( $\partial U/\partial t$ ) e a derivada no tempo da altura do escoamento ( $\partial h/\partial t$ ) podem ser desprezados nas Eqs. (1) e (2), respectivamente. Esta simplificação é comum na dedução dos modelos parabólicos e dos modelos hiperbólicos. No caso dos modelos parabólicos despreza-se ainda a variação longitudinal da altura do escoamento ( $\partial h/\partial x$ ). Manipulando as Eqs. (1) e (2) obtém-se então a seguinte expressão:

$$\frac{\partial z}{\partial x} + J = 0 \quad (6)$$

Derivando a Eq. (6) em relação a  $x$  e atendendo às Eqs. (3), (4) e (5) obtém-se o modelo parabólico linear:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} - K_o \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} = 0 \quad (7)$$

em que  $K_o$  é o coeficiente de difusão e  $Z$  a elevação do fundo móvel em relação ao fundo inicial, dados pelas seguintes expressões:

$$K_o = \frac{1}{3} \frac{bQ_{s0}}{BJ_o} \quad (8)$$

e

$$Z = z - z_o \quad (9)$$

em que  $J_o$  é o declive da linha de energia e  $z_o$  a cota do fundo móvel do escoamento em equilíbrio.

A solução analítica da equação diferencial (7) é obtida considerando as seguintes condições inicial e de fronteira:

$$Z(x,0) = 0 \quad \text{para } x \geq 0 \text{ e } t \leq 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial x}(0,t) = -\frac{\Delta Q_s}{K_o} \quad \text{para } t > 0 \quad (11)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} z(x,t) = 0 \quad (12)$$

JAIN (1981) apresentou a solução analítica do modelo parabólico linear sob a forma adimensional:

$$\frac{Z(x,t)}{Z(0,t)} = \left[ \exp(-\eta^2) - \eta\sqrt{\pi} \operatorname{erfc}(\eta) \right] \quad (13)$$

em que  $\eta$  é dado por  $\eta = x / (2\sqrt{K_o t})$  e  $\operatorname{erfc}(\cdot)$  é a função complementar de erro. A elevação do fundo na secção de sobrealimentação,  $Z(0,t)$ , é obtida através da seguinte expressão:

$$\frac{Z(0,t)}{\sqrt{K_o t}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\Delta Q_s}{K_o} \quad (14)$$

### 3 - ESTUDO EXPERIMENTAL

#### 3.1 - Descrição da instalação e procedimento experimental

O estudo experimental foi conduzido no Canal de Inclinação Variável (CIV) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Este canal, com 40,7 m de comprimento, 2,0 m de largura e 1,7 m de altura, funciona em circuito fechado, podendo proceder-se à recirculação de misturas de água e sedimentos. O escoamento processa-se por gravidade do tanque de montante para o canal e, pela extremidade de jusante deste, sai para o tanque de descarga. Daí as misturas são bombeadas para o tanque de montante, fechando-se deste modo o circuito do escoamento. Na secção de jusante do canal existe uma comporta plana vertical que permite controlar a altura do escoamento no interior do canal e uma comporta de fundo que viabiliza a saída dos sedimentos para o tanque de descarga. A inclinação do canal pode variar entre 0 % e 2,5 %, o que corresponde ao deslocamento vertical máximo de 1 m na secção de jusante. No interior do canal foi colocada uma camada de areia com 15 cm de espessura. Na Figura 2 representa-se esquematicamente a instalação experimental.

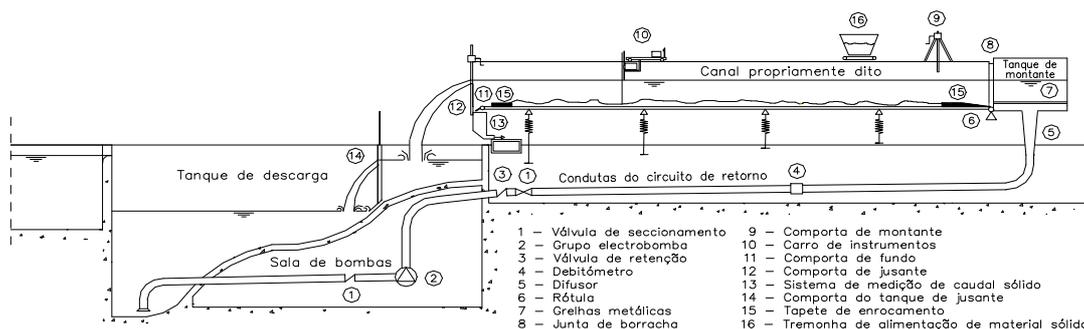


Figura 2 - Esquema geral do Canal de Inclinação Variável.

