

MODELAÇÃO FÍSICA TRIDIMENSIONAL COM FUNDOS MÓVEIS PARA O ESTUDO DA DESCRIÇÃO ANALÍTICA DO PERFIL ACTIVO DE PRAIA

Raquel Silva, Fernando Veloso Gomes, Francisco Taveira Pinto

Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal.
rcsilva@fe.up.pt, vgomes@fe.up.pt, fpinto@fe.up.pt

Carlos Coelho

Departamento de Engenharia Civil
Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal.
ccoelho@ua.pt.

RESUMO

A análise crítica do desempenho de um modelo numérico de evolução a médio e longo-prazo da linha de costa mostrou a necessidade de melhorar a descrição dos processos físicos subjacentes, nomeadamente a evolução do perfil activo de praia sob acção de diferentes condições de agitação marítima. Foi concebido e implementado no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (SHRHA-DEC-FEUP) um modelo físico tridimensional com fundos móveis. A sua definição baseou-se em condições hidrodinâmicas e morfo-sedimentares típicas da costa Oeste Portuguesa, como as que caracterizam uma praia do sector costeiro Aveiro-Mira, onde se faz sentir a influência de uma estrutura de defesa transversal. Os resultados experimentais de monitorização da evolução do perfil transversal foram articulados com as simulações do referido modelo numérico, recorrendo aos resultados de medição das taxas de transporte longitudinal e identificando os efeitos de escala presentes. A análise dos resultados permitiu a definição de orientações para a descrição numérica da evolução a médio e longo-prazo do perfil transversal de praia.

Palavras-chave: modelação combinada, efeitos de escala, estrutura de defesa, transporte longitudinal.

1. INTRODUÇÃO

O aumento global da fixação das populações nas zonas costeiras e o conseqüente desenvolvimento das actividades económicas e sociais têm dado origem a uma multiplicação de intervenções antropogénicas sobre estes sistemas. A erosão costeira é um problema generalizado, ao qual estão associados custos elevados, sendo inúmeras as frentes urbanas em risco. As alterações climáticas resultam num risco acrescido de erosão e inundação. Nos últimos anos, a comunidade científica internacional tem desenvolvido especial esforço na investigação de aspectos que possam contribuir para a compreensão do comportamento e evolução da morfologia das zonas costeiras, de modo a que os instrumentos de planeamento tenham bases científicas que justifiquem as opções a tomar. Neste contexto, os modelos físicos e numéricos tornam-se essenciais.

O modelo numérico LTC (Long Term Configuration, Coelho *et al.* 2004) foi especialmente concebido para aplicação a praias arenosas, cuja evolução a médio e longo-prazo é principalmente devida ao transporte longitudinal de sedimentos, induzido pela agitação marítima na zona de rebentação e sujeita à disponibilidade sedimentar. Este modelo alarga o conceito de um modelo de linha de costa clássico, uma vez que permite a actualização da

topo-hidrografia da zona activa da praia, através de um esquema baseado em regras pré-definidas. A análise crítica do seu desempenho, tanto em testes genéricos como na sua aplicação a casos de estudo (Coelho 2005, Silva 2010), mostrou a necessidade de melhorar a descrição dos processos físicos subjacentes, nomeadamente a evolução do perfil activo de praia sob acção de diferentes condições de agitação marítima. Além disso, para aumentar a credibilidade dos seus resultados, deviam ser estabelecidos intervalos de valores com significado físico para os parâmetros morfodinâmicos, habitualmente utilizados na sua calibração. Por exemplo, a taxa de transporte longitudinal, a profundidade de fecho (Silva *et al.* 2008) e a granulometria dos sedimentos (Silva *et al.* 2009).

Com o intuito de aprofundar o estudo desses processos foi concebido e implementado, pela primeira vez, no Laboratório de Hidráulica da Secção de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente (SHRHA), do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), um modelo físico tridimensional com fundos móveis de transporte longitudinal de sedimentos. A dificuldade de definição e operação deste tipo de modelos físicos torna-os muito raros. De facto, à complexidade inerente aos modelos hidrodinâmicos de ondas curtas, acrescem os problemas de reprodução do transporte sedimentar (redução do tamanho dos sedimentos, formas de fundo, modo de transporte sedimentar dominante). As dificuldades de concepção reduzem-se quando são implementados a uma escala quase real (Hamilton e Ebersole 2001), mas as dificuldades de operação e os custos envolvidos aumentam. Para a definição deste tipo de modelo foram utilizadas orientações teóricas disponíveis na literatura (Hughes 1993, Oumeraci 1999, Soulsby 2008) e considerados outros estudos em modelo físico com fundos móveis (Dean 1985, Kamphuis 1975, 1985, Kamphuis e Kooistra 1990, Kamphuis 1991, 2002). O modelo foi definido para condições hidrodinâmicas e morfo-sedimentares típicas da costa Oeste Portuguesa, caracterizadas pelos parâmetros conhecidos numa praia existente a Sul da povoação da Vagueira (sector costeiro Aveiro-Mira), onde se faz sentir a influência de uma estrutura de defesa transversal. Devido a restrições impostas pelas dimensões e configuração do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA-DEC-FEUP, pela granulometria dos sedimentos disponíveis para a realização do estudo e pela necessidade de efectuar a medição de pequenas variações verticais do fundo, o modelo teve que ser geometricamente distorcido.

Seguiu-se uma abordagem combinada modelo físico/modelo numérico (DHI 2008), numa tentativa de ultrapassar a lacuna deixada pela escassez de dados de monitorização da evolução do perfil activo de praia, essencialmente devida à dificuldade técnica e aos custos elevados associados à sua realização. Assim, os resultados experimentais de monitorização foram articulados com simulações do referido modelo numérico. A integração dos resultados baseou-se na determinação da escala de tempo morfológico a partir das taxas de transporte longitudinal medidas no decurso do programa experimental. A análise e a interpretação dos resultados permitiram a definição de orientações relativas à descrição numérica da evolução a médio e longo-prazo do perfil transversal de praia.

2. O MODELO NUMÉRICO LTC

O modelo numérico LTC (Long Term Configuration, Coelho *et al.* 2004) foi desenvolvido para a previsão a médio e longo-prazo da evolução da linha de costa. O modelo foi especialmente concebido para aplicação a praias arenosas, cuja evolução é principalmente devida aos gradientes da taxa de transporte longitudinal de sedimentos, dependente do clima de agitação, do nível da água do mar, das fontes e sumidouros de sedimentos, das características dos sedimentos e das condições de fronteira. A topo-hidrografia da zona activa da praia é considerada e actualizada durante a execução do modelo, alargando-se o conceito clássico dos modelos de 1-linha. Podem ser representadas áreas extensas (vários km) num horizonte temporal de médio e longo-prazo (várias décadas). As principais limitações do modelo são as inerentes à evolução a médio e longo-prazo do perfil transversal de praia, designadamente em situação persistente de erosão ou acreção.

O modelo assume que cada onda actua durante um determinado período de tempo (o passo de tempo computacional). A transformação das ondas por refração e empolamento obedece à teoria linear da onda e a difracção na vizinhança de estruturas de defesa é também considerada. As condições da onda na rebentação são estimadas com base num critério

simples para a profundidade de rebentação (γ_b). Alternativamente, as condições da onda na rebentação podem ser importadas de resultados de modelos de agitação mais sofisticados. As taxas de transporte longitudinal potencial são avaliadas através de formulações semi-empíricas, como a formulação CERC (1984), ou a determinada por Kamphuis (1991) com base num estudo em modelo físico com fundos móveis,

$$Q = \frac{Q_s}{(\rho_s - \rho)(1 - n)} = \frac{2.27 H_{sb}^2 T_p^{1.5} m_b^{0.75} d_{50}^{-0.25} \sin^{0.6} 2\theta_b}{(\rho_s - \rho)(1 - n)} \quad [1]$$

em que Q representa a taxa de transporte longitudinal (m^3/s), ρ a massa volúmica da água (kg/m^3), ρ_s a massa volúmica dos sedimentos (kg/m^3), n a porosidade dos sedimentos, Q_s a taxa de transporte de massa submersa (kg/s), H_{sb} a altura de onda significativa na rebentação (m), T_p o período de onda de pico (s), m_b o declive do fundo na zona de rebentação, d_{50} o diâmetro mediano dos sedimentos (m) e θ_b o ângulo de incidência da onda na rebentação.

Tal como no caso de um modelo clássico de 1-linha, em cada passo de tempo computacional, a equação da continuidade é utilizada para fazer o balanço do volume de sedimentos em cada secção transversal do domínio computacional, devido à variação das taxas de transporte longitudinal entre secções adjacentes e da eventual entrada/saída de sedimentos nessa secção. O aumento/diminuição do volume de sedimentos corresponde a uma subida/descida da posição vertical de todos os pontos do perfil activo, entre o limite submerso até ao qual são mensuráveis variações de profundidade (profundidade de fecho, DoC , calculada de acordo com Hallermeier 1981a) e o limite máximo de espraiamento da onda (Ru , avaliado através de uma formulação apresentada em Ruggiero *et al.* 2001). Na vizinhança da DoC a actualização das cotas do perfil é condicionada pelo ângulo de repouso dos sedimentos (Φ), numa situação de acreção, e por um declive mínimo definido pelo utilizador para a praia submersa, numa situação de erosão. Na vizinhança do Ru , os parâmetros que controlam a actualização das cotas do perfil são o declive mínimo da face da praia definido pelo utilizador e Φ , respectivamente para as situações de acreção e erosão, Figura 1. Desta forma, podem ser testadas várias configurações de evolução do perfil transversal activo, em diferentes situações de acreção/erosão, ultrapassando-se as limitações inerentes ao estado actual do conhecimento.

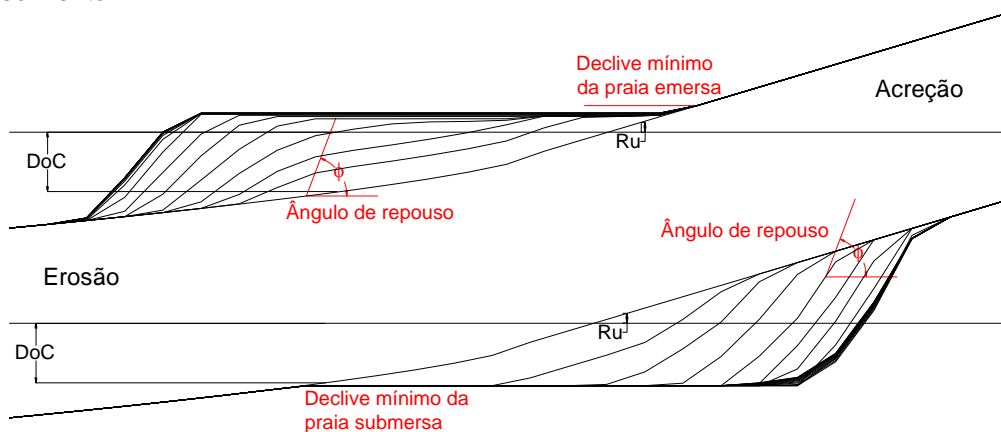


Figura 1. Esquema de actualização do perfil transversal activo (escala vertical distorcida).

3. MODELO 3D COM FUNDOS MÓVEIS DE TRANSPORTE LONGITUDINAL

Um modelo físico tridimensional com fundos móveis foi implementado no tanque de ondas (12 m de largura, 28 m de comprimento e 1.2 m de profundidade) do Laboratório de Hidráulica da SHRHA-DEC-FEUP, equipado com um sistema multi-elemento de geração de agitação, que incorpora um sistema de absorção dinâmica da reflexão (*HR Wallingford*). O principal objectivo do estudo experimental foi a monitorização da evolução de uma praia sob acção de diferentes condições de agitação, que induziam taxas de transporte longitudinal relevantes, assumindo-se que o transporte longitudinal é o processo dominante na evolução a médio e longo-prazo da parte activa de uma praia.

