



MODELAÇÃO FÍSICA DA EVOLUÇÃO DO PERFIL DE PRAIA A DIFERENTES ESCALAS

Francisco Sancho, Paula Freire, Filipa S.B.F. Oliveira

Núcleo de Estuários e Zonas Costeiras
LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa
fsancho@lnec.pt, pfreire@lnec.pt, foliveira@lnec.pt

RESUMO

Neste trabalho apresentam-se os principais resultados da evolução morfológica do perfil de praia, a duas escalas em modelo reduzido, com enfoque para as condições de agitação marítima do tipo erosivo. Discutem-se as analogias e discrepâncias observadas, à luz das leis de semelhança adoptadas. Conclui-se ainda, sobre a importância da cota do sopé da defesa longitudinal aderente em relação ao nível de água, com base na significância do efeito da estrutura na evolução do perfil transversal na zona adjacente à obra.

INTRODUÇÃO

A morfologia do perfil transversal de uma praia é controlada principalmente pela agitação marítima, maré e características dos sedimentos. A longo termo, é o balanço dos fluxos de sedimentos longitudinais o principal responsável pelo equilíbrio da forma plana de uma praia. Contudo, os fluxos de sedimentos transversais que controlam maioritariamente o perfil transversal de praia influenciam também a distribuição e magnitude da corrente longilitoral e, consequentemente, a deriva sedimentar litoral. O perfil transversal é assim o resultado de trocas sedimentares entre fluxos na direcção da costa e fluxos na direcção oposta (para barlar). Para além do nível do mar e das características sedimentológicas, os fluxos sedimentares transversais dependem da não-linearidade das ondas e da corrente de fundo (*undertow*).

O reconhecimento e o estudo dos processos de transporte sedimentar es têm sido conseguidos fundamentalmente através de dados adquiridos *in situ* e de modelação física. Genericamente, a modelação experimental em laboratório permite isolar e estudar os processos físicos mais relevantes, num ambiente controlado e com maior facilidade de efectuar medições. Ao revés, impede a simulação de todas as interacções (não-lineares) que ocorrem na natureza, devido quer à criação (e limitação) de condições de fronteira quer a efeitos de escala. Em modelos físicos de grande escala estes últimos efeitos são nulos ou muito reduzidos, e os processos morfodinâmicos principais são assim relativamente bem reproduzidos (e.g., Guannel *et al.*, 2007). Contudo, o custo e o tempo necessários à sua construção e utilização tornam este instrumento impraticável em inúmeros estudos. Alternativamente, a modelação física em pequena escala é limitada no respeitante à reprodução da dinâmica sedimentar, dado não se poderem satisfazer simultaneamente todas as leis de verosimilhança (Kamphuis, 1996).

Por fim, o desenvolvimento do conhecimento e da capacidade de modelação numérica tornaram esta tecnologia num instrumento mais económico e flexível no respeitante a estudos de dinâmica litoral. Contudo, os modelos numéricos são ainda limitados, em particular no respeitante à capacidade de modelação de todas as interacções não-lineares. Evidenciam-se as limitações na reprodução da dinâmica sedimentar do transporte transversal para sotamar e na zona de espraiamento. Resulta assim que o recurso à combinação de modelação física e numérica, de forma integrada e pesada, explorando as vantagens de cada abordagem, pode melhorar a capacidade de compreensão e simulação de problemas complexos de engenharia costeira.

No âmbito do sub-projecto "CoMIBBS – Composite Modelling of the Interaction between Beaches and Structures", financiado pelo projecto europeu "HYDRALABIII – Integrated Infrastructure Initiative", estudou-se a evolução morfológica do perfil transversal de uma praia arenosa artificializada com uma defesa longitudinal aderente (vulgo "paredão"), através de uma

metodologia integrada que combina modelação física com modelação numérica (Fortes et al., 2008, Freire et al., 2009).

Efectuaram-se ensaios em laboratório a duas escalas de comprimento, 1:6 (canal COI2) e 1:13 (canal COI1), respectivamente, relativamente a um protótipo semelhante à configuração existente na Praia de Buarcos. Estes ensaios foram executados em dois canais de ondas irregulares distintos (Figura 1), com diferentes condições de agitação marítima (representadas pela altura de onda significativa e período de pico), conduzindo a erosão ou acumulação na baixa-praia. Mediu-se a evolução do perfil de praia, periodicamente, desde o início do ensaio até ao final do mesmo, definido como sendo o tempo em que se atingem condições próximas da estacionaridade do perfil. Mediram-se ainda, em alguns pontos ao longo do perfil, a elevação da superfície livre e a velocidade do fluido a várias profundidades. Em ambas as escalas, efectuaram-se ensaios com dois níveis de água diferentes, em relação à base da obra de defesa marginal, simulando dois níveis de maré (ou de sobrelevação).

Neste trabalho apresentam-se os principais resultados da evolução morfológica do perfil de praia, às diferentes escalas. Discutem-se as analogias e discrepâncias observadas, à luz das leis de semelhança adoptadas. Analisa-se, ainda, a importância da cota do sopé da obra de defesa em relação ao nível de água, pela significância do efeito da estrutura na evolução do perfil transversal na zona adjacente à obra.

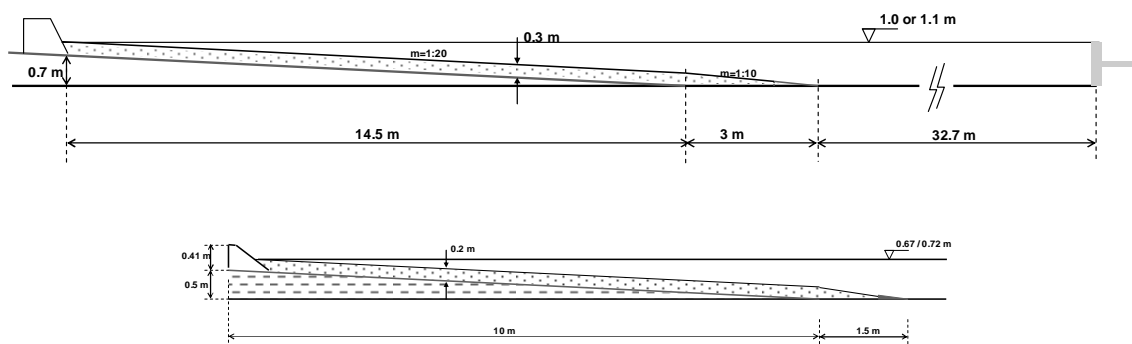


Figura 1 – Configuração geométrica dos perfis de praia laboratoriais iniciais, no canal, COI2 (em cima) e no canal, COI1 (abaixo).

DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE SEMELHANÇA, MODELOS FÍSICOS E ENSAIOS

Conforme descrito acima, pretendeu-se estudar a evolução morfológica do perfil de praia sob diferentes condições de agitação marítima, em dois modelos físicos a diferentes escalas, sendo uma considerada mais próxima do protótipo (escala 1:6) e outra menor. O objectivo da condução de ensaios a duas escalas era a melhor compreensão dos efeitos e leis de escala, de forma a otimizar a realização de ensaios experimentais de dinâmica sedimentar.

A geometria dos perfis de praia e as características da hidrodinâmica e dos sedimentos nos modelos, contudo, tinham as seguintes limitações: i) serem realizáveis nos canais de ondas existentes no LNEC tendo em conta as suas dimensões físicas; ii) adaptarem-se à geometria pré-definida de outros ensaios paralelos, em modelo com fundo rígido (Fortes et al., 2008); iii) utilizar-se água no canal, em vez de outro fluido com densidade diferente; iv) utilizarem-se sedimentos naturais (ou fabricados) de quartzo, isto é, com densidade igual à do protótipo, e v) reproduzir-se um protótipo cujos sedimentos fossem relativamente grosseiros, de forma a que as dimensões dos sedimentos nos modelos físicos fossem ainda do tipo de areia média a fina, e não menores, que conduziriam a um comportamento dinâmico diferente do de areias.

Face às limitações enunciadas, escolheu-se para protótipo a Praia de Buarcos, que foi alvo de estudos detalhados na última década (Freire et al., 2002, 2004; Laranjeiro et al., 2002, 2003;



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

Oliveira, 2002; Oliveira et al., 2002). Tanto o declive de praia como a existência de defesa longitudinal aderente (vulgo “paredão”) desta praia ajustavam-se às condições de ensaio. De acordo com os estudos acima referidos, as dimensões dos sedimentos em Buarcos variam entre $0.5 \leq D_{50} \leq 1.6\text{mm}$ (sendo D_{50} o diâmetro mediano), variando com a data e a posição (transversal e longitudinal) da amostra. Adoptou-se assim o valor de $D_{50} \approx 1.1\text{mm}$ para os cálculos de escalas.

As escalas de comprimento e de outras grandezas físicas resultaram da selecção das grandezas adimensionais consideradas mais relevantes para os fenómenos em causa. Em ensaios em modelo físico com fundo móvel são 8 as variáveis independentes (Kamphuis, 1985): altura de onda, H , período de onda, T (ou T_p para o período de pico), profundidade, h , densidade do fluido, ρ , viscosidade cinemática do fluido, ν , aceleração gravítica, g , diâmetro característico dos sedimentos, D_{50} , e densidade dos sedimentos, ρ_s . Recorrendo ao teorema de Buckingham obtêm-se 5 números adimensionais independentes (de Froude, de Reynolds, de Rouse, de Shields, e peso imerso dos sedimentos), que idealmente deveriam ser iguais no protótipo e no modelo reduzido. Sendo tal geralmente muito difícil, resultou mesmo impossível nos presentes ensaios devido às limitações acima enunciadas, em particular as referentes às densidades do fluido e dos sedimentos, ambas iguais nos modelos e no protótipo.

No referente à hidrodinâmica, de forma a reproduzir-se correctamente a transformação de ondas ao longo do perfil (Dean e Dalrymple, 2001), considerou-se a escala de comprimentos única, isto é, não distorcida:

$$n_H = n_L = n_h, \quad (1)$$

em que n representa a relação de escala protótipo-modelo e os índices significam altura de onda (H), comprimento de onda (L) e profundidade (h). Pela mesma razão, estabeleceu-se ainda a semelhança de Froude, isto é, que os números de Froude, $Fr = H_s \pi / T_p \sqrt{gh}$, nos modelos e no protótipo fossem iguais. As relações de escala de velocidades (U) e de tempos (T) resultaram assim:

$$n_U = n_T = (n_L)^{0.5} = (n_H)^{0.5} = (n_h)^{0.5}. \quad (2)$$

Relativamente ao transporte de sedimentos e devido à complexidade deste processo, não é possível obter perfeita similitude simultaneamente no transporte em suspensão e por arrastamento, mantendo a escala de densidades dos sedimentos unitária (Alsina et al., 2007). Tal é corroborado pelos resultados de Grasso et al. (2009), que não cumpre a relação de escalas do peso imerso dos sedimentos, em consequência da escolha para o modelo de sedimentos grosseiros de baixa densidade.

Vulgarmente, para o transporte por arrastamento, a dimensão dos sedimentos é reduzida à escala, mantendo a semelhança entre o número de Froude densimétrico e a densidade de sedimentos relativa. Para o transporte em suspensão as relações de escala são normalmente baseadas na velocidade de queda dos sedimentos. De acordo com Alsina et al. (2007), obtêm-se melhores semelhanças entre protótipo e modelo, relativamente ao transporte de sedimentos ao longo do perfil de praia e à sua variação morfológica, assegurando relações de escala para o transporte em suspensão. Assim, adoptou-se este princípio no presente trabalho. A similitude do transporte em suspensão pode ser traduzida pelo número de Dean (1973), ou de velocidade de queda adimensional:

$$\Omega = \frac{H}{T w_s}, \quad (3)$$

em que w_s é a velocidade de queda dos sedimentos imersos (no presente trabalho adoptou-se a formulação de Jiménez e Madsen (2003) para o seu cálculo). Refira-se ainda que o número de Dean foi anteriormente definido por Gourlay (1968) para estimar condições de agitação marítima erosivas e acumulativas (conduzindo à acreção da praia) quando $\Omega > 2$ e $\Omega < 1$, respectivamente. Por outro lado, é um parâmetro amplamente utilizado para a classificação modal de “tipos de praia” (Wright e Short, 1984): reflectivas, $\Omega < 1$; intermédias, $1 < \Omega < 5$; e



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

dissipativas, $\Omega > 5$. Daí a importância acrescida de também se procurar a similitude de Ω em protótipo e em laboratório.