O CIV dispõe de um *sistema de sobrealimentação* constituído por uma tremonha assente sobre a parte superior do canal. Esta tremonha possui uma abertura regulável que

permite a saída do material sólido para o canal. O valor máximo do caudal sólido de sobrealimentação que é possível fornecer de modo contínuo é  $8 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ .

O equipamento de medição utilizado nos ensaios incluiu três debitómetros electromagnéticos para medição de caudais, um seguidor de fundos para medição das cotas do fundo, um limnómetro para medição das cotas da superfície livre do escoamento, copos e peneiros para medição de caudal sólido e uma régua graduada para verificação da inclinação do canal. O seguidor de fundos e o limnómetro foram montados no carro de instrumentos do CIV que permite o transporte destes aparelhos ao longo de todo o comprimento do canal.

A realização dos ensaios com sobrealimentação de sedimentos implicou o estabelecimento da condição de referência correspondente à situação de equilíbrio do escoamento. Antes do início de cada ensaio seleccionaram-se os valores do caudal,  $Q$ , da altura do escoamento,  $h$ , e do declive do canal,  $i_c$ , tendo como objectivo o estabelecimento rápido do regime uniforme, ao qual corresponderiam valores de equilíbrio de caudal sólido,  $Q_s$ , e do declive do fundo móvel,  $i_f$  (igual ao declive da linha de energia,  $J$ ). Procedeu-se também à regularização da camada de areia no interior do canal de modo a iniciar cada ensaio com um fundo plano. Utilizou-se como material do fundo e de sobrealimentação uma areia com um diâmetro mediano igual a 0,70 mm e um coeficiente de graduação igual a 1,68.

No início de cada ensaio começou-se por introduzir água lentamente no canal para não perturbar o fundo. Estabelecido o valor do caudal, fixou-se o declive do canal, que se manteve constante ao longo do ensaio. Através da manobra da comporta de jusante ajustou-se o valor da altura de água que correspondia, em primeira aproximação, ao valor inicialmente seleccionado. A comporta de fundo foi mantida com uma abertura reduzida, apenas para permitir a passagem de material sólido para o tanque de jusante.

Através de levantamentos dos perfis longitudinais do fundo e da superfície livre num trecho de medição com 20 m de comprimento e da observação da evolução da configuração do leito móvel procurou-se identificar tendências sistemáticas de erosão ou de deposição ao longo do canal que se afastassem da situação de equilíbrio pretendida. Quando tais situações ocorreram procedeu-se a pequenos ajustamentos da posição das comportas de jusante e do fundo. Considerou-se que se atingia o equilíbrio quando as configurações de fundo se encontravam completamente desenvolvidas e em equilíbrio com o escoamento líquido prevalecente e/ou eram praticamente iguais os declives médios da linha de energia,  $J$ , da superfície livre,  $i_s$ , e do fundo móvel,  $i_f$ .

Quando o escoamento atingiu o regime de equilíbrio, iniciou-se a sobrealimentação introduzindo no escoamento, através da tremonha, areia igual à do fundo do canal, numa secção situada 1,0 m a montante do trecho de medição. O caudal sólido de sobrealimentação foi mantido constante ao longo de todo o ensaio, tendo sido estabelecido em função das características de cada ensaio e da capacidade do sistema de sobrealimentação.

Durante a fase inicial de obtenção do regime de equilíbrio e na fase de sobrealimentação de sedimentos efectuaram-se vários levantamentos de perfis do fundo e da superfície livre e mediu-se o caudal sólido que saía para jusante. Além disso monitorizaram-se os processos de formação e desaparecimento das formas de fundo e, no caso dos ensaios com sobrealimentação, mediu-se o avanço da “onda de deposição” no seu deslocamento para jusante.

