

Modelação numérica da erosão de dunas durante tempestades

Filipa S. de Brito F. de Oliveira

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente, Av. do Brasil, 101,
1700-066 Lisboa, Portugal
email: foliveira@lnec.pt <http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nec>

Sumário

Aplicaram-se os modelos matemáticos de morfodinâmica XBeach, Litprof e Duner para avaliar a variação temporal da resposta de um perfil de praia à ação erosiva de uma tempestade marítima. Testaram-se os modelos para um caso de erosão de duna em modelo laboratorial de grande escala. A avaliação do desempenho foi feita com base na análise da evolução morfológica e em indicadores de impacto e de erro. Os três modelos reproduziram a erosão da duna, mas foi o XBeach que apresentou o melhor desempenho. O modelo Duner revelou ser um instrumento simples e eficiente na impossibilidade aplicar modelos numéricos mais complexos.

Palavras-chave: Morfodinâmica; Praia; Xbeach; Litprof; Duner.

1 INTRODUÇÃO

Grande parte da interface terra-mar do longo da costa Portuguesa é constituída por sistemas dunares. Estes sistemas são uma importante defesa natural costeira. A sua erosão, galgamento, rotura e inundação durante eventos extremos de estado do mar constitui um elevado risco no que respeita a perda de território, degradação ambiental, destruição de património e perda de vidas humanas (na ausência de sistemas de alerta e planos de salvamento).

O presente estudo enquadra-se na área da dinâmica costeira e visa melhorar a avaliação e previsão da vulnerabilidade/resiliência de sistemas dunares à ação das ondas e da sobrelevação do nível mar em condições de tempestade marítima caracterizadas por fortes ventos, baixas pressões atmosféricas e curta duração (horas a dias). O objetivo específico do estudo foi testar três modelos matemáticos, o modelo XBeach, o modelo Litprof e o modelo Duner, para um caso de erosão de duna previamente realizado em canal de grande escala em modelo reduzido de laboratório, avaliar o desempenho de cada um dos três e compará-los entre si.

A reprodução dos processos costeiros em modelo reduzido de laboratório, em canais de grande escala (para minimizar os efeitos de escala), tem a vantagem, relativamente ao protótipo, de proporcionar maior controlo dos processos envolvidos, quer nas condições iniciais e de forçamento quer na monitorização da evolução, e consequentemente garantir maior confiança nos resultados. As condições em canal equivalem a uma praia uniforme ao longo da componente longitudinal.

O caso de estudo, descrito em [1] como teste T01, foi um caso de erosão de um perfil de referência com uma duna no topo de praia. A escolha deste caso para comparar o desempenho dos modelos XBeach, Litprof e Duner na erosão de dunas, deve-se ao facto de, para além de incluir uma duna bastante robusta na sua configuração geométrica, ter sido realizado em canal de grande escala (fator de escala profundidade nd igual a 6). A geometria do perfil inicial pode ser vista na Figura 1. O perfil foi implementado desde o nível -4.5 m, ao largo, até aproximadamente ao nível 1.68 m, correspondente ao topo da duna. O sedimento utilizado caracteriza-se por $D_{50}=0.2$ mm, $D_{90}=0.3$ mm e densidade 2.65. O teste foi realizado à temperatura aproximada de 9°C. As condições de onda incidente foram um espectro de Pierson Moskowitz com altura significativa $H_s=1.5$ m, período de pico $T_p=4.9$ s e duração 6 horas. O teste foi temporariamente interrompido para realizar medições do fundo a 0.1, 0.3, 1, 2.04 e 6 horas a contar a partir do início da experiência laboratorial. Os intervalos no início do teste foram mais curtos porque no início de um teste as taxas de erosão são mais elevadas. Da ação das ondas resultou um perfil de erosão caracterizado por um forte recuo da duna: aproximadamente $9 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-1}$ foram extraídos da duna frontal, correspondendo este volume a um recuo de aproximadamente 2 m ao nível da água e de aproximadamente 4.8 m ao nível do topo da duna. A erosão da duna não se deu gradualmente mas sim por etapas, i.e., em determinados instantes ocorreu o deslizamento de blocos de duna com volume razoável. Este processo de avalanche ocorreu quando o declive da duna era quase vertical ou mesmo ligeiramente negativo (quando o topo de duna estava já pendurado). Observou-se ainda que o instante de avalanche (de deslizamento

dos blocos de duna) nem sempre coincidiu com o instante de impacto da onda. Relativamente à morfologia do perfil de erosão, observou-se que nos primeiros instantes, em que a taxa de erosão é mais elevada, o volume de areia erodido da duna foi depositado na zona do perfil submerso imediatamente adjacente formando um declive de praia mais suave. Posteriormente, com o decorrer do processo erosivo, formou-se uma barra submersa não muito pronunciada na zona de deposição de areia mais afastada da face de praia e duna (Figura 1).