A relação de escalas para a modelação do transporte em suspensão e da variação morfológica num modelo não-distorcido é segundo van Rijn, 2007:

$$n_{D50} = (n_h)^{0.56}, \quad (4)$$

em que n_{D50} representa a escala do diâmetro mediano dos sedimentos. Assim, na Tabela 1 apresentam-se as relações de escala utilizadas para os ensaios efectuados, das quais resulta uma relação entre as duas escalas dos modelos de 2.22.

Tabela 1 – Escalas no protótipo e modelos.

	Protótipo	COI1	COI2
n_h	1	6	13.3
n_{D50}	1	2.73	4.26
$D_{50, \text{model}} \text{ (mm)}$	1.09	0.4	0.256

De acordo com Ribberink (2007), seria também desejável que o parâmetro de Shields (ou “número de mobilidade”),

$$\Psi = \frac{U^2}{\Delta g D_{50}}, \quad (5)$$

fosse constante entre modelo e protótipo, já que o mesmo controla o regime de transporte de sedimentos junto ao fundo. Na equação anterior, $\Delta = (\rho_s - \rho)/\rho$, e U representa a velocidade orbital devido ao movimento ondulatório junto ao fundo, $U = \pi H / (T \sinh(kh))$. No entanto, para sedimentos com densidades iguais, tal é incompatível com o critério de semelhança definido para o transporte em suspensão (Ribberink, 2007). Este autor sugere que, nesse caso, se executem ensaios em modelo mantendo o mesmo regime de fundo que ocorre no protótipo. Tal condição foi verificada para o caso de estudo (Tabelas 2 a 4). Acrescente-se ainda que o número de Shields acima apresentado (eq. (5)), é uma simplificação da sua definição, $\Psi = \tau / \Delta g D_{50}$, em que τ representa a tensão de corte (ou de atrito) junto ao fundo, proporcional ao quadrado da velocidade orbital, $\tau \propto f_w U^2$. Assim, na comparação do número de mobilidade de acordo com a eq. (5), admite-se que o factor de atrito, f_w , é igual no modelo e no protótipo (o que dificilmente será verdadeiro, dado que f_w depende de D_{50} e da amplitude do movimento orbital (e.g., Swart, 1974).

Por fim, Grasso et al. (2009) verifica a semelhança do número de Rouse, ϕ , definido como:

$$\phi = \frac{w_s}{u'}, \quad (6)$$

em que u' representa a intensidade (velocidade) turbulenta do escoamento,

$$u' = \kappa \sqrt{f_w / 2} A 2\pi / T_p,$$

sendo κ a constante de von Karman (0.4), e A a amplitude orbital do escoamento oscilatório junto ao fundo. Segundo aqueles autores, o número de Rouse é relevante para caracterizar o movimento dos sedimentos em suspensão num escoamento turbulento como aquele sob ondas na rebentação. Utilizou-se ainda a expressão proposta por Swart (1974) para o cálculo do coeficiente de atrito, f_w ,



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

$$f_w = \exp\left(5.213(2.5D_{50}/A)^{0.194} - 5.977\right).$$

Nas tabelas 2 e 3 apresentam-se os parâmetros hidrodinâmicos (h , H_s e T_p) relativos aos ensaios efectuados em ambos os modelos, às escalas 1:6 e 1:13, respectivamente, bem como os valores dos números adimensionais indicados anteriormente (Ψ , Ω , ϕ , Fr). Note-se que estes últimos parâmetros foram calculados à profundidade $h=2.5H_s$, estimada como a profundidade onde ocorre rebentação das ondas. Outros autores, p.ex., Grasso et al. (2009), optaram por calcular os mesmos números adimensionais a maior profundidade, mais próxima da profundidade de fecho ($h=4H_s$, no caso apresentado). Efectivamente, aqui optou-se pela profundidade de rebentação, por ser nas suas imediações onde haverá maior quantidade de sedimentos em suspensão que se reflecte na escala de Dean.

Tabela 2 - Ensaio na escala 1:6; $D_{50}=0.4$ mm.

Teste	h_0 (m)	H_s (m)	T_p (s)	Duração (hr)	ψ^*	Ω^*	ϕ^*	Fr^*
L1E	1.0	0.37	3.27	12	48	2.4	2.6	0.12
L1A	1.0	0.22	3.27	16	32	1.4	3.1	0.09
L2E	1.1	0.37	3.27	12	48	2.4	2.6	0.12
L2A	1.1	0.22	3.27	16	32	1.4	3.1	0.09
L3E (L4E)	1.1	0.37	4.08	12 (14)	53	1.9	2.6	0.09
L3A	1.1	0.22	4.08	20	33	1.1	3.1	0.07

* Calculado à profundidade $h=H_s/0.4$

Tabela 3 - Ensaio na escala 1:13; $D_{50}=0.256$ mm.

Teste	h_0 (m)	H_s (m)	T_p (s)	Duração (hr)	ψ^*	Ω^*	ϕ^*	Fr^*
S1E	0.67	0.19	2.23	8	37	3.1	2.0	0.12
S2E	0.67	0.17	1.80	6.4	30	3.5	2.1	0.15
S2A	0.67	0.10	1.80	3.2	21	2.0	2.5	0.11
S3E	0.67	0.17	2.80	16.7	38	2.2	2.1	0.09
S3A	0.67	0.10	2.80	14.7	24	1.3	2.5	0.07
S4E	0.72	0.19	2.23	10.7	37	3.1	2.0	0.12
S4A	0.72	0.10	2.23	12	23	1.7	2.5	0.09

* Calculado à profundidade $h=H_s/0.4$

Tabela 4 - Condições no protótipo; $D_{50}=1.09$ mm.

