

CARACTERIZAÇÃO DE CONFIGURAÇÕES DE FUNDO EM CANAIS DE LEITO MÓVEL SUJEITOS A SOBREALIMENTAÇÃO DE SEDIMENTOS

Elsa Alves

*Bolseira de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil
Av. do Brasil, 101, 1799 Lisboa Codex
Telefone: 8482131; Fax: 351 1 8473845
Portugal*

António H. Cardoso

*Professor Associado, Instituto Superior Técnico
Av. Rovisco Pais, 1096 Lisboa Codex
Telefone: 8418154; Fax: 351 1 8497650
Portugal*

1. INTRODUÇÃO

As intervenções humanas nos cursos de água podem introduzir alterações significativas no respectivo regime de transporte sólido, destruindo equilíbrios previamente existentes e conduzindo a erosões ou a deposições (desequilíbrios) nos leitos aluvionares com consequências negativas para o ambiente fluvial.

No estudo de situações de escoamentos com desequilíbrio entre a capacidade de transporte e a disponibilidade de sedimentos, designadamente quando ocorre o aumento repentino do volume de sedimentos afluentes a uma dada secção de um canal, surgem dificuldades decorrentes do facto de as formulações clássicas não integrarem os efeitos desses desequilíbrios. Se, para escoamentos em equilíbrio, as relações para a previsão das configurações de fundo, da resistência ao escoamento e do caudal sólido permitem prever resultados aceitáveis, estes pioram significativamente quando se trata de prever as modificações de cursos de água sujeitos a alterações do regime de caudais sólidos ou líquidos.

Recentemente foi realizado no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) um estudo experimental com o objectivo de caracterizar a evolução de escoamentos com fundo móvel sujeitos à sobrealimentação de sedimentos. O objectivo desta comunicação consiste na apresentação dos resultados referentes à caracterização das configurações de fundo observadas.

2. INSTALAÇÕES E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo foi conduzido no Canal de Inclinação Variável (CIV). Esta instalação funciona em circuito fechado, podendo recircular 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 bombadas para o tanque de montante, fechando-se deste modo o circuito do escoamento. O canal tem 40,7 m de comprimento, 2,0 m de largura e 1,7 m de altura. Na respectiva secção de jusante existe uma comporta plana vertical que permite controlar a altura do escoamento 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 CIV dispõe de um *sistema de sobrealimentação* constituído por uma tremonha e por uma lança de enchimento. A tremonha possui uma abertura regulável que permite controlar o caudal sólido de sobrealimentação.

Nos ensaios, utilizaram-se três debítmómetros electromagnéticos para medição de caudais, um seguidor de fundos, um limnómetro, 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.

Efectuaram-se dois tipos de ensaios: ensaios em equilíbrio (ou em regime) e ensaios com sobrealimentação de sedimentos. Antes do início dos ensaios em equilíbrio seleccionavam-se os valores de 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). Introduzia-se a água lentamente no canal para não perturbar o fundo móvel (previamente aplanado) constituído por areia ($D_{50} = 0,70$ mm; $\sigma_D = 1,68$). Corrigia-se, depois, o caudal. Através de levantamentos dos perfis longitudinais do fundo e da superfície livre e da observação da evolução da configuração do leito móvel procuravam-se identificar tendências sistemáticas de erosão ou de deposição ao longo do canal que se afastassem da situação de equilíbrio pretendida. Quando tais situações ocorriam procedia-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, i_f .

Os ensaios com sobrealimentação de sedimentos sucederam-se aos ensaios em equilíbrio. As variáveis de controlo, designadamente o caudal, a abertura das comportas e o declive do canal, mantinham-se inalteradas e a configuração inicial do leito móvel correspondia à obtida no ensaio em equilíbrio anterior. Introduzia-se no escoamento, através da tremonha, areia igual à do fundo.

Durante os ensaios de equilíbrio e de sobrealimentação efectuaram-se vários levantamentos de perfis do fundo e da superfície livre e media-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, media-se o avanço da “onda de deposição” no seu deslocamento para jusante.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizaram-se dez ensaios de equilíbrio (referidos por E.1 a E.10) tendo em vista a criação da situação de referência para os ensaios de deposição e seis ensaios com sobrealimentação, S.1 a S.6, precedidos dos correspondentes ensaios de equilíbrio, E.1 a E.6.