3.1. Condições no Protótipo

O modelo foi definido de forma a reproduzir uma praia localizada na região central da costa Oeste Portuguesa, a Sul da povoação da Vagueira (no sector costeiro Aveiro-Mira). Esta praia tem estado sujeita a uma situação persistente de erosão e é influenciada, numa extensão de cerca de 1000 m, pela presença de uma estrutura de defesa transversal. Na Tabela 1 apresenta-se um resumo dos valores típicos utilizados para caracterizar os parâmetros hidrodinâmicos e morfo-sedimentares no protótipo.

Tabela 1. Valores dos parâmetros hidrodinâmicos e morfo-sedimentares no protótipo.

Altura de onda significativa média, H_s	1 – 2 m
Período de onda de pico médio, T_p	8 – 12 s
Direcção média na base da praia	O 10° N
Nível médio da água do mar	+2 m ZH (Zero Hidrográfico)
Taxa de transporte longitudinal potencial	1 – 2 milhões m ³ /ano
Declive da face da praia	0.05
Massa volúmica dos sedimentos, ρ_s	2650 kg/m ³
Diâmetro mediano dos sedimentos, d_{50}	0.5 mm

O modelo devia abranger toda a zona activa da praia, incluindo a zona de rebentação, entre o Ru e a DoC . A altura da zona activa da praia é função das condições de agitação que sobre esta actuam. Este parâmetro foi avaliado para as condições de agitação a testar, sendo o maior valor encontrado de 12 m. Este valor resulta da soma do Ru com a DoC , estimados com base na altura de onda significativa na rebentação, H_b , através das expressões $Ru \sim H_b$ e $DoC \sim 3H_b$ (Roberts *et al.* 2007), em que H_b foi estimada através da seguinte formulação (Komar 1998),

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

em que g representa a aceleração da gravidade (m/s²) e considerando $H_s = 2$ m e $T_p = 12$ s.

3.2. Definição do Modelo

A praia que se pretendia reproduzir em modelo apresentava uma dimensão longitudinal de cerca de 1000 m e uma dimensão vertical de cerca de 12 m. A selecção da areia para a construção do modelo, as restrições impostas pelas dimensões do tanque de ondas e a necessidade de haver suficiente resolução para o levantamento das variações verticais do fundo, obrigaram à distorção do modelo. Na verdade, o equipamento que foi utilizado para a medição das posições do fundo tinha uma resolução vertical de cerca de 1 mm. Para esta resolução e para uma escala geométrica $N = 50$, apenas poderiam ser medidas variações verticais superiores a 5 cm no protótipo. Kraus *et al.* (1999) relataram que a resolução do equipamento mais preciso para o levantamento do perfil de praia era de 2.54 cm. Na definição do modelo, este foi o valor de resolução no protótipo que se pretendeu atingir.

O modelo correspondia primariamente a um modelo hidrodinâmico de ondas curtas, obedecendo ao critério de semelhança de *Froude*. A escala de comprimento característico foi considerada igual à escala geométrica vertical, $N_L = N_z$, de forma a garantir a adequada reprodução do empolamento e da refracção da onda (Hughes 1993). Outros fenómenos de transformação da agitação seriam afectados pela distorção geométrica do modelo. Ficaram assim estabelecidas as seguintes relações de escala, para as quais se assumiu $N_g = N_p = 1$,

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

em que x, y, z representam as coordenadas espaciais (m), H a altura de onda (m), L o comprimento de onda (m), T o período de onda (s), U a velocidade orbital (m/s), h a profundidade da água (m), t o tempo (s) e Ω a distorção geométrica do modelo.

Uma vez que o processo mais relevante que se pretendeu reproduzir foi o transporte longitudinal de sedimentos, o modelo foi considerado dominado pelo transporte em suspensão, devido aos elevados níveis de turbulência que ocorrem na zona de rebentação. Neste pressuposto foram adoptadas as relações de escala de Vellinga (1982), obtidas com base num grande número de testes em modelo físico e recomendadas por Dean (1985) para modelos distorcidos. Estes critérios definem a seguinte relação, para a qual se assumiu $N_g = 1$, ou seja,

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

em que ω representa a velocidade de queda dos sedimentos (m/s).

Para a construção do modelo foi seleccionada areia com um diâmetro mediano, $d_{50} = 0.27$ mm, e uma velocidade de queda $\omega = 35$ cm/s (estimada pela formulação de Hallermeier 1981b). Para um trecho de praia com 620 m de comprimento no protótipo, a selecção da areia fixou as escalas geométricas, horizontal, $N_x = 74$, e vertical, $N_z = 37$ ($\Omega = 2$). A geometria do modelo ficou definida: 40 cm de altura, 6.2 m de largura e 8.4 m de comprimento. O declive médio do perfil activo de praia foi de 0.06, fazendo um ângulo de cerca de 4° com a horizontal. A praia emersa tinha 16 cm de altura e a profundidade da água era de 24 cm.

3.3. Instalação Experimental, Sistemas de Medição e Programa Experimental

O modelo reduzido foi implementado segundo a direcção transversal do tanque de ondas, na extremidade oposta ao sistema de geração de agitação, em frente a uma praia dissipadora (Figura 2).

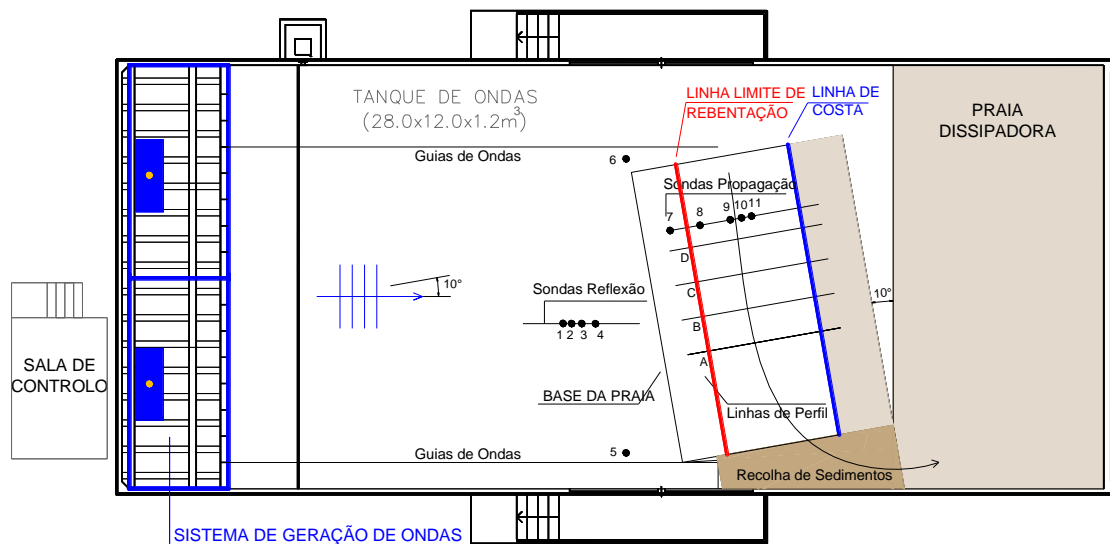


Figura 2. Instalação experimental, no interior do tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA-DEC-FEUP.

O modelo foi rodado cerca de 10° em relação à direcção transversal do tanque, ocupando uma área de cerca de $10\text{ m} \times 8\text{ m}$. Esta obliquidade permitiu a escolha de um método de geração de agitação, segundo a direcção normal ao sistema de geração, que permite um controlo e realismo da agitação gerada superiores aos conseguidos através do método disponível para a geração segundo direcções oblíquas ao sistema. As ondas geradas aproximavam-se da base da praia segundo um ângulo de incidência de 10° , induzindo uma corrente longitudinal que transportava os sedimentos para sotamar. A colocação oblíqua facilitou também a atenuação (na praia dissipadora) da corrente longitudinal induzida, evitando assim o estabelecimento de uma corrente circular entre a zona de geração da agitação e a base da praia. Foram colocados guias de onda paralelamente à direcção de propagação da agitação, de forma a evitar a perda lateral de energia.

A agitação gerada era irregular de crista longa, com uma densidade espectral de energia que seguia um espectro de *Jonswap*, para um parâmetro de reforço de pico $\gamma = 3.3$. Foi utilizado

um método de ruído branco filtrado para a geração da agitação (com uma repetição do sinal após cerca de 650 ondas), que permitia a activação das técnicas de absorção dinâmica de reflexão e de compensação de efeitos não-lineares. As séries temporais de elevação da superfície livre foram registadas junto à base da praia e ao longo de um perfil transversal. A aquisição foi efectuada por sondas hidrodinâmicas, que comunicavam com o módulo do sistema de geração dotado de um *software* de aquisição e análise de dados.

Para cada um dos testes experimentais realizados, foram registados os dados de elevação da superfície livre a uma taxa de amostragem de 24 Hz (4 Hz no protótipo), durante um período de tempo variável entre 10 minutos e 1 hora. Os locais de medição podem ser identificados na Figura 2: quatro sondas hidrodinâmicas na base da praia (sondas 1, 2, 3, 4 - para avaliação do espectro de agitação incidente e análise da reflexão), uma sonda hidrodinâmica a barlar e outra a sotamar (sondas 5, 6 - para medição do nível de água) e cinco sondas hidrodinâmicas ao longo de um perfil transversal (sondas 7, 8, 9, 10, 11 - para análise da propagação da agitação na zona de rebentação). Foi também efectuada a recolha sistemática dos sedimentos acumulados a sotamar, em virtude do seu transporte longitudinal (para determinação das taxas de transporte longitudinal de sedimentos). A área de recolha compreendeu toda a largura da zona de rebentação (Figura 2). Foram realizados levantamentos do perfil transversal, utilizando um perfilador de fundos sensível ao toque (*HR Wallingford*), em quatro secções transversais afastadas das fronteiras do modelo, com um espaçamento de 1 m entre si (A, B, C, D, Figura 2). As cotas do fundo foram medidas ao longo do perfil transversal com um espaçamento de 5 cm e uma resolução vertical de 1 mm. A posição da linha de costa e a posição da linha de rebentação foram monitorizadas utilizando um sistema de duas câmaras sincronizadas.

O procedimento experimental iniciava-se diariamente com o ajuste da profundidade da água no interior do tanque, que foi mantida constante em todos os testes experimentais. Seguiu-se a calibração das sondas hidrodinâmicas. A intensidade luminosa do sistema de câmaras era ajustada e era definida a programação diária de aquisição de imagens. Eram definidos os parâmetros de geração e aquisição de agitação. Dava-se início à série diária de testes experimentais. Do programa experimental constaram séries longas de testes de uma hora de acção de agitação irregular, seguidos de uma paragem para medição de perfis transversais e recolha dos sedimentos transportados para sotamar. Foram construídos quatro modelos, tendo sido realizada uma série de testes sobre cada um deles (Tabela 2).

Tabela 2. Programa experimental executado no estudo em modelo físico com fundos móveis.