Condição	h_0 (m)	H_s (m)	T_p (s)	Duração (hr)	ψ^*	Ω^*	ϕ^*	Fr^*
1E	6.0	2.25	8	29	107	2.4	2.9	0.12
1A	6.0	1.3	8	39	69	1.4	3.5	0.09
3E	6.0	2.25	10	29	117	2.0	2.9	0.10
3A	6.0	1.3	10	49	72	1.1	3.5	0.07

* Calculado à profundidade $h=H_s/0.4$

Nestas tabelas, a primeira letra do nome do teste refere-se à escala ($L=1:6$, $S=1:13$); segue-se um número sequencial do teste, e uma letra que indica condições mais erosivas (E) ou de acreção (A). Refira-se que a estimativa de condições erosivas ou acrecivas advém do trabalho experimental de Gourlay (1968), o qual indica que as mesmas ocorrem para $\Omega > 2$ ou $\Omega < 1$,



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

respectivamente. Contudo, recentemente, Grasso et al. (2009) concluem que este parâmetro por si só não determina se a praia se encontra em erosão ou sedimentação.

A profundidade h_0 refere-se àquela em frente ao gerador de ondas (Figura 1). Nos ensaios onde h_0 é maior, o nível de água toca o sopé do encontro da estrutura de retenção com o perfil inicial da praia. Este último é um plano inclinado com declive igual a 1:20 no início de todos os ensaios erosivos, à excepção do ensaio L4E. Para os ensaios com condições de agitação menos energéticas, provavelmente do tipo de acreção (de acordo com os valores de Ω), o perfil inicial era o resultante dos ensaios erosivos.

Na tabela 4 apresenta-se as condições em protótipo que se pretenderam reproduzir em modelo reduzido.

Focando nos testes L1E (Tab. 2), S1E (Tab. 3) e condição 1E (Tab. 4), efectivamente, a escolha da escala de sedimentos de acordo com o critério de van Rijn (2007), eq. (4), implica que o número de Dean Ω seja igual no protótipo e nos modelos. No entanto, a condição S1E não corresponde exactamente às das outras escalas por ter uma altura de onda superior à que seria equivalente, o que induz um número de Dean superior (supostamente, conduzindo a uma agitação mais erosiva). De igual modo, as condições L1A, S4A e 1A deveriam ter igual Ω , tal não se verificando para a escala mais pequena por, novamente, se ter escolhido uma altura de onda superior à da escala correspondente. Saliente-se que os testes efectuados na escala mais pequena não correspondem exactamente às condições (à escala) dos ensaios na escala maior; tal resulta do facto de em ensaios preliminares no canal de menores dimensões não se terem observado as variações morfológicas expectáveis e daí se ter procedido a um ajuste dos parâmetros hidrodinâmicos.

A comparação entre os números adimensionais correspondentes às condições em protótipo (Tab. 4) e modelos reduzidos (Tab.s 2 e 3) é apresentada graficamente na Figura 2. Nos painéis da esquerda ilustram-se as condições do tipo “erosivo”, enquanto à direita as do tipo “de acreção”. É imediatamente visível que o número de mobilidade (ou de Shields), Ψ , é assaz diferente nos modelos e no protótipo, sendo substancialmente superior neste último caso, indicando assim maior capacidade de mobilização dos sedimentos do fundo. Contudo, esta diferença seria amenizada se atendêssemos aos valores dos coeficientes de atrito, calculados em modelo e protótipo. Efectivamente, por exemplo, obtém-se os valores $f_w=0.016$, 0.015 e 0.011 para as ondas de cálculo S1E, L1E e 1E, respectivamente, o que indica que nos modelos o factor de atrito é superior em cerca de 40% ao valor correspondente no protótipo, o que atenuaria as diferenças encontradas para o número de mobilidade Ψ na mesma percentagem.

Relativamente ao número de Dean, Ω , eles são próximos em modelo e protótipo, excepto para algumas condições no modelo mais pequeno, à escala 1:13, como acima referido. Quanto ao número de Rouse, ϕ , verifica-se que são muito semelhantes entre o protótipo e o modelo de escala maior, mas ligeiramente inferiores para os ensaios à menor escala. Atendendo à sua definição, eq. (6), isto significa que na pequena escala existe proporcionalmente maior turbulência que na outra escala.

Por fim, confirma-se na Figura 2 a semelhança de Froude para as condições erosivas 1E, L1E, L2E, S1E e S4E, e as condições “de acreção” 1A, L1A, L2A e S4A, tal como pretendido. As condições 3E, L3E e S3E, bem com as 3A, L3A e S3A, também estão correctamente similares.

Nos ensaios a maior escala registaram-se os perfis de praia ao fim de cada hora nos ensaios erosivos, e a cada duas horas nos ensaios de acreção utilizando-se um perfilador de fundo automático. Efectuou-se igualmente um registo fotográfico nos mesmos instantes. Mediram-se ainda, em alguns pontos ao longo do perfil, a elevação da superfície livre e a velocidade do fluido a várias profundidades (nos primeiros 25 minutos de cada ensaio). Na escala menor as medições do perfil de praia efectuaram-se em tempos distintos: a cada 40 min na série S1 e S4, 32 min na série S2, e 100 min na série S3. Os registos da elevação da superfície livre tiveram a duração de 20 min.