### **3.2 - Caracterização dos ensaios**

Realizaram-se seis ensaios com sobrealimentação de sedimentos, designados por S.1 a S.6. Como foi referido, a informação recolhida nos ensaios consistiu, essencialmente, nos

levantamentos de perfis longitudinais do fundo e da superfície livre e nas medições dos caudais líquido e sólido e dos ritmos de sobrealimentação. A partir desta informação foi possível obter os valores de algumas variáveis características do escoamento. Assim, no Quadro 1 resumem-se os valores do caudal,  $Q$ , do caudal sólido de equilíbrio,  $Q_{so}$ , da altura média do escoamento,  $h_o$ , da velocidade média do escoamento,  $U_o$ , do correspondente número de Froude,  $Fr_o$ , do declive da linha de energia,  $J_o$ , do declive do fundo,  $i_{fo}$ , e do tipo de configuração de fundo relativos à fase inicial dos ensaios com sobrealimentação.

Quadro 1 - Condições de referência dos ensaios com sobrealimentação de sedimentos.

Ensaio	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$Q_{so}$ (10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /s)	$h_o$ (m)	$U_o$ (m/s)	$Fr_o$ (-)	$J_o$ (10 <sup>-3</sup> )	$i_{fo}$ (10 <sup>-3</sup> )	Tipo de configuração de fundo
S.1	0,230	3,47	0,219	0,522	0,356	1,399	0,889	dunas
S.2	0,180	4,02	0,191	0,469	0,342	1,773	2,303	dunas
S.3	0,160	0,47	0,193	0,412	0,299	0,477	0,739	dunas e rugas
S.4	0,160	2,06	0,178	0,448	0,340	1,377	1,221	dunas
S.5	0,160	0,08	0,246	0,323	0,208	0,210	0,517	fundo plano
S.6	0,180	0,18	0,249	0,360	0,231	0,229	0,364	fundo plano

No Quadro 2 indicam-se, para cada ensaio, a duração da sobrealimentação,  $t$ , o caudal sólido de sobrealimentação,  $\Delta Q_s$ , e os valores finais da altura média do escoamento,  $h$ , da velocidade média,  $U$ , do declive da linha de energia,  $J$ , e do declive do fundo,  $i_f$ , e o tipo de configuração de fundo referentes ao trecho afectado pela deposição.

Quadro 2 - Condições finais dos ensaios com sobrealimentação de sedimentos.

Ensaio	$t$ (min)	$\Delta Q_s$ (10 <sup>-5</sup> m <sup>3</sup> /s)	$h$ (m)	$U$ (m/s)	$Fr$ (-)	$J$ (10 <sup>-3</sup> )	$i_f$ (10 <sup>-3</sup> )	Tipo de configuração de fundo
S.1	535	6,96	0,191	0,600	0,438	3,087	8,107	dunas
S.2	430	7,14	0,169	0,531	0,412	2,438	4,001	dunas
S.3	582	7,50	0,160	0,497	0,397	2,023	6,458	dunas
S.4	499	7,35	0,156	0,510	0,412	2,326	5,469	dunas
S.5	463	6,96	0,152	0,524	0,429	2,468	7,800	dunas
S.6	726	6,96	0,201	0,446	0,318	1,689	5,757	dunas

### 3.3 - Determinação da tendência dos perfis do fundo

Os perfis longitudinais do fundo móvel obtidos nos ensaios com sobrealimentação apresentam oscilações que traduzem, por um lado, a presença de configurações de fundo e, por outro, a formação da onda de deposição. A irregularidade geométrica que os perfis apresentam dificulta a descrição da evolução do seu comportamento médio ao longo do tempo.

