

# MODELAÇÃO FÍSICA 3D COM FUNDOS MÓVEIS PARA AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS ASSOCIADOS À EVOLUÇÃO DA LINHA DE COSTA

## 3D Moveable Bed Physical Modeling for the Evaluation of Parameters Related with Coastline Evolution

RAQUEL SILVA <sup>(1)</sup>, FRANCISCO TAVEIRA-PINTO <sup>(2)</sup> e FERNANDO VELOSO-GOMES <sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> *Estudante de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua do Dr. Roberto Frias, 4200 – 465 Porto, Portugal, rcsilva@fe.up.pt*

<sup>(2)</sup> *Prof. Associado com Agregação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua do Dr. Roberto Frias, 4200 – 465 Porto, Portugal, fpinto@fe.up.pt*

<sup>(3)</sup> *Prof. Catedrático, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua do Dr. Roberto Frias, 4200 – 465 Porto, Portugal, vgommes@fe.up.pt*

### Resumo

A erosão costeira é um problema generalizado, com repercussões a nível económico, político e social, ao qual estão associados custos elevados, sendo inúmeras as frentes urbanas em risco. A simulação numérica da evolução da morfologia costeira a médio e longo prazo é uma abordagem possível e essencial sob o ponto de vista do planeamento e do projecto das intervenções de defesa costeira. A análise crítica do desempenho de um modelo numérico de simulação da evolução da configuração costeira a médio e longo prazo (LTC) mostrou que existem ainda algumas lacunas e incertezas associadas à aplicação de um modelo numérico deste tipo, devidas à complexidade e à interação dos processos envolvidos, e à escassez de dados de campo que os caracterizem. No presente artigo, descreve-se um modelo físico reduzido 3D com fundos móveis de transporte longitudinal de sedimentos, concebido com o objectivo de obter resultados, cuja articulação com as simulações do modelo numérico referido, pudesse permitir o seu aperfeiçoamento. Indica-se o procedimento seguido para o estabelecimento das relações de escala, que permitiram a definição do modelo físico, baseada em características típicas da costa Noroeste Portuguesa. Apresenta-se a instalação experimental e o procedimento utilizado na realização dos testes experimentais. Determina-se a escala de tempo morfológica, necessária à articulação entre os resultados do modelo físico e do modelo numérico.

**Palavras-chave:** Evolução costeira a médio e longo prazo, modelação combinada, transporte longitudinal de sedimentos, escala de tempo morfológico.

### Abstract

Coastal erosion is a global problem placing several urban fronts at risk and involving high costs. Numerical simulation of coastal morphology evolution at medium to long term is a possible and an essential approach from the point of view of the planning and the design of coastal defence interventions. The critical analysis of the performance of a medium to long term coastline evolution numerical model (LTC) showed that some gaps and uncertainties associated with the application of such a model still exist, due to the complexity and interaction of the processes involved, and the scarcity of field data that allow their characterization. In this paper, a 3D movable bed physical model of longshore sediment transport is described. The model was conceived aiming the gathering of results, which could be combined with the numerical simulations for the numerical model improvement. The options taken for the scale relations selection are presented, together with the model definition, based in typical conditions for the northwest Portuguese coast. Furthermore, the experimental setup and the testing procedure are exposed. The morphological time scale is determined, which is essential for the combination of the physical and the numerical results.

**Keywords:** Medium to long term coastline change, composite modeling, longshore sediment transport, morphological time scale.

### 1. Introdução

As zonas costeiras são de primordial importância para o desenvolvimento económico, político e social de muitos países, como é o caso de Portugal. A forte pressão urbana existente em alguns locais, conjugada com a redução da alimentação sedimentar (essencialmente devida à acção do Homem) têm vindo a aumentar o risco de erosão e de inundações, situação que as alterações climáticas tendem a agravar.

Neste contexto, as entidades decisoras devem dispor de ferramentas que permitam avaliar os efeitos de eventuais medidas tomadas sobre as zonas costeiras e seleccionar aquelas que se afigurem mais adequadas, em particular para garantir a segurança dos valores existentes nesses locais.

A simulação numérica da evolução da morfologia costeira a médio e longo prazo é uma abordagem possível e essencial sob o ponto de vista do planeamento e do projecto das intervenções de defesa costeira, embora existam ainda limitações e os resultados venham acompanhados de grande incerteza, devido à complexidade e à interacção dos processos envolvidos, e à escassez de dados de campo que os caracterizem.

Foram já desenvolvidos diversos modelos com diferentes níveis de sofisticação e requisitos de dados de base, mas todos eles, em geral, de difícil validação. O procedimento de validação de um modelo pressupõe a reprodução de soluções analíticas obtidas através de simplificações do problema (*benchmark*), o ajuste de parâmetros para a reprodução de situações reais medidas em protótipo (calibração) e a reprodução de situações reais adicionais também medidas em protótipo (verificação do modelo calibrado). No entanto, as observações de campo são caras e tecnicamente difíceis de obter, especialmente em zonas costeiras bastante energéticas, como é o caso da costa Noroeste Portuguesa, e por esse motivo, dispersas ou incoerentes.

A análise crítica do desempenho de um modelo numérico de simulação da evolução da fisiografia costeira a médio e longo prazo (LTC - 'Long Term Configuration', Coelho, 2005), para aplicação a praias arenosas, onde o transporte sólido longitudinal é o processo de transporte sedimentar dominante, mostrou que existem ainda algumas lacunas e incertezas associadas à aplicação de um modelo numérico deste tipo. Para o seu aperfeiçoamento era necessário melhorar o conhecimento dos processos físicos descritos e aumentar a confiança na sua aplicação a situações reais, estabelecendo intervalos de valores com significado físico para os parâmetros morfodinâmicos de calibração.

A indisponibilidade de conjuntos de dados de campo adequados à realização de estudos que permitissem progressos das simulações numéricas, juntamente com a possibilidade de acesso a instalações experimentais, motivou o recurso à modelação física para avaliação da evolução do perfil transversal de praia, especialmente em situações persistentes de acreção ou erosão, sob a acção de diferentes condições de agitação marítima. Assim, apesar da dificuldade em reproduzir variações de médio e longo prazo em laboratório, foi definido e implementado um modelo físico reduzido 3D com fundos móveis de transporte longitudinal de sedimentos, cujos resultados seriam posteriormente analisados e articulados com as simulações do modelo numérico referido.

## 2. Definição do Modelo Físico 3D com Fundos Móveis

Em praias arenosas a evolução da linha de costa a médio e longo prazo é essencialmente controlada pelo transporte sólido longitudinal, induzido pela agitação marítima na sua aproximação oblíqua junto à rebentação. Sob acção de um clima anual de agitação marítima, admite-se que o perfil transversal de praia mantém uma configuração de equilíbrio, sendo o transporte transversal de sedimentos nulo, em termos médios.

Desta forma, o principal processo de transporte sedimentar a reproduzir no modelo físico seria o transporte sólido longitudinal.

O caso de estudo utilizado para o estabelecimento das condições em protótipo foi um troço de praia que contém a região envolvente de um esporão com cerca de 145 m de comprimento, localizado a Sul da povoação da Vagueira, no sector costeiro Esmoriz - Furadouro (Figura 1), para o qual foram efectuadas recolhas quadrimestrais de amostras de sedimentos durante um período de 5 anos.



