

Aplicação do modelo Duner para erosão de dunas

F. S. B. F. Oliveira(1)

(1) Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa. foliveira@lnec.pt

Resumo: O estudo visou melhorar a avaliação e previsão da vulnerabilidade/resiliência de sistemas dunares à acção das ondas e da sobrelevação do nível do mar em condições de tempestade marítima. O objetivo específico foi testar o modelo matemático morfodinâmico Duner, desenvolvido com base no método de convolução, para uma experiência laboratorial em canal de grande escala. Utilizaram-se três casos de geometria de perfil de equilíbrio idealizada aproximados do perfil inicial para calcular o máximo potencial de erosão do perfil praia-duna. Da avaliação do desempenho do modelo, realizada através de indicadores de impacto e de erro, resultou a classificação de bom para o melhor caso de aproximação do perfil inicial e a classificação de razoável para os outros dois casos testados. Estes resultados permitiram reforçar a conclusão de que o modelo constitui um instrumento simples e eficiente para avaliação e previsão da vulnerabilidade de dunas.

Palavras chave: morfodinâmica, convolução, perfil de praia, tempestade, sobrelevação

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas dunares constituem a mais importante defesa natural costeira. A sua erosão constitui um elevado risco no que respeita a perda de território e património e a degradação ambiental.

O objectivo deste estudo foi melhorar o teste do modelo matemático morfodinâmico Duner (Oliveira, 2012b), na erosão de dunas, para uma experiência laboratorial em canal de grande escala. O desempenho do modelo aqui avaliado foi também comparado com o desempenho de outros modelos numéricos previamente aplicados para o mesmo caso de estudo (Oliveira, 2012a; Oliveira, 2012b).

O caso de estudo, descrito em WL | Delft Hydraulics (2006) como teste T01, foi um caso de erosão de um perfil de praia com duna realizado em canal de grande escala (fator de escala profundidade nd igual a 6) em modelo reduzido de laboratório. 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. 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.

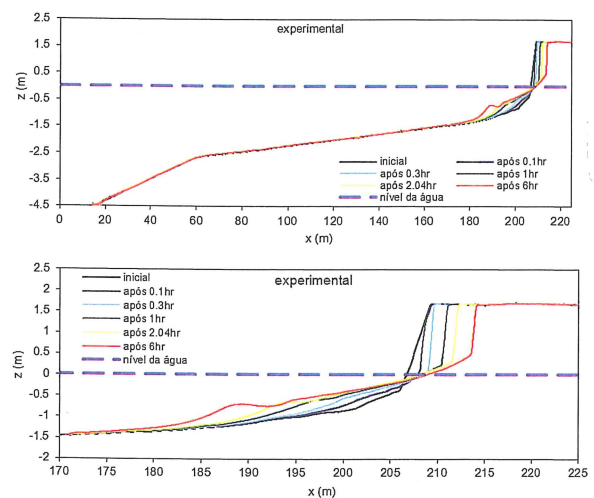


Fig. 1. Evolução do perfil para o caso experimental: perfil completo (em cima) e pormenor (em baixo).

2. MÉTODO

2.1. 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 (1993).

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 (sobrelevação) em condições de tempestade expressa pela função $f(t)$, a equação diferencial linear que governa a resposta do perfil é

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

cuja solução pode ser obtida 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 ao máximo potencial de erosão 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

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

onde $\beta = 2\pi T_s/T_D$, 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

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

que é resolvida iterativamente em ordem à fase, σt_m , entre $\pi/2$ e π . O desfasamento da máxima resposta é

$\sigma t_m - \pi/2$. A substituição da eq. (6) na eq. (5) permite calcular a resposta máxima, que é

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

Neste estudo pretendeu-se melhorar o teste do modelo matemático morfodinâmico Duner realizado por Oliveira (2012b). Para isso, utilizou-se um novo caso de geometria de perfil de equilíbrio idealizada proposto em (Kriebel e Dean, 1993) para calcular o parâmetro R_{∞} . Assumiu-se que a geometria do perfil inicial pode ser aproximada por um novo caso perfil de equilíbrio com duna sem berma, a que se chamou caso 3, pois já tinham sido usadas as designações de caso 1 e caso 2 para os casos de aproximação baseados num perfil de equilíbrio com face de praia inclinada e noutro perfil de equilíbrio com duna sem berma, respetivamente (Figura 2).

Conforme descrito em Oliveira (2012b), 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 (Dean, 1977), considerado $A=0.065 \text{ m}^{1/3}$. 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, 2 e 3 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, entre a base da face de praia e o topo da duna. 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). No caso 3 consideraram-se dois trechos de declive constante que resultaram, o primeiro, com declive 1:9.6, da variação linear entre a base da face de praia (topo do perfil de equilíbrio) e a interseção do nível da água com a face da duna, seguido do segundo, a face da duna, com declive 1:3.7.