Série	Duração (horas)	H_s (m)	T_p (s)	θ (°)	h (m)	Descrição
I.1	21	1	8	10	8.7	Praia em erosão
I.2	21	1	12	10	8.7	Praia em erosão
I.3	14	2	12	10	8.7	Praia em erosão
I.4	9	2	8	10	8.7	Praia em erosão
II	6	2	12	10	8.7	Praia em erosão
III	18	2	12	10	8.7	A barlar do esporão
IV	16	2	12	10	8.7	A sotamar do esporão

Na Série I de testes experimentais, o modelo reproduzia uma praia em situação persistente de erosão, uma vez que não havia alimentação sedimentar a barlar. O modelo foi submetido à acção sequencial de quatro condições de agitação persistentes, caracterizadas por diferentes alturas e períodos de onda. A duração total de acção da agitação nesta série de testes foi de 65 horas. Na Figura 3 apresentam-se os espectros de densidade de energia em função da frequência, $S(f_n)$, para cada uma das condições de agitação irregular testadas. É apresentado o espectro teórico gerado e o espectro medido nas sondas hidrodinâmicas 1, 2, 3, 4 (Figura 2) para um teste de exemplo de cada sub-série da Série I. Nas restantes séries de testes, as condições de agitação foram mantidas como na sub-série I.2. Os testes realizados durante a Série II tinham como principal propósito avaliar a influência da configuração inicial do perfil de praia na sua evolução e também servir como referência para as séries subsequentes. Na Série III e na Série IV, a evolução do perfil foi avaliada, respectivamente, a barlar e a sotamar de uma estrutura transversal, um esporão. O peso dos blocos de enrocamento utilizados para

reproduzir a estrutura de defesa foi determinado através da semelhança para a fórmula de *Hudson* (Hughes 1993), assumindo a escala geométrica vertical como escala de comprimento característico.

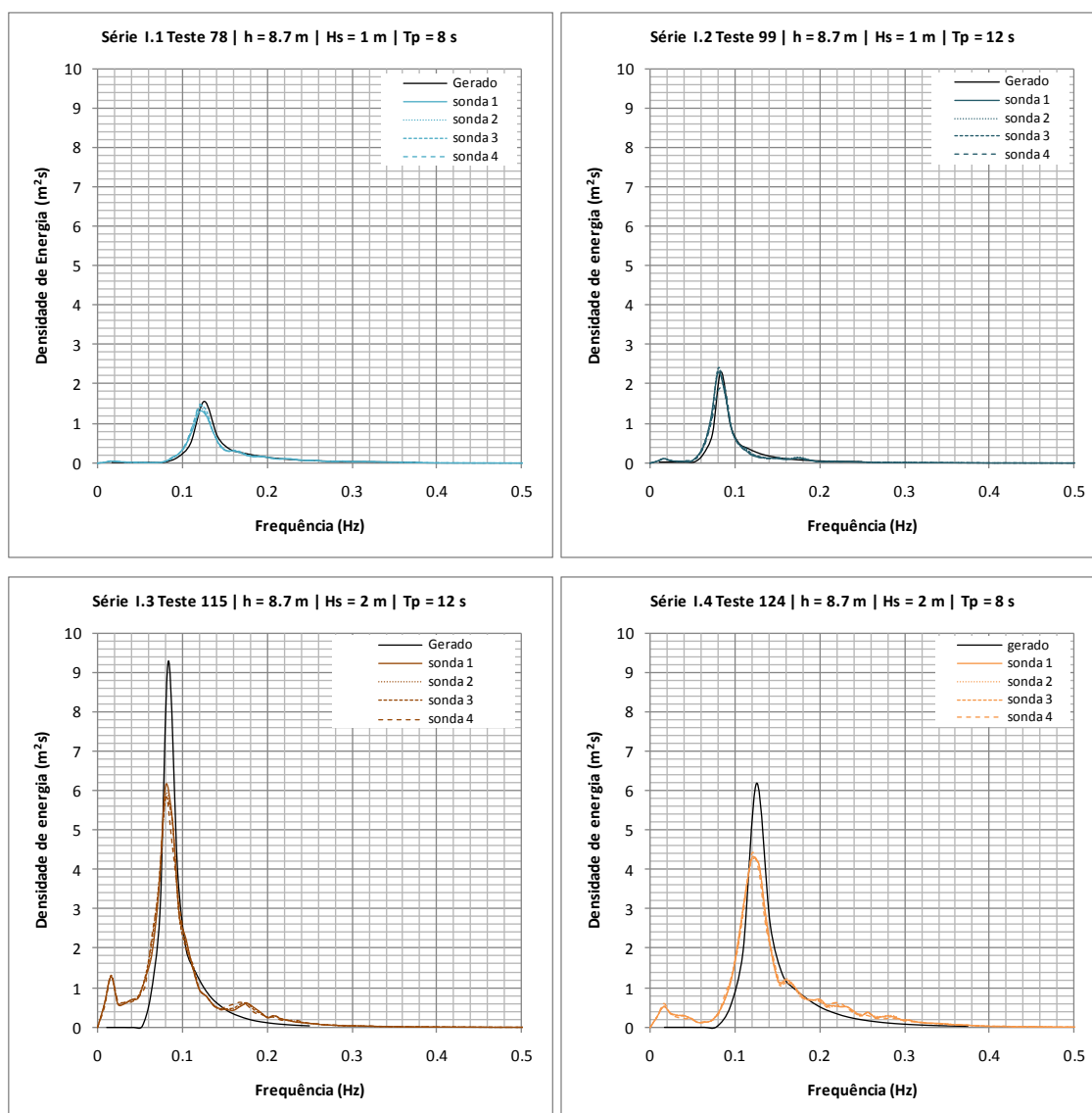


Figura 3. Exemplos dos espectros teórico gerado e medidos na base da praia num teste de cada sub-série I.1, I.2, I.3, I.4 (da esquerda para a direita e de cima para baixo).

4. EVOLUÇÃO DO PERFIL TRANSVERSAL ACTIVO

Apresenta-se na Figura 4 a evolução do perfil transversal activo na secção A da praia, no decurso da Série I de testes experimentais. Durante um período de tempo inicial de transição e sempre que houve alteração das condições de agitação incidentes a praia sofreu significativas alterações morfológicas segundo a direcção transversal, embora mantendo uma certa uniformidade longitudinal. A continuidade da acção das condições de agitação resultava em pequenas alterações no sentido transversal e numa intensificação do transporte longitudinal, associado a erosão do perfil e a recuo da linha de costa. Na Figura 5 representa-se a evolução do perfil transversal medida durante a Série III de testes experimentais (na secção A) e durante a Série IV de testes experimentais (no ponto médio entre as secções C e D). Pode ver-se que a barlarar da estrutura transversal, o perfil transversal se torna mais reflectivo, com maiores declives da face da praia, enquanto a sotamar se torna mais dissipativo, tendo associado um pronunciado recuo da linha de costa.

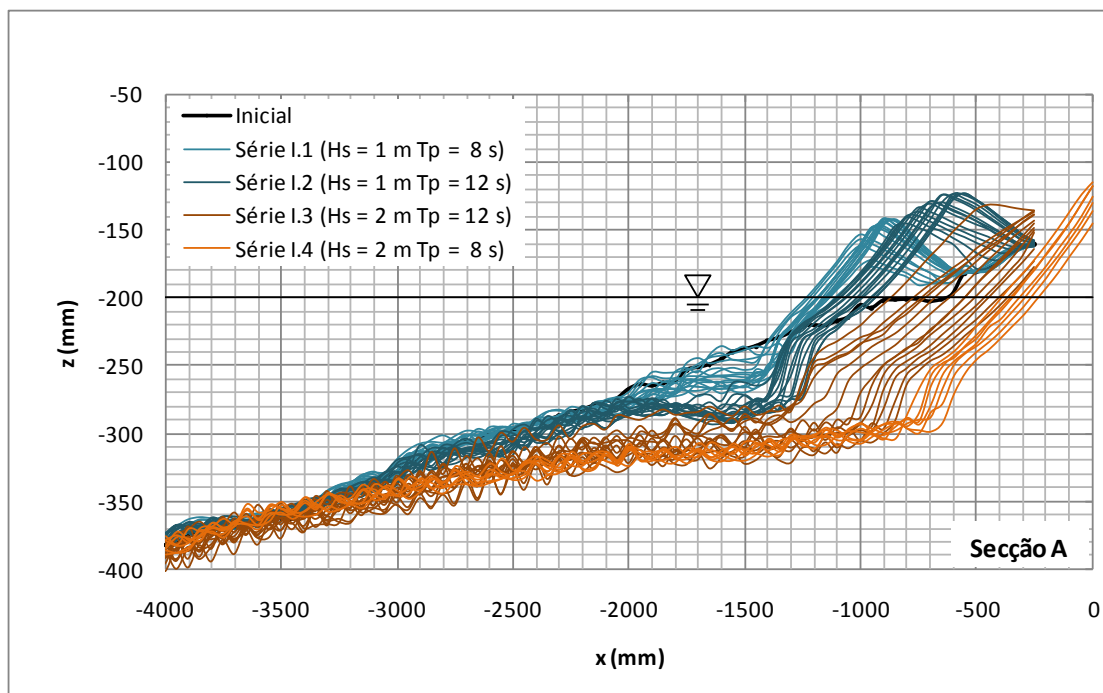


Figura 4. Evolução do perfil transversal no decurso da Série I de testes experimentais.

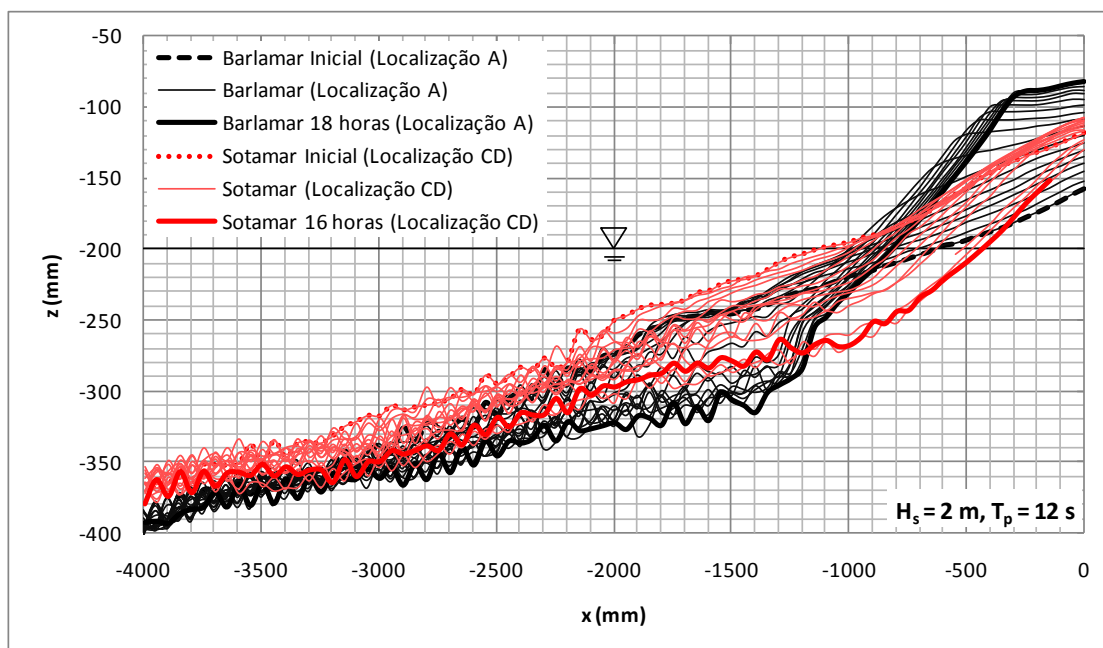


Figura 5. Evolução do perfil transversal a barlamar (Série III de testes experimentais) e a sotamar (Série IV de testes experimentais) da estrutura transversal.