Figura 1. Caso de estudo utilizado no estabelecimento das condições em protótipo a reproduzir no modelo físico reduzido com fundos móveis ('Google Earth', 2010).

### 2.1. Condições hidrodinâmicas e características morfo-sedimentares no protótipo

No Tabela 1 apresenta-se um resumo dos parâmetros fundamentais para a caracterização hidrodinâmica e morfo-sedimentar no protótipo. Estas condições correspondem a condições típicas da costa Noroeste Portuguesa.

Tabela 1. Parâmetros fundamentais para a caracterização hidrodinâmica e morfo-sedimentar no protótipo.

Altura de onda significativa média, $H_s$	1 - 2 m
Período de pico médio, $T_p$	8 - 12 s
Direcção média junto à base da praia	W10°NW
Nível médio da água do mar	+2 m (ZH)
Taxa potencial de transporte longitudinal	1-2 milhões $m^3$ /ano
Declive da face da praia	0.05
Comprimento mediano dos sedimentos	0.5 mm
Extensão de influência aproximado da estrutura transversal	500 m para Norte e para Sul

As condições de agitação marítima caracterizam-se por uma altura de onda significativa média entre 1 m e 2 m, um período de pico médio entre 8 s e 12 s e uma direcção de incidência da onda ao largo de cerca de 15°. O nível médio da água do mar é de +2 m ZH (Zero Hidrográfico).

Não existe grande precisão em relação ao valor do transporte sólido longitudinal médio anual ao longo da costa Noroeste Portuguesa. Os vários autores indicam valores que se situam entre 1 e 2 milhões  $m^3/ano$ , o que é consistente com a capacidade de transporte sólido longitudinal de 1.8 milhões  $m^3/ano$ , de uma onda com uma altura de onda de 2 m e uma direcção de incidência de  $10^\circ$  junto à base da praia, conforme previsto pela fórmula de CERC (1984), para um valor de 0.2 do seu coeficiente empírico.

Da análise das amostras de sedimentos recolhidas nas campanhas referidas, concluiu-se que o trecho de praia a reproduzir é essencialmente constituído por areia de quartzo ( $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ ) com um valor médio para o diâmetro mediano dos sedimentos  $d_{50} = 0.5 \text{ mm}$ .

Admite-se que o perfil transversal de praia mantém uma configuração de equilíbrio (entre a profundidade de fecho,  $DoC$ , e o ZH) e apresenta um declive regular na sua parte emersa de 0.05 (entre o ZH e o limite máximo de espraiamento da onda,  $Ru$ ) como é característico nesta região. Admite-se ainda que o esporão influencia de forma significativa a praia onde foi implantado numa extensão de cerca de 1 km, 500 m a Norte e 500 m a Sul.

O modelo reduzido construído deveria comportar toda a zona activa da praia entre o limite máximo de espraiamento da onda e o limite submerso até ao qual ocorrem variações mensuráveis do perfil activo ( $DoC$ ).

Estes limites podem ser estimados em função da altura de onda na rebentação,  $H_b$ , utilizando as conclusões de Roberts *et al.* (2007):

$$DoC \sim 3H_b \quad \text{e} \quad Ru \sim H_b \quad [1]$$

Cada uma das condições de agitação marítima a testar iria influenciar a variação do fundo na largura activa do perfil de praia, que seria tanto maior quanto maior a altura de onda na rebentação.

A praia deveria ser construída com uma largura que comportasse o maior perfil activo, definido pelas condições de agitação marítima a testar, garantindo-se, desta forma, que as restantes condições iriam modificar o perfil transversal numa largura que estaria contida na praia construída.

Para as condições de agitação marítima a testar, a maior altura de onda na rebentação seria  $H_b = 2.9 \text{ m}$ , para uma altura de onda significativa  $H_s = 2 \text{ m}$  e um período de onda de pico  $T_p = 12 \text{ s}$ , estimada através da expressão (Komar, 1998):

$$H_b = 0.39g^{1/5}(T_p H_s^2)^{2/5} \quad [2]$$

em que  $g$  representa a aceleração da gravidade.

Assim, o perfil activo de praia deveria ser limitado por uma profundidade de cerca de 8.7 m e uma altura emersa de cerca de 2.9 m, perfazendo uma altura total de cerca de 12 m. Em conformidade com o que foi exposto, pretendia-se reproduzir em modelo físico reduzido uma praia com uma dimensão longitudinal de cerca de 1 km e uma dimensão vertical de cerca de 12 m.

## 2.2. Dimensionamento do modelo físico 3D com fundos móveis

O modelo físico foi construído no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica (LH) da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA) do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), que tem as dimensões de 12 m de largura, 28 m de comprimento e profundidades máximas de 1.20 m. O tanque de ondas está equipado com um sistema de geração da agitação marítima composto por múltiplos batedores, instalados segundo a direcção transversal numa das suas extremidades, que incorpora um sistema de absorção dinâmica da reflexão. Dada a versatilidade de geração deste sistema (permite a geração de agitação marítima segundo direcções oblíquas em relação à direcção de excursão dos batedores) foram equacionadas diversas possibilidades para a colocação do modelo com fundos móveis no interior do tanque. Optou-se por uma colocação segundo a direcção transversal com uma obliquidade de  $10^\circ$ , à frente da praia dissipadora existente ao fundo do tanque. Desta forma, seria possível atenuar a sotamar a corrente longitudinal que seria induzida ao longo da praia, evitando-se que fosse gerada uma corrente circular entre esta e a zona de geração da agitação. Além disso, a colocação oblíqua da praia relativamente à orientação do sistema de geração permitiria que a sua extensão longitudinal aumentasse, no modelo, em cerca de 3 m, possibilitando ainda, a selecção de um método de geração da agitação incidente segundo a direcção normal ao sistema de geração, que apresentava vantagens comparativamente com o necessário à geração de agitação segundo uma direcção oblíqua. O espaço efectivamente disponível para a construção do modelo físico com fundos móveis permitia acomodar uma praia com uma extensão de cerca de 10 m. A escala de uma dada grandeza física  $a$  define-se como sendo o quociente entre o valor da grandeza no protótipo e o seu valor no modelo:  $N_a = a_p/a_m$ .

Para uma escala geométrica horizontal  $N_x = 100$  poder-se-ia reproduzir a extensão de praia pretendida (1 km), mas a altura da praia (12 m em protótipo) seria de apenas 12 cm, tornando muito difícil a medição de variações do fundo.

Equipamentos para medição de variações do fundo com cerca de 1 mm de resolução, como o que seria utilizado, apenas detectariam variações correspondentes a 10 cm no protótipo. Em levantamentos do perfil de praia ao longo do tempo, a menor variação que se pode medir corresponde à resolução do equipamento de medição utilizado, podendo admitir-se que variações inferiores a este valor não têm significado. Kraus *et al.* (1999) referem que a resolução do equipamento mais preciso é de 2.54 cm. Para que variações desta ordem pudessem ser medidas no modelo reduzido, a escala vertical deveria ser menor do que a horizontal.

A dimensão longitudinal da praia a reproduzir poderia ser reduzida até 500 m, avaliando-se alternadamente a situação de erosão e de acreção, respectivamente, a barlar e a sotamar da estrutura transversal (pelo que  $N_x \geq 50$ ). A altura do modelo deveria ser máxima para a medição de variações do fundo móvel ao longo do tempo com uma resolução aceitável.