Na Tabela 1 resumem-se os valores do caudal, Q , do caudal sólido de equilíbrio, Q_{se} , da altura média do escoamento, h , da velocidade média do escoamento, U , do correspondente número de Froude, Fr , do declive da linha de energia, J , e do declive do fundo, i_f , relativos aos ensaios em equilíbrio.

Na Tabela 2 indicam-se, para os ensaios com sobrealimentação, a duração da sobrealimentação, t_s , o caudal sólido de sobrealimentação, Q_{sa} , 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 , referentes ao trecho afectado pela deposição.

Tabela 1 – Resumo das características principais dos ensaios em equilíbrio.

Ensaio	Q (m ³ /s)	Q _{se} (10 ⁻⁵ m ³ /s)	h (m)	U (m/s)	Fr (-)	J (10 ⁻³)	i _f (10 ⁻³)
E.1	0,230	3,47	0,219	0,356	0,356	1,399	0,889
E.2	0,180	4,02	0,191	0,342	0,342	1,773	2,303
E.3	0,160	0,47	0,193	0,299	0,299	0,477	0,739
E.4	0,160	2,06	0,178	0,340	0,340	1,377	1,221
E.5	0,160	(*)	0,246	0,208	0,208	0,210	0,517
E.6	0,180	(*)	0,249	0,231	0,231	0,229	0,364
E.7	0,230	9,20	0,198	0,415	0,415	2,584	2,851
E.8	0,224	4,20	0,226	0,331	0,331	1,194	1,050
E.9	0,300	4,94	0,246	0,390	0,390	2,445	3,114
E.10	0,250	3,17	0,237	0,344	0,344	1,724	2,291

(*) Ensaios com fundo plano sem transporte de material sólido.

Tabela 2 – Condições finais dos ensaios com sobrealimentação de sedimentos.

Ensaio	t _s (min)	Q _{sa} (10 ⁻⁵ m ³ /s)	h (m)	U (m/s)	Fr (-)	J (10 ⁻³)	i _f (10 ⁻³)
S.1	535	6,96	0,191	0,600	0,438	3,087	8,107
S.2	430	7,14	0,169	0,531	0,412	2,438	4,001
S.3	582	7,5	0,160	0,497	0,397	2,023	6,458
S.4	499	7,35	0,156	0,510	0,412	2,326	5,469
S.5	463	6,96	0,152	0,524	0,429	2,468	7,800
S.6	726	6,96	0,201	0,446	0,318	1,689	5,757

Na Figura 1 apresenta-se, a título de exemplo, para o ensaio S.5, o perfil do fundo e da superfície livre para a situação de equilíbrio e para a situação final do ensaio.

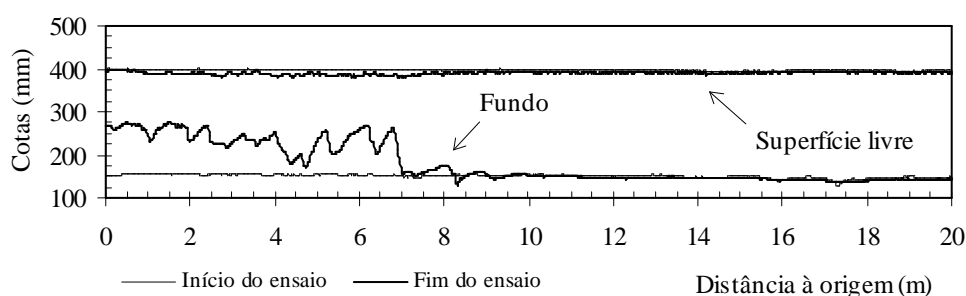


Figura 1 – Condição inicial e final para o ensaio S.5.

Nos ensaios em equilíbrio, o número de Froude foi sempre inferior a 0,42, o que garante a existência do regime inferior. Com excepção de dois ensaios, E.5 e E.6, em que o fundo permaneceu plano, as configurações de fundo dominantes foram dunas cobertas por rugas. A altura, Δ , e o comprimento, Λ , das dunas foram determinadas a partir dos registos da cota do fundo através da análise dos resíduos em torno do fundo médio (ver ALVES 1996, pág. 25). No caso dos ensaios com sobrealimentação, consideraram-se apenas as partes dos registos em que se manifesta o efeito da deposição. Na Figura 2 apresentam-se os valores da altura e da declividade