5. EFEITOS DE LABORATÓRIO E DE ESCALA E INCERTEZA DAS MEDIÇÕES

Reconhece-se que um modelo costeiro reduzido é sempre afectado por efeitos de escala e de laboratório e pela incerteza associada às medições. Para a interpretação dos resultados do modelo físico, estes efeitos foram identificados e quantificados sempre que possível.

Os principais efeitos de laboratório eram os relacionados com a reflexão da agitação nas fronteiras físicas, com a geração mecânica das ondas e com a inadequada recirculação das correntes longitudinais no interior do tanque de ondas. A geração mecânica da agitação

introduz muitas vezes efeitos indesejados, tais como ondas transversais e ondas de longo período falsas, devidas a efeitos de interação não-linear dos campos de agitação irregular. O método do ruído branco filtrado, utilizado para a geração da agitação irregular, permite a activação de uma técnica de compensação dos efeitos não-lineares, baseada na adição de um sinal teórico de segunda ordem, que corrige a geração pelo sinal primário (Beresford 2003). Os efeitos da reflexão nas fronteiras físicas do modelo foram minimizados de duas formas distintas. Por um lado, foi utilizado um método incorporado no sistema de geração, de absorção dinâmica de reflexão nas pás da máquina de geração (Beresford 2003). Por outro lado, a praia existente na extremidade oposta ao sistema de geração tinha como principal função a redução da reflexão na parede do tanque. Devido à opção de colocação oblíqua do modelo, esta praia também contribuiu para a atenuação da recirculação da corrente longitudinal. Admite-se que as técnicas adoptadas foram eficientes na minimização dos efeitos de laboratório.

A quantificação dos efeitos de escala é difícil e altamente dependente da perspectiva adoptada para o modelo físico. Segue-se uma discussão dos efeitos de escala presentes no modelo físico reduzido. Em primeiro lugar são discutidos os efeitos hidrodinâmicos, seguindo-se os efeitos relacionados com o transporte de sedimentos e, finalmente, a incerteza das medições.

5.1. Efeitos Hidrodinâmicos

Os fenómenos de transformação da agitação são condicionados pela distorção geométrica do modelo. A parte hidrodinâmica foi dimensionada supondo que a escala de comprimento característico era igual à escala geométrica vertical (Secção 3.2). Segundo a teoria linear da onda, essa condição é necessária para garantir que a refração (governada pela lei de *Snell*) e o empoamento são adequadamente reproduzidos no modelo (Hughes 1993). No entanto, a verificação desta condição num modelo geometricamente distorcido resulta numa inadequada reprodução do fenómeno de difracção, uma vez que as coordenadas adimensionais x/L e y/L se encontram distorcidas ($N_L = N_z \neq N_x = N_y$).

A classificação da rebentação das ondas é, numa primeira aproximação, baseada no número de *Irribaren*, definido através da expressão seguinte (Komar 1998),

$$\xi = \frac{\tan\beta}{\sqrt{H/L}} \quad [5]$$

em que $\tan\beta$ representa o declive da face da praia.

Num modelo geometricamente distorcido este parâmetro não se encontra em semelhança, apresentando uma escala $N_\xi = 1/\Omega$, o que pode resultar numa alteração do carácter da rebentação entre o protótipo e o modelo reduzido. Na Tabela 3 apresenta-se a classificação da rebentação das ondas em função do número de *Irribaren* associado às condições da agitação na rebentação, para as condições testadas durante a Série I de testes experimentais. Os valores apresentados para o modelo são valores médios obtidos a partir das medições de declives e de agitação durante cada sub-série de testes experimentais. A transição do carácter de rebentação de mergulhante no protótipo para em colapso no modelo foi observada para a sub-série I.2 de testes experimentais.

Tabela 3. Classificação do tipo de rebentação baseada no número de *Irribaren* associado às condições da agitação na rebentação, para a Série I de testes experimentais.

Série	Protótipo		Modelo	
	ξ_b	Tipo de rebentação	ξ_b	Tipo de rebentação
I.1 ($H_s = 1$ m, $T_p = 8$ s)	0.886	Mergulhante	1.753	Mergulhante
I.2 ($H_s = 1$ m, $T_p = 12$ s)	1.338	Mergulhante	2.676	Em colapso
I.3 ($H_s = 2$ m, $T_p = 12$ s)	0.883	Mergulhante	1.765	Mergulhante
I.4 ($H_s = 2$ m, $T_p = 8$ s)	0.766	Mergulhante	1.531	Mergulhante

O Ru é também frequentemente parametrizado em função do número *Irribaren*, através de uma formulação do tipo $Ru = c H \xi$, em que c é uma constante empírica (Hughes 2004). Desta relação, apesar de o Ru ser um comprimento vertical, num modelo geometricamente distorcido a sua escala é $N_{Ru} = 1/\Omega N_z$. Assim, antecipou-se que o Ru fosse maior no modelo do que o

determinado pela escala geométrica vertical, o que foi considerado para a definição do modelo. Também se antecipava uma maior reflexão na praia. Foi efectuada uma análise da reflexão no decurso dos testes experimentais, recorrendo ao software de análise de dados de agitação, incorporado no sistema de geração (Beresford *et al.* 2005). Esta análise consistia na aplicação do método dos mínimos quadrados para o ajuste de séries temporais de elevação da superfície livre, medidas em quatro sondas hidrodinâmicas co-lineares com um espaçamento conhecido entre si, colocadas sobre uma profundidade constante (sondas 1, 2, 3, 4, cf. Figura 2). O método permite a separação do espectro de densidade de energia incidente, $S_{in}(f_n)$, do espectro de densidade de energia reflectido, $S_{rn}(f_n)$. Trata-se de uma generalização do método apresentado por Isaacson (1991) para agitação irregular, baseado na manipulação no domínio da frequência dos parâmetros medidos, assumindo reflexão especular e a aplicabilidade da teoria linear da onda. Na Figura 6 apresentam-se os valores obtidos durante a Série I de testes experimentais para a altura de onda significativa incidente,

$$H_{m0i} = 4 \sqrt{\sum_n S_{in}(f_n)} \quad [6]$$

e para o coeficiente de reflexão global,

$$Cr = \sqrt{\frac{\sum_n S_{in}(f_n)}{\sum_n S_{rn}(f_n)}} \quad [7]$$

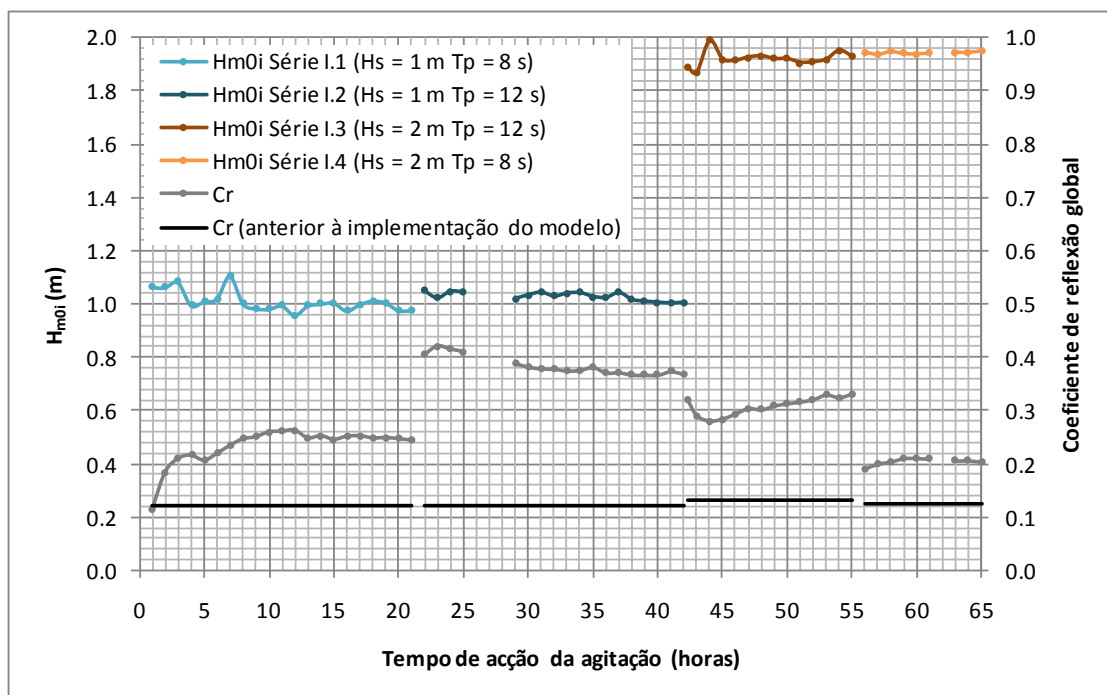


Figura 6. Altura de onda significativa incidente (eixo esquerdo) e coeficiente de reflexão global (eixo direito) durante a Série I de testes experimentais e antes da construção do modelo.

O efeito reflectivo introduzido pela praia pode ser inferido da análise da Figura 6. Antes da construção do modelo a agitação era reflectida na praia dissipativa (cf. Figura 2), com um coeficiente de reflexão que variava entre 12% e 13% para as condições de agitação testadas. Posteriormente, este parâmetro aumentou significativamente, gradualmente, no início, com o ajuste transversal do perfil de praia à acção da agitação, estabilizando em cerca de 25% após cerca de sete horas. A sensibilidade do perfil transversal de praia às condições de agitação actuaes está patente na rápida variação do coeficiente de reflexão global, em resposta à mudança das condições de agitação, aumentando com a diminuição da declividade da agitação (H/L). A rebentação em colapso é característica de praias com declives acentuados

sob acção de agitação com uma declividade pequena. Este tipo de rebentação assemelha-se à rebentação mergulhante, mas ao invés de revelar um avanço da crista é a cava da onda que avança, conduzindo ao colapso da crista ou, em algumas situações, a um movimento oscilatório, estando normalmente associada a importantes fenómenos de reflexão. De acordo com a Tabela 3, as condições de agitação que actuaram durante a sub-série I.2 de testes experimentais deram origem a uma rebentação em colapso, diferente da rebentação mergulhante que ocorria para as restantes sub-séries. A elevada reflexão da praia para a sub-série I.2 de testes experimentais é consistente com este prognóstico.

Os efeitos de escala devidos à dissimilitude das forças de tensão superficial podem causar um amortecimento do movimento da superfície livre e consequentemente afectar a celeridade da onda, resultando na incorrecta reprodução de fenómenos como a refacção. Valores de referência (Hughes 1993) indicam que as forças de tensão superficial contribuem com cerca de 1% para o equilíbrio das forças de inércia, em profundidades de 2 cm e períodos de onda de 0.35 s, podendo este contributo aumentar para valores inferiores. O conteúdo energético das condições de agitação irregular testadas, associado às frequências em que estes efeitos poderiam ter alguma importância ($f > 2.85$ Hz) é praticamente nulo (cf. Figura 3). Portanto, os efeitos de escala devidos a forças de tensão superficial foram considerados desprezáveis.