Alturas de praia inferiores a 25 cm, correspondentes a uma resolução de 5 cm em protótipo, foram consideradas inaceitáveis (o que implicava  $N_z \leq 50$ ). A profundidade do tanque permitia a construção de um modelo com uma altura máxima de cerca de 1.2 m, o que, para reproduzir uma altura de praia de cerca de 12 m no protótipo, corresponderia a uma escala vertical  $N_z = 10$ . Numa primeira abordagem admitiu-se que o modelo seria distorcido, com a maior escala horizontal possível no intervalo  $50 \leq N_x \leq 100$ , que permitisse acomodar a maior extensão de praia entre 500 m e 1 km, e com a menor escala vertical possível no intervalo  $10 \leq N_z \leq 50$ , que permitisse a melhor resolução na medição de variações do fundo.

Por questões práticas de construção e operação de modelos hidrodinâmicos com uma dimensão considerável, o fluido preferencialmente utilizado (água doce) é idêntico ao fluido no protótipo (água salgada). A aceleração da gravidade é igual no modelo e no protótipo ( $N_g = 1$ ). Tratando-se de um modelo com fundos móveis é também necessário decidir qual o material a utilizar para reproduzir os sedimentos. Em modelos em que o sedimento é areia, a redução excessiva das dimensões das partículas sedimentares, pode introduzir efeitos de escala importantes, uma vez que grãos muito finos no protótipo não podem ser reduzidos sem que o seu modo de transporte seja modificado no modelo. Em alternativa poder-se-ia recorrer a materiais de maiores diâmetros, mas mais leves, para modelar as partículas sedimentares. Silva *et al.* (2006) utilizaram pequenos cilindros de PVC ( $d_{50} = 4.13 \text{ mm}$ ;  $s = 1.57$ ) e areia ( $d_{50} = 1.82 \text{ mm}$ ;  $s = 2.65$ ) como material sedimentar, num estudo de caracterização experimental do escoamento originado pela ruptura de uma barragem, num canal com fundo móvel, Figura 2.

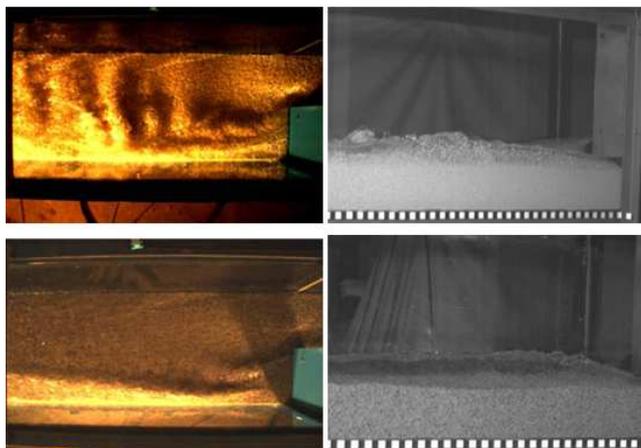


Figura 2. Visualização do escoamento originado pela ruptura de uma barragem num canal com fundo móvel: PVC (em cima) e areia (em baixo). Vista em planta (esquerda) e vista lateral (direita) [retirado de Silva *et al.*, 2006].

Os autores concluíram que o transporte sólido era diferente entre os ensaios realizados com PVC e com areia. No primeiro caso, a menor densidade permitia uma maior mobilização e suspensão de material do fundo, que chegava mesmo a ocupar toda a coluna de água à passagem da frente de onda, resultando em alterações significativas da batimetria do fundo, Figura 2 (em cima).

No caso da areia, a quantidade de material em suspensão era bastante inferior, pelo que o escoamento ocorria praticamente com uma coluna de água “limpa”, apenas havendo transporte das partículas de menores dimensões, Figura 2 (em baixo).

Em modelos costeiros, a utilização de materiais leves como material de fundo, tem o grande inconveniente de fazer com que o movimento das partículas, em resposta à acção das ondas, se faça não só debaixo de água, mas também fora desta, especialmente na zona de rebentação e sobre a praia (Kamphuis, 1985). Por este motivo, não se equacionou a hipótese de utilização de outro material mais leve como material sedimentar no modelo, optando-se pela areia de quartzo. O tamanho dos sedimentos deveria ser reduzido comparativamente com o seu tamanho no protótipo, mas não poderia ser demasiado reduzido, uma vez que a areia muito fina pode ter um comportamento característico de sedimentos coesivos.

Os processos físicos relevantes para o estudo deviam manter-se no modelo como no protótipo. No entanto, a semelhança completa não seria possível.

Para a semelhança dos processos hidrodinâmicos o modelo deveria ser não distorcido e obedecer aos critérios de semelhança de *Froude*, ficando reconhecido que os efeitos de escala viscosos e as formas de fundo poderiam interferir na sua hidrodinâmica.

Para a semelhança dos processos de transporte sedimentar admitiu-se que o modo dominante era o transporte em suspensão, uma vez que se pretendia reproduzir processos que ocorrem na zona de empolamento e rebentação, onde os níveis de turbulência são bastante elevados. Os sedimentos do fundo são agitados, elevando-se na coluna de água, após o que são transportados em suspensão pelas correntes. Este modo de transporte sedimentar está intrinsecamente ligado a processos de erosão e deposição sedimentar, erosão localizada e outros problemas resultantes da acção energética das ondas. Idealmente, o modelo seria não distorcido e adoptar-se-iam os critérios de semelhança de Dean (1985), para os quais o parâmetro de velocidade de queda é igual no modelo e no protótipo. No entanto, o modelo teria que ser distorcido, o que teria repercussões tanto nos processos hidrodinâmicos como nos processos de transporte sedimentar.

A parte hidrodinâmica do modelo seria reproduzida de acordo com os critérios de semelhança de *Froude*, nos quais a escala de comprimentos característicos seria associada à escala geométrica vertical,  $N_L = N_z$ , garantindo-se assim a adequada reprodução dos fenómenos de empolamento e refração. Nesta hipótese ficaram estabelecidas as seguintes relações de escala:

$$\begin{aligned} N_H &= N_L = N_h = N_z \\ N_U &= N_T = N_t \\ N_x &= N_y = \Omega N_z \end{aligned} \quad [3]$$

em que  $x$ ,  $y$  e  $z$  representam as coordenadas espaciais,  $H$  a altura de onda,  $L$  o comprimento de onda,  $T$  o período de onda,  $U$  a velocidade orbital,  $h$  a profundidade da água,  $t$  o tempo e  $\Omega$  a distorção geométrica do modelo.

Os fenómenos de transformação da agitação marítima sobre a praia seriam afectados pela distorção do modelo, não sendo por exemplo, a difracção adequadamente reproduzida. Era possível a transição do carácter da rebentação entre o protótipo e o modelo. O espraio das ondas seria maior no modelo do que no protótipo, esperando-se também uma maior reflexão das ondas na praia.

Para os processos de transporte sedimentar utilizaram-se os critérios de semelhança de Vellinga (1982) para modelos distorcidos, estabelecidos com base num grande número de testes em modelo físico e recomendados por Dean (1985) para modelos distorcidos. Estes critérios definem a seguinte relação de escala:

$$N_x = \left( \frac{N_g N_z}{N_\omega^2} \right)^{0.28} N_z \quad [4]$$

em que  $N_\omega$  representa a escala da velocidade de queda dos sedimentos,  $\omega$ .

