

Efeitos de escala em modelação numérica da erosão de um perfil de praia

Scale effects in numerical modelling of beach profile erosion

J. Contente (1) e F. S. B. F. Oliveira (1)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal.
joana.contente22@gmail.com

Abstract: Scale effects in a numerical process-based beach profile model, applied to simulate beach profile evolution under erosive wave conditions, were investigated. The numerical model was applied at laboratory and prototype scales, first with the default settings and then calibrated. Its performance was evaluated using the Brier Skill Score. The numerical results of the profile evolution in both scales were compared after reducing the results from the prototype scale to the laboratory scale. The profile erosion prediction was overestimated in the laboratory scale and underestimated in the prototype scale. Despite the calibration parameter that causes the largest modifications of the beach profile being the same in both scales, the most efficient parameter was different. For most of the calibration parameters, the value for the best case was not coincident in both scales. It was concluded that there are scale effects using the Litprof model.

Palavras chave: Erosão Costeira, Modelação Morfodinâmica, Curto-prazo, Litprof, Efeitos de Escala

Keywords: Coastal Erosion, Morphodynamic Modelling, Short-term, Litprof, Scale Effects

1. INTRODUÇÃO

O estudo que aqui se descreve enquadra-se na área da dinâmica costeira. Teve como objetivo global melhorar a modelação numérica da morfodinâmica de praias a curto-prazo, através da validação de um modelo numérico a diferentes escalas, e objetivo específico a avaliação de efeitos de escala na modelação numérica.

A aplicação combinada de modelos numéricos e modelos laboratoriais à escala reduzida (modelos físicos), para além de permitir melhorar o conhecimento final sobre os processos simulados, permite também melhorar cada uma das metodologias individualmente. Por um lado, a medição de parâmetros, em diversas etapas, no âmbito da experiência laboratorial permite realizar um maior controlo dos resultados numéricos e consequentemente obter maior confiança nos resultados finais; por outro lado, a simulação numérica de condições de ensaio em modelo físico permite testar um mais alargado conjunto de condições, que não só demorariam mais tempo como também poderiam ser impossíveis de executar (por motivos tais como limitação das dimensões da infraestrutura e custo).

Dado o interesse na aplicação de modelos numéricos de morfodinâmica de praias a curto prazo às escalas dos modelos reduzidos, torna-se necessário realizar a sua validação a essas escalas. Ou seja, pretende-se responder à seguinte questão: “Realizando modelação física e numérica combinadas da evolução de um perfil de praia, deve realizar-se a modelação numérica à escala do protótipo e depois reduzir os resultados à

escala do modelo laboratorial ou realizar a modelação numérica à escala do modelo laboratorial diretamente?”. Para responder a esta questão, neste estudo simulou-se em modelo numérico, à escala experimental, um caso de erosão de perfil de praia anteriormente reproduzido em modelo físico no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Simulou-se também o mesmo caso à escala do protótipo, cujos resultados, após reduzidos à escala experimental, foram comparados com os primeiros, ou seja com os resultados numéricos à escala do modelo reduzido. Desta forma, avaliaram-se os efeitos de escala na modelação numérica da erosão de um perfil de praia.

2. METODOLOGIA

2.1. Modelo Litprof

O modelo Litprof é um dos cinco modelos numéricos do sistema de modelação Litpack (DHI, 2008), desenvolvido para modelação do transporte de sedimentos não-coesivos devido à ação de ondas e correntes na zona litoral. Trata-se de um modelo morfodinâmico quasi-3D, baseado nos processos físicos costeiros predominantes em praias quasi-uniformes, ou seja, em praias onde a direção da onda incidente pode ser variável mas as isolinhas de profundidade são aproximadamente paralelas à linha de costa (quer isto dizer que os gradientes das condições hidrodinâmicas e sedimentares na direção longitudinal são negligenciáveis).