(Δ/Λ) das dunas para os ensaios em equilíbrio em função do parâmetro de transporte definido por VAN RIJN (1984), $T = (U'_*/U_{*c})^2 - 1$ em que U_{*c} é a velocidade crítica de atrito junto ao fundo para o início do movimento e $U'_* = U\sqrt{g}/C'$, $C' = 18\log(12R_f/3D_{90})$, R_f é a parcela do raio hidráulico atribuível ao fundo e D_{90} é o diâmetro de peneiração tal que 90 % em peso é mais fino. Na Figura 3 apresentam-se os resultados equivalentes para os ensaios de deposição. Traçam-se ainda as relações sugeridas por Van Rijn e as bandas de variação a que estão associados erros inferiores a 100 %.

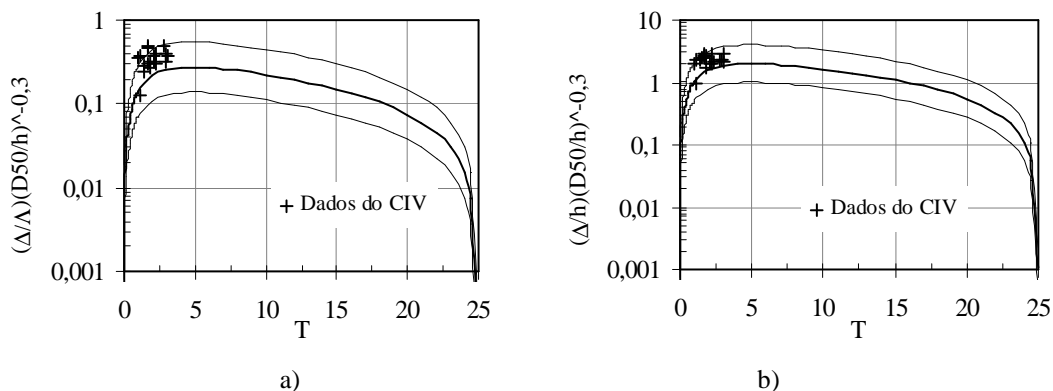


Figura 2 – Critério de Van Rijn para os ensaios de equilíbrio.

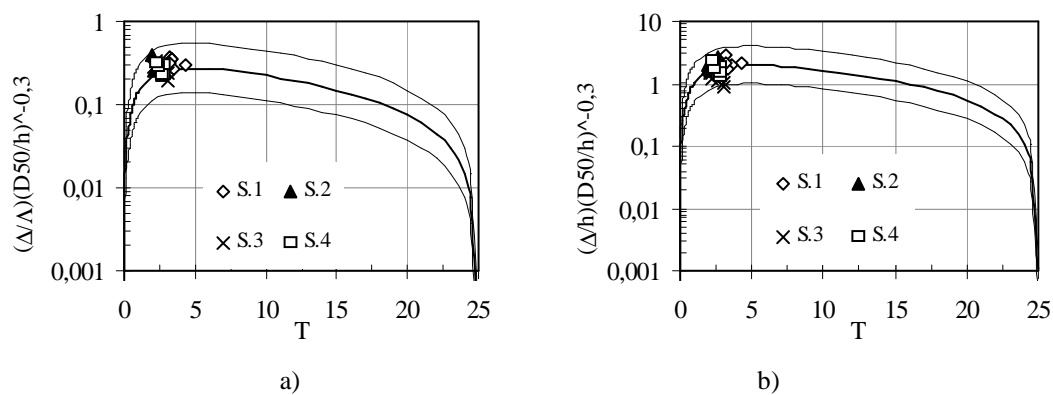


Figura 3 – Critério de Van Rijn para os ensaios com sobrealimentação.

De um modo geral, pode concluir-se que o critério de Van Rijn fornece boas previsões das dimensões das dunas. Porém, os valores observados tendem a situar-se na banda superior das previsões no caso dos ensaios em equilíbrio (o que constitui uma manifestação de que as dunas estavam completamente desenvolvidas), o mesmo não acontecendo para os trechos de deposição onde as dunas tendem a ser mais baixas e menos declivosas (ver Figura 3). O mesmo se pode concluir pela análise da Figura 4 (em particular da Figura 4b) onde se apresenta, para os ensaios com sobrealimentação, a evolução temporal do comprimento médio e da altura média das dunas adimensionalizados pelos respectivos valores de equilíbrio. As dimensões das dunas são quase sempre inferiores aos respectivos valores de equilíbrio. Porém, no ensaio S.2, em que o efeito da deposição cobre uma maior extensão de canal, a altura e o comprimento tendem a aproximar-se dos valores de equilíbrio.