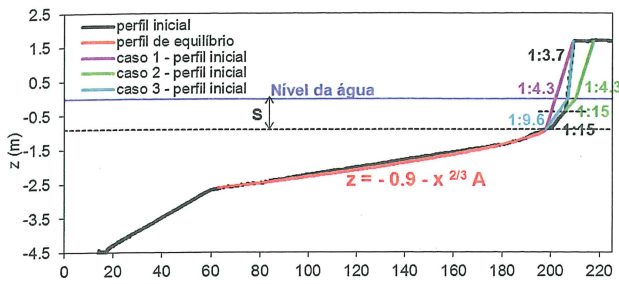


Fig. 2. Condições de aplicação do modelo Duner: casos de geometria de perfil de equilíbrio idealizada aplicados, baseados nos casos propostos em (Kriebel e Dean, 1993), para estimar R_{∞} .

2.2. Indicadores de desempenho

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

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

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

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 por 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 δ (que aqui se assumiu nulo). Define-se por

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

onde os parêntesis angulares denotam a média.

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

Tabela I. 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
Fraço	0.3 – 0.0
Mau	< 0.0

3. RESULTADOS

Apresentam-se na Figura 3 e 4 os resultados da evolução do perfil ao fim de 6hr obtidos com o modelo Duner à escala laboratorial para os 3 casos de aproximação do perfil inicial. Na Figura 3 também se pode ver o perfil correspondente ao máximo potencial de erosão, R_{∞} , para cada caso. A resposta dos perfis de praia obtida com o modelo Duner mostrou que o máximo recuo devido à erosão, R_{\max} , foi 6.1, 2.4 e 3.4 m para os casos 1, 2, e 3, respetivamente, e que foi cerca de 23, 11 e 14% do respetivo potencial de erosão para cada um dos casos (parâmetro R_{\max}/R_{∞}). A máxima erosão ocorreu primeiro no caso 1, seguidamente no caso 3 e por último no caso 2, sendo os respetivos desfazamentos 2.62, 2.77 e 2.83 radiano (Figura 5). O parâmetro β , que indica o rácio entre escala temporal de erosão e a duração da tempestade, foi 10.69, 26.07 e 19.24 para os casos 1, 2 e 3, respetivamente.

Apesar do declive da duna ter variado durante a experiência (principalmente no início), acima do nível da água o perfil experimental manteve-se entre os perfis simulados nos casos 1 e 2 (Figura 4). O caso 3 foi o que apresentou a melhor similaridade entre os perfis finais experimental e simulado.

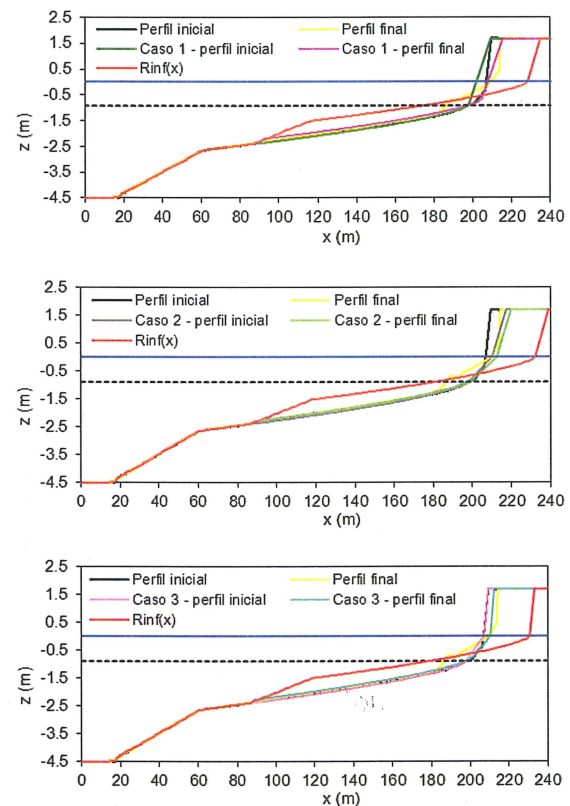


Fig. 3. Resultados do modelo morfodinâmico Duner à escala laboratorial, para os casos 1, 2 e 3, ao fim de 6 horas e para o máximo potencial de erosão.

Avaliou-se o desempenho do modelo na previsão da evolução do perfil com base no indicador de erro BSS (Figura 6) e nos indicadores de impacto volume

de erosão, recuo da duna e recuo do topo da duna (Tabela II). O indicador de erro BSS para o caso 3 classifica o desempenho do modelo como bom. O desempenho do modelo Duner para os casos 1 e 2 classifica-se como razoável com base no indicador de erro BSS.