Para minimizar esta dificuldade, implementou-se uma metodologia para o cálculo da tendência dos perfis longitudinais do fundo, ou seja, para a determinação da curva que descreve o comportamento médio dos perfis do fundo. A metodologia adoptada encontra-se descrita em ALVES (1997) e consiste, basicamente, em dividir o perfil do fundo em trechos menores e utilizar a aproximação polinomial cúbica obtida através da função *spline* cúbica

interpoladora naqueles trechos. A aplicação deste método exige a definição prévia de uma sequência de pontos, denominados nós, a partir dos quais se procede à interpolação através das *splines* cúbicas. A escolha do espaçamento entre nós deve permitir revelar a verdadeira tendência do comportamento médio do perfil do fundo. Um valor demasiado elevado conduz a um alisamento excessivo das características do fundo e, por outro lado, um valor pequeno conduz a uma curva de tendência próxima do perfil do fundo original. Consequentemente, a escolha do espaçamento entre nós variou de ensaio para ensaio e de perfil para perfil e foi feita por inspeção visual.

Nas Figuras 3 e 4 apresentam-se, a título de exemplo, para os ensaios S.1 e S.5, os perfis do fundo e da superfície livre para a situação de equilíbrio ( $t = 0$  min) e para a situação final do ensaio, correspondente ao fim da sobrealimentação. Nas mesmas figuras são ainda representadas as tendências dos perfis do fundo e identifica-se a posição aproximada da frente de deposição ( $L_F$ ) nesses registos.

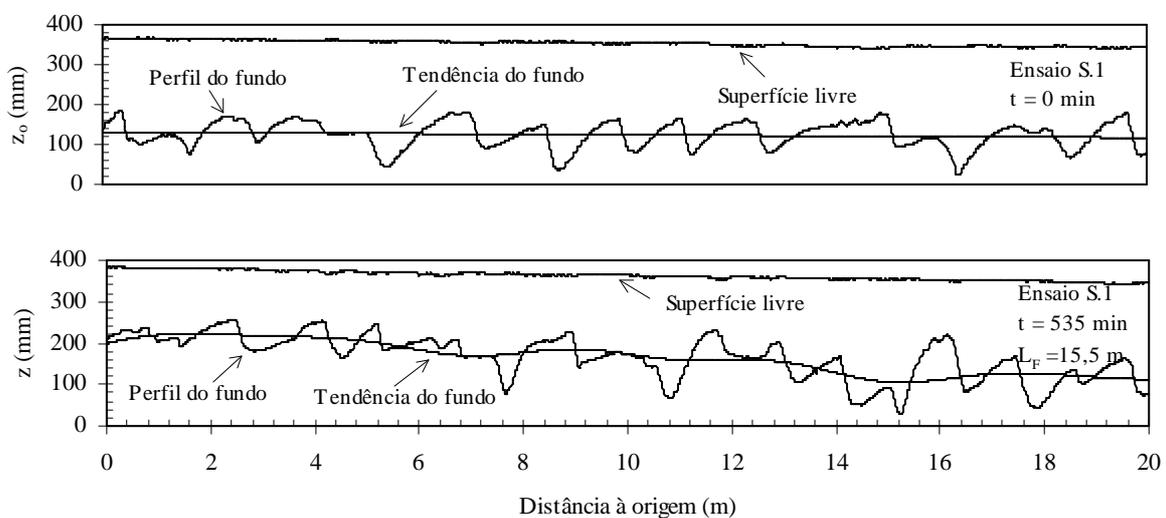


Figura 3 - Perfis longitudinais e tendências do fundo no início e no final do ensaio S.1.