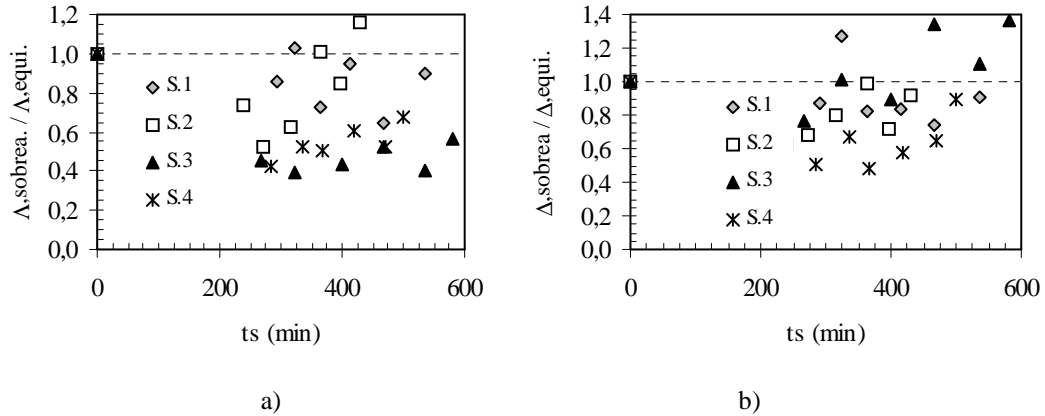


Figura 4 – Dimensões das configurações de fundo nos ensaios com sobrealimentação.

Desde os anos sessenta tem-se procurado caracterizar as dimensões das configurações de fundo a partir da função de autocovariância e do espectro dos registos das cotas do fundo. Annambhotla 1969 (SANTOS, 1975) refere que as relações estabelecidas para a obtenção da altura e do comprimento das configurações de fundo dependem do parâmetro, δ^2 , dado por $\delta^2 = 1 - m_2^2/m_0m_4$, em que m_0 , m_2 e m_4 são os momentos espectrais de ordem 0, 2 e 4, respectivamente. Quando δ^2 toma valores próximos de 1, como é o caso dos ensaios em equilíbrio e com sobrealimentação realizados, a estimativa da altura é dada pela equação,

$$\Delta = 2\sigma_y \sqrt{2 - \delta^2} \quad (1)$$

em que σ_y é o desvio padrão da elevação da cota do fundo em relação à tendência do fundo. Por outro lado, o comprimento das configurações de fundo pode ser obtido através das equações:

$$\Lambda_1 = \frac{m_0}{m_1} ; \quad \Lambda_2 = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (2a); (2b)$$

Na Figura 5 comparam-se os valores da altura, Δ , e do comprimento, Λ , das dunas observados nos ensaios em equilíbrio com os valores calculados. Apesar de as equações (1) e (2a) fornecerem, respectivamente, estimativas da altura e do comprimento das dunas por defeito e de a equação (2b) fornecer estimativas do comprimento por excesso, as previsões são aceitáveis em face das gamas de incerteza usuais neste tipo de tópicos.

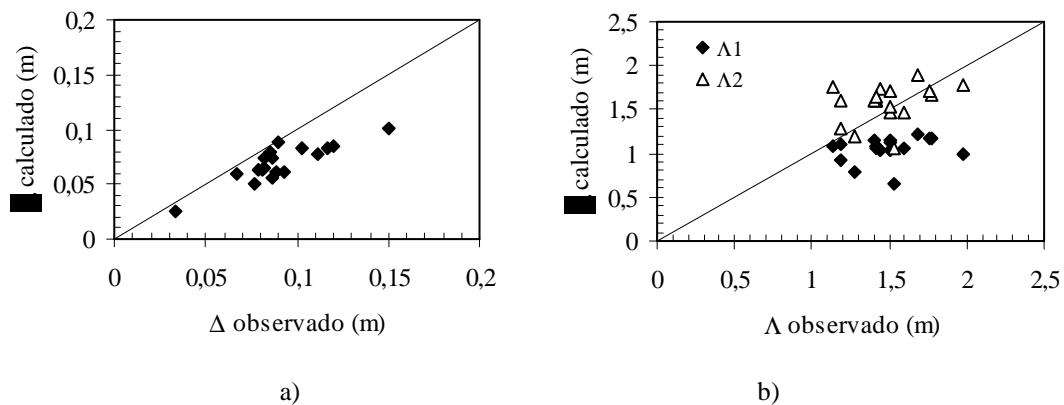


Figura 5 – Estimativa das dimensões das dunas através dos espectros. Ensaios em equilíbrio.