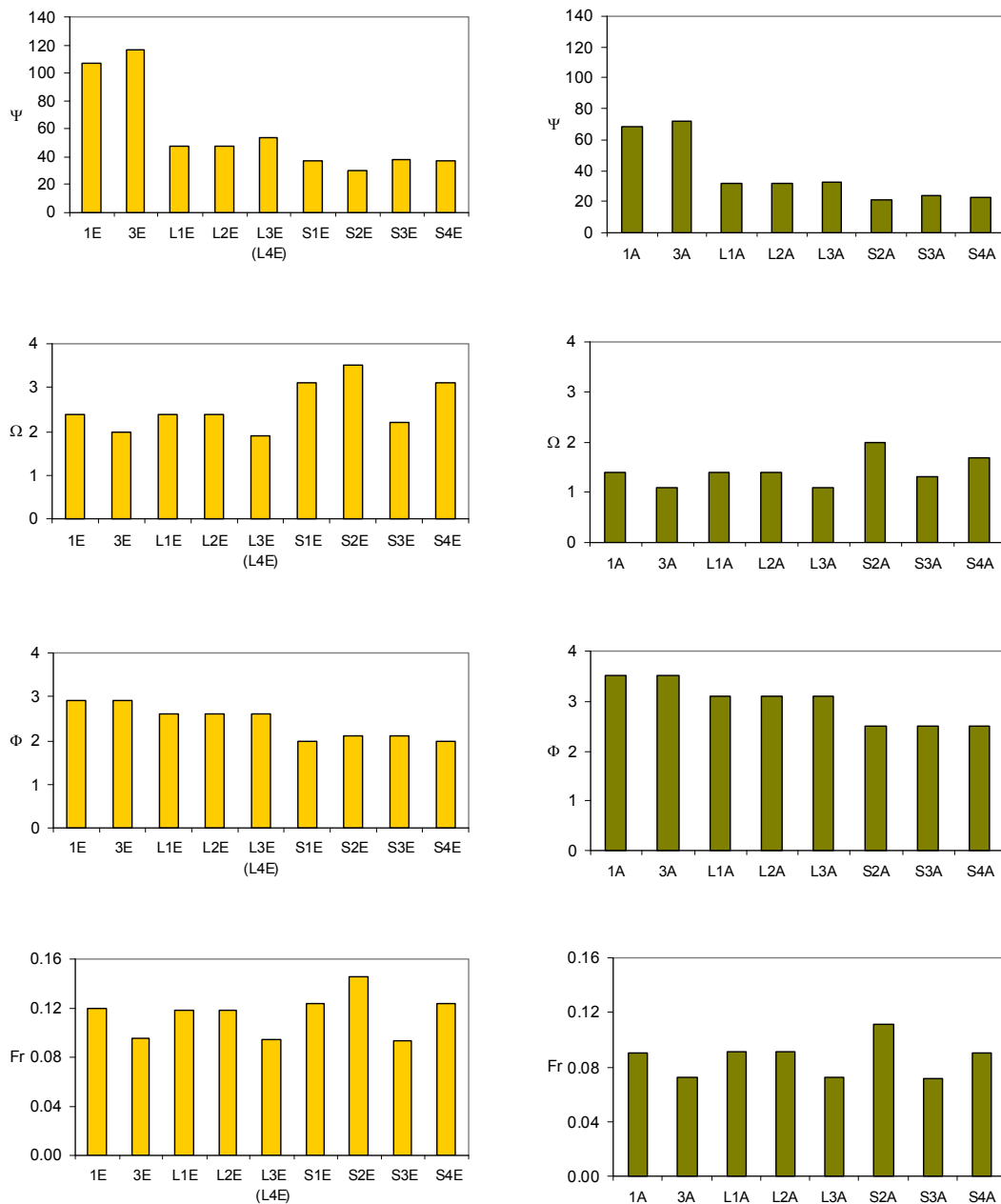


Figura 2 – Valores do número de mobilidade, Ψ , número de Dean, Ω , número de Rouse, ϕ , e número de Froude, Fr, para as condições em protótipo e modelos do tipo erosivo (esquerda) e acrecivo (direita).

RESULTADOS DOS ENSAIOS EROSIVOS

Primeiramente, apresentam-se os resultados da evolução morfológica do perfil de praia, em ambas as escalas, para os ensaios erosivos e sem o efeito da estrutura (isto é, para os menores níveis de água). Na Figura 3 comparam-se os perfis de praia resultantes do ensaio de grande escala L1E (gráfico à direita) com os dos ensaios em pequena escala S1E, S2E e S3E (gráfico à esquerda). Note-se que esta figura permite comparar directamente os resultados dos ensaios, dado que as dimensões dos eixos verticais e horizontais dos 2 gráficos estão exactamente à escala entre os dois modelos, i.e., 1:2.2. Por outro lado, registe-se ainda que se apresentam as variações morfológicas que ocorreram após durações equivalentes do ensaio (tomando como referência a escala de tempos expressa pela eq. (2)).

Duas conclusões imediatas se retiram desta confrontação: i) a variação morfológica foi distinta em ambas as escalas, desenvolvendo-se uma barra de rebentação com profundidade ~30 cm no ensaio de grande escala L1E e uma plataforma de rebentação (com profundidade ~10 cm) nos ensaios na pequena escala (S1E, S2E e S3E); ii) a variação do período de onda nos ensaios de pequena escala não teve efeitos notórios na evolução morfológica do perfil de praia. Aliás, esta segunda conclusão também decorre da comparação de perfis de praia medidos após idêntico número de ondas incidentes.

Note-se que, apesar dos perfis de praia de ambos os modelos serem distintos, eles possuem todavia muitas semelhanças na região da face da praia, próxima da estrutura. Com efeito o perfil de praia entre a estrutura e o ponto de máxima erosão tem declive e extensão semelhantes em ambos os casos, diferindo substancialmente desse ponto até ao sopé da praia submersa. Nesta última região, efectivamente, observam-se enormes diferenças entre os perfis obtidos nas duas escalas, com realce para a mobilização de sedimentos no ensaio de escala maior em toda praia submersa, enquanto na pequena escala não houve modificação significativa do fundo em profundidades superiores a 10 cm.