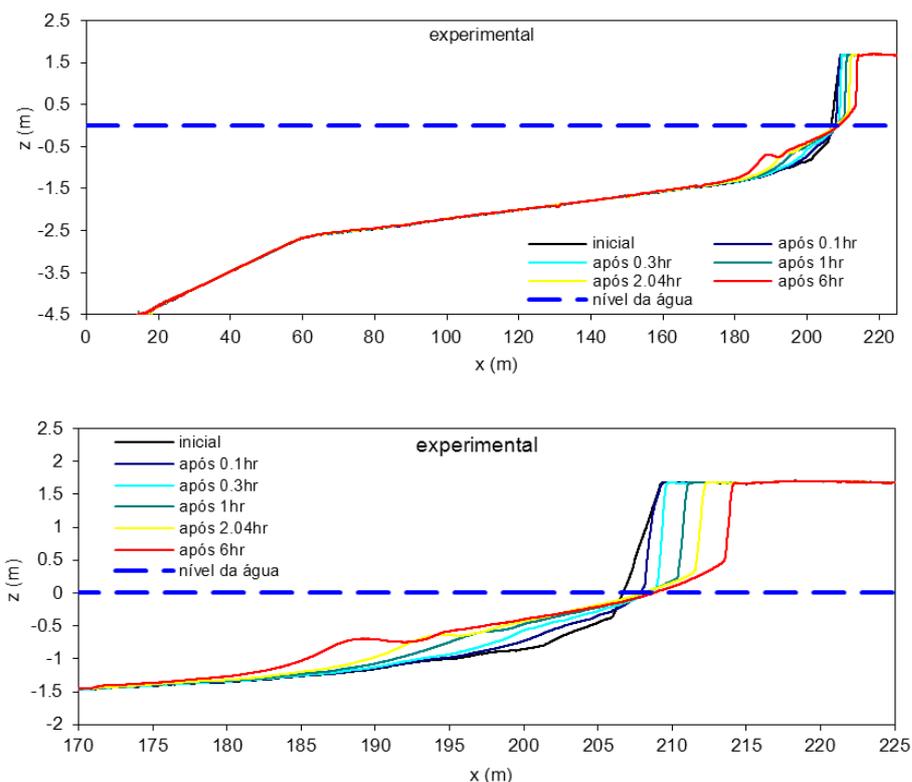


Fig.1. Evolução do perfil para o caso de verificação: perfil completo (em cima) e pormenor (em baixo).

Na secção seguinte descreve-se brevemente cada um dos modelos de forma conceptual e a abordagem utilizada na sua aplicação. Também se descrevem os indicadores utilizados para avaliar o desempenho dos modelos: indicadores de erro (Brier Skill Score) e de impacto (volume de erosão, recuo da duna e recuo do topo da duna). Na secção 3 apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos nas duas fases de aplicação dos modelos XBeach e Litprof (fase de aplicação com os parâmetros por defeito e fase de calibração) e nos dois casos de aproximação do perfil usados no modelo Duner. Finalmente na secção 4 retiram-se as principais conclusões e fazem-se recomendações de utilidade na aplicação dos três modelos para casos de aplicação de erosão de dunas semelhantes.

2 MÉTODOS

A modelação numérica da erosão praia-duna caracteriza-se em três tipos de modelos conceptuais: empíricos, semi-empíricos e determinísticos ou baseados em processos. Do primeiro tipo, modelos empíricos, são os modelos onde existe uma relação explícita entre a erosão da praia-duna e importantes parâmetros físicos, que não são quantificados de forma individual mas sim através das consequências, ou seja, volume erodido e recuo da duna. O modelo Duner qui aplicado é um modelo deste tipo. Do segundo tipo, modelos semi-empíricos, são os modelos em que os principais processos físicos são individualmente descritos através de formulações matemáticas. O modelo SBeach [2] é um exemplo deste tipo. Finalmente do terceiro tipo, modelos

determinísticos, também vulgarmente designados por modelos baseados em processos, são os modelos em que os processos físicos são modelados individualmente. Os modelos XBeach e Litprof aplicados neste estudo são ambos deste tipo.

A aplicação de ambos os modelos determinísticos, mas principalmente do modelo XBeach, requer a introdução de um elevado número de parâmetros relativos aos processos físicos costeiros. Em projetos de engenharia, onde é de grande utilidade a aplicação deste tipo de modelos, acontece muitas vezes ser inviável a medição de alguns destes parâmetros. Para ultrapassar esta dificuldade, em geral os autores dos modelos recomendam a utilização de alguns valores por defeito (*standard set of parameter settings*), verificados para a mais alargada gama de condições de teste possível. Neste estudo, aplicaram-se os modelos XBeach e Litprof para o conjunto dos parâmetros por defeito e testaram-se parâmetros de calibração. É com base na comparação dos dois conjuntos de resultados numéricos (que resultam da aplicação dos modelos com os parâmetros por defeito e dos modelos calibrados) com os resultados observados que se faz a avaliação do desempenho dos modelos XBeach e Litprof.

2.1 Modelo XBeach

O modelo XBeach (eXtreme Beach behaviour) [3], disponível à comunidade científica para desenvolvimento e aplicação, é um dos modelos mais promissores nesta área, dado que se trata de um modelo determinístico e está aberto a futuro desenvolvimento.