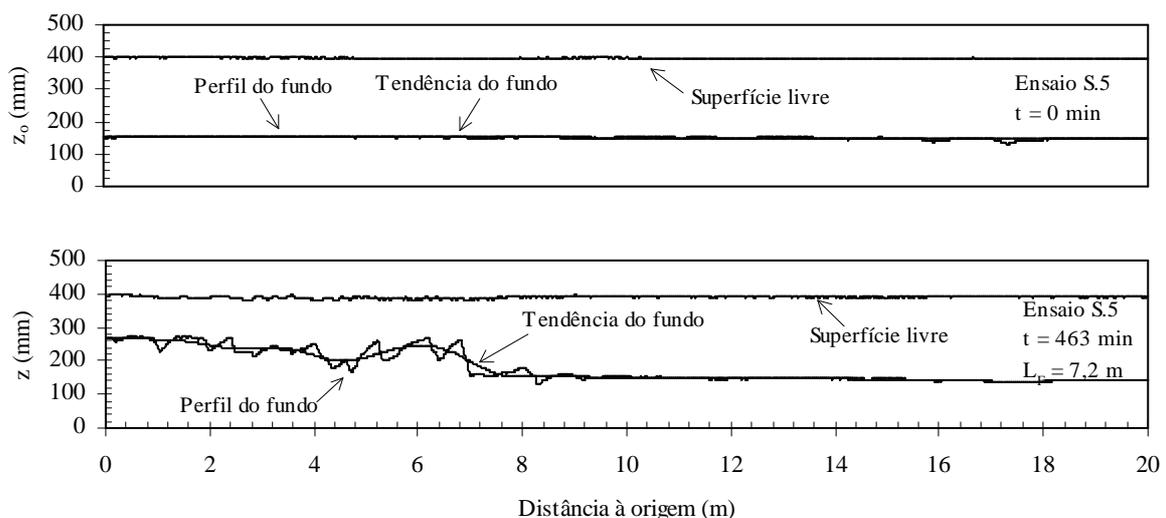


Figura 4 - Perfis longitudinais e tendências do fundo no início e no final do ensaio S.5.

#### 4 - APLICAÇÃO DO MODELO PARABÓLICO LINEAR AOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Procedeu-se à aplicação do modelo parabólico linear aos resultados dos ensaios com sobrealimentação de sedimentos realizados no CIV. Nas Figuras 5 e 6 apresenta-se, em função do parâmetro  $\eta = x / (2\sqrt{K_o t})$ , o perfil longitudinal do fundo adimensionalizado determinado através do modelo parabólico linear (Eq. (13)). Nas referidas figuras são ainda representados, para os ensaios com sobrealimentação, os valores de  $Z(x,t) / Z(0,t)$  obtidos a partir das curvas de tendência ajustadas ao perfil longitudinal do fundo no final de cada ensaio. Refira-se que na determinação do coeficiente de difusão,  $K_o$ , intervém a constante  $b$  da equação de transporte sólido (Eq. (4)). De acordo com ALVES (1997), para os ensaios realizados no CIV a constante da referida equação toma o valor de 7,8.

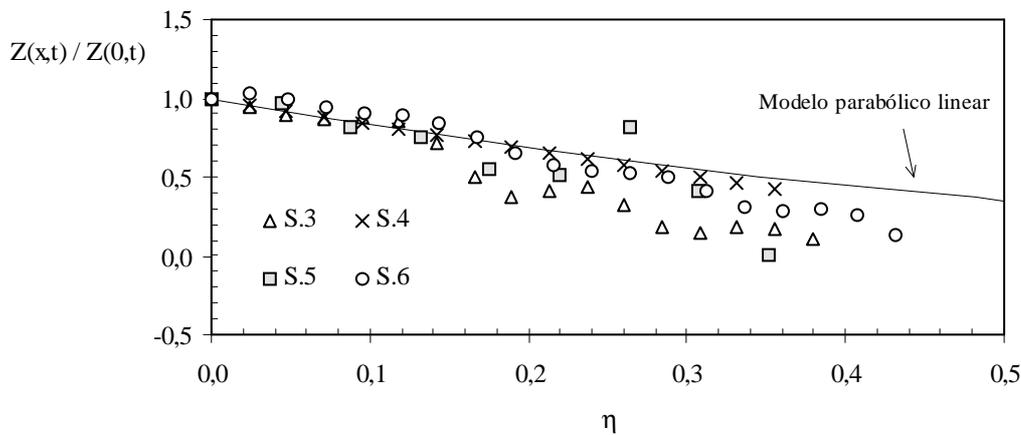


Figura 5 - Perfis longitudinais do fundo adimensionais obtidos para os ensaios S.3 a S.6.