Foram adquiridos 25.6 m<sup>3</sup> (26.5 toneladas) de areia seca à empresa SIBELCO Portuguesa Lda. Tratava-se de uma areia de sílica com uma baridade de 1037 kg/m<sup>3</sup> e um diâmetro mediano de 0.273 mm. Escolhido o sedimento que seria utilizado na construção do modelo 3D com fundos móveis, tendo em consideração todos os constrangimentos impostos pelas dimensões do tanque de ondas e pelas condições hidrodinâmicas e morfo-sedimentares a reproduzir, além de se ter fixado o diâmetro mediano dos sedimentos e a respectiva escala, ficou também fixada a sua velocidade de queda e consequentemente, tendo em consideração os critérios de semelhança de Vellinga, expressão [4], a distorção geométrica do modelo (Figura 3).

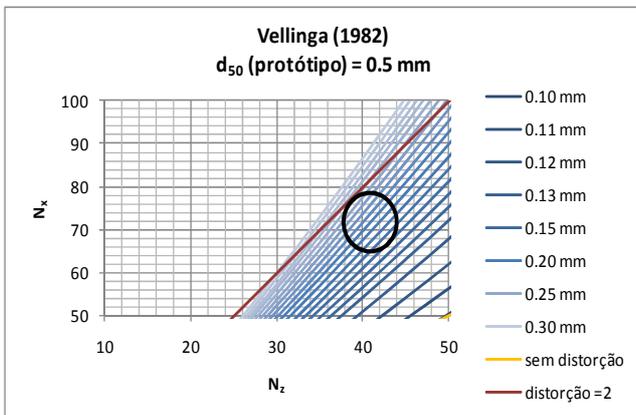


Figura 3. Escala horizontal estabelecida com base nos critérios de semelhança de Vellinga (1982), em função do diâmetro mediano dos sedimentos no modelo e da escala vertical (para um diâmetro mediano em protótipo de 0.5 mm).

Para uma extensão de praia de 620 m em protótipo, ficaram fixadas as escalas geométricas em  $N_x = 74$  e  $N_z = 37$  e toda a geometria do modelo.

O modelo viria a ser construído com uma altura de 40 cm, uma largura de 6.2 m e uma dimensão longitudinal de 8.4 m. O declive médio da praia reduzida seria de 0.06, ou seja, um ângulo com a horizontal de cerca de 4°. A sua parte emersa teria 16 cm de altura e a profundidade da água seria de 24 cm.

Na Figura 4 representa-se o perfil activo do trecho de praia em protótipo (em cima) e a sua reprodução em modelo distorcido, bem como o perfil de equilíbrio de Dean (1991) para o diâmetro mediano dos sedimentos de fundo no modelo,  $d_{50} = 0.27 \text{ mm}$ .

Note-se que o perfil reproduzido, mantendo a semelhança na sua geometria, se afasta consideravelmente do perfil de equilíbrio de Dean para os sedimentos utilizados.

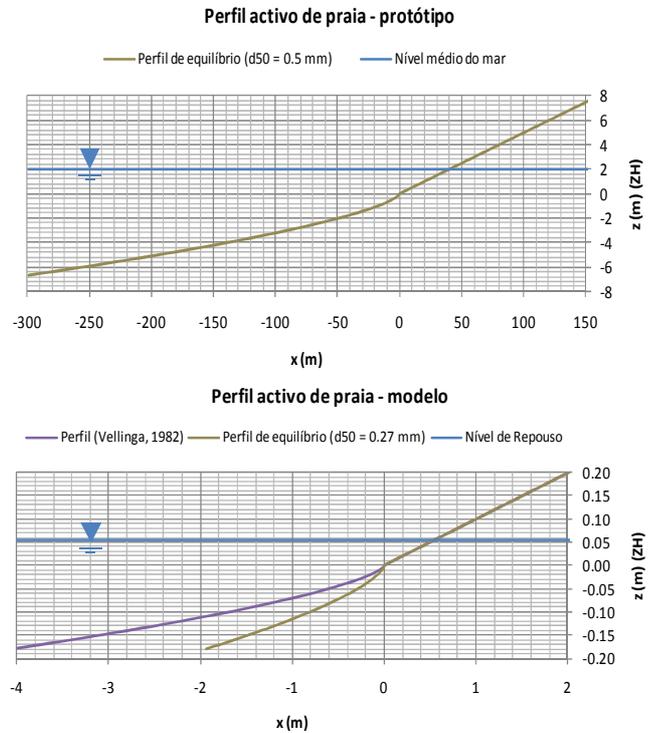


Figura 4. Perfil activo de praia no protótipo (em cima) e a sua reprodução em modelo físico de acordo com os critérios de semelhança de Vellinga (1982) (em baixo).

### 2.3. Condições hidrodinâmicas e características morfo-sedimentares no modelo

A propagação das condições de agitação marítima de teste seleccionadas foi estimada desde a zona de geração até ao limite máximo de espraio das ondas, através da teoria linear da onda.

Começaram por obter-se as condições ao largo com base nas condições pretendidas junto à base da praia, que foram posteriormente propagadas até à zona de rebentação. Esta estimativa foi necessária para garantir que a rebentação e o espraio das ondas se fariam sobre a praia construída.

Além disso, o limite máximo para a altura de onda, definido pelo sistema de geração não poderia ser excedido. Este limite é imposto pela condição mais restritiva, entre o limite de rebentação das ondas no interior do tanque e o limite de desempenho do sistema de geração, que são função da profundidade da água e do período característico da agitação.

Foi também efectuada a estimativa das taxas de transporte longitudinal esperadas nos ensaios. Estas estimativas indicaram taxas de transporte longitudinal de massa submersa variáveis entre cerca de 5 e 40 kg/h, mas que podiam chegar a ser cerca de 200 kg/h.

Tabela 2. Resumo dos testes realizados em modelo reduzido com fundos de areia.

Série	Testes	$\Delta t$ (h)	$H_s$ (m) (protótipo)	$T_p$ (s)	$H_s$ (cm) (modelo)	$T_p$ (s) (modelo)	$\theta$ (°)	$h$ (cm)	Descrição
I.1	57-78	21	1	8	2.70	1.31	10	24.0	Praia uniforme - Erosão
I.2	79-99	21	1	12	2.70	1.97	10	24.0	Praia uniforme - Erosão
I.3	100-115	14	2	12	5.39	1.31	10	24.0	Praia uniforme - Erosão
I.4	116-124	9	2	8	5.39	1.97	10	24.0	Praia uniforme - Erosão
II	125-130	6	2	12	5.39	1.97	10	24.0	Praia uniforme - Erosão
III	132-148	17	2	12	5.39	1.97	10	24.0	Estrutura transversal - Acreção
IV	149-165	17	2	12	5.39	1.97	10	24.0	Estrutura transversal - Erosão

### 3. Instalação Experimental e Programa de Testes

#### 3.1. Descrição geral dos testes

A agitação gerada segundo a direcção longitudinal principal do tanque, transversal ao sistema de geração, iria abordar a praia segundo um ângulo de incidência de  $10^\circ$ , induzindo uma corrente longitudinal ao longo desta, que a sotamar da mesma seguiria em direcção à praia dissipadora existente ao fundo do tanque.