O Litprof descreve as alterações morfológicas ocorridas num perfil normal à linha de costa quando submetido à ação de uma série temporal de agitação marítima e nível do mar (maré e sobrelevação). Trata-se de um modelo numérico constituído por vários sub-modelos dos processos costeiros: um modelo de hidrodinâmica, um modelo quasi-3D de transporte de sedimentos e um modelo morfológico (de evolução do fundo) (Fig. 1). A abordagem metodológica utilizada é descrita em Oliveira (2001) e DHI (2008). Os processos de transformação da onda considerados são o empolamento, a refração, a dispersão direcional e o decaimento devido à dissipação de energia associada ao atrito de fundo e à rebentação. Os processos decorrentes da progressão da onda em direção à linha de costa considerados como contribuintes para o transporte sedimentar são as assimetrias vertical e horizontal da onda, o fluxo lagrangiano, a corrente de circulação junto à camada limite (*streaming*), a deslocação de massa à superfície gerada pela rebentação (*surface roller*) e a corrente de retorno. Uma vez que não são estimadas as ondas infragravíticas (que resultam de interações harmónicas não lineares de grupos de ondas curtas) (Tucker, 1954), o modelo não considera o escoamento na zona de espraiamento (*swash*), ou seja, a extensão da zona ativa termina na última célula molhada devido à ação conjunta do *setup* (sobrelevação do nível do mar devida à rebentação das ondas) e das ondas curtas (ou gravíticas). O modelo resolve os dois modos de transporte sedimentar, que são o modo de fundo (ou arrastamento) e o modo de suspensão. No final de cada passo temporal de cálculo, o modelo atualiza o fundo através da aplicação da equação da continuidade aos sedimentos.

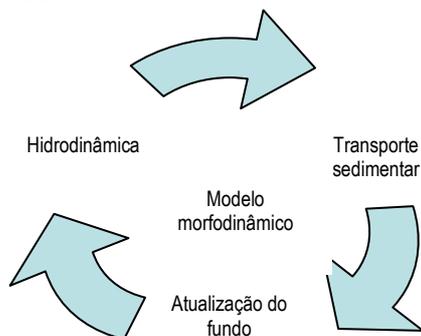


Fig. 1 – Esquema simplificado do modelo Litprof.

2.2. Caso de estudo

Realizaram-se ensaios em modelo reduzido correspondentes a condições de hidrodinâmica, morfologia e sedimentologia semelhantes às condições da praia de Buarcos, Figueira da Foz, localizada na costa central oeste Portuguesa, vastamente estudada e caracterizada anteriormente (Oliveira, 2002; Lorangeiro *et al.*, 2003; Freire *et al.*, 2004). Parte destes ensaios, detalhadamente descritos em Freire *et al.* (2008),

nomeadamente o ensaio correspondente a este caso de estudo, efetuaram-se na infraestrutura COI2, um canal de ondas irregulares com dimensões 73m x 3m x 2m (comprimento x largura x altura), do LNEC.

O presente caso de estudo trata-se de um perfil de praia com declive 1:20 e diâmetro mediano $D_{50}=0.4$ mm, realizado em modelo reduzido à escala 1:6. O topo de praia é limitado por uma defesa longitudinal aderente, que neste caso em particular, pelo facto do nível da água ter sido considerado igual a 1.0 m, não foi solicitada pela ação das ondas, ou seja, não ocorreu interação onda-estrutura. As condições de onda incidente foram um espectro de Jonswap com $H_s=0.37$ m, $T_p=3.27$ s e duração de 12 horas. Para efeitos de simulação numérica considerou-se para perfil inicial o perfil observado ao fim da primeira hora, sendo por isso o período de simulação numérica de 11 horas.

Da ação das ondas resultou um perfil do tipo barra-fossa, com uma fossa pouco pronunciada a tender para plataforma (Fig. 2). O nível da água parada corresponde à coordenada vertical z igual a zero. Salienta-se ainda que durante a experiência laboratorial ocorreram fugas de sedimento da parte inferior do perfil para o canal (fora da zona de monitorização).