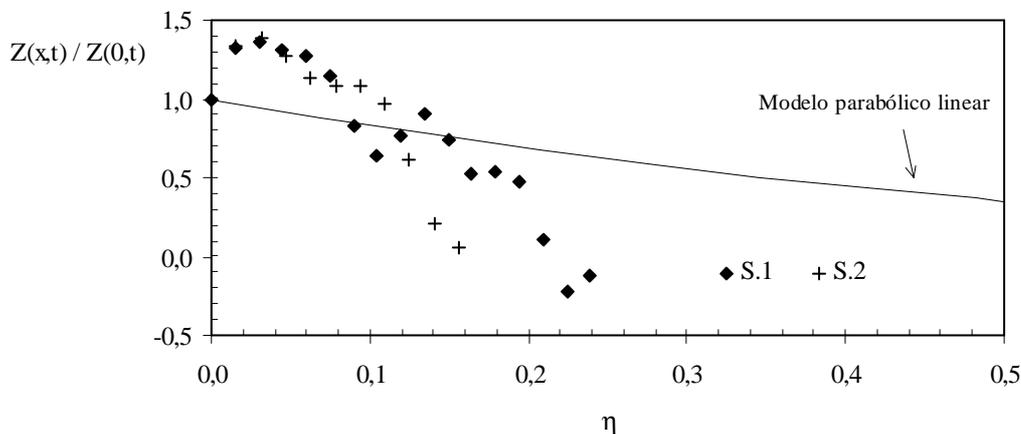


Figura 6 - Perfis longitudinais do fundo adimensionais obtidos para os ensaios S.1 e S.2.

Como se pode observar na Figura 5, para os ensaios S.4 e S.6 existe uma excelente concordância entre as previsões do modelo e os valores observados. Nos ensaios S.3 e S.5 as previsões aproximam-se dos valores observados para valores baixos de  $\eta$  mas afastam-se quando este parâmetro aumenta. Isto significa que, para estes ensaios, o modelo parabólico linear tende a sobrestimar os valores da relação  $Z(x,t) / Z(0,t)$  nas secções mais afastadas da secção de sobrealimentação. Nos restantes ensaios (S.1 e S.2) as previsões do modelo

afastam-se significativamente dos valores observados (Figura 6). Em todos os ensaios o modelo prevê uma extensão do efeito da deposição maior do que a observada.

JARAMILLO (1983) aplicou o modelo parabólico linear aos dados de SONI (1975) e de MEHTA (1980), concluindo que as previsões do modelo se aproximam dos resultados experimentais quando  $\Delta Q_s / Q_{so} = 4$ . Quando  $\Delta Q_s / Q_{so} > 4$  o modelo tende a fornecer estimativas por defeito da relação  $Z(x,t) / Z(0,t)$  e para valores baixos de  $\Delta Q_s / Q_{so}$  conduz a estimativas por excesso. Jaramillo atribuiu estes resultados às simplificações admitidas na dedução do modelo. De acordo com o referido autor, para  $\Delta Q_s / Q_{so} = 4$  os erros introduzidos pelas várias simplificações tendem a anular-se.

As previsões obtidas com a aplicação do modelo parabólico aos ensaios do CIV parecem confirmar, em parte, as conclusões de JARAMILLO (1983). De facto, os maiores desvios entre as previsões e os resultados experimentais verificam-se para os ensaios S.1 e S.2 em que a relação entre o caudal sólido de sobrealimentação e o caudal sólido de equilíbrio ( $\Delta Q_s / Q_{so}$ ) é igual a 2 e a 1,8, respectivamente. Nestes ensaios o modelo prevê valores de  $Z(x,t) / Z(0,t)$  por excesso, para valores do parâmetro  $\eta$  superiores a cerca de 0,15 o que, de algum modo, está de acordo com os resultados de JARAMILLO (1983). O modelo aproxima-se dos resultados experimentais no ensaio S.4, em que  $\Delta Q_s / Q_{so}$  é igual a 3,6, e no ensaio S.6, em que  $\Delta Q_s / Q_{so} \gg 4$ . No entanto, nos ensaios S.3 e S.5, em que  $\Delta Q_s / Q_{so} \gg 4$ , o modelo tende a fornecer estimativas por excesso da relação  $Z(x,t) / Z(0,t)$  o que contraria as conclusões de Jaramillo.