Os processos de dissipação turbulenta de energia são devidamente reproduzidos através do critério de semelhança de *Froude*, em particular, os que ocorrem numa camada-limite turbulenta. No entanto, o número de *Reynolds* não se encontra em semelhança, sendo necessariamente reduzido de acordo com este critério, o que representa um aumento dos efeitos viscosos, aumentando também a probabilidade de os escoamentos oscilatórios turbulentos no protótipo se tornarem em escoamentos de transição no modelo. Neste caso, as ondas de superfície são atenuadas por atrito interno e por atrito na camada-limite junto ao fundo. Hughes (1993) declarou que a atenuação das ondas de superfície por atrito interno, durante a sua propagação no interior de tanques de onda é tipicamente pequena, uma vez que a distância percorrida é curta. Na verdade, para distâncias pequenas o atrito interno é mínimo e os efeitos de dissipação viscosa estão confinados à camada-limite junto ao fundo. O autor relata que a atenuação sobre um fundo plano é de cerca de 5%, para ondas de superfície caracterizadas por uma altura de onda de 8 cm e um período de onda de 1.2 s, ao percorrerem uma distância de cerca de 50 m no interior de um tanque de ondas com 40 cm de profundidade. No presente estudo para condições de agitação da mesma ordem de grandeza das condições referidas pelo autor, a distância percorrida, entre a zona de geração da agitação e a base da praia, é de cerca de 12 m (cf. Figura 2). Assim, considerou-se que a atenuação das ondas de superfície sobre o fundo do tanque de ondas também poderia ser desprezada.

5.2. Efeitos no Transporte de Sedimentos

Na análise dos efeitos de escala associados aos processos de transporte sedimentar presentes no modelo reduzido da praia, a tensão de atrito junto ao fundo e os níveis de turbulência assumem papéis muito importantes (Soulsby 1997, van Rijn 1993).

Fora da zona de rebentação, os agentes hidrodinâmicos da dinâmica sedimentar (ondas e correntes) actuam através do atrito no fundo. Esta acção é expressa em termos da tensão de atrito, τ_0 , que representa a força de atrito exercida pelo escoamento por unidade de área do fundo. Esta quantidade também pode ser representada como uma velocidade de atrito, $u_* = \sqrt{\tau_0/\rho}$. A escala para a tensão de atrito num modelo hidrodinâmico de ondas curtas (*Froude*), de acordo com a definição da velocidade de atrito e assumindo $N_{ur} = N_u$ e $N_p = 1$, deve ser, $N_{\tau_0} = N_L = N$. A tensão de atrito junto ao fundo e as grandezas relacionadas são dependentes do tempo, sendo habitualmente definidas de acordo com o tipo de mecanismo de geração. Para escoamentos oscilatórios de superfície livre, a tensão de atrito junto ao fundo é também oscilatória, com amplitudes habitualmente representadas por τ_w . Esta quantidade pode ser relacionada com um factor de atrito, f_w , através da expressão, $\tau_w = \frac{1}{2}\rho f_w U_w^2$, em que $U_w = 2\pi A/T$ representa a amplitude da velocidade orbital junto ao fundo (m/s), $A = H/2/\sinh kh$ a excursão semi-orbital junto ao fundo e $k = 2\pi/L$ o número de onda (m^{-1}). A tensão de atrito depende da velocidade do escoamento e da rugosidade do fundo, habitualmente medida através da rugosidade de *Nikuradse*, k_s (relacionada com a granulometria dos sedimentos) ou do comprimento de rugosidade, z_0 (obtido a partir do perfil de velocidade do escoamento).

No interior da zona de rebentação, os níveis de turbulência tornam-se mais importantes, com a velocidade de queda a assumir particular destaque na dinâmica sedimentar. A velocidade de queda pode ser determinada através de três equações, válidas para diferentes intervalos de um parâmetro de impulsão definido para a areia natural (Hallermeier 1981b).

O modelo foi construído com areia e distorcido de acordo com a relação de escala de *Vellinga* (Secção 3.2). A presença de *ripples* entre a base da praia e a zona de rebentação foi permanente durante a realização dos testes experimentais (Figura 7). Ondulações deste tipo podem também ocorrer no protótipo, para esta zona da praia (Traykovski *et al.* 1999).



Figura 7. *Ripples* presentes no modelo físico durante a realização dos testes experimentais.

Alguns parâmetros, considerados importantes para os processos de transporte sedimentar, foram avaliados para as condições de agitação testadas durante a Série I de testes experimentais, para três cenários diferentes:

- a) Fundo liso e escala do tamanho dos sedimentos igual à escala de comprimento característico ($N_{d50} = N_z$, $d_{50} = 0.50$ mm no protótipo);
- b) Fundo liso e escala de *Vellinga* para o tamanho dos sedimentos ($d_{50} = 0.27$ mm no modelo, $d_{50} = 0.50$ mm no protótipo);
- c) Fundo com *ripples* e escala de *Vellinga* para o tamanho dos sedimentos ($d_{50} = 0.27$ mm no modelo, $d_{50} = 0.50$ mm no protótipo).

No caso de um fundo liso, a rugosidade de *Nikuradse* foi estimada através da expressão $k_s = 2.5d_{50}$, enquanto no caso de um fundo com *ripples*, a rugosidade do fundo deixa de ser definida em função da granulometria dos sedimentos, tornando-se dependente da geometria das formas de fundo. Neste caso, a rugosidade de *Nikuradse* pode ser estimada a partir do comprimento de rugosidade, $k_s = 30z_0$ (Soulsby 1997).

O comprimento de rugosidade foi considerado como a superposição de três componentes, z_{0s} relacionada com o atrito na superfície dos grãos, z_{0f} , relacionada com as formas de fundo e z_{0t} relacionada com o transporte de sedimentos (Soulsby 1997). A primeira componente foi avaliada através da expressão, $z_{0s} = d_{50}/12$. A componente relacionada com as formas de fundo foi estimada através da expressão, $z_{0f} = 0.267 \zeta^2 / \lambda$, em que ζ e λ representam respectivamente a altura e o comprimento das ondulações (m) (Nielsen 1992). A geometria das formas de fundo foi avaliada da seguinte forma: no protótipo através das formulações semi-empíricas de Nielsen (1981), recomendadas por Traykovski *et al.* (1999) para condições hidrodinâmicas e sedimentares no protótipo semelhantes às testadas; no modelo através das

formulações semi-empíricas de Faraci e Foti (2002), estabelecidas em condições consistentes com aquelas que foram testadas. Por fim, a componente relacionada com o transporte de sedimentos foi estimada através da expressão, $z_{0t} = 5.67(\theta_{ws} - 0.05)^{0.5}d_{50}$, em que $\theta_{ws} = \tau_{ws}/g(\rho_s - \rho)d_{50}$ representa a componente do parâmetro de *Shields* relacionada com o atrito sobre a superfície dos grãos. O factor de atrito assumiu-se como sendo igual ao de uma camada-limite rugosa turbulenta, podendo ser calculado através do seguinte conjunto de condições (Swart 1974),

$$\begin{aligned} f_w &= 0.3, & A/k_s &\leq 1.57 \\ f_w &= 0.00251 \exp [5.21(A/k_s)^{-0.19}], & A/k_s &> 1.57 \end{aligned} \quad [8]$$

A classificação do regime hidráulico de escoamentos oscilatórios na camada-limite junto ao fundo pode ser baseada no número de *Reynolds* do escoamento, $Re = (U_w A)/\nu$, e na rugosidade relativa, A/k_s (van Rijn 1993). Estes parâmetros foram avaliados para as condições testadas, assumindo a validade da teoria linear da onda. Na Figura 8 apresentam-se os valores obtidos, para uma localização entre a base da praia e a zona de rebentação (correspondente a uma profundidade de 3.82 m no protótipo e 10.3 cm no modelo), para cada um dos três cenários acima referidos.

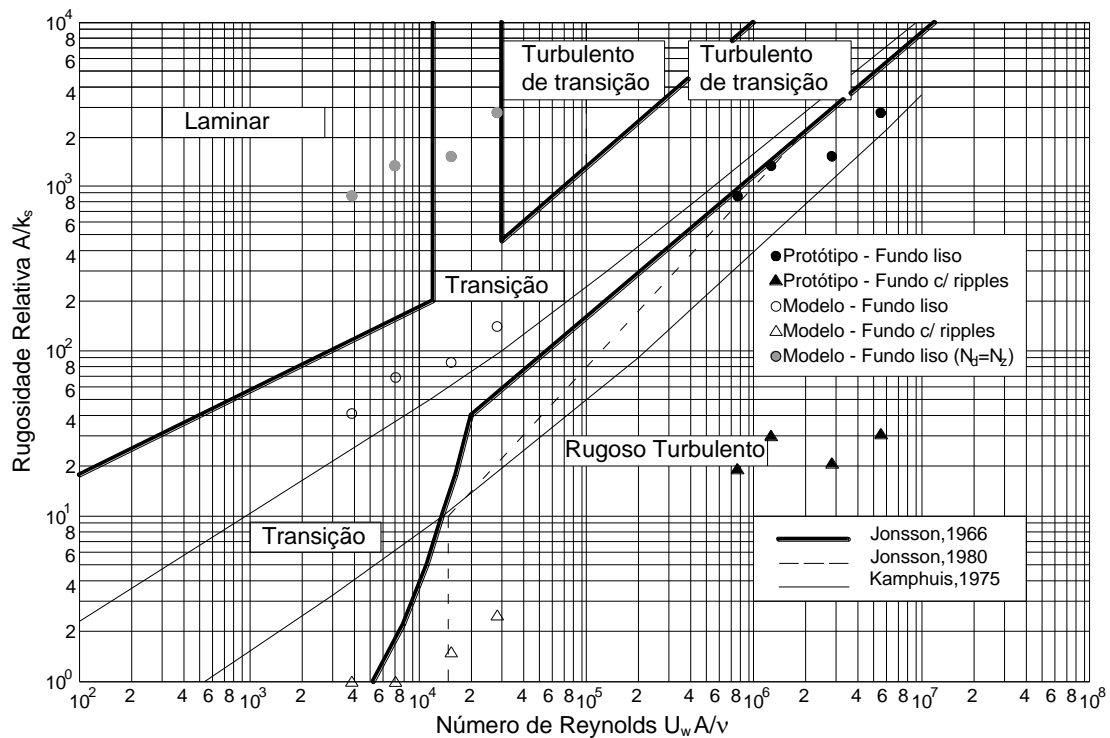


Figura 8. Classificação do regime hidráulico para as condições de agitação de teste e para cada um dos três cenários referidos (adaptada de van Rijn 1993).

A Figura 8 mostra que, para a profundidade seleccionada, o regime do escoamento apresenta uma clara tendência para passar do regime rugoso turbulento no protótipo para o regime laminar no modelo, devido à redução do número de *Reynolds* ($N_{Re} = N^{3/2}/N_v \approx 190$). No entanto, para o mesmo número de *Reynolds*, se a rugosidade relativa for reduzida, o que corresponde a um aumento da rugosidade do fundo, esta tendência reduz-se. Isto ocorre, por exemplo, quando se considera a existência de *ripples* no protótipo, em que o escoamento é claramente rugoso turbulento. O mesmo se verifica quando se compara classificação do regime hidráulico no modelo para os cenários de rugosidade do fundo crescente, a) fundo liso, $N_{d50} = N_z$, b) fundo liso, $d_{50} = 0.27$ mm e c) fundo com *ripples*, $d_{50} = 0.27$ mm. Assim, a ocorrência de *ripples* no fundo atenua os efeitos de escala associados à transição do regime hidráulico turbulento no protótipo para de transição no modelo.

Os parâmetros indicados a seguir foram considerados importantes na avaliação dos restantes efeitos de escala relacionados com os processos de transporte sedimentar:

- Densidade relativa, ρ_s/ρ ;
- Comprimento relativo, A/d_{50} ;
- Número de *Froude* densimétrico (equivalente ao parâmetro de *Shields* ou à tensão de atrito adimensional), $F_* = (\rho u_*^2)/(\gamma_s d_{50})$, em que $\gamma_s = (\rho_s - \rho)g$ representa o peso específico submerso dos sedimentos (N/m^3) e o diâmetro mediano da areia, d_{50} , representa o tamanho característico dos sedimentos (m);
- Número de *Reynolds* associado à granulometria dos sedimentos, $Re_* = (u_* d_{50})/\nu$;
- Velocidade de queda relativa, ω/u_* .