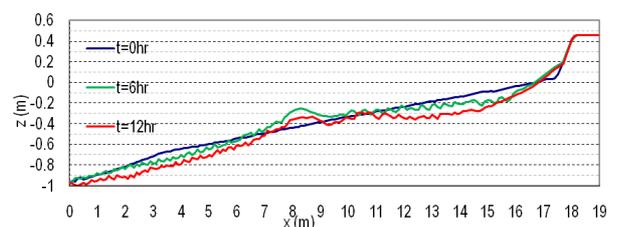


Fig. 2 - Evolução do perfil para o caso de estudo (envelope da observação experimental).

Nos ensaios em modelo reduzido foram consideradas as seguintes condições de redução de escala (Freire *et al.*, 2008):

- para os processos de hidrodinâmica considerou-se o modelo não distorcido, ou seja, aplicou-se uma única escala de comprimento para todas as variáveis ($n_H = n_L = n_h$); onde n representa a relação de escala protótipo-modelo e os índices significam altura de onda, H , comprimento de onda, L , e profundidade, h); e considerou-se a existência de similaridade do número de Froude ($Fr=U/(gh)^{1/2}$; onde U é a velocidade característica do escoamento e g a aceleração gravítica) entre o modelo e o protótipo.

- para os processos sedimentares aplicou-se a relação de escalas $n_{D50} = n_h^{0.56}$, onde n_{D50} e n_h são as relações de escala do diâmetro mediano dos sedimentos e da profundidade.

As relações de escala de velocidade, U , e de tempo, T , resultaram em $n_U = n_T = (n_L)^{0.5} = (n_h)^{0.5}$.

2.3. Abordagem metodológica

Com vista à avaliação dos efeitos de escala na modelação numérica deste caso de erosão de um perfil de praia, utilizou-se uma abordagem metodológica baseada na seguinte sucessão de procedimentos:

1. Simulação numérica do caso de estudo à escala do modelo reduzido.
 - 1.1. Aplicação do modelo com os parâmetros por defeito.
 - 1.2. Calibração do modelo.
2. Simulação numérica do caso de estudo à escala do protótipo.
 - 2.1. Aplicação do modelo com os parâmetros por defeito.
 - 2.2. Calibração do modelo.
3. Comparação dos resultados numéricos obtidos às escalas do modelo reduzido e do protótipo, após redução dos resultados obtidos à escala do protótipo para a escala do modelo reduzido.

A aplicação deste tipo de modelos morfodinâmicos baseados nos processos físicos requer um elevado número de parâmetros (de condições de onda, de escoamento, de transporte, de morfodinâmica, de fronteira e de estabilidade numérica), cujo valor a utilizar deve corresponder às condições físicas locais. Frequentemente, em projetos de engenharia, é inviável a medição direta de muitos destes parâmetros. Nestas circunstâncias, o procedimento que vulgarmente se utiliza é aplicar valores usados em casos de estudo com condições físicas semelhantes relatados em literatura, ou aplicar os parâmetros por defeito, recomendados pelos autores dos modelos, que foram definidos como sendo aqueles que melhor representam a mais alargada gama de condições físicas possível (previamente testado).

Neste estudo, em ambas as fases de aplicação do modelo, de simulação à escala do modelo reduzido e de simulação à escala do protótipo, fez-se uma aplicação prévia com os parâmetros por defeito. Identificam-se na Tabela I os principais parâmetros de calibração do modelo Litprof, assim como os valores atribuídos por defeito. Posteriormente, também em ambas as fases de aplicação do modelo, procedeu-se à calibração, ou seja, ajustaram-se parâmetros de forma a melhorar o desempenho do modelo, i.e., a similaridade com os resultados observados. Testaram-se os parâmetros de calibração assinalados na Tabela I, tendo como base os parâmetros por defeito. Em Oliveira (2011) mencionam-se os restantes parâmetros de calibração do modelo Litprof. Neste processo, fez-se variar um parâmetro de cada vez mantendo os outros constantes.