Os testes consistiram de ensaios de 1 hora de acção contínua de agitação marítima sobre o modelo reduzido com fundos de areia, seguidos de uma paragem para que fossem efectuadas as medições necessárias. Foram realizados quatro séries de testes (Tabela 2).

No decorrer da experiência foram efectuadas recolhas sistemáticas dos sedimentos acumulados a sotamar da praia, para determinação da taxa de transporte sólido longitudinal. Foram medidas séries temporais de elevação da superfície livre junto à base da praia e ao longo do perfil transversal, para posterior análise de reflexão e da transformação das ondas na sua propagação sobre a mesma. Foi também efectuado o levantamento sistemático do perfil transversal da praia em 4 localizações longitudinais pré-seleccionadas. O nível de repouso da superfície livre foi mantido constante em todos os testes.

Foram realizados quatro séries de testes: na série I de testes considerou-se a praia em erosão (uma vez que não havia alimentação sedimentar a barlar, Figura 5) sob a acção sucessiva de quatro condições de agitação marítima, variáveis em altura e período de onda.

A duração total da acção da agitação marítima foi de 65 horas. Nas restantes séries de testes, as condições de agitação marítima foram mantidas constantes, caracterizadas por uma altura de onda significativa,  $H_s = 2$  m, e um período de onda de pico,  $T_p = 12$  s. A série II de testes foi realizada essencialmente para avaliação da influência da configuração inicial do perfil de praia na sua evolução, servindo também como referência para as séries III e IV.

Para a realização das últimas foi construída uma estrutura transversal à praia e avaliada a evolução do perfil transversal, respectivamente, a barlar (Figura 6) e a sotamar (Figura 7) da mesma.

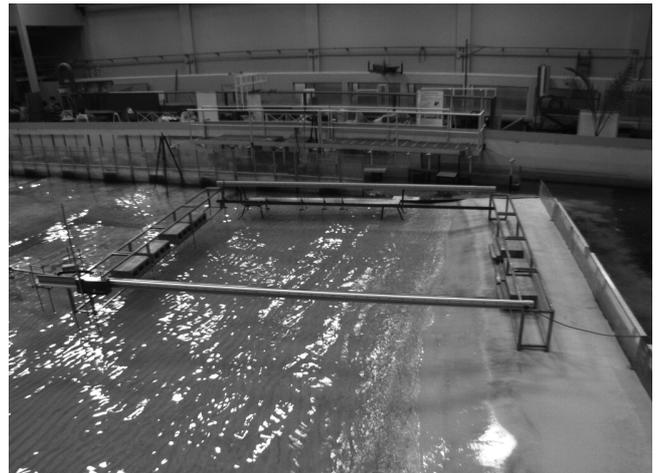


Figura 5. Modelo físico reduzido com fundos de areia em situação de erosão, durante a realização da série I de testes.

A estrutura transversal foi dimensionada através da fórmula de *Hudson*, nomeadamente para a determinação do peso dos blocos do manto resistente, admitindo-se que a escala geométrica era igual à escala vertical do modelo com fundos de areia, uma vez que era também esta a escala de comprimentos característicos utilizada para a reprodução dos processos hidrodinâmicos de acordo com a semelhança de *Froude*.

A duração total das séries de testes variou entre 6 e 21 horas no modelo.



Figura 6. Modelo físico reduzido com fundos de areia em situação de erosão, durante a realização da série III de testes.



Figura 7. Modelo físico reduzido com fundos de areia em situação de erosão, durante a realização da série IV de testes.

### 3.2. Descrição geral da instalação experimental

O modelo reduzido foi construído no interior do tanque de ondas do LH - SHRHA - DEC - FEUP. Na Figura 8 representa-se a instalação experimental em planta.

O modelo foi colocado no tanque segundo uma direcção rodada de  $10^\circ$  em relação à direcção transversal, à frente da praia dissipadora, ocupando uma área de cerca de 10 m x 8 m.

Na Figura 8 podem identificar-se as zonas do modelo onde eram efectuadas medições:

- a sotamar da praia, a zona de recolha de sedimentos, entre o limite de espraiamento das ondas e a linha-limite até à qual se esperava que ocorresse rebentação;

- na zona central do modelo com fundos de areia, a área de medição da variação dos perfis de fundo nas quatro posições longitudinais (perfis A, B, C e D) espaçadas de 1 m entre si.

Na Figura 8 pode também ver-se a localização das sondas de níveis hidrodinâmicos utilizadas para a medição da elevação da superfície livre:

- quatro sondas antes da base da praia (sondas 1, 2, 3 e 4), para determinação do espectro de agitação incidente e análise de reflexão da praia;
- um par de sondas para medição do nível de água junto às fronteiras de barlamar e de sotamar do modelo (sondas 5 e 6);
- uma série de cinco sondas ao longo de um perfil transversal de praia (sondas 7, 8, 9, 10, 11), para posterior análise da propagação das ondas sobre a praia.

A posição da linha de costa e da linha de rebentação foram monitorizadas através de filmagens realizadas com um sistema de câmaras sincronizadas. Foram colocados guias de ondas de acrílico segundo a direcção de propagação das ondas, para evitar perdas laterais de energia, segundo a direcção paralela às cristas das ondas. O procedimento experimental iniciava-se diariamente com o ajuste da profundidade da água no interior do tanque, seguido da calibração das sondas de níveis hidrodinâmicos.

A luminosidade do sistema de câmaras sincronizadas era ajustada e efectuava-se a programação diária das filmagens. Definiam-se os parâmetros de geração e de aquisição da agitação marítima, dando-se então início aos testes propriamente ditos, que consistiam de uma hora de acção de agitação, seguidos de uma paragem para medição de perfis e recolha de sedimentos acumulados.