Em resumo, parece poder concluir-se que para  $\Delta Q_s / Q_{so} = 4$  o modelo fornece estimativas dos valores de  $Z(x,t) / Z(0,t)$  próximas dos valores observados nos ensaios. Quando  $\Delta Q_s / Q_{so} \neq 4$  as previsões tendem a afastar-se dos valores observados, não sendo possível indicar o sentido do desvio consoante  $\Delta Q_s / Q_{so} > 4$  ou  $\Delta Q_s / Q_{so} < 4$ .

Na Figura 7 comparam-se os valores observados da elevação da cota do fundo na secção de sobrealimentação obtidos nestes ensaios e no estudo experimental de SONI (1975) com os valores estimados pelo modelo parabólico linear. Verifica-se que o modelo tende a subestimar ligeiramente os valores de deposição na secção de alimentação, tanto para os ensaios de Soni como para os ensaios S.1, S.4, S.5 e S.6.

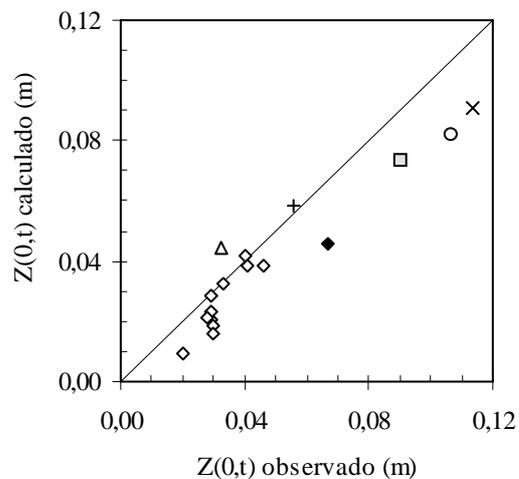


Figura 7 - Comparação entre valores observados e calculados de  $Z(0,t)$ .

Através de uma análise de regressão múltipla a resultados obtidos numericamente, JAIN (1985) apresentou a seguinte expressão para o cálculo do coeficiente de difusão,  $K_o$ :

$$K_o = 1,41 Q_{SO}^{0,866} J_o^{-0,982} \Delta Q_s^{0,102} \quad (15)$$

Na Figura 8 comparam-se para os ensaios realizados neste estudo e para os ensaios de Soni os valores observados de  $K_o$  com as respectivas estimativas obtidas pela Eq. (15). Refira-se que os valores observados de  $K_o$  foram obtidos por inversão da Eq. (14) utilizando os valores da elevação da cota do fundo medidos nos ensaios na secção de sobrealimentação.

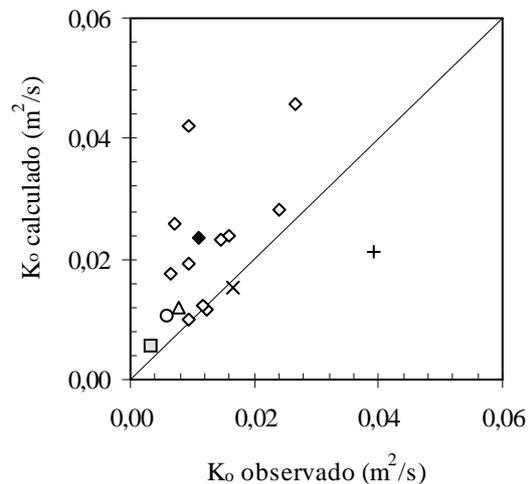


Figura 8 - Comparação entre valores observados de  $K_o$  e as previsões de Jain.

Como se pode observar na Figura 8, de um modo geral os valores calculados do coeficiente de difusão são superiores aos valores observados nos ensaios. Apesar de alguma dispersão, os valores obtidos neste estudo aproximam-se mais das estimativas fornecidas pela Eq. (15) do que os valores obtidos por Soni.

## 5 - CONCLUSÕES

O objectivo principal desta comunicação é o de verificar a aplicabilidade do modelo parabólico linear ao estudo da evolução do fundo móvel num escoamento sujeito à sobrealimentação de sedimentos. A aplicação do modelo requer que sejam conhecidas as condições de equilíbrio do escoamento num instante de tempo anterior à sobrealimentação e o caudal sólido de sobrealimentação, que se considera constante ao longo do tempo. O modelo admite também que o caudal sólido pode ser obtido a partir da velocidade média do escoamento.