Tabela I – Parâmetros de calibração do modelo Litprof testados.

Parâmetro ¹	Valor por defeito	Outros valores testados
Gamma1	0.88	0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1
Gamma2	0.6	0, 0.4, 0.8, 1
Beta	0.15	0.1, 0.2
Max Angle	30°	10°, 15°, 20°
Scale Parameter	1	0.8, 1.2

¹ designação de acordo com a nomenclatura das variáveis na interface do modelo

Neste modelo numérico os principais parâmetros de calibração são os parâmetros de rebentação da onda Gamma1 (γ_1) e Gamma2 (γ_2), o parâmetro de turbulência Beta (β), o máximo ângulo de fundo submerso estável (Max Angle) e o parâmetro de escala Scale Parameter (α_{scale}).

Os parâmetros adimensionais γ_1 e γ_2 são considerados na estimativa da máxima altura de onda, H_{max} , que por sua vez é necessária para estimar a energia dissipada segundo Battjes & Janssen (1978). Eles são considerados na formulação seguinte

$$H_{max} = \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \tanh\left(\frac{\gamma_2 kh}{\gamma_1}\right) \quad (1)$$

onde k é o número de onda e h a profundidade. O parâmetro de rebentação γ_1 descreve a máxima declividade da onda, H/L . O parâmetro de rebentação γ_2 é, segundo Battjes & Stive (1984), calculado da seguinte forma

$$\gamma_2 = 0.5 + 0.4 \tanh(33s_0) \quad (2)$$

onde s_0 é o declive de onda ao largo, igual a H/L_0 , e L_0 é o comprimento de onda ao largo.

O parâmetro β é um parâmetro empírico que descreve a relação entre a taxa de energia dissipada e a área da turbulência superficial, através da equação da turbulência superficial (Dally & Brown, 1995), dada por

$$\frac{d}{dx}(E_r \cos \alpha) + \frac{d}{dx}\left(\frac{1}{2}\rho_r c^2 \frac{A}{T} \cos \alpha\right) = \rho_r g \beta \frac{A}{T} \quad (3)$$

onde E_r é o fluxo de energia da onda, α é o ângulo de incidência da onda, ρ_r é a densidade do rolo de turbulência, incluindo os turbilhões de ar, A é a área da superfície do rolo de turbulência, T é o período médio e g é a aceleração gravítica. Este parâmetro adimensional foi definido com base em experiências laboratoriais realizadas com ondas regulares (Dally & Brown, 1995). O valor recomendado é 0.15, independentemente de se considerarem ondas regulares ou irregulares.

O parâmetro Max Angle é, tal como o nome indica, o máximo ângulo de fundo antes de avalanche submersa, ou seja, o máximo ângulo de fundo submerso estável.

O parâmetro adimensional α_{scale} é um coeficiente de difusão horizontal que afeta a forma de desenvolvimento das barras. É um parâmetro associado à variação de momento horizontal e é proporcional a uma escala de comprimento característica à qual o

transporte é suavizado (DHI, 2008). O comprimento das barras aumenta com o aumento do valor deste parâmetro.

2.4. Avaliação de resultados

Para avaliar os resultados numéricos, para além da observação da similaridade entre previsões e medições do perfil de praia, utilizou-se um parâmetro estatístico adequado à principal variável a analisar, que é a profundidade. Utilizou-se o parâmetro Brier Skill Score (BSS) de van Rijn *et al.* (2003), que compara previsões ($z_{b,c}$) e medições de perfil ($z_{b,m}$) com o perfil inicial ($z_{b,0}$) e tem em conta o erro de medição ∂ (que aqui se assumiu nulo). Define-se por

$$BSS = 1 - \frac{\langle (|z_{b,c} - z_{b,m}| - \partial)^2 \rangle}{\langle (z_{b,0} - z_{b,m})^2 \rangle} \quad (4)$$

onde os parêntesis angulares denotam a média.