A densidade relativa é aproximadamente igual no protótipo e no modelo de areia, isto no pressuposto de que a massa volúmica da água salgada no protótipo é aproximadamente igual à massa volúmica da água doce utilizada no modelo.

Os restantes parâmetros foram estimados para pressupostos idênticos aos utilizados no caso da classificação do regime hidráulico, para as condições de agitação consideradas na Série I de testes experimentais e para os mesmos cenários. As escalas para estes parâmetros (relação entre protótipo e modelo) foram obtidas a partir da relação entre quantidades estimadas para a profundidade seleccionada entre a base da praia e a zona de rebentação (3.82 m no protótipo e 10.3 cm no modelo). Os valores obtidos apresentam-se na Tabela 4, seguindo-se a sua discussão.

Tabela 4. Escala dos parâmetros importantes nos processos de transporte sedimentar da Série I de testes experimentais, para os cenários mencionados.

Série	$N(A/d_{50})$	$N(\tau_{ws})$	$N(u_*)$	$N(F_*)$	$N(Re_*)$	$N(\omega/u_*)$
a) Fundo liso, $N_{d50} = N_z$, $d_{50} = 0.50$ mm no protótipo						
I.1 ($H_s = 1$ m, $T_p = 8$ s)	1	36	6	1	190	62
I.2 ($H_s = 1$ m, $T_p = 12$ s)	1	36	6	1	190	62
I.3 ($H_s = 2$ m, $T_p = 12$ s)	1	36	6	1	190	62
I.4 ($H_s = 2$ m, $T_p = 8$ s)	1	36	6	1	190	62
b) Fundo liso, $d_{50} = 0.27$ mm no modelo, $d_{50} = 0.50$ mm no protótipo						
I.1 ($H_s = 1$ m, $T_p = 8$ s)	20	12	3	6	5	0.5
I.2 ($H_s = 1$ m, $T_p = 12$ s)	20	13	4	7	6	0.5
I.3 ($H_s = 2$ m, $T_p = 12$ s)	20	15	4	8	6	0.5
I.4 ($H_s = 2$ m, $T_p = 8$ s)	20	14	4	7	6	0.5
c) Fundo com ripples, $d_{50} = 0.27$ mm no modelo, $d_{50} = 0.50$ mm no protótipo						
I.1 ($H_s = 1$ m, $T_p = 8$ s)	20	3	2	2	3	1
I.2 ($H_s = 1$ m, $T_p = 12$ s)	20	3	2	2	3	1
I.3 ($H_s = 2$ m, $T_p = 12$ s)	20	7	3	4	4	1
I.4 ($H_s = 2$ m, $T_p = 8$ s)	20	6	2	3	4	1

a) Fundo liso, $N_{d50} = N_z$, $d_{50} = 0.50$ mm no protótipo

Se os sedimentos tivessem sido reproduzidos de acordo com a escala geométrica vertical, o comprimento relativo, A/d_{50} , seria igual no modelo e no protótipo (tal como a rugosidade relativa de um fundo liso). Sob esta hipótese, a escala da velocidade de atrito seria igual à escala de velocidade $N_{u_*} = N_U$ e a escala da tensão de atrito seria $N_{\tau_0} = N_L = N_z$. Além disso, o número de *Froude* densimétrico seria igual no modelo e no protótipo e o número de *Reynolds* associado à granulometria dos sedimentos seria menor, tal como o número de *Reynolds* do escoamento. Nesta hipótese, ter-se-ia observado uma clara tendência de o escoamento na camada-limite se tornar laminar no modelo (Figura 8), sendo de esperar uma redução das taxas de transporte por arrastamento. No entanto, a velocidade de queda seria muito reduzida (e também o parâmetro de velocidade de queda relativa), sendo expectáveis taxas de transporte em suspensão exageradas no modelo. Esta análise é consistente com as conclusões de Alsina *et al.* (2007), baseadas em resultados de simulações numéricas.

A areia utilizada para a construção do modelo apresenta dimensões maiores do que as necessárias para a semelhança do comprimento relativo. Neste caso, espera-se uma incorrecta representação do atrito no fundo, das formas de fundo e do fenómeno de percolação (Oumeraci 1999).

b) Fundo liso, $d_{50} = 0.27$ mm no modelo, $d_{50} = 0.50$ mm no protótipo

No cenário de um fundo liso, o comprimento relativo seria menor no modelo do que no protótipo e a rugosidade do fundo seria exagerada. A tensão de atrito (ou a velocidade de atrito) seria também exagerada. O número de *Froude* densimétrico seria menor, mas o número de *Reynolds* associado à granulometria dos sedimentos assumiria valores mais próximos dos valores no protótipo e a tendência de mudança para um regime hidráulico de transição diminuiria. O parâmetro velocidade de queda seria cerca do dobro no modelo, o que poderia ser indicativo de uma redução das taxas de transporte em suspensão. Além disso, as forças necessárias para a movimentação dos grãos seriam exageradas, uma vez que a sua escala depende da escala do tamanho dos sedimentos $N_F = N_{d50}^3 < N_L^3$ (Kamphuis 1985).

c) Fundo com *ripples*, $d_{50} = 0.27$ mm no modelo, $d_{50} = 0.50$ mm no protótipo

A presença de *ripples* no fundo, que espontaneamente apareceram no modelo, resulta num aumento dos factores de atrito e também da rugosidade do fundo. A tensão de atrito e a velocidade de atrito são ainda mais exageradas do que no caso de o tamanho dos sedimentos ter sido reproduzido de acordo com a escala geométrica vertical. Também o número de *Froude* densimétrico e o número de *Reynolds* associado à granulometria dos sedimentos aumentam. O parâmetro velocidade de queda relativa é aproximadamente igual no modelo e no protótipo.

A semelhança do parâmetro de *Shields* é considerada importante em estudos de escoamentos uniformes sobre fundos móveis, para os quais o movimento incipiente dos grãos tem um papel essencial. Em modelos costeiros com fundos móveis sob escoamentos oscilatórios, existem opiniões diversas acerca da sua importância. Os processos de interacção são mais complexos, especialmente devido à inversão do sentido do escoamento na camada-limite junto ao fundo, que se torna momentaneamente laminar (Hughes 1993). Dean (1985) é de opinião que a semelhança para o parâmetro de *Shields* não é importante nos processos costeiros, porque a mobilização dos sedimentos é feita pela turbulência e não pela tensão de atrito no fundo. Além disso, o autor afirma que a semelhança para o parâmetro velocidade de queda (necessária em modelos dominados pelo transporte em suspensão) resulta numa semelhança aproximada para o parâmetro de *Shields*. O autor apresentou um gráfico da curva crítica para o início do movimento sob a acção das ondas de superfície (Figura 9).

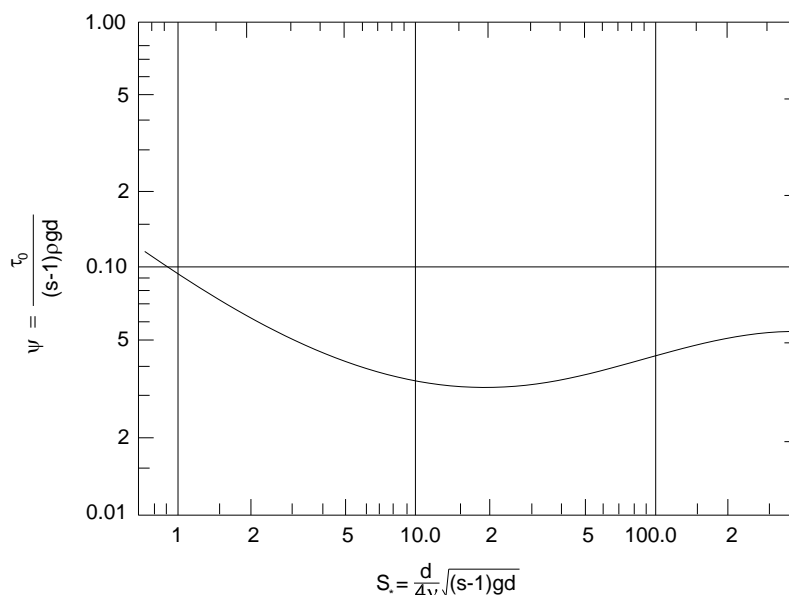


Figura 9. Curva crítica para o início do movimento sob a acção das ondas de superfície (Dean 1985, baseado em Madsen e Grant 1976).

Esta curva é definida pela tensão de atrito adimensional (ψ , parâmetro de *Shields*) em função de um parâmetro equivalente ao número de *Reynolds* associado à granulometria dos sedimentos (S^*). Os valores estimados para estas grandezas durante nas condições de agitação testadas durante a Série I de testes experimentais, para a profundidade seleccionada e para os cenários acima mencionados são apresentados na Tabela 5. A localização, na Figura 9, dos pares (ψ , S^*) obtidos garante o início de movimento.

Tabela 5. Parâmetros ψ e S^* nas condições de agitação testadas durante a Série I de testes experimentais, para os cenários mencionados.

Série	Protótipo		Modelo	
	ψ	S^*	ψ	S^*
d) Fundo liso, $N_{d50} = N_z$, $d_{50} = 0.50$ mm no protótipo				
1.1 ($H_s = 1$ m, $T_p = 8$ s)	0.5	9.4	0.5	0.05
1.2 ($H_s = 1$ m, $T_p = 12$ s)	0.5	9.4	0.5	0.05
1.3 ($H_s = 2$ m, $T_p = 12$ s)	1.6	9.4	1.7	0.05
1.4 ($H_s = 2$ m, $T_p = 8$ s)	1.5	9.4	1.6	0.05
e) Fundo liso, $d_{50} = 0.27$ mm no modelo, $d_{50} = 0.50$ mm no protótipo				
1.1 ($H_s = 1$ m, $T_p = 8$ s)	0.5	9.4	0.1	4.5
1.2 ($H_s = 1$ m, $T_p = 12$ s)	0.5	9.4	0.1	4.5
1.3 ($H_s = 2$ m, $T_p = 12$ s)	1.6	9.4	0.2	4.5
1.4 ($H_s = 2$ m, $T_p = 8$ s)	1.5	9.4	0.2	4.5
f) Fundo com ripples, $d_{50} = 0.27$ mm no modelo, $d_{50} = 0.50$ mm no protótipo				
1.1 ($H_s = 1$ m, $T_p = 8$ s)	2.2	9.4	1.2	4.5
1.2 ($H_s = 1$ m, $T_p = 12$ s)	2.0	9.4	1.3	4.5
1.3 ($H_s = 2$ m, $T_p = 12$ s)	7.7	9.4	2.1	4.5
1.4 ($H_s = 2$ m, $T_p = 8$ s)	8.2	9.4	2.7	4.5

5.3. Incerteza nas Medições

De acordo com a discussão apresentada na Secção 5.2, a presença de *ripples* no fundo parece beneficiar a reprodução do transporte de sedimentos em suspensão. No entanto, as dimensões destas ondulações, características do protótipo, confirmam a sua incorrecta reprodução e os perfis transversais medidos são afectados pelo seu exagero geométrico. Foi aplicado um filtro digital passa-baixo à série de posições do fundo no domínio do espaço⁻¹, antes da sua conversão para valores no protótipo, de forma a eliminar oscilações com comprimentos inferiores a 50 cm (Figura 10).