No caso dos ensaios com sobrealimentação, determinou-se também a altura e o comprimento das configurações de fundo através das equações (1) e (2a). Na Figura 6 apresenta-se a evolução das previsões com o decorrer dos ensaios. Nesta figura observa-se uma tendência para os valores do comprimento aumentarem após o início da sobrealimentação. Apesar de essa tendência ser menos evidente em relação à altura das configurações de fundo, esta é uma manifestação de que o fundo móvel se encontra num estado transitório na procura de um novo equilíbrio.

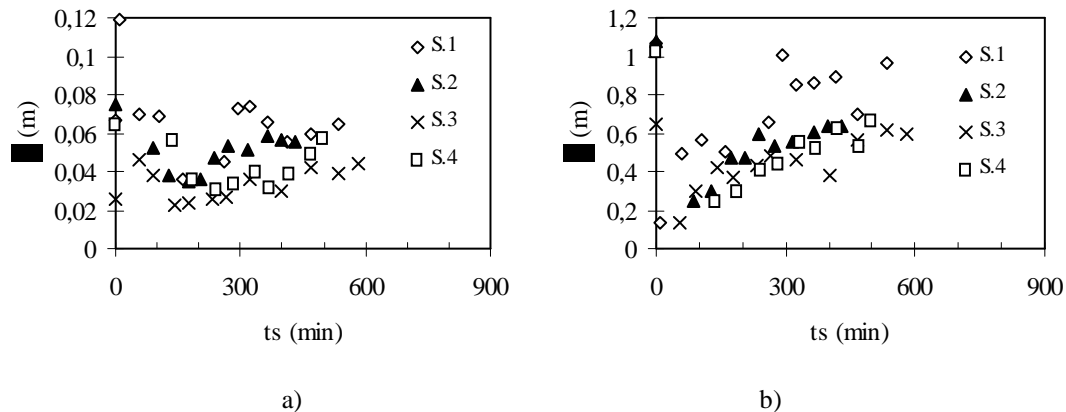


Figura 6 – Estimativa das dimensões das dunas através dos espectros. Ensaios com sobrealimentação.

A celeridade das dunas foi determinada utilizando dois procedimentos diferentes: o primeiro consistiu na análise visual directa de registos sucessivos das cotas do fundo; o segundo baseia-se na análise de correlação entre perfis do fundo em diferentes instantes de tempo. Estes procedimentos foram aplicados aos dados dos ensaios em equilíbrio e, tal como se pode observar na Figura 7a, os resultados obtidos por ambas as vias são muito semelhantes e comparáveis entre si. Kondap e Garde (GARDE e RAJU 1985, pág. 103) relacionaram a celeridade das configurações de fundo adimensionalizada, c' , e o número de Froude do escoamento, Fr , através da seguinte equação: $c' = 0,021Fr^{4,0}$, em que c' é dado por $c' = c/\sqrt{gh}$. Pela análise da Figura 7b, pode concluir-se que esta equação se ajusta de forma muito satisfatória aos valores observados nos ensaios em equilíbrio.