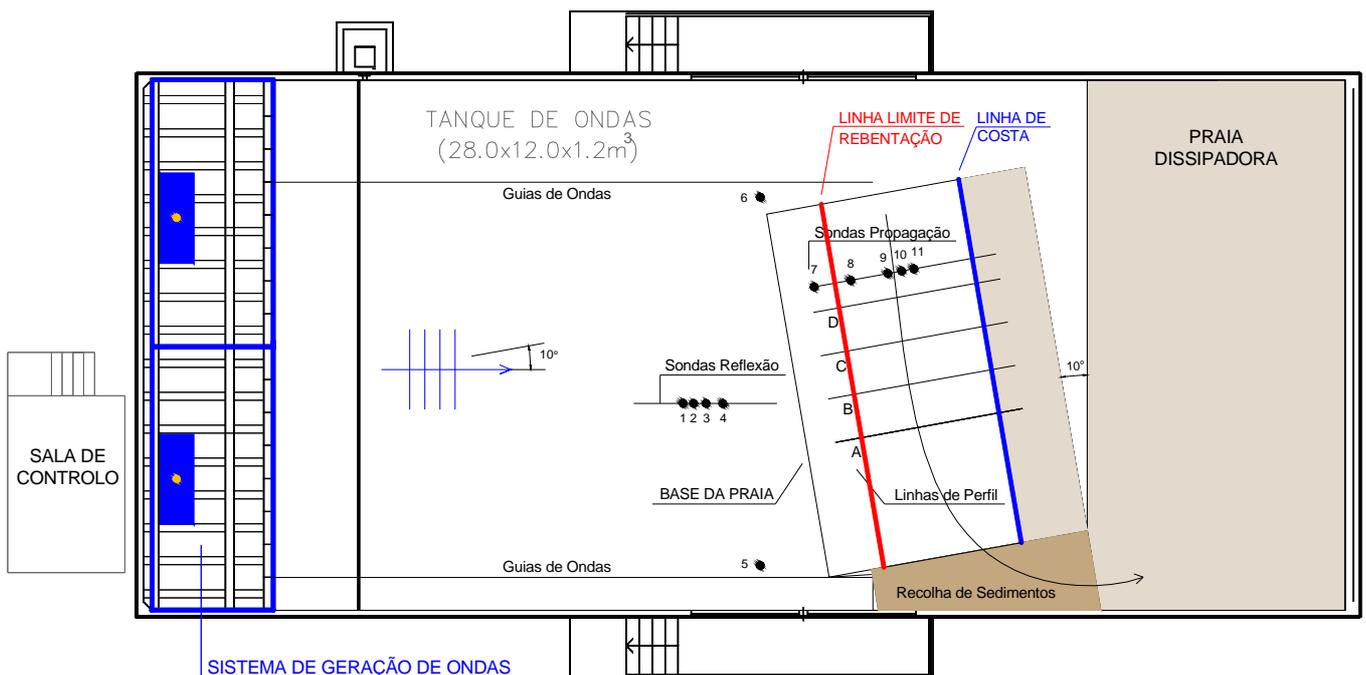


Figura 8. Instalação experimental no interior do tanque de ondas do LH-SHRHA-DEC-FEUP, para avaliação de parâmetros associados a modelos de evolução de linha de costa.

### 3.3. Comportamento da praia sob acção da agitação

A partir do momento em que os testes experimentais foram iniciados e as primeiras ondas foram geradas, presenciou-se a propagação da agitação marítima, desde a sua zona de geração até à praia, segundo a direcção longitudinal principal do tanque. As ondas incidiam obliquamente junto à base da praia, o que era particularmente evidente pela orientação da linha de rebentação, induzindo uma corrente longitudinal que resultava num transporte sólido para sotamar.

Esta corrente comportou-se conforme esperado, fluindo de barlamar para sotamar e inflectindo junto à parede do tanque em direcção à praia dissipadora existente ao fundo do mesmo, onde era atenuada. Após algumas horas (7) de acção da agitação o perfil transversal adquiriu uma configuração de “quase-equilíbrio”, reduzindo-se a importância do transporte transversal, evidenciado, no entanto, pelo crescimento continuado da altura da berma (que apenas pareceu estabilizar após 14 horas de acção da agitação) e aumentando a do transporte longitudinal, observando-se o recuo da linha de costa.

A transição para novas condições de agitação, caracterizadas por um maior período de pico (menor declividade), deu lugar a novos ajustamentos do perfil transversal, cuja forma se manteve em termos globais. Observou-se um crescimento significativo da berma, em consequência do aumento do espriamento das ondas, um aprofundamento do desnível associado à rebentação e um aumento da concavidade da face da praia, apesar de não ser assinalável a variação dos declives característicos.

A transição para condições de agitação mais energéticas, caracterizadas por uma maior altura de onda significativa, deu lugar a modificações expressivas da forma do perfil transversal, que sob a acção continuada da agitação se tornou claramente mais dissipativo, com declives característicos significativamente inferiores. No decurso desta sub-série de testes observou-se uma transição da forma do perfil para o tipo de erosão.

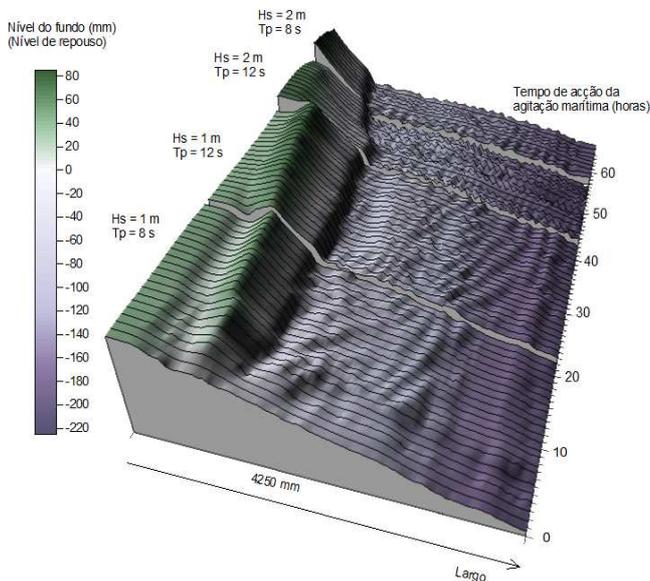


Figura 9. Perfis transversais medidos na localização longitudinal A da praia construída, durante a série I de testes experimentais (praia uniforme em erosão).

Com efeito verificou-se o desaparecimento da berma, o prenúncio de uma barra submersa e o aumento da profundidade-limite até à qual se observaram variações do fundo, traduzindo um transporte transversal no sentido do largo.

O transporte sólido longitudinal foi intenso, observando-se o recuo acentuado da posição da linha de costa. As condições de agitação que se seguiram caracterizaram-se por uma redução do período de pico, mantendo-se a tendência erosiva do perfil e o transporte transversal no sentido do largo, ainda que os declives característicos tenham sofrido um ligeiro aumento. Verificaram-se variações do fundo até ao limite da base da praia. Nesta fase, a parte emersa da praia era já muito estreita tendo sido este o factor que determinou a conclusão da série de testes experimentais.

### 3.4. Taxa de transporte longitudinal de sedimentos

A formulação de Kamphuis (1991) foi considerada por Schoonees e Theron (1993, 1996), como robusta e a melhor para a estimativa da taxa de transporte sólido longitudinal, tanto no campo como em laboratório, na sequência da sua validação, com base numa vasta base de dados de campo de medição de taxas de transporte longitudinal. A expressão é dada por:

$$Q_s = 2.27 H_{sb}^2 T_p^{1.5} m_b^{0.75} d_{50}^{-0.25} \text{sen}^{0.6}(2\theta_b) \quad [5]$$

em que  $Q_s$  representa a taxa de transporte longitudinal de massa submersa (kg/s),  $T_p$  o período de pico do espectro de agitação marítima ao largo,  $m_b$  o declive de rebentação e  $\theta_b$  o ângulo de incidência da onda sobre a praia.

Por outro lado, a taxa de transporte longitudinal pode também ser estimada através da determinação da massa submersa dos sedimentos que atravessa uma secção de praia num determinado intervalo de tempo:

$$Q_{s,med} = \frac{M_{s,med}}{\Delta t}, \quad [6]$$

em que  $\Delta t$  representa o intervalo o tempo e  $M_{s,med}$  a massa submersa dos sedimentos. A massa submersa relaciona-se com o volume de sedimentos,  $V$ , através da expressão:

$$M_s = (1 - p)(\rho_s - \rho)V \quad [7]$$

em que  $\rho_s$  representa a massa volúmica dos sedimentos,  $\rho$  a massa volúmica da água e  $p$  a porosidade da areia.