A incerteza associada à medição das pequenas variações verticais entre perfis sucessivos (~ mm), juntamente com a ligeira migração das *ripples*, inibiu uma avaliação rigorosa da variação de área do perfil entre testes sucessivos. A massa submersa dos sedimentos em transporte, $M_{s,m}$, foi determinada a partir dos sedimentos acumulados a sotamar da praia no fim de cada teste horário. Foi encontrada uma correlação significativa entre a taxa de variação da área dos perfis e a massa submersa dos sedimentos acumulados. Mais significativa foi a correlação encontrada entre a variação da posição da linha de costa e a massa submersa dos sedimentos acumulados, Figura 11. Neste caso, a dispersão dos valores é inferior, pois os factores de incerteza relacionados com a variação da área dos perfis não intervêm na determinação da posição da linha de costa. A relação encontrada entre as duas grandezas reflecte a validade da hipótese clássica dos modelos de 1-linha, de que o perfil transversal de praia mantém uma configuração de equilíbrio numa situação persistente de erosão, em que a variação da sua área corresponde uma variação da posição da linha de costa.

As taxas de transporte longitudinal de massa submersa foram determinadas a partir dos resultados obtidos no modelo físico, através da Eq. 1. Os valores no protótipo das quantidades intervenientes na formulação (Kamphuis 1991) foram estimados (usando a teoria linear das ondas e um critério simples de rebentação) a partir das medições no modelo físico (altura de onda significativa e período de onda de pico na base da praia). O declive do fundo na zona de rebentação foi aproximado pelo declive da face da praia (o seu exagero devido aos efeitos de escala foi considerado).

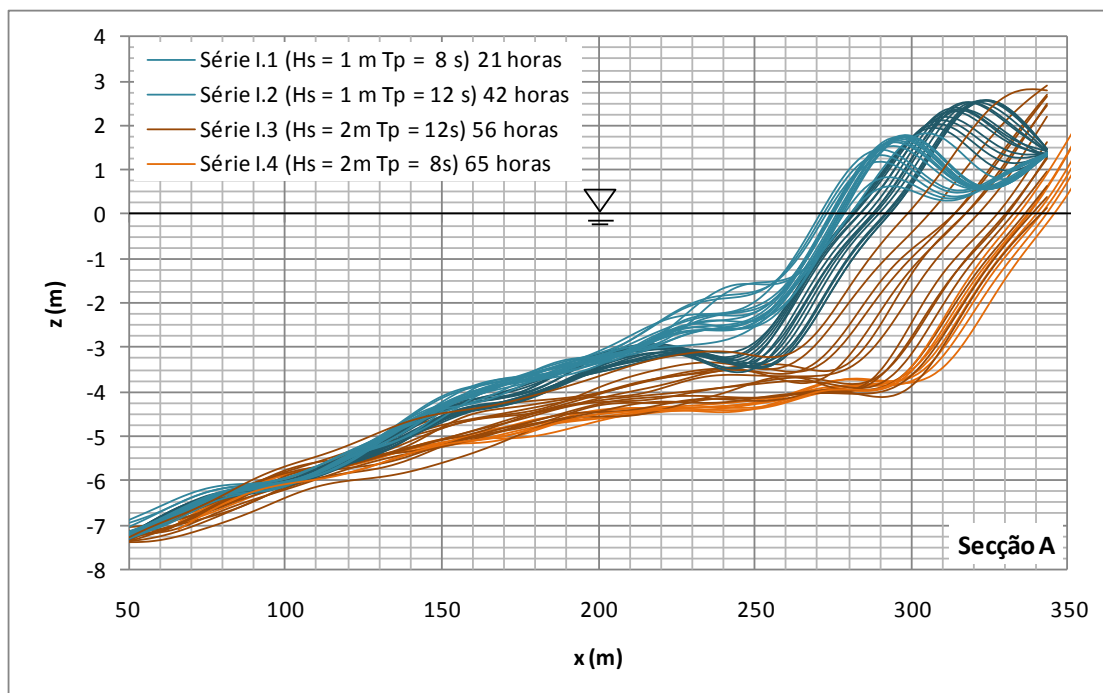


Figura 10. Evolução do perfil transversal durante a Série I de testes experimentais, após a aplicação de um filtro digital passa-baixo e conversão para valores no protótipo.

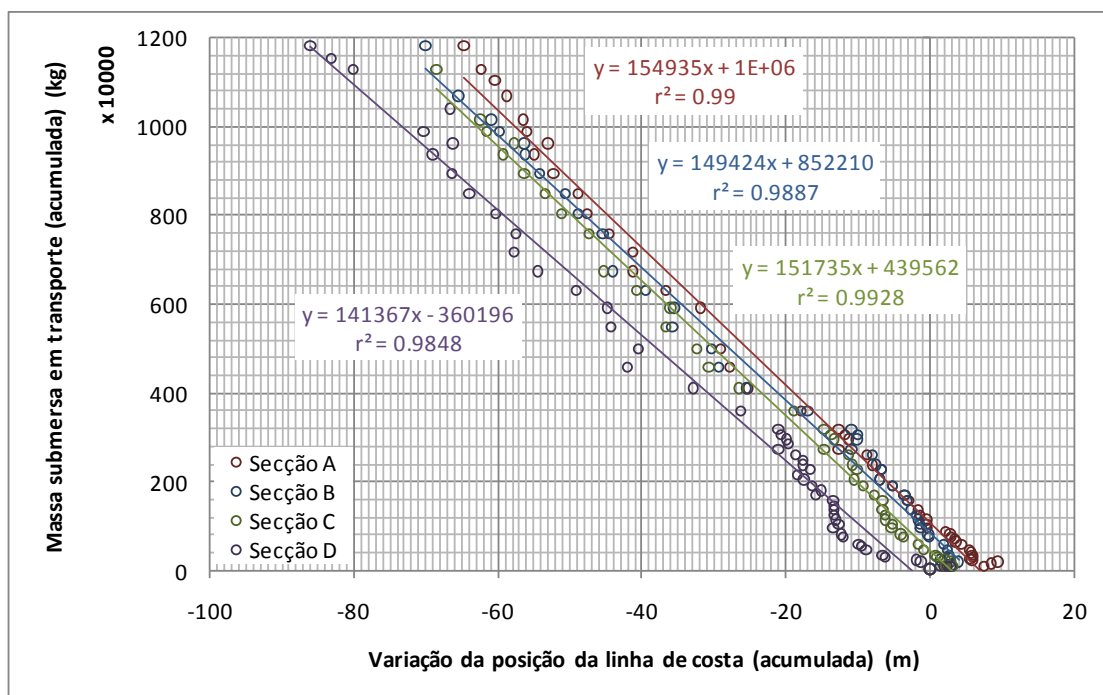


Figura 11. Massa submersa acumulada em função da variação acumulada da posição da linha de costa (secções A, B, C, D), durante a Série I de testes experimentais.

Estas taxas foram também avaliadas a partir da determinação da massa submersa dos sedimentos acumulados a sotamar da praia no fim de cada teste, através da seguinte expressão,

$$Q_{s,m} = M_{s,m}/\Delta t \quad [9]$$

em que Δt (s) representa a duração do teste.

A igualdade entre as taxas de transporte longitudinal de massa submersa (Eq. 1 e Eq. 9), considerando que $M_{s,m} = (\rho_s - \rho)(1-n)V_s$, em que V_s representa o volume de sedimentos em transporte, permite a estimativa da escala de tempo morfológico, ou seja,

$$N_{tm} = N_z^{5/2} N_x^{11/4} N_{d50}^{1/4} N_{\rho_s - \rho} N_{1-n} \quad [10]$$

Embora as taxas de transporte longitudinal derivadas com base na formulação semi-empírica tenham apresentado valores sistematicamente maiores, foi encontrada uma correlação significativa entre ambas. Uma regressão linear, utilizando o método dos mínimos quadrados, resultou num coeficiente de determinação $r^2 = 0.9734$. As diferenças observadas podem ser devidas aos efeitos de escala e de laboratório referidos (taxas de transporte eventualmente menores, estimativa dos ângulos de rebentação, ausência de alimentação sedimentar a barlamar da praia, descontinuidade da corrente longitudinal junto às fronteiras da praia) ou a incerteza nas estimativas.

6. EVOLUÇÃO COMBINADA DO PERFIL TRANSVERSAL DE PRAIA

A determinação da escala de tempo morfológico ($N_{tm} = 19.5$, considerando $N_{\rho_s - \rho} = N_{1-n} = 1$) permitiu a articulação entre os resultados do modelo físico, corrigidos de efeitos de escala, e os resultados das simulações numéricas com o modelo LTC. Os resultados combinados foram analisados para a Série I de testes experimentais (Figura 12).

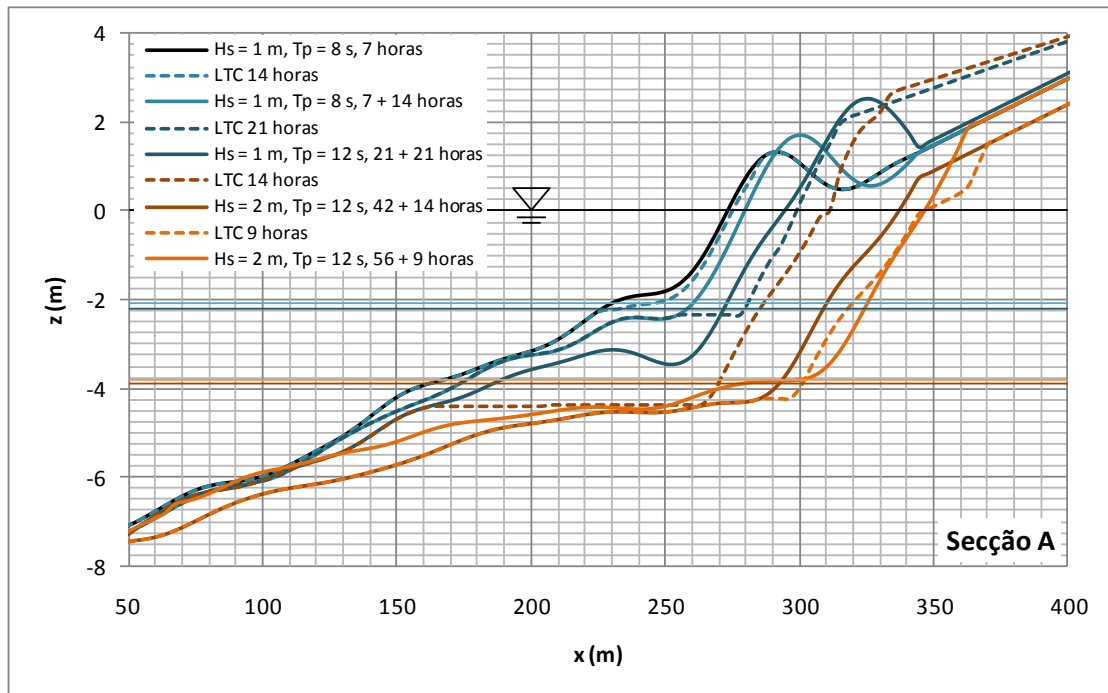


Figure 12. Comparação entre os perfis transversais medidos no modelo físico durante a Série I de testes experimentais e simulados pelo modelo LTC.