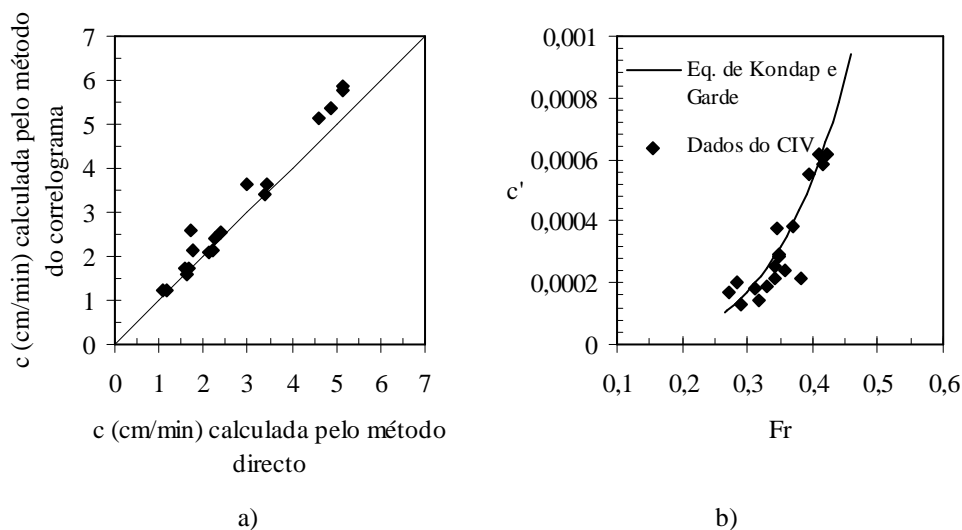


Figura 7 – Celeridades das configurações de fundo em equilíbrio.

A celeridade das dunas observadas no trecho com deposição foi determinada pelo segundo método acima referido. Na Figura 8a apresenta-se a evolução da razão entre valores da celeridade e os correspondentes valores de equilíbrio. Pode concluir-se que existe um aumento da celeridade das dunas relativamente à dos ensaios em equilíbrio. Porém, conforme se pode observar na Figura 8b, onde se comparam os valores das celeridades das dunas obtidos nos ensaios com sobrealimentação com as previsões fornecidas pela equação de Kondap e Garde, as celeridades observadas são ligeiramente inferiores às estimativas obtidas pela referida equação válida para escoamentos em equilíbrio. Isto significa que, apesar de os valores da celeridade serem superiores aos valores observados na situação de equilíbrio inicial, não chegam a atingir valores correspondentes a uma nova situação de equilíbrio.

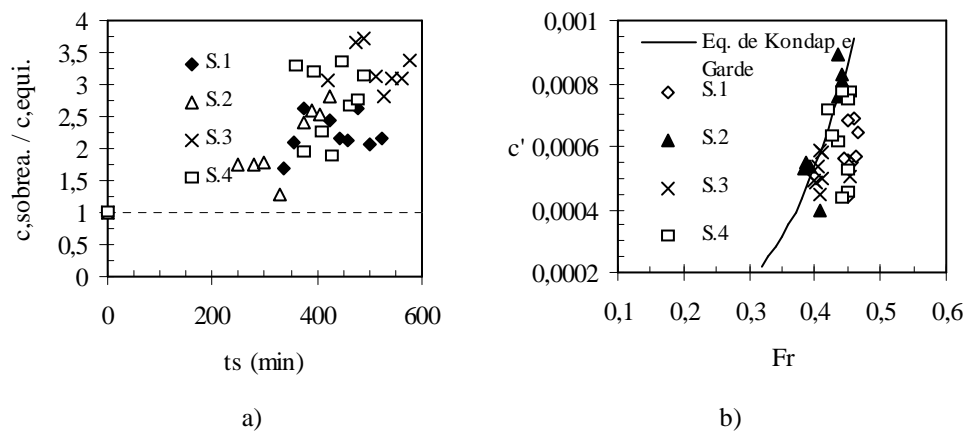


Figura 8 – Celeridades das configurações de fundo durante a sobrealimentação.

A semelhança na forma dos espectros de variância das cotas do fundo levou JAIN (1971) a procurar construir um espectro universal, função de alguns parâmetros do escoamento, que pudesse caracterizar o fundo. Jain tomou como factor de adimensionalização do número de onda, ϵ , o parâmetro $1/h\sigma_y Fr^{5/3}$ e do espectro de variância, $p(\epsilon)$, o parâmetro $hFr^{5/3}$. Na Figura 9a apresentam-se os resultados obtidos para os ensaios de equilíbrio. Na Figura 9b apresentam-se, a título de exemplo, para o ensaio S.4, os espectros de variância obtidos após o início da sobrealimentação e no final do ensaio e os limites de confiança, a um nível de 90 %, do espectro de variância obtido na situação de equilíbrio.