Trata-se de um modelo bidimensional no plano horizontal (2DH) constituído por vários sub-modelos dos processos costeiros propagação de ondas infragravíticas e grupos de ondas gravíticas, espraçamento, erosão e galgamento de dunas, avalanche, transporte sedimentar e evolução do fundo [4]. O objetivo do XBeach é modelar estes processos nos quatro regimes de impacto de tempestade marítima definidos por Sallanger [5]: regime de espraçamento, regime de colisão, regime de galgamento e regime de inundação. Neste estudo em particular, apenas ocorrem os regimes de espraçamento e colisão.

A aplicação do modelo foi feita em duas fases: na primeira, testou-se o modelo com os parâmetros por defeito; na segunda, calibrou-se o modelo, ajustando os parâmetros de forma a melhorar o seu desempenho, i.e., a similaridade com os resultados observados. Utilizou-se uma malha estruturada alternada, retilínea e equidistante, de espaçamento horizontal 1 m, implementada num sistema de coordenadas no qual o eixo-x está orientado na direção do canal, i.e., perpendicular à linha de costa.

Após análise dos dois conjuntos de valores dos parâmetros por defeito sugeridos pelos autores em [3] e [4], optou-se por atribuir um novo conjunto de valores aos parâmetros por defeito. Fez-se constituir esse conjunto por: para os parâmetros com valor igual em ambos os conjuntos, por esse valor; e para os restantes parâmetros, pelo valor atribuído para os casos teste Lip11d-2E, Deltaflume_2005_T04, Zelt, Delilah e Zwin descritos em [3], sendo os dois primeiros testes laboratoriais e os restantes três testes de campo (Zelt e Delilah nos USA, Zwin na Europa). Descrevem-se em [6] e [7] os parâmetros por defeito atribuídos no âmbito das condições de onda, condições de escoamento, condições de transporte e morfodinâmica, condições numéricas e condições fronteira.

O modelo XBeach possui um elevado número de possíveis parâmetros de calibração, resultantes da inclusão de um elevado número de processos e de diferentes opções de modelação. Isto faz com que o modelo tenha um elevado potencial para reproduzir corretamente os processos envolvidos mas também seja bastante exaustivo o procedimento de teste que conduz à sua correta aplicação.

Com base nas aplicações do modelo publicadas, verificou-se que ainda não existe suficiente experiência sobre a aplicação do modelo de forma a apontar com clareza quais os parâmetros de calibração ([6] e [7]). Assim, após análise pormenorizada da formulação do modelo e respetivos parâmetros [4], testaram-se os parâmetros: beta, break, facsl, facua, gammax, hmin, hswitch, lws, turb, wetsl, dryslp e order, conforme Quadro 1, tendo como base os parâmetros por defeito. Neste processo, fez-se variar um parâmetro de cada vez mantendo os outros constantes.

2.2 Modelo Litprof

O modelo Litprof [8] do sistema de modelação Litpack é um dos modelos mais eficazes nesta área e mais aplicado a nível mundial em projetos de investigação e consultoria. Tem a vantagem de ser um modelo

determinístico, tal como o modelo XBeach, e o inconveniente de não estar aberto a desenvolvimento por parte da comunidade científica. A sua aplicação deve ser feita mediante licença comercial.

O modelo Litprof trata-se de um modelo bidimensional no plano vertical (2DV) constituído por vários sub-modelos dos processos costeiros: um modelo de hidrodinâmica, um modelo quasi-tri-dimensional de transporte de sedimentos e um modelo morfológico (de evolução do fundo). A abordagem metodológica utilizada é descrita em [8] e [9]. Este modelo não inclui os processos costeiros da zona de espriamento. O modelo foi testado considerando duas teorias de onda, uma clássica e outra semi-empírica ([6] e [7]). A teoria de onda clássica considerada foi a teoria de 5ª ordem de Stokes [10] e a teoria semi-empírica considerada foi a teoria de Doering e Bowen [11], na qual são consideradas parametrizações da onda para incluir as assimetrias horizontal e vertical.

Tal como para o modelo XBeach, a aplicação do modelo Litprof foi feita em duas fases: na primeira, testou-se o modelo com os parâmetros por defeito; na segunda, calibrou-se o modelo, ajustando os parâmetros de forma a melhorar o seu desempenho, i.e., a similaridade com os resultados observados. Utilizou-se um espaçamento horizontal de 1 m ao longo do perfil de praia.

Na fase de teste do modelo Litprof com os parâmetros por defeito, utilizaram-se os parâmetros por defeito recomendados pelos autores. Descrevem-se em [6] e [7] os parâmetros por defeito atribuídos no âmbito das condições de transporte (Módulo PRFTABL), condições de onda e condições de morfodinâmica.

Na fase de calibração do modelo testaram-se os parâmetro de rebentação γ_1 e γ_2 , o parâmetro de escala (scale parameter) e o máximo ângulo de fundo submerso estável (Maximum Angle of Bed Slope), conforme Quadro 2.

Quadro 1. Parâmetros de calibração do modelo XBeach.