O modelo numérico não era capaz de simular o ajuste transversal dos perfis que ocorria sempre que havia uma mudança das condições de agitação. Por esta razão, foi realizada uma série de quatro simulações numéricas, usando o primeiro perfil medido em cada uma das sub-séries de testes experimentais para a construção da topo-hidrografia inicial. Da análise dos resultados verificou-se que a evolução do perfil transversal em erosão seria melhor representada se o declive da face da praia substitísse o ângulo de repouso, como parâmetro de controlo ao Ru . Em geral, foi encontrada uma boa concordância entre os resultados experimentais e numéricos, com as maiores diferenças a ocorrerem para a sub-série I.3, caracterizada pelas condições de agitação mais energéticas. Um aspecto a melhorar na descrição numérica da evolução do perfil transversal em erosão, está relacionado com a definição do limite submerso até ao qual ocorrem variações mensuráveis, vinculada à localização da zona de rebentação.

7. CONCLUSÕES

As opções seleccionadas para a concepção e implementação do modelo tridimensional com fundos móveis no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da SHRHA-DEC-FEUP provaram ser eficazes. Os efeitos de escala mais importantes encontrados nos processos hidrodinâmicos, especialmente devidos à necessária distorção geométrica, foram: incorrecta reprodução da difracção, possível transição do carácter de rebentação da onda, intensificação da reflexão e exagero do espraiamento de onda. Os efeitos de escala associados aos processos de transporte sedimentar são principalmente os relacionados com os efeitos viscosos na camada-limite junto ao fundo e com a granulometria dos sedimentos utilizados para a construção do modelo. Foram identificados: a incorrecta reprodução das formas de fundo, confirmada pela presença de *ripples* com dimensões características do protótipo, a eventual atenuação das taxas de transporte e o aumento da percolação. A combinação do efeito de percolação acentuada com um reforço da reflexão e um exagero do espraiamento de onda fazia prever um aumento do declive da praia. De facto, foi mostrado que o escoamento rugoso turbulento no protótipo apresenta uma clara tendência para se tornar de transição ou laminar no modelo, devido à necessária redução do número de *Reynolds*, num modelo hidrodinâmico de ondas curtas (*Froude*). Se o tamanho dos sedimentos no modelo fosse o determinado pela escala de comprimento característico, ocorreria além disso, uma redução do transporte por arrastamento e um aumento do transporte em suspensão. Quando são usados sedimentos de maiores dimensões, a tendência de transição de regime reduz-se. O atrito no fundo, a tensão de atrito e a velocidade de atrito tornam-se exageradas e o número de *Reynolds* associado à granulometria dos sedimentos aproxima-se dos valores no protótipo. Se o fundo fosse plano seria expectável um aumento do transporte em suspensão. A presença de *ripples* no fundo dá origem a uma tendência de redução do transporte por arrastamento e a uma reprodução aproximadamente correcta do transporte em suspensão. Neste caso, o parâmetro de *Shields* é reduzido ficando, no entanto garantido o início do movimento para todas as condições de agitação avaliadas.

Foi encontrada uma correlação significativa entre a taxa de transporte longitudinal e a variação da posição da linha de costa. Os resultados reflectiram a validade da hipótese clássica em modelos de 1-linha, de que o perfil de praia em erosão persistente mantém uma configuração de equilíbrio, verificando-se um recuo da posição da linha de costa. As taxas de transporte longitudinal medidas apresentaram valores sistematicamente inferiores aos estimados com base na formulação semi-empírica de Kamphuis (1991), verificando-se, no entanto, uma correlação significativa entre ambas. A determinação da escala de tempo morfológico permitiu a articulação entre os resultados do modelo físico e das simulações numéricas. Em geral, observou-se uma boa concordância entre os resultados, que forneceram orientações para a melhoria da descrição numérica da evolução do perfil transversal de praia em erosão. Os perfis transversais medidos a barlar e a sotamar de uma estrutura transversal poderão ser utilizados para a melhoria da descrição numérica da evolução do perfil nas imediações de uma transição acreção/erosão.

AGRADECIMENTOS

Raquel Silva é suportada pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia através de uma bolsa de pós-doutoramento (SFRH/BPD/70571/2010).

BIBLIOGRAFIA

- Alsina, J.M., Sánchez-Arcilla, A., Gironella, X., Baldock, T.E. (2007). Design of Scaled Movable Bed Experiments Using Numerical Models. *Journal of Coastal Research* SI 50, pp. 379 - 383.
- Beresford, P.J. (2003). HR WaveMaker - Wave Generation Control Program - Software Manual. Oxfordshire, United Kingdom, HR Wallingford Limited. IT 453 (Issue 5).
- Beresford, P.J., Spencer, J.M.A., Clarke, J. (2005). HR WaveData - Data Acquisition and Analysis Software Program - User Manual. Oxfordshire, United Kingdom, HR Wallingford Limited. IT 493.
- CERC (1984). Shore Protection Manual. Washington, DC, U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering and Research Center, U.S. Government Printing Office.

- Coelho, C., Taveira Pinto, F., Veloso Gomes, F., Pais Barbosa, J. (2004). Shoreline Coastal Evolution and Coastal Works in the Southern Part of Aveiro Lagoon Inlet, Portugal, Proceedings 29th International Conference on Coastal Engineering, American Society of Civil Engineers, pp. 3914-3926.
- Coelho, C. (2005). Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para diferentes Intervenções de Defesa Costeira. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 404 p.
- Dean, R.G. (1985). Physical Modeling of Littoral Processes. In: R.A. Dalrymple (Ed.), Physical Modelling in Coastal Engineering. A.A. Balkema, The Netherlands, Rotterdam, pp. 119-139. ISBN 90 6191 516 3.
- DHI (2008). JRA1.2 - 12 - CoMIBBS - Composite Modelling of the Interactions between Beaches and Structures, Task 4 - Composite Modelling of the Interaction between Groynes and Jetties. HYDRALAB III.
- Faraci, C., Foti, E. (2002). Geometry, Migration and Evolution of Small-scale Bedforms Generated by Regular and Irregular Waves. Coastal Engineering 47, pp. 35-52.
- Hallermeier, R.J. (1981a). A Profile Zonation for Seasonal Sand Beaches from Wave Climate. Coastal Engineering 4, pp. 253-277.
- Hallermeier, R.J. (1981b). Terminal Settling Velocity of Commonly Occuring Sand Grains. Sedimentology 28(6), pp. 859-865 (referido por Soulsby 1997).
- Hamilton, D.G., Ebersole, B.A. (2001). Establishing Uniform Longshore Currents in a Large-scale Sediment Transport Facility. Coastal Engineering 42, pp. 199-218.
- Hughes, S.A. (1993). Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering, Advanced Series on Ocean Engineering, World Scientific, London. ISBN 981-02-1540-1.
- Hughes, S.A. (2004). Estimation of Wave Run-up on Smooth, Impermeable Slopes using the Wave Momentum Flux Parameter. Coastal Engineering 51, pp. 1085- 1104.
- Isaacson, M. (1991). Measurement of Regular Wave Reflection. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering 117(6), pp. 553-569.
- Kamphuis, J.W. (1975). Coastal Mobile Bed Models: Does it Work? In: Symposium on Modelling Techniques, 2nd Annual Symposium of the Waterways Harbors and Coastal Engineering, Division of American Society of Civil Engineers, San Francisco, California, 2, pp. 993-1009, American Society of Civil Engineers.
- Kamphuis, J.W. (1985). On Understanding Scale Effect in Coastal Mobile Bed Model. In: R.A. Dalrymple (Ed.), Physical Modelling in Coastal Engineering. A.A. Balkema, The Netherlands, Rotterdam, pp. 141-162. ISBN 90 6191 516 3.
- Kamphuis, J.W., Kooistra, J., 1990. Three-Dimensional Mobile Bed Hydraulic Model Studies of Wave Breaking, Circulation and Sediment Transport Processes. In: Associate Committee on Shoreline (Ed.), Canadian Coastal Conference '90, National Research Council of Canada, Kingston, pp. 363-386.
- Kamphuis, J.W. (1991). Alongshore Sediment Transport Rate, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, 117(6), pp. 624-641.
- Kamphuis, J.W. (2002). Alongshore Transport of Sand. In: 28th International Conference on Coastal Engineering, Cardiff, Wales, pp. 2478-2490, American Society of Civil Engineers.
- Komar, P.D. (1998). Beach Processes and Sedimentation. 2nd Ed, New Jersey, USA, 544 p.
- Kraus, N.C., Larson, M., Wise, R.A. (1999). Depth of Closure in Beach-fill Design. Proceedings of the 12th Conference on Beach Preservation Technology, Tallahassee, Florida, pp. 271-286.
- Madsen, O.S., Grant, W.D. (1976). Quantitative Description of Sediment Transport by Waves. In: 15th International Conference on Coastal Engineering, Honolulu, HI, New York, pp. 1093-1112, American Society of Civil Engineers (referido por Dean 1985).
- Nielsen, P. (1981). Dynamics and Geometry of Wave-generated Ripples. Journal of Geophysical Research 86(C7), pp. 6467- 6472 (referido por Traykovski *et al.* 1999).
- Nielsen, P. (1992). Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport. Advanced Series on Ocean Engineering, Singapore, World Scientific (referido por Soulsby 1997).

- Oumeraci, H. (1999). Strengths and Limitations of Physical Modelling in Coastal Engineering, – Synergy Effect with Numerical Modelling and Field Measurement. In: HYDRALAB Workshop, Hannover, Germany, pp. 7-38, HYDRALAB.
- Roberts, T.M., Wang, P., 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.
- Ruggiero, P., Komar, P.D., McDougal, W.G., Marra, J.J., Beach, R.A. (2001). Wave Runup, Extreme Water Levels and the Erosion of Properties Backing Beaches. *Journal of Coastal Research*, 17(2), pp. 407-419.
- Silva, R., Coelho, C., Veloso Gomes, F., Taveira Pinto, F. (2008). A Importância de alguns Parâmetros Hidromorfológicos em Estudos de Modelação das Zonas Costeiras. In: 3^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, FEUP, Porto, Portugal, 30 Outubro, Ed. F. Taveira Pinto, pp. 25-35, ISBN 989-978-9557-2-3.
- Silva, R., Baptista, P., Veloso Gomes, F., Coelho, C., Taveira Pinto, F. (2009). Sediment Grain Size Variation on a Coastal Stretch facing the North Atlantic (NW Portugal). *Journal of Coastal Research SI 56* (Proceedings of the 10th International Coastal Symposium, Lisbon, Portugal), pp. 762-766. ISSN 0749-0208.
- Silva, R. (2010). Avaliação Experimental e Numérica de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução da Linha de Costa. Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 488 p.
- Soulsby, R. (1997). *Dynamics of Marine Sands: A Manual for Practical Applications*. London, Thomas Telford Publications, 249 p.
- Soulsby, R. (2008). Guidelines for Physical Modeling of Sediment Dynamics. HYDRALAB III European Community contract nº 022441 (RII3). HYDRALAB III Deliverable NA3.1-3.
- Swart, D.H. (1974). Offshore Sediment Transport and Equilibrium Beach Profiles. Waterloopkundig, Laboratorium, Delft, W.D. Meinema B.V (referido por Soulsby 1997).
- Traykovski, P.A., Hay, E., Irish, J.D., Lynch, J.F. (1999). Geometry, Migration, and Evolution of Wave Orbital Ripples at LEO-15. *Journal of Geophysical Research* 104(C1), pp. 1505-1524.
- van Rijn, L.C. (1993). *Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas*. Amsterdam, The Netherlands, Aqua Publications.
- Vellinga, P. (1982). Beach and Dune Erosion during Storm Surges, *Coastal Engineering* 6(4), pp. 361-387.