Apresenta-se na Tabela II a classificação do desempenho de modelos morfodinâmicos proposta por van Rijn *et al.* (2003).

Tabela II - Classificação proposta por van Rijn *et al.* (2003).

	Brier Skill Score (BSS)
Excelente	1.0 - 0.8
Bom	0.8 - 0.6
Razoável	0.6 - 0.3
Fraco	0.3 - 0.0
Mau	< 0.0

3. RESULTADO E DISCUSSÃO

Seguidamente descrevem-se os principais resultados das aplicações do modelo numérico à escala laboratorial e à escala do protótipo e da comparação entre ambas. Salienta-se que resultados mais detalhados podem ser vistos em Contente & Oliveira (2012).

3.1. Modelação à escala do modelo reduzido

O modelo com os parâmetros por defeito reproduz erosão da zona da face de praia, processo que não se verificou na experiência laboratorial, onde a zona que efetivamente erodiu se localiza a 11-17 m de distância à origem da abcissa do sistema de coordenadas do perfil. Consequentemente, o modelo simula um recuo ao nível da linha de água com cerca de 1 m que não foi observado (Fig. 3).

Dos cinco parâmetros de calibração testados, aquele que causou maiores alterações ao resultado obtido com os parâmetros por defeito foi o Gamma2. A alteração de Gamma2 de 0.6 para 0.4 foi o procedimento que permitiu obter melhor similaridade entre resultados numéricos e experimentais. O BSS passou de -0.74 para

-0.25 (Tabela III). Verificou-se assim que o parâmetro Gamma2 foi o mais eficaz na calibração do modelo à escala reduzida.

3.2. Modelação à escala do protótipo

O modelo com os parâmetros por defeito reproduz alterações insignificantes no perfil de praia, ou seja, não simula o processo de erosão observado na parte superior do perfil submerso (Fig. 3).

À semelhança do verificado na aplicação do modelo numérico à escala do modelo reduzido, o parâmetro de calibração que causou maiores modificações do perfil de praia relativamente ao resultado obtido com os parâmetros por defeito foi o Gamma2. Contudo, para todos os valores de Gamma2 testados, com a exceção do valor por defeito, 0.6, o parâmetro Gamma2 causou erosão da zona da face de praia (à semelhança dos resultados das simulações numéricas realizadas à escala do modelo reduzido). Com base no indicador de erro BSS, foi o parâmetro de calibração Scale Parameter igual a 0.8 que permitiu obter o melhor resultado do perfil à escala do protótipo (Tabela IV).

3.3. Comparação entre modelos às duas escalas

A aplicação do modelo numérico com os parâmetros por defeito a ambas as escalas mostrou que o modelo só simulou erosão do perfil de praia à escala reduzida e que a erosão simulada ocorreu na zona da face de praia (tendo em conta que o nível da água parada se verifica para z igual a zero), acima da erosão observada (que foi na parte superior do perfil submerso) (Fig. 3). O indicador de erro BSS aponta para um melhor desempenho do modelo numérico com os parâmetros por defeito à escala do protótipo do que à escala reduzida (Tabelas III e IV). Contudo, com base na classificação de van Rijn *et al.* (2003) (Tabela II), salienta-se que no primeiro caso o resultado é mau e no segundo é fraco, porque o processo de erosão do perfil é sobrestimado e subestimado respetivamente.

Compararam-se os resultados obtidos a ambas as escalas, do modelo reduzido e do protótipo, para cada um dos melhores casos dos cinco parâmetros de calibração (Figs 4-8). A avaliação de cada um dos melhores casos baseou-se na análise conjunta da similaridade entre os perfis numérico e experimental e do indicador de erro BSS. Verificou-se que, com exceção do parâmetro de calibração Scale Parameter, para o qual se obteve o melhor valor 0.8, nenhum dos parâmetros de calibração tem valores coincidentes para os melhores casos a ambas as escalas. Para as escalas do modelo reduzido e do protótipo, respetivamente, obtiveram-se os seguintes valores para os melhores casos: 1 e 0.8 para o parâmetro Gamma1; 0.4 e 0.6 (o parâmetro por defeito) para o parâmetro Gamma2; 0.15 (o parâmetro