A análise baseou-se na comparação entre as previsões do modelo e os resultados experimentais obtidos num canal de grandes dimensões. Em resumo, as conclusões são as seguintes:

- A elevação da cota do fundo calculada através do modelo parabólico linear diminui gradualmente a partir do valor máximo, na secção de sobrealimentação, aproximando-se assintoticamente de zero nas secções mais afastadas.
- Verifica-se que, em geral, o modelo tende a prever uma extensão de deposição maior do que aquela que se observa nos ensaios experimentais. Como consequência, a

elevação da cota do fundo é sobrestimada nas secções mais afastadas da secção de sobrealimentação.

– As previsões do modelo apresentam uma razoável concordância com os resultados experimentais, em particular quando a relação entre o caudal sólido de sobrealimentação e o caudal sólido de equilíbrio ( $\Delta Q_s / Q_{so}$ ) é igual a 4. A qualidade do modelo tende a ser inferior quando  $\Delta Q_s / Q_{so} \neq 4$  não sendo possível definir o sentido do desvio consoante  $\Delta Q_s / Q_{so}$  é inferior ou superior a 4.

– O modelo tende a subestimar os valores da elevação da cota do fundo na secção de sobrealimentação para os ensaios realizados e para os ensaios de Soni.

## SIMBOLOGIA

$a, b$	parâmetros da equação de transporte sólido, $Q_s = aU^b$
$B$	largura superficial do escoamento
$Fr$	número de Froude
$f$	factor de atrito de Darcy-Weisbach
$g$	aceleração da gravidade
$h$	altura do escoamento
$i_c$	declive do canal
$i_f$	declive do fundo móvel
$i_s$	declive da superfície livre
$J$	perda de carga unitária (aproximadamente igual ao declive da linha de energia)
$K_o$	coeficiente de difusão
$L_F$	posição da frente de deposição
$Q$	caudal
$Q_s$	caudal sólido
$\Delta Q_s$	caudal sólido de sobrealimentação
$t$	tempo após o início da sobrealimentação
$U$	velocidade média do escoamento
$x$	coordenada longitudinal medida na direcção principal do escoamento
$Z$	elevação da cota do fundo em relação ao perfil inicial, $Z = z - z_o$
$z$	cota do fundo móvel
$\eta$	parâmetro adimensional, $\eta = x / (2\sqrt{K_o t})$
o	em índice refere-se às condições de equilíbrio do escoamento

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Prof. António Heleno Cardoso, do Instituto Superior Técnico (Lisboa), a leitura cuidada do texto e as úteis críticas e sugestões apresentadas.

## BIBLIOGRAFIA

ALVES, E. - *Estudo Experimental de Escoamentos em Desequilíbrio em Canais com Leito Móvel. O Caso da Deposição*. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal, 1997.

- DE VRIES, M. - *River-Bed Variations - Aggradation and Deggradation*. Delft Hydraulics Laboratory, Publication N° 107, Delft, Netherlands, 1973.
- JAIN, S. C. - "River Bed Aggradation due to Overloading". Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 107, HY1, Janeiro 1981, pp. 120 - 124.
- JAIN, S. C. - "River Bed Aggradation due to Increase in Sediment Load". Pre-Workshop Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Workshop on Alluvial Problems, University of Roorkee, Roorkee, India, 1985.
- JARAMILLO, W. F. - *Aggradation and Degradation of Alluvial-Channel Beds*. Ph.D. Thesis, The University of Iowa, Iowa, EUA, 1983.
- MEHTA, P. J. - *Study of Aggradation in Alluvial Streams*. Ph.D. Thesis, University of Roorkee, India, 1980.
- MOSCONI, C. E. - *River-Bed Variations and Evolution of Armor Layers*. Ph.D. Thesis, The University of Iowa, Iowa, EUA, 1988.
- SONI, J. P. - *Aggradation of Streams due to Increase in Sediment Load*. Ph.D. Thesis, University of Roorkee, India, 1975.