<i>Parâmetro [unidades]</i>	<i>Valor por defeito</i>	<i>Valores de teste</i>
beta [-]	0.1	0.2
break [-]	3	1; 2; 4
facsl [-]	1.6	0.8
facua [-]	0	1
gammax [-]	2	0.5
hmin [m]	0.05	0.001
hswitch [m]	0.1	0.01
lws [-]	0	1
turb [-]	2	0; 1
wetslp [-]	0.3	0.15; 0.6
dryslp [-]	1	2
order [-]	1	2

Quadro 2. Parâmetros de calibração do modelo Litprof.

<i>Parâmetro [unidades]</i>	<i>Valor por defeito</i>	<i>Valores de teste</i>
gamma1 [-]	0.88	0.75; 0.95
gamma2 [-]	0.6	0.8; 0.9; 1.5
scale parameter [-]	1	0.8; 1.2
Maximum Angle of Bed Slope [°]	30	10; 20

2.3 Modelo Duner

O modelo Duner, desenvolvido pela autora, baseia-se no método de convolução (também conhecido pelo método da integral de convolução) aplicado para estimar a resposta a uma excitação arbitrária no estudo de sistemas dinâmicos lineares. A utilização deste método para estimar a erosão de praias em condições de tempestade marítima foi proposta por Kriebel e Dean e encontra-se descrita em [13].

Trata-se de um modelo unidimensional, na direção do perfil de praia perpendicular à linha de costa, em que se admite que a resposta do perfil, i.e., a variação do nível topo-hidrográfico no tempo, quando submetido à variação das condições de hidrodinâmica (ondas e sobrelevação), é exponencial. Com base neste pressuposto, a variação do perfil no tempo, $R(t)$, pode ser aproximada por

$$R(t) = R_{\infty} \left(1 - e^{-t/T_S}\right) \quad (1)$$

onde R_{∞} =máximo deslocamento do perfil a esse nível topo-hidrográfico que ocorre depois do sistema alcançar o equilíbrio e T_S = escala temporal característica da resposta exponencial. Considerando a ação forçadora subida do nível do mar (sobreelevação) em condições de tempestade expressa pela função $f(t)$, a equação diferencial linear que governa a resposta do perfil é

$$\frac{dR(t)}{dt} = \frac{1}{T_S} [R_{\infty} f(t) - R(t)] \quad (2)$$

cujas soluções podem ser obtidas pelo método da integral de convolução, expressa por

$$R(t) = \alpha R_{\infty} \int_0^t f(\tau) e^{-\alpha(t-\tau)} d\tau \quad (3)$$

onde $\alpha = 1/T_S$ e τ =desfasamento temporal. Desta expressão retiram-se duas características da resposta do perfil: que a resposta é atrasada relativamente à ação forçadora e que é amortecida relativamente à máxima erosão potencial do sistema. Para além do recuo da face, berma e duna da praia o método de convolução também permite obter o volume de erosão associado. Partindo do pressuposto que o perfil recua à mesma taxa relativa, i.e., que o parâmetro adimensional $R(t)/R_{\infty}$ é constante, o volume de erosão relativo é o mesmo que o recuo da berma relativo, ou seja

$$\frac{V(t)}{V_{\infty}} = \frac{R(t)}{R_{\infty}} \quad (4)$$

onde $V(t)$ =volume de erosão no tempo t acima de um nível de referência e V_{∞} =volume de erosão de equilíbrio acima do mesmo nível de referência. É através da determinação dos parâmetros R_{∞} e V_{∞} que o método de convolução satisfaz a equação da continuidade ou conservação transversal de areia.

Na forma adimensional, a solução da eq. (3) pode ser expressa por

$$\frac{R(t)}{R_{\infty}} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{\beta^2}{1+\beta^2} \exp\left(-\frac{2\sigma}{\beta}\right) - \frac{1}{1+\beta^2} [\cos(2\sigma) + \beta \sin(2\sigma)] \right\} \quad (5)$$

onde $\beta = 2\pi \frac{T_S}{T_D}$, sendo T_D =duração total da sobrelevação, i.e., tempo que decorre desde o início até ao fim da subida do nível do mar.

O tempo correspondente à máxima erosão, t_m , é obtido igualando a função derivada da eq. (5) a zero, de onde resulta a expressão

$$\exp\left(-\frac{2\sigma_m}{\beta}\right) = \cos(2\sigma_m) - \frac{1}{\beta} \sin(2\sigma_m) \quad (6)$$

que é resolvida iterativamente em ordem à fase, σ_m , entre $\pi/2$ e π . O desfasamento da máxima resposta é $\sigma_m - \pi/2$. A substituição da eq. (6) na eq. (5) permite calcular a resposta máxima, que é

$$\frac{R_{\max}}{R_{\infty}} = \frac{1}{2} [1 - \cos(2\sigma_m)]. \quad (7)$$

Neste estudo, para calcular o máximo potencial de erosão do perfil, assumiu-se que a geometria do perfil se encontra entre dois casos de geometria de perfil de equilíbrio idealizada propostos em [13]: perfil de equilíbrio com face de praia inclinada e perfil de equilíbrio com duna sem berma, doravante designados por caso 1 e caso 2, respetivamente (Figura 2).