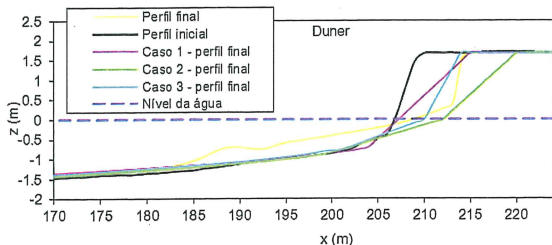


Fig. 4. Resultados do modelo morfodinâmico Duner à escala laboratorial ao fim de 6 horas (pormenor).

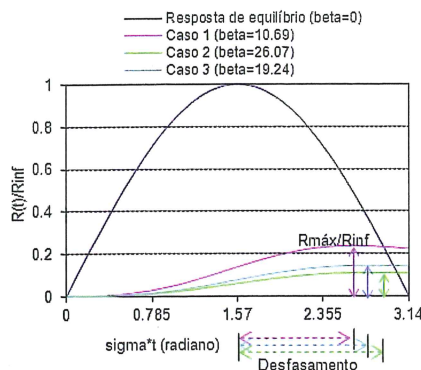


Fig. 5. Resposta do perfil de praia para os casos 1, 2 e 3.

Os resultados dos indicadores de impacto volume de erosão e recuo do topo da duna são consentâneos com o resultado do indicador de erro, pois é no caso 3 que estes indicadores tem valores mais próximos dos valores da experiência. Quanto ao indicador de impacto recuo da duna (ao nível da água) é o caso 1 que mais se aproxima do resultado experimental, contudo, uma vez que o recuo é inferior ao observado, considera-se que o caso 3, o segundo melhor, é o mais fiável pois está do lado da segurança. Desta análise, concluiu-se que o caso 3 foi o que teve o melhor desempenho dos três casos analisados.

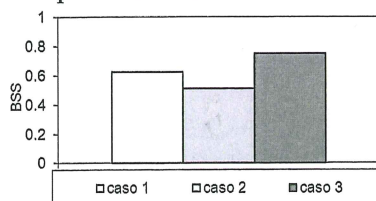


Fig. 6. Indicador de erro para os casos 1, 2 e 3.

Tabela II. Indicadores de impacto para os casos 1, 2 e 3.

	Volume de erosão [m³.m⁻¹]	Recuo da duna [m]	Recuo do topo da duna [m]
Experiência	-9	2	5
Caso 1	-6	1	4
Caso 2	-15	5	10
Caso 3	-7	4	4

4. CONCLUSÕES

Pretendeu-se melhorar o teste do modelo morfodinâmico Duner para um caso de erosão de dunas em canal de grande escala (experiência laboratorial) previamente realizado por Oliveira (2012b). Para isso, utilizou-se um novo caso de geometria de perfil de equilíbrio idealizada proposto em (Kriebel e Dean, 1993) para calcular o parâmetro R_{∞} . A comparação da evolução morfológica observada com a evolução morfológica simulada e a avaliação do desempenho do modelo realizada com indicadores de impacto e de erro mostraram que para este novo caso de aproximação do perfil inicial o modelo Duner teve um bom desempenho e que este desempenho foi superior ao obtido com os casos previamente testados. Estes resultados permitiram reforçar a conclusão de que o modelo constitui um instrumento simples e eficiente para avaliação e previsão da vulnerabilidade de dunas.

Salienta-se ainda que o melhorado desempenho do modelo Duner aqui obtido foi também comparado com o desempenho de outros modelos numéricos previamente aplicados para o mesmo caso de estudo (Oliveira, 2012a; Oliveira, 2012b) e que se concluiu que apesar do modelo XBeach continuar a ter melhor desempenho do que o modelo Duner (que advém da melhor simulação da parte submersa do perfil), o requisito do conhecimento de um elevado número de parâmetros físicos locais e o custo computacional do modelo XBeach tornam o modelo Duner um modelo morfodinâmico bastante competitivo.

REFERÊNCIAS

- Dean, R.G. (1977). Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts. Oc. Eng. Report No. 12, Univ. of Delaware, Newark.
- Kriebel, D.L. e Dean, R.G. (1993). Convolution method for time-dependent beach-profile response. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119(2), 204-226.
- Oliveira, F.S.B.F. (2012a). Erosão de dunas com os modelos XBeach e Litprof. *Revista Gestão Costeira Integrada (em impressão)*.
- Oliveira, F.S.B.F. (2012b). Modelação numérica da erosão de dunas durante tempestades. *IV Conferência MEFTE 2012 (em impressão)*.
- WL | Delft Hydraulics (2006). Dune erosion, Large-scale model tests and dune erosion prediction method. Report H4357, Delft.
- Van Rijn, L.C., Walstra, D.J.R., Grasmeyer, B., Sutherland