A expressão [5] mostra que a escala para a taxa de transporte de massa submersa é dada por:

$$N_{Q_s} = N_z^{7/2} N_x^{-3/4} N_{d_{50}}^{-1/4} \quad [8]$$

Enquanto a análise da conjugação da expressão [6] com a expressão [7], mostra que essa escala é dada por:

$$N_{Q_{s,med}} = \frac{N_z N_x^2 N_{\rho'} N_{1-p}}{N_{t_m}} \quad [9]$$

em que  $\rho' = \rho_s/\rho$  representa a densidade relativa de massa submersa e  $p$  a porosidade da areia.

Como as duas escalas devem ser iguais, expressões [8] e [9], a escala de tempo morfológico será dada por:

$$N_{t_m} = N_z^{-5/2} N_x^{11/4} N_{d_{50}}^{1/4} N_{\rho'} N_{1-p} \quad [10]$$

Os valores de protótipo dos parâmetros intervenientes na formulação [5] foram estimados a partir dos dados obtidos no modelo físico: a altura de onda significativa na rebentação obteve-se a partir da altura de onda significativa medida ao longo dos testes e da sua propagação até à zona de rebentação, utilizando a teoria linear da onda juntamente com um critério de rebentação simples, tendo-se obtido o ângulo de incidência da onda junto à rebentação através do mesmo procedimento; o período de pico foi medido ao longo dos testes; o declive de rebentação foi aproximado pelo declive da face da praia, uma vez que não foi possível extrair o declive de rebentação dos perfis transversais medidos; o diâmetro dos sedimentos era conhecido. A distorção do declive da face da praia foi considerada, uma vez que o estabelecimento da escala para a taxa de transporte longitudinal se baseou nos valores de referência no protótipo. Com base nestes valores foi efectuada a estimativa das taxas de transporte sólido longitudinal através da formulação de Kamphuis (1991). Os valores de massa submersa medidos a partir dos sedimentos recolhidos no fim de cada hora de teste foram também utilizados para a estimativa das taxas de transporte sólido longitudinal, através da expressão [6].

Na Figura 11 apresentam-se as taxas de transporte sólido longitudinal estimadas ao longo da série I de testes experimentais. Os valores apresentados correspondem a valores no protótipo. A escala da taxa de transporte de massa submersa, obtida a partir do valor de referência para o diâmetro mediano dos sedimentos no protótipo (expressão [8]) era  $N_{Q_s} = 10401$ . A análise da figura mostra a existência de uma correlação importante entre os valores das taxas de transporte longitudinal estimadas através da formulação de Kamphuis (1991) e as obtidas através da pesagem dos sedimentos recolhidos no fim de cada hora de teste.

Utilizando o método dos mínimos quadrados efectuou-se um ajuste das taxas estimadas através da formulação às medidas no modelo, obtendo-se a seguinte relação (Figura 10):

$$Q_{s,med} = Q_s - (43000 \pm 6000) \left( \frac{\text{kg}}{\text{hora}} \right). \quad [11]$$

O coeficiente de determinação,  $r^2 = 0.9739$ , traduzindo a proporcionalidade directa entre as taxas determinadas pelos dois métodos.

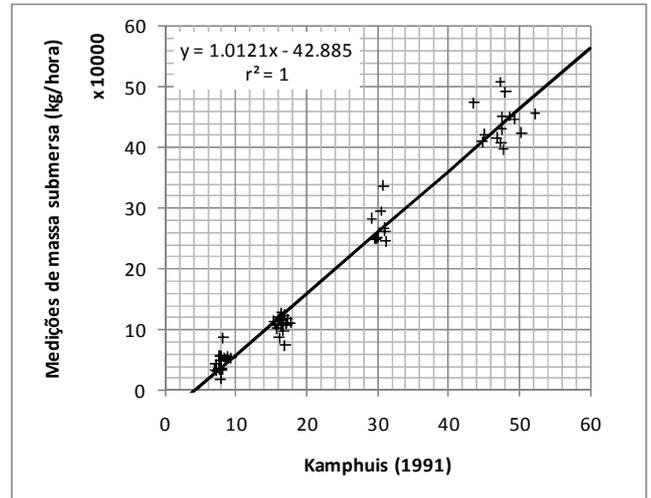


Figura 10. Taxa de transporte sólido longitudinal, estimada através da formulação de Kamphuis (1991) e obtida através da medição da massa submersa dos sedimentos recolhidos no fim de cada teste.

No entanto, as taxas de transporte sólido longitudinal estimadas através da formulação semi-empírica apresentaram valores sistematicamente superiores aos obtidos a partir da pesagem dos sedimentos recolhidos a sotamar da praia. Esta situação é consistente com o previsto por Dean (1985).

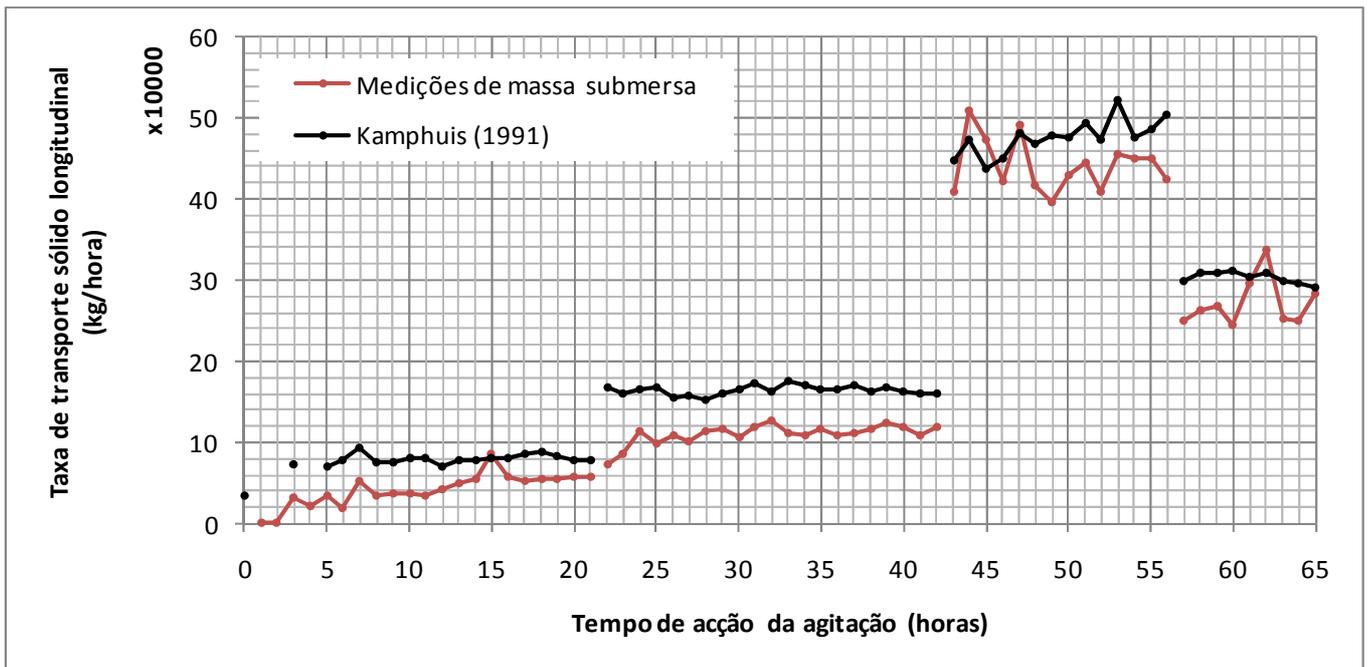


Figura 11. Taxa de transporte sólido longitudinal, estimada através da formulação de Kamphuis (1991), e obtida através da medição da massa submersa dos sedimentos recolhidos em cada hora de teste.