Verificou-se que o perfil inicial abaixo da face de praia, i.e, abaixo do nível -0.9 m, possui uma geometria aproximada de um perfil de equilíbrio, $x = (h/A)^{3/2}$ (onde x é a coordenada horizontal, h é a profundidade e A é o parâmetro que governa a inclinação do perfil, que depende do diâmetro dos sedimentos [14, 15]), considerando $A=0.065 \text{ m}^{1/3}$. Na Figura 2 pode ver-se o ajustamento do perfil inicial ao perfil de equilíbrio. Considerou-se a sobrelevação, S , igual a 0.9 m, correspondente à subida do nível da água desde o topo do perfil de equilíbrio até ao nível zero (mantido constante ao longo da experiência). Com base nos resultados experimentais, considerou-se o índice de rebentação γ unitário, sendo $\gamma = H_b / h_b$ (onde H_b =altura de onda na rebentação e h_b =profundidade de rebentação), usualmente entre 0.78-1.0. As diferenças entre os casos 1 e 2 estão na geometria do perfil acima do topo do perfil de equilíbrio: no caso 1 considerou-se uma face de praia de declive constante igual a 1:4.3; no caso 2 consideraram-se dois trechos de declive constante que resultaram do prolongamento da face de praia do perfil inicial até ao nível da água (declive 1:15), seguido de um trecho de duna com declive igual ao da duna do perfil do caso 1 (declive 1:4.3).

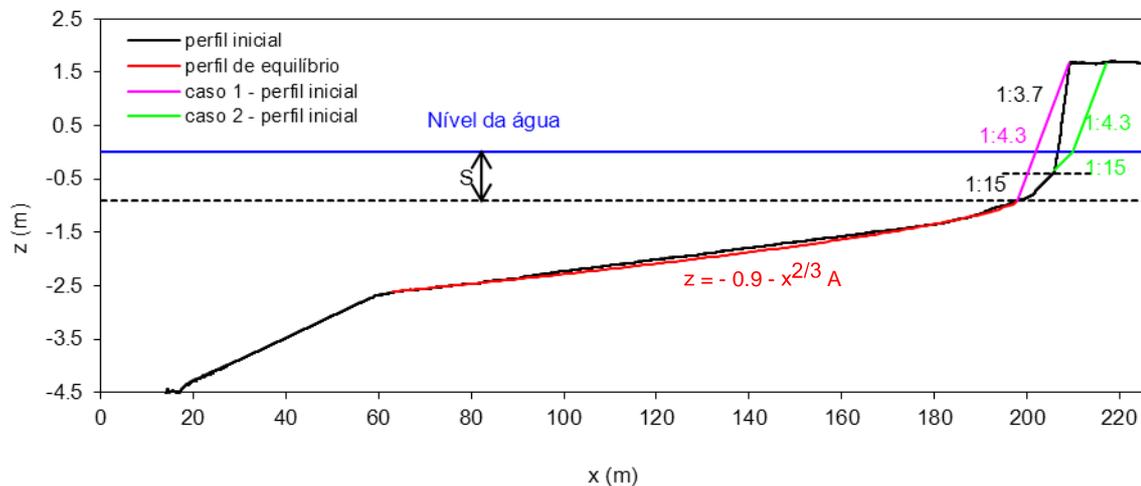


Fig.2. Condições de aplicação do modelo Duner: casos de geometria de perfil de equilíbrio idealizada aplicados, baseados nos casos propostos em [13], para estimar R_{∞} .

2.4 Indicadores de desempenho

Neste estudo utilizaram-se dois tipos de indicadores para avaliar o desempenho dos modelos: indicadores de impacto e de erro. Os indicadores de impacto foram o volume de erosão (por metro de comprimento longitudinal de praia) e o recuo (da duna e do topo da duna), respetivamente definidos por

$$\text{Volume de erosão} = \int_{z_1}^{z_2} (\text{perfil inicial} - \text{perfil pós - tempestade}) dz \quad (8)$$

e

$$\text{Re cuo} = |x_0 - x_t| \quad (9)$$

sendo z_1 e z_2 a profundidade do ponto inicial do perfil e a cota do topo da duna, respetivamente; e x_0 e x_t as coordenadas horizontais, a um determinado nível de referência (nível da água ou topo da duna) da duna frontal, no perfil inicial e no perfil pós-tempestade, respetivamente.

A medição de erro para avaliar o desempenho dos modelos foi feita com base no método Brier Skill Score (BSS), descrito em [12], 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

$$BSS = 1 - \frac{\langle (|z_{b,c} - z_{b,m}| - \partial)^2 \rangle}{\langle (z_{b,0} - z_{b,m})^2 \rangle} \quad (10)$$

onde os parêntesis angulares denotam a média.

Apresenta-se no Quadro 3 a classificação do desempenho de modelos morfodinâmicos proposta em [12].

Quadro 3. Classificação de desempenho com base no Brier Skill Score (BSS).