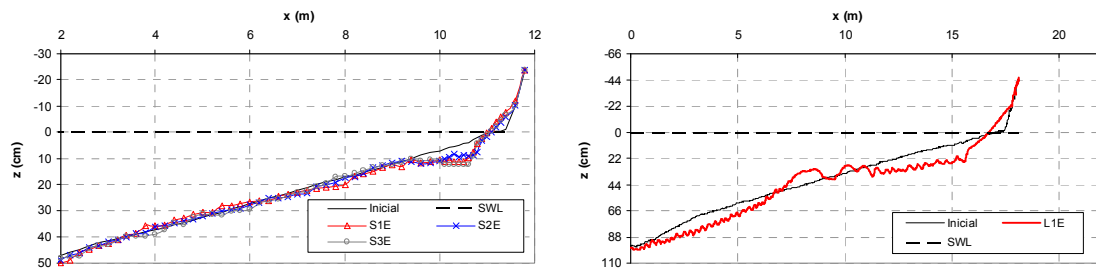


Figura 3 – Evolução do perfil de praia nos ensaios com menor nível de água (com pouca interferência da estrutura), em instantes equivalentes. Eixos verticais e horizontais estão à escala exacta entre as duas figuras. **Esquerda:** ensaios na pequena escala; **Direita:** ensaios na grande escala.

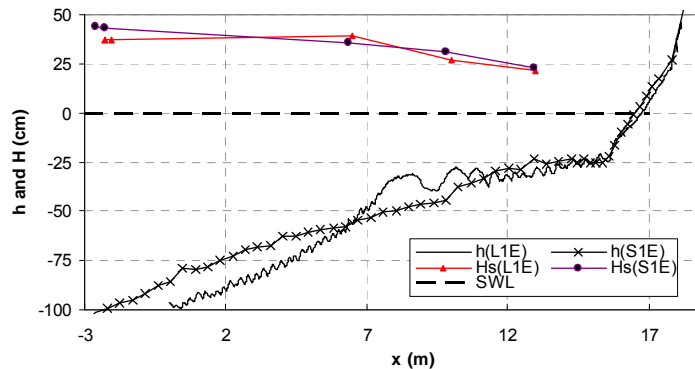


Figura 4 – Altura de onda significativa nos ensaios erosivos L1E e S1E, referida às dimensões da grande escala.

A variação da altura de onda significativa (obtida por análise espectral) ao longo do perfil de praia, para os ensaios erosivos L1E (larga escala) e S1E (pequena escala), é ilustrada na Figura 4. Nesta figura, os resultados dos ensaios de pequena escala são multiplicados pela relação de escalas de comprimentos entre os dois modelos, $n_H=2.22$. Observa-se que existe uma boa semelhança hidrodinâmica entre estes dois resultados, pois a altura de onda segue uma variação idêntica em ambos, principalmente na região de rebentação das ondas ($x > 5$ m) apesar da configuração do fundo após tempos idênticos (à escala) de duração do ensaio ser distinta. Contudo, apesar da aparente semelhança hidrodinâmica, nas sondas colocadas mais

ao largo, onde raramente ocorre rebentação, a altura de onda foi superior (à escala) nos ensaios de pequena escala.

Analisando esta variação da altura de onda e do perfil de praia à luz dos parâmetros adimensionais apontados anteriormente, (Ψ , Ω , ϕ , Fr), a diferença mais notória entre estes dois ensaios reside no número de Dean, Ω , que é cerca de 30% superior para o ensaio de pequena escala S1E, em relação ao ensaio L1E, o que sugeriria maior potencial erosivo para esse caso. Por outro lado, o número de Rouse, ϕ , é cerca de 20% inferior para o ensaio S1E, o que também indicaria maior turbulência para o escoamento na pequena escala. Assim, embora ambos estes parâmetros sugiram maior movimentação de sedimentos para o ensaio na pequena escala, foi observado o oposto não se tendo ainda encontrado explicação plausível.

A evolução do perfil de praia para os testes com um nível de água superior, e consequente interacção forte entre a estrutura marginal e o escoamento (e a morfodinâmica), em grande e pequena escala, é apresentada na Figura 5. Tal como anteriormente, a comparação directa (em resultado da equiparação de escalas de ambos os ensaios) entre estes resultados permite concluir que a evolução morfológica da praia não foi semelhante nas duas escalas. Apesar das diferenças, em ambos os casos observou-se o crescimento de uma barra de rebentação, embora em diferentes posições. Encontraram-se igualmente, entre os ensaios às duas escalas, magnitudes semelhantes de erosão no sopé da estrutura.

A Figura 5 mostra ainda que o prolongamento da duração do ensaio de pequena escala de 8 hr para 11 hr não provocou nenhuma variação significativa do fundo. Efectivamente, a maioria das variações do perfil de fundo ocorreram nas primeiras 5 hr de ensaio, atingindo-se um determinado equilíbrio morfológico. A posterior continuação do ensaio induziu somente pequenas alterações do perfil do fundo.

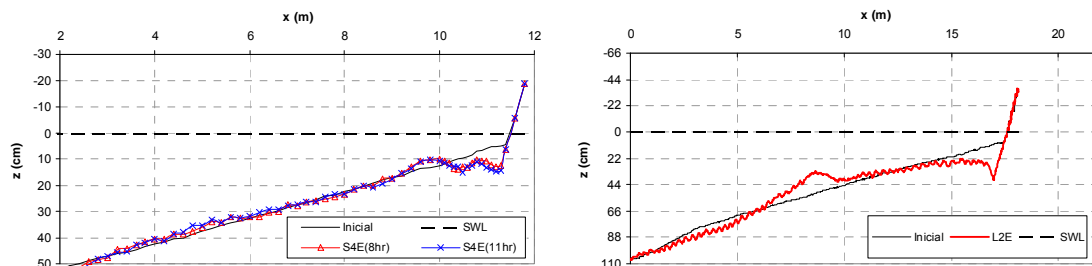


Figura 5. Evolução do perfil de praia nos ensaios com nível de água superior (com elevada interacção da estrutura), em instantes equivalentes. Eixos verticais e horizontais estão à escala exacta entre as duas figuras. **Esquerda:** ensaios na pequena escala; **Direita:** ensaios na grande escala.