São diversos os factores que podem contribuir para as diferenças observadas, os quais podem estar relacionados com os efeitos de escala presentes no modelo físico, em termos de transporte de sedimentos e de distorção geométrica, com a estimativa dos ângulos de incidência das ondas, com a ausência de alimentação sedimentar a barlar da praia e com a descontinuidade da corrente de deriva litoral junto às fronteiras. Com efeito, o facto de existir um deficit sedimentar no modelo é incompatível com o pressuposto de uma praia infinita utilizado no desenvolvimento da formulação de Kamphuis (1991), estabelecida com base num modelo 3D com fundos de areia, no qual era efectuada realimentação de água e sedimentos.

Em relação aos efeitos de escala relacionados com o transporte sedimentar, o facto de o parâmetro de velocidade de queda apresentar valores ligeiramente superiores no modelo podia resultar numa redução da taxa de transporte de sedimentos em suspensão.

O tamanho dos sedimentos era reduzido em relação ao do protótipo, mas maior do que o que a escala geométrica determinaria, podendo contribuir para a redução da taxa de transporte por arrastamento e para o aumento da percolação, que possivelmente resultaria num menor transporte na zona de espraiamento das ondas.

Admitindo a igualdade entre as duas taxas de transporte, foi possível determinar a escala de tempo morfológico, através da expressão [10],  $N_{t_m} = 19.5$ . A determinação desta escala era necessária para a articulação entre os resultados do modelo físico e as simulações do modelo numérico.

#### 4. Considerações Finais

No presente artigo, descreveu-se um modelo físico 3D com fundos móveis de transporte longitudinal de sedimentos, concebido com o objectivo de obter resultados, cuja articulação com as simulações de um modelo numérico de simulação da evolução da configuração costeira a médio e longo prazo (LTC), pudesse permitir o seu aperfeiçoamento.

Indicou-se o procedimento seguido para o estabelecimento das relações de escala, que permitiram a definição do modelo, baseada em características típicas da costa Noroeste Portuguesa. Reconhecendo-se que os efeitos de escala viscosos, as formas de fundo e a distorção geométrica podem interferir na hidrodinâmica do modelo.

Apresentou-se a instalação experimental e o programa de testes. Os testes experimentais decorreram conforme esperado, com a agitação a propagar-se desde a sua zona de geração até à praia, segundo a direcção longitudinal principal do tanque, incidindo obliquamente junto à base da praia e induzindo uma corrente longitudinal, que resultava num transporte sólido para sotamar.

A corrente induzida inflectia junto à parede do tanque em direcção à praia dissipadora existente ao fundo do mesmo.

Em resposta às diferentes condições de agitação a praia sofreu variações morfológicas, inicialmente segundo a direcção transversal, que se revelaram longitudinalmente uniformes.

A continuidade da acção das mesmas condições de agitação resultava numa intensificação do transporte longitudinal, verificando-se a erosão do perfil da praia (que mantinha a sua forma global) e o recuo da linha de costa.

As taxas de transporte sólido longitudinal foram determinadas com base nos dados adquiridos no modelo físico, seguindo duas abordagens distintas, através da formulação de Kamphuis (1991) e através da medição da massa submersa dos sedimentos acumulados a sotamar da praia em cada teste.

Apesar de as taxas de transporte obtidas através da formulação semi-empírica apresentarem valores sistematicamente superiores aos obtidos a partir da pesagem dos sedimentos recolhidos a sotamar da praia, obteve-se uma correlação muito significativa entre ambas. As diferenças observadas entre as estimativas podiam ser devidas a diversos factores relacionados com os efeitos de escala presentes no modelo físico, em termos de transporte de sedimentos e da distorção geométrica, com a estimativa de ângulos de incidência das ondas, com a ausência de alimentação sedimentar a barlar da praia e com a descontinuidade da corrente de deriva litoral junto às fronteiras.

A correlação muito significativa entre os valores obtidos por cada um dos métodos permitiu a determinação da escala de tempo morfológico, necessária para a articulação entre os resultados do modelo físico e as simulações do modelo numérico.

Os resultados obtidos no modelo físico podem ser utilizados para o aperfeiçoamento do modelo numérico, designadamente no que diz respeito à descrição numérica da evolução do perfil transversal de praia em situação persistente de erosão e a barlar e a sotamar de uma estrutura transversal. Existem dificuldades inerentes à interpretação destes resultados devido aos efeitos de escala presentes e à complexidade e nível do conhecimento dos processos de interacção entre ondas e sedimentos, especialmente na zona de rebentação. Para isso estes efeitos devem ser identificados e quantificados.

#### Referências

- CERC (1984). *Shore Protection Manual*. Coastal Engineering and Research Center, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg.
- Coelho, C. (2005) *Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira*. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 404 pp.
- Dean, R.G. (1985). Physical Modeling of Littoral Processes. *Physical Modelling in Coastal Engineering*. Rotterdam: A.A. Balkema, The Netherlands. 119-139 p.
- Dean, R.G. (1991). Equilibrium Beach Profiles: Characteristics and Applications. *Journal of Coastal Research*. 7:pp. 53-84.
- Kamphuis, J.W. (1985). On Understanding Scale Effect in Coastal Mobile Bed Model. *Physical Modelling in Coastal Engineering*. Rotterdam: A.A. Balkema, The Netherlands. 141-162 p.

- Kamphuis, J.W. (1991). Alongshore Sediment Transport Rate. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*. 117:6. pp. 624-641.
- Komar, P.D. (1998). *Beach Processes and Sedimentation*. 2<sup>nd</sup>. New Jersey, USA: 544 p.
- Kraus, N.C., Larson, M. e Wise, R.A. (1999). *Depth of Closure in Beach-fill Design*. In: 12<sup>th</sup> Conference on Beach Preservation Technology, Tallahassee, Florida, pp. 271-286, FSBPA.
- Roberts, T.M., Wang, P. e Kraus, N.C. (2007). *Limits of Beach and Dune Erosion in Response to Wave Runup Elucidated from SUPERTANK*. In: Coastal Sediments '07, Reston, VA, pp. 1961-1974, American Society of Civil Engineers.
- Schoonees, J.S. e Theron, A.K. (1993). Review of the Field-data Base for Longshore Sediment Transport. *Coastal Engineering*. 19:pp. 1-25.
- Schoonees, J.S. e Theron, A.K. (1996). *Improvement of the Most Accurate Longshore Transport Formula*. In: 25<sup>th</sup> International Conference on Coastal Engineering, Orlando, Florida, 3, pp. 3652-3665, American Society of Civil Engineers.
- Silva, P., Leal, J.G.A.B. e Ferreira, R.M.L. (2006). *Caracterização Experimental do Escoamento Originado pela Ruptura de uma Barragem num Canal não Prismático com Fundo Móvel*. In: 8<sup>o</sup> Congresso da Água, Figueira da Foz, Portugal. Associação Portuguesa de Recursos Hídricos (edição electrónica).
- Vellinga, P. (1982). Beach and Dune Erosion during Storm Surges. *Coastal Engineering*. 6:4. pp. 361-387.