por defeito) e 0.1 para o parâmetro Beta; e 20° e 30° (o parâmetro por defeito) para o Max Angle. Também se verificou que o parâmetro de calibração que permitiu obter os melhores resultados a ambas as escalas não foi o mesmo: à escala reduzida foi o parâmetro Gamma2 (para BSS igual a -0.25); e à escala do protótipo foi o parâmetro Scale Parameter (para BSS igual a 0.05). Estes resultados permitem concluir que a calibração do modelo numérico depende da escala de aplicação.

Tal como no caso de aplicação do modelo com os parâmetros por defeito, o indicador de erro BSS aponta para um melhor desempenho do modelo numérico calibrado à escala do protótipo do que à escala reduzida (Tabelas III e IV). Contudo, mantém-se o facto do processo de erosão do perfil ser sobrestimado à escala reduzida e subestimado à escala do protótipo.

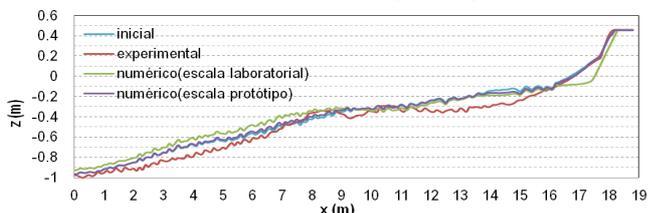


Fig. 3 – Evolução do perfil ao fim de 11 horas. Resultados numéricos com os parâmetros por defeito (às escalas laboratorial e do protótipo).

Tabela III - Valores de BSS para os testes à escala do modelo reduzido.

Teste	Brier Skill Score (BSS)
Parâmetros por defeito	-0.745
Gamma1=0.6	-0.529
Gamma1=0.7	-0.495
Gamma1=0.8	-0.592
Gamma1=0.9	-0.667
Gamma1=1	-0.589
Gamma2=0	-2.186
Gamma2=0.4	-0.252
Gamma2=0.8	-2.096
Gamma2=1	-5.049
Beta=0.1	-0.803
Beta=0.2	-0.747
Max Angle=15	-0.479
Max Angle=20	-0.532
Scale Parameter=0.8	-0.712
Scale Parameter=1.2	-0.845

Tabela IV - Valores de BSS para os testes à escala do protótipo.

Teste	Brier Skill Score (BSS)
Parâmetros por defeito	0.043
Gamma1=0.6	0.008
Gamma1=0.7	0.035
Gamma1=0.8	0.049
Gamma1=0.9	0.045
Gamma1=1	0.048
Gamma2=0	-0.204
Gamma2=0.8	-0.184
Gamma2=1	-1.182
Beta=0.1	0.048
Beta=0.2	0.042
Max Angle=15	0.008
Max Angle=20	0.033
Scale Parameter=0.8	0.054
Scale Parameter=1.2	0.033

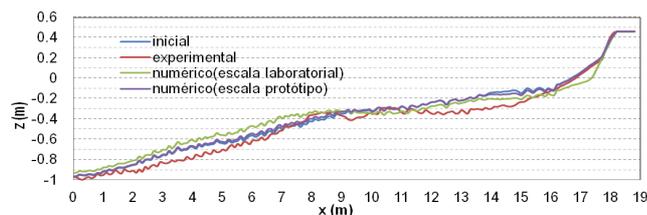


Fig. 4 - Evolução do perfil ao fim de 11 horas. Resultados numéricos da calibração do parâmetro Gamma1 (às escalas laboratorial e do protótipo).