Em suma, as figuras 3 e 5 permitem concluir que, geralmente, uma região muito menor do perfil (aproximadamente entre a linha de costa e o sopé do terraço ou barra) sofreu alterações morfológicas nos ensaios em pequena escala, relativamente ao verificado nos ensaios de grande escala. Na pequena escala, esta região estende-se por cerca de 2 m, enquanto que na grande escala ela cobre ~10 m, o que é muito superior ao comprimento de ~4.5 m que se obteria se houvesse semelhança morfológica entre os dois modelos.

Comparando os resultados obtidos para os dois níveis de água ensaiados na grande escala, em condições de erosão (L1E e L2E), isto é, com e sem interacção da estrutura (painéis à direita da Figura 5 e 3, respectivamente), reconhece-se que a evolução morfológica do perfil de praia foi idêntica em quase toda a sua extensão, com excepção da erosão significativa que ocorreu no sopé do “paredão”, descalçando-o parcialmente. No restante, a crista da barra está aproximadamente à mesma profundidade e na mesma localização entre os dois ensaios, o mesmo acontecendo relativamente às características da fossa entre a crista e a linha de costa.

Tal fenómeno de erosão (no ensaio L2E) ocorre em parte devido à reflexão parcial das ondas que ocorre no caso em que o nível de água é superior. A onda reflectindo-se na estrutura forma



um anti-nodo parcial junto a esta, aonde ocorrem movimentos verticais máximos do escoamento, conduzindo a um aumento do transporte sedimentar e à erosão.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Voltando à análise dos parâmetros adimensionais e dos resultados da evolução dos perfis de praia, conclui-se que os ensaios erosivos em modelo reduzido conduzidos a escalas distintas, com relação de escala de 2.22, têm fundamentalmente números de Dean, Ω , diferentes (Figura 2): $\Omega=2.4$ no caso de escala maior (L1E) e $\Omega=[3.1, 3.5, 2.2]$ nos casos de pequena escala (S1E, S2E, S3E). Os números de Shields, Ψ , são também ligeiramente inferiores nos ensaios de pequena escala, bem como os números de Rouse, ϕ . Assim, seria de esperar que a alteração do número de Dean fosse o principal responsável pela variação da resposta morfológica da grande para a pequena escala, nos ensaios erosivos. No entanto, tal não é plausível, já que nos ensaios em pequena escala se obteve exactamente o mesmo comportamento morfológico para os ensaios com três números de Dean ($\Omega=[3.1, 3.5, 2.2]$) que compreendem o valor utilizado no ensaio de grande escala.

Por outro lado, é relevante compararmos o perfil de praia obtido nos ensaios erosivos com aqueles obtidos por Grasso et al. (2009), num canal distinto e com sedimentos grosseiros de baixa densidade, para valores do número de Dean análogos. Note-se que estes autores concluem que para $\Omega \approx 1$ se obtêm perfis de praia reflectivos, para $\Omega \approx 2.5$ formam-se praias com terraços submersos mais ou menos longos e com uma baixa-praia algo reflectiva, com declive da ordem de 1:10, e para $\Omega \approx 3.7$ se obtém um perfil composto por uma parte submersa com declive suave (mas não em forma de terraço) e uma face de praia ligeiramente reflectiva, semelhante à anterior (declive $\approx 1/10$).

Na Figura 6 apresenta-se os perfis de fundo finais obtidos por Grasso et al. (2009), para três condições hidrodinâmicas com $\Omega \approx 2.5$. Em todos eles observam-se terraços de rebentação, sendo no entanto uns mais longos que outros. Comparando estes resultados com os apresentados anteriormente, sem interacção de estrutura (Figura 3), podemos concluir que o perfil final obtido apresenta igualmente a forma de terraço, mais alongado no ensaio de larga escala, e mais curto nos ensaios de pequena escala. Assim, à luz dos resultados destes autores, e apesar de no presente estudo não se ter obtido semelhança morfológica nos ensaios às diferentes escalas, o comportamento é dentro da gama observada pelos mesmos. Futuramente, procurar-se-á compreender melhor a razão porque condições de agitação e sedimentológicas com idênticos números de Dean podem conduzir a perfis de equilíbrio com terraços/barras distintas.

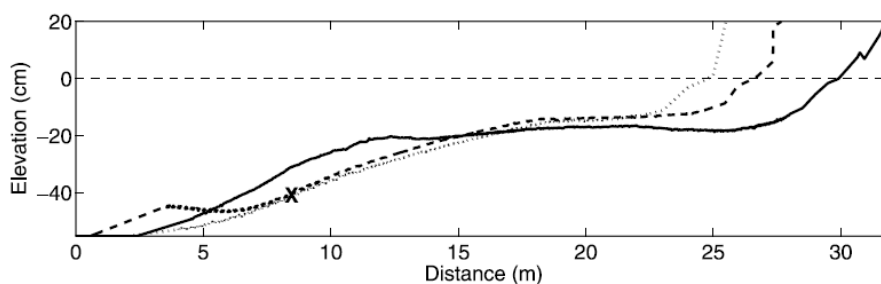


Figura 6 – Perfis de fundo finais obtidos por Grasso et al. (2009) para três casos com $\Omega \approx 2.5$.

Refira-se ainda que nos últimos anos (2007-2009) outros ensaios em diferentes escalas foram efectuados no âmbito do sub-projecto "SANDS: Scaling and Analysis and New instrumentation for Dynamich bed TestS", financiado pelo projecto europeu "HYDRALABIII – Integrated Infrastructure Initiative". Em ensaios desenvolvido em três canais (e.g., Cáceres et al., 2008), a três diferentes escalas, procurou-se compreender melhor as relações de escala e de



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

semelhança morfológica entre modelos, tal como aqui. Assim, importará também futuramente contrapor os resultados obtidos nesses ensaios com os presentes, à luz dos parâmetros identificados.