	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 RESULTADOS

Compararam-se os resultados dos três modelos morfodinâmicos XBeach, Litprof e Duner à escala laboratorial. Na Figura 3 podem ver-se os resultados da evolução do perfil ao fim de 6 horas obtidos com cada um dos três modelos. No caso das simulações com o modelo XBeach e Litprof (para a teoria de onda Stokes5, uma vez que a teoria de onda não se mostrou influente nos resultados) apresentam-se os resultados com os parâmetros por defeito e após calibração (obtida com o parâmetro $lws=1$ para o modelo XBeach e com os parâmetros Maximum Angle of Bed Slope= 10° e $\gamma=1.5$ para o modelo Litprof). No caso das simulações com o modelo Duner apresentam-se os resultados dos casos 1 e 2 descritos na secção 2.3. Destes resultados, que no caso dos modelos XBeach e Litprof podem ser vistos com mais detalhe em [7], salientam-se os principais:

- a) o modelo XBeach com os parâmetros por defeito simula de forma razoável a ação erosiva das ondas na quase totalidade do perfil. As maiores diferenças relativamente aos resultados experimentais encontram-se no declive da duna, que se observou quase vertical durante a experiência laboratorial e o modelo reproduz mais suave, e na barra submersa formada na extremidade da zona ativa do perfil (para valores de x entre 185 e 192 m), que o modelo não reproduz. Assim, o modelo reproduziu corretamente o recuo do topo da duna mas não o recuo observado ao nível da água. Consequentemente, o volume de erosão simulado foi cerca de 75% do valor observado. A calibração do modelo melhorou consideravelmente estes resultados: a configuração do perfil passou a ser mais concordante com a configuração experimental, quer na face da duna quer na parte submersa do perfil. Concluiu-se sobre a necessidade de melhorar a formulação do processo de avalanche.
- b) o modelo Litprof para ambas as teorias de onda com os parâmetros por defeito não simula o processo de erosão da duna. No entanto, o modelo calibrado passou a reproduzir o recuo do topo da duna corretamente e a formação de uma barra submersa na posição observada experimentalmente. Apesar disso, simulou incorretamente o volume de erosão (cerca de metade do observado) e o declive da duna, o que teve como consequência um avanço da duna ao nível do mar em vez de recuo. Concluiu-se que a falta de similaridade entre os resultados numéricos obtidos com o modelo Litprof e os resultados experimentais deve-se ao facto do modelo não abordar corretamente o processo de avalanche em zona seca nem considerar a ação de ondas longas. Concluiu-se que apenas limitando o máximo declive de fundo, e desta forma acelerando o processo de instabilidade do fundo, é possível causar erosão na base da duna com o modelo Litprof.

c) o modelo Duner simulou o recuo da duna mas não a formação da barra submersa (Figuras 3 e 4). O perfil final experimental encontra-se entre os perfis simulados nos casos 1 e 2, o que confirma a hipótese admitida da geometria do perfil se encontrar entre os dois casos de geometria de perfil de equilíbrio idealizada propostos na secção 2.3. A resposta dos perfis de praia obtida com o modelo Duner mostrou que a máxima erosão se deu primeiro no caso 1 e posteriormente no caso 2, e que no caso 1 a máxima erosão foi cerca de 23% do potencial de erosão enquanto no caso 2 foi apenas cerca de 11% do potencial de erosão (Figura 5).

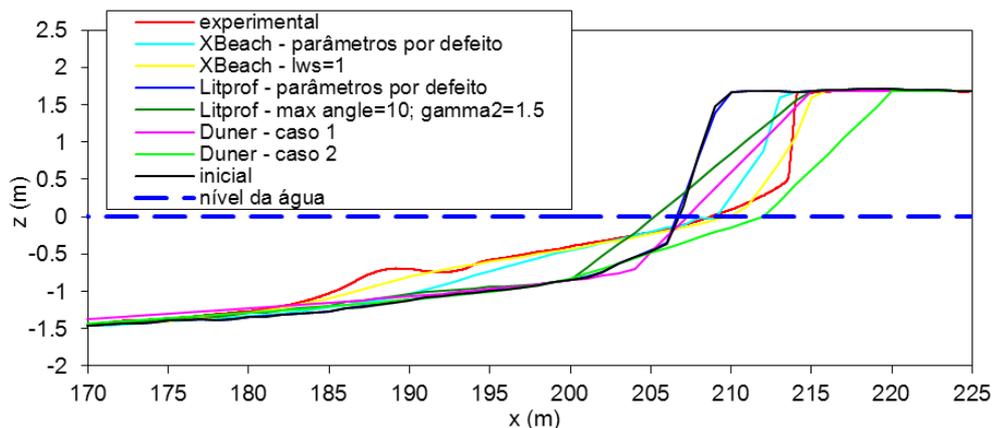


Fig.3. Resultados dos modelos morfodinâmicos XBeach, Litprof e Duner à escala laboratorial ao fim de 6 horas.