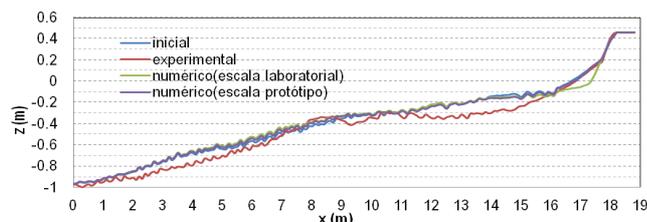


Fig. 5 - Evolução do perfil ao fim de 11 horas. Resultados numéricos da calibração do parâmetro Gamma2 (às escalas laboratorial e do protótipo).

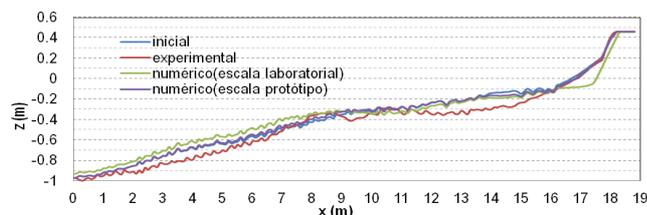


Fig. 6 - Evolução do perfil ao fim de 11 horas. Resultados numéricos da calibração do parâmetro Beta (às escalas laboratorial e do protótipo).

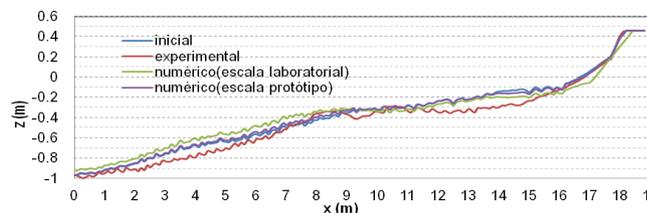


Fig. 7 - Evolução do perfil ao fim de 11 horas. Resultados numéricos da calibração do parâmetro Max Angle (às escalas laboratorial e do protótipo).

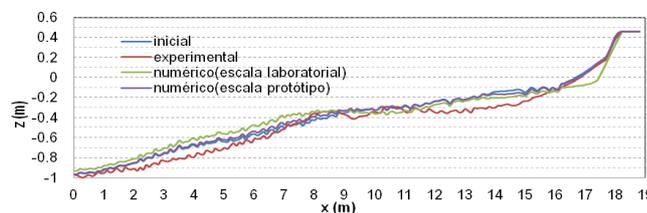


Fig. 8 - Evolução do perfil ao fim de 11 horas. Resultados numéricos da calibração do parâmetro Scale Parameter (às escalas laboratorial e do protótipo).

4. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo validar um modelo numérico de morfodinâmica de praias a curto-prazo a diferentes escalas (escalas do modelo reduzido e do protótipo) e avaliar os efeitos de escala na modelação numérica. Para concretizar este objetivo realizaram-se ensaios laboratoriais, em canal de ondas irregulares, para simular a erosão de um perfil da praia de Buarcos, Figueira da Foz, que foram reproduzidos em modelo numérico à escala laboratorial e à escala do protótipo. Numa primeira fase, os resultados de ambas as aplicações foram validados com os resultados experimentais. Numa segunda fase, após reduzidos à escala laboratorial, os resultados numéricos à escala do protótipo foram comparados com os resultados numéricos à escala laboratorial. A avaliação do desempenho do modelo numérico baseou-se na observação da similaridade entre previsões (resultados numéricos) e medições (resultados experimentais) e no indicador de erro BSS, que foi calculado para cada teste. Nas aplicações do modelo numérico, em ambas as escalas, realizaram-se testes com os parâmetros por defeito recomendados pelos autores do modelo e posteriormente executou-se a calibração.

Concluiu-se que o processo de erosão do perfil de praia foi sobrestimado à escala reduzida e subestimado à escala do protótipo, quer na aplicação do modelo com os parâmetros por defeito, quer na aplicação do modelo calibrado. O indicador de erro BSS aponta para um melhor desempenho do modelo numérico à escala do protótipo do que à escala reduzida, sendo que, com base na classificação de van Rijn et al. (2003), no primeiro caso o desempenho é mau e no segundo é fraco. Na avaliação do desempenho do modelo deve ter-se em conta a fuga de sedimento da parte inferior do perfil para fora da zona de monitorização que ocorreu durante a experiência laboratorial, facto que terá contribuído para a falta de similaridade entre os resultados numéricos e experimentais na parte inferior do perfil, causando assim um pior desempenho do modelo numérico do que efetivamente teve.