Por fim, os presentes resultados mostram que, no caso de fraca interacção com a estrutura (caso L1E), a baixa-praia mantém areia que se estende até à estrutura, enquanto no caso de elevada interacção entre o escoamento e a estrutura, devido ao maior nível de água (caso L2E), esta é erodida no seu sopé. Este fenómeno observado, de erosão do sopé da estrutura, apesar de conhecido, salienta a importância da protecção do sopé de estruturas de retenção pela areia da baixa e alta-praia. Se as bermas tiverem níveis adequados em relação aos níveis de água estimados (atendendo às marés e sobrelevações meteorológicas), dificilmente serão erodidas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela União Europeia, através do projecto "HYDRALABIII – Integrated Infrastructure Initiative" (contrato nº: 022441).

REFERÊNCIAS

- Alsina, J.M., Sánchez-Arcilla, A., Gironella, X. and Baldock, T.E., (2007). Design of scaled movable bed experiments using numerical models. *Journal of Coastal Research*, SI 50 (Proceedings of the 9th International Coastal Symposium), 379 – 383. Gold Coast, Australia, ISSN 0749.0208.
- Cáceres, I., Grüne, J., Van Rijn, L., Sánchez-Arcilla, A., Ahmari, A. and Ribberink, J., (2008). Mobile-bed tests. The SANDS project. 31st International Conference on Coastal Engineering, Hamburg, Germany.
- Dean, R.G. (1973). Heuristic models of sand transport in the surf zone. *Proc. Conference Engineering Dynamics in the Surf Zone*, Sydney (Australia), pp. 208-214.
- Dean, R.G. and Dalrymple, R.A. (2001). *Coastal processes with engineering applications*. Cambridge University Press.
- Fortes, C.; Lemos, R.; Neves, M.G.; Reis, M.T.; Santos, J.A.; Pinheiro, L.; Palha, A.; Capitão, R.; Sousa, I. (2008). Physical modelling of wave propagation and breaking in a flume using different geometric model scales. *Proc. of the Second International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection (CoastLab08)*, 2-5 July, Bari, Italy.
- Freire, P., Oliveira, F.S.B.F., Capitão, R., Fortes, C. and Costa, M., (2004). Cross-shore evolution of Buarcos beach, Portugal. 29th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Lisboa, Portugal, pp. 2314-2326.
- Freire, P.M.S., Oliveira, F.S.B.F. and Lorangeiro, S.H.C.D., (2002). *Short-Term morphodynamics of Buarcos beach, NW coast of Portugal*. Littoral 2002, The changing coast. EUROCOAST/EUCC, Porto, Portugal, pp. 375-380.
- Freire P., Sancho F., Oliveira F.S.B.F. (2009). Composite Modelling of Sediment Dynamics for Propagating Waves Reaching Coastal Defences. In: Damiani, L., Mossa, M. (Eds) *Second International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection (CoastLab08-Bari)*: 125-135, IAHR, Madrid.
- Gourlay, M.R., (1968). Beach and dune erosion tests. Delft Hydraulics Laboratory, Rep. No. M935/M936.
- Grasso F., H. Michallet, E. Barthélemy, R. Certain (2009). Physical modeling of intermediate cross-shore beach morphology: Transients and equilibrium states, *J. Geophys. Res.*, 114, C09001, doi:10.1029/2009JC005308.



6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária
Funchal, 8 e 9 de Outubro de 2009

- Guannel, G., H.T. Özkan-Haller, M.C. Haller, and J.T. Kirby (2007). Influence of velocity moments on sand bar movement during CROSSTEX, in Coastal Sediments '07: Proceedings of the Sixth International Symposium on Coastal Engineering and Science of Coastal Sediment Processes, May 13– 17, 2007, New Orleans, Louisiana, pp. 28–41, ASCE.
- Jiménez, J.A. and Madsen, O.S. (2003). A Simple Formula to Estimate Settling Velocity of Natural Sediments. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, Vol. 129, No. 2, 70-78.
- Kamphuis, J.W., (1985). On understanding scale effect in coastal mobile bed models. Physical modelling in coastal engineering, R.A. Dalrymple (Ed.), Rotterdam, A.A. Balkema, 141-162.
- Kamphuis, J.W., (1996). *Physical Modeling of Coastal Processes*. Chapter in "Advances in Coastal and Ocean Engineering, Volume 2", P. Liu (Ed.), Singapore: World Scientific Press, pp. 79-114.
- Larangeiro, S.H.C.D., Oliveira, F.S.B.F. and Freire, P.M.S., (2003). *Longshore sediment transport along a sandy coast with hard rock outcrops*. Shore and Beach, Vol.71, No.2, pp. 20-24.
- Larangeiro, S.H.C.D., Oliveira, F.S.B.F. and Freire, P.M.S., (2002). *Numerical characterisation of the longshore sediment dynamics of Buarcos beach, West coast of Portugal*. Littoral 2002, The changing coast. EUROCOAST/EUCC, Porto, Portugal, pp. 369-374.
- Oliveira, F.S.B.F., (2002). *Effect of the sea level variation in the offshore limit of the surf zone of Buarcos, Portugal*. Littoral 2002, The changing coast. EUROCOAST/EUCC, Porto, Portugal, pp. 363-368.
- Oliveira, F.S.B.F., Freire, P.M.S. and Larangeiro, S.H.C.D., (2002). *Characterisation of the dynamics of Figueira da Foz beach, Portugal*. Journal of Coastal Research, No.36, pp. 552-563.
- Ribberink, J. (2007). Scale relationships for sand transport processes on the upper shoreface. Internal Note, JRA Sands, Hydralab-III, pp. 9.
- Swart, D.H. (1974). A schematization of onshore-offshore transport. Proc. 14th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, 884-900.
- Van Rijn, L., (2007). Scale relationships for beach and dune erosion. Internal communication, HYDRALAB-Project SANDS.
- Wright, L.D., and Short, A.D., (1984). Morphodynamic variability of surf zones and beaches: a synthesis. *Marine Geology*, 56, pp. 93-118.