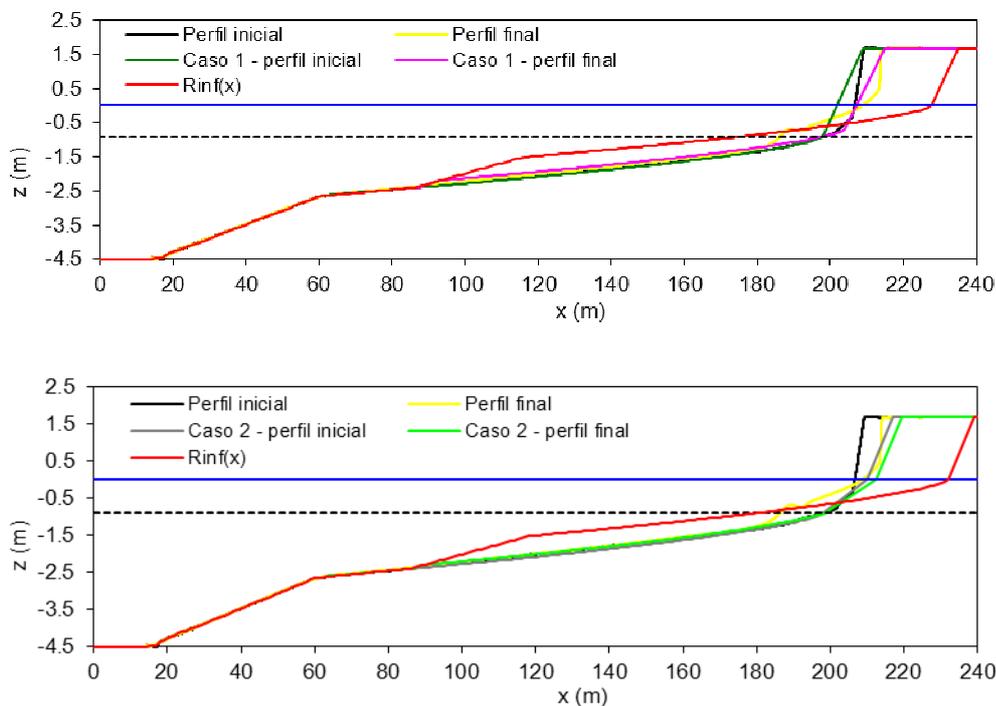


Fig.4. Resultados do modelo morfodinâmico Duner à escala laboratorial ao fim de 6 horas e para o máximo potencial de erosão.

Avaliou-se o desempenho dos modelos na previsão da evolução do perfil com base em indicadores de impacto (volume de erosão, recuo da duna e recuo do topo da duna) e no indicador de erro, BSS (Figura 6). Todos os

indicadores apontam que o modelo XBeach calibrado foi o que teve o melhor desempenho dos três modelos aplicados. Salienta-se o resultado do indicador de erro BSS para o modelo XBeach calibrado que classifica o desempenho do modelo como excelente.

No seu melhor desempenho, classificado como razoável através do indicador de erro BSS, o modelo Litprof reproduziu corretamente o recuo do topo da duna, mas incorretamente o volume de erosão (cerca de metade do observado) e o recuo da duna. Por este motivo, recomenda-se muita precaução na aplicação do modelo Litprof para previsão da erosão de dunas.

O desempenho do modelo Duner para ambos os casos de aproximação classifica-se como razoável através do indicador de erro BSS. No entanto, apesar do caso experimental estar contido entre ambos, as diferenças entre os valores dos indicadores de impacto para cada caso são grandes. Estes resultados sugerem experimentar um novo caso de geometria de perfil idealizada de aproximação do caso de estudo (do tipo do caso 2, i.e., perfil de equilíbrio com duna sem berma): um caso em que o declive da face de praia se conserve 1:15 até ao nível da água e em que o declive da duna seja 1:3.7, igual ao do caso experimental.

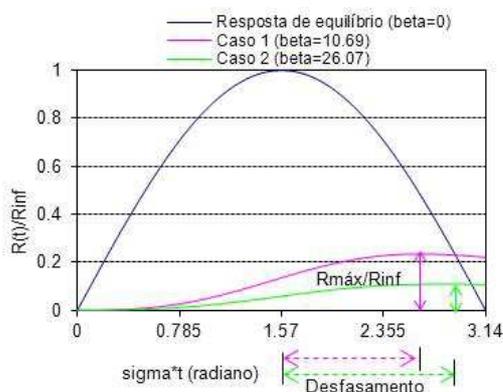


Fig.5. Resposta do perfil de praia para os casos 1 e 2.

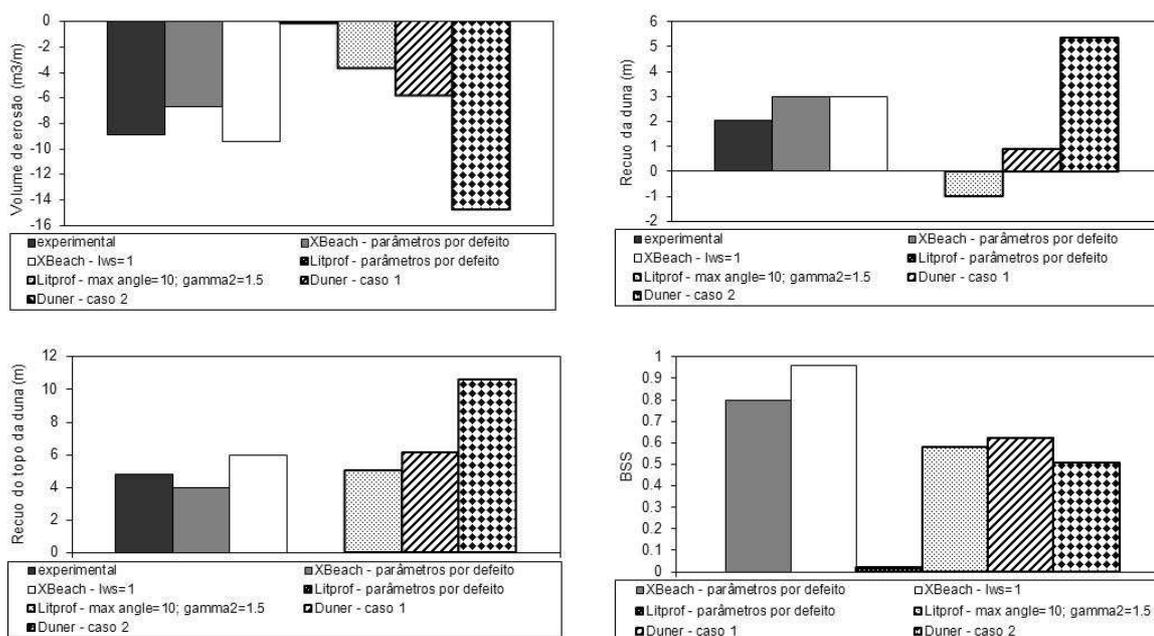


Fig.6. Indicadores de desempenho dos modelos morfodinâmicos XBeach, Litprof e Duner: volume de erosão (em cima à esquerda), recuo da duna (em cima à direita), recuo do topo da duna (em baixo à esquerda) e BSS (em baixo à direita).

4 CONCLUSÕES

Concluiu-se que o modelo XBeach tem um elevado potencial na avaliação e previsão da vulnerabilidade de dunas pois não só apresentou um excelente desempenho neste caso de estudo, como também, sendo um modelo aberto a futuro desenvolvimento por parte da comunidade científica, possibilita a alteração (introdução e/ou melhoria) do tratamento matemático dos processos físicos envolvidos na morfodinâmica costeira. O modelo Litprof não reproduziu corretamente a geometria do perfil de erosão em toda a sua extensão pelo que se recomenda precaução na sua aplicação em casos de erosão de dunas. Concluiu-se que o modelo Duner constitui um instrumento simples e eficiente na impossibilidade aplicar modelos numéricos mais complexos e recomenda-se a sua aplicação para estimativas preliminares em problemas de engenharia.

REFERÊNCIAS

1. WL | Delft Hydraulics, *Dune erosion, Large-scale model tests and dune erosion prediction method*. Report H4357, Delft, 2006.
2. M. Larson and N.C. Kraus, *SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced change. Report 1. Empirical formulation and model development*. Technical report CERC-89-9, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, MS, 1989.
3. D. Roelvink, A. Reniers, A. Dongeren, J.T. Vries, R. McCall and J. Lescinski, Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56, 1133-1152, 2009.
4. D. Roelvink, A. Reniers, A. Dongeren, J.T., Vries, J. Lescinski and R. McCall, *XBeach model description and manual*. Report. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology, 2010.
5. A.H. Sallanger, Storm impact scale for barrier islands. *Journal of Coastal Research*, 16 (3), 890-895, 2000.
6. F.S.B.F. Oliveira, Avaliação do modelo de erosão de praias e dunas XBeach: resultados preliminares. *11º Congresso da Água, APRH, Porto, Portugal*, CD-ROM, 18 pp, 2012.
7. F.S.B.F. Oliveira, Erosão de dunas com os modelos XBeach e Litprof. *Gestão Costeira Integrada*, 2012 (em revisão).
8. DHI, *Profile development. LITPROF user guide*. Danish Hydraulic Institute, 2008.
9. F.S.B.F. Oliveira, *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, 2001.
10. J. Fenton, A fifth-order Stokes theory for steady waves. *J. Coastal, Port. Waterway and Ocean Eng.*, ASCE, 111, 216-234, 1985.
11. J.C. Doering and A.J. Bowen, Parametrization of orbital velocity asymmetries of shoaling and breaking waves using bispectral analysis. *Coastal Engineering*, 26, 15-33, 1995.
12. L.C. Van Rijn, D.J.R. Walstra, B. Grasmeijer, J. Sutherland, S. Pan and J.P. Sierra, 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, 2003.
13. D.L. Kriebel and R.G. Dean, Convolution method for time-dependent beach-profile response. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119(2), 204-226, 1993.
14. R.G. Dean, Beach erosion: causes, processes, and remedial measures. *CRC Critical Review of Envir. Control*, 6(3), 259-296, 1976.
15. R.G. Dean, *Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts*. Oc. Engrg. Report No. 12, Univ. of Delaware, Newark, 1977.