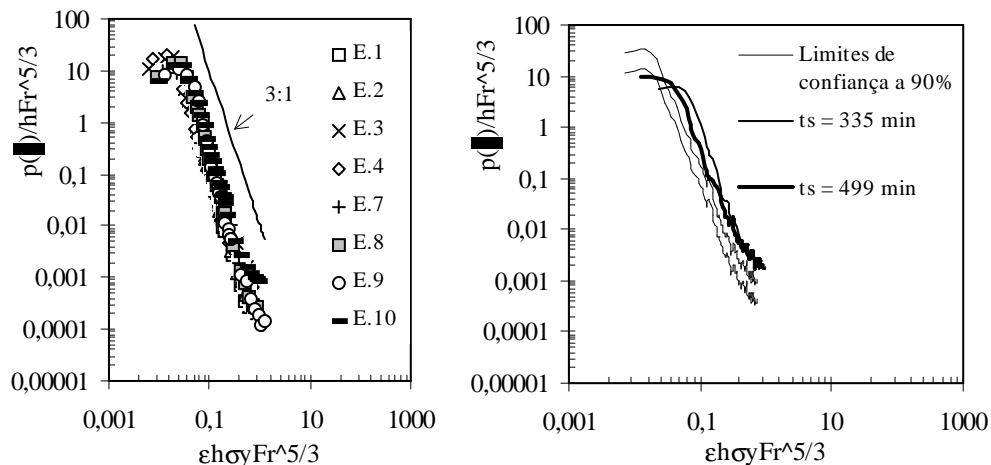


Figura 9 – Espectros adimensionais para os ensaios de equilíbrio e com sobrealimentação.

No caso dos ensaios em equilíbrio, verifica-se que os espectros adimensionalizados coincidem, convergindo para um espectro universal. Nos ensaios com sobrealimentação, os espectros não coincidem com os espectros obtidos para a situação de equilíbrio, localizando-se à direita do limite de confiança superior do espectro de equilíbrio. Este desvio da forma do espectro está relacionado com a transferência de energia espectral associada aos menores números de onda, para valores superiores de ϵ , o que resulta da diminuição das dimensões das configurações de fundo, nomeadamente do seu comprimento (ver Figura 6a), com a sobrealimentação de sedimentos.

No início da sobrealimentação verifica-se que os espectros se afastam mais dos espectros determinados para a situação de equilíbrio. No final dos ensaios, os espectros voltam a aproximar-se do espectro de equilíbrio.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo procurou-se caracterizar a evolução do fundo móvel durante os ensaios com sobrealimentação pela comparação das dimensões, celeridades e espectros de variância com os respectivos valores dos ensaios de equilíbrio. Dos resultados discutidos pode-se concluir que:

- A altura e o comprimento das configurações de fundo diminuem com a sobrealimentação de sedimentos. O critério de Van Rijn conduz a previsões aceitáveis, quer para os ensaios em equilíbrio quer para os ensaios com sobrealimentação.
- As celeridades das configurações de fundo tendem a aumentar com o aumento do número de Froude do escoamento, o que é uma consequência da diminuição da altura do escoamento e do aumento da velocidade do escoamento. Os valores observados durante a sobrealimentação são, contudo, inferiores aos fornecidos pela equação de Kondap e Garde validada para os escoamentos em equilíbrio.
- Nos ensaios em equilíbrio os espectros de variância das cotas do fundo adimensionalizados tendem a convergir para um espectro universal. O mesmo não acontece nos ensaios com sobrealimentação, apesar de se observar que, com o tempo, os espectros se aproximam dos de equilíbrio confirmando a tendência de o fundo tender a alcançar uma nova condição de equilíbrio.

5. BIBLIOGRAFIA

ALVES, E. – *Estudo experimental de escoamentos em desequilíbrio em canais com leito móvel. O caso da deposição*. Dissertação de Mestrado (Versão Provisória), Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1996.

GARDE, R. J.; RAJU, K. R. – *Mechanics of sediment transportation and alluvial stream problems*. Wiley Eastern, 2nd edition, 1985.

JAIN, S. – *Evolution of sand wave spectra*. Ph.D. Thesis, University of Iowa, Iowa, 1971.

SANTOS, M. A. – Modelação estocástica das configurações de fundo. 1º Relatório do processo *Estabelecimento de critérios de definição de curvas de vazão em leitos aluvionares*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1975.

VAN RIJN, L. C. – Sediment transport, Part III: Suspended load transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, vol. 110, No. 12, Dezembro 1984, p. 1733 – 1754.