Concluiu-se também que o parâmetro de calibração mais influente na modificação do perfil de praia a ambas as escalas foi o parâmetro Γ_2 , mas que só no caso do modelo à escala laboratorial este foi o parâmetro de calibração mais eficaz. No caso do modelo à escala do protótipo, o Scale Parameter foi o parâmetro de calibração mais eficaz.

Do processo de calibração a ambas as escalas, concluiu-se ainda que, com exceção do parâmetro de calibração Scale Parameter, nenhum dos restantes parâmetros de calibração tem valores coincidentes em ambas as escalas.

Como conclusão final, constatou-se que existem efeitos de escala na simulação numérica da erosão de um perfil de praia com o modelo Litprof.

Agradecimentos

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto MorFeed (PTDC/AAC-AMB/100092/2008), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

5. REFERÊNCIAS

- Battjes, J.A. & Stive, M.J.F. (1984). Calibration and verification of a dissipation model for random breaking waves, *Coastal Engineering*, 649-660.
- Battjes, J.A. & Janssen, J.P.F.M. (1978). Energy Loss and Set-Up due to Breaking of Random Waves. *Proc. of the 16th Int. Conf. on Coastal Engineering*, Hamburg, 569-587.
- Contente, J. & Oliveira, F.S.B.F. (2012). Efeitos de Escala em Modelação Numérica da Erosão de um Perfil de Praia. *Relatório NEC/LNEC*, Lisboa, 57 pp (em impressão).
- Dally, W.R. & Brown, C.A. (1995). A modeling investigation of the breaking wave roller with application to cross-shore currents. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No. C12, 24.873-24.883.
- DHI (2008). Profile development. LITPROF user guide. Danish Hydraulic Institute, 74 pp.
- Freire, P., Oliveira, F.S.B.F., Capitão, R., Fortes, C. & Costa, M. (2004). Cross-shore evolution of Buarcos beach, Portugal. *29th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Lisboa, Portugal, 2314-2326.
- Freire, P., Sancho, F. & Oliveira, F.S.B.F. (2008). Composite modelling of sediment dynamics for propagating waves reaching coastal defences. *Second International Conference on the Application of Physical Modelling to Port and Coastal Protection (Coastlab08)*, Bari, Italy, 87-90.
- Larangeiro, S.H.C.D., Oliveira, F.S.B.F. & Freire, P.M.S. (2003). Longshore sediment transport along a sandy coast with hard rock outcrops, *Shore and Beach*, Vol.71, No.2, 20-24.
- Oliveira, F.S.B.F. (2002). Effect of the sea level variation in the offshore limit of the surf zone of Buarcos, Portugal. *Littoral 2002, The changing coast*. EUROCOAST/EUCC, Porto, Portugal, 363-368.
- Oliveira, F.S.B.F. (2001). Transporte Litoral perpendicular à costa. *Relatório 1 - Modelação Matemática da Hidrodinâmica e Transporte de Sedimentos na Zona Costeira*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal, 39 pp.
- Oliveira, F.S.B.F. (2011). Avaliação do Modelo de Erosão de Praias e Dunas – Xbeach: Resultados Preliminares. *11^o Congresso da Água*, Porto, Portugal, 18 pp.
- Tucker, M.J. (1954). Surfbeats: sea waves of 1 to 5 minutes' period. *Proc. R. Soc. London, Ser. A* 202, 565-573.
- Van Rijn, L.C., Walstra, D.J.R., Grasmeijer, B., Sutherland, J., Pan, S. & Sierra, J.P. (2003). The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. *Coastal Engineering*, 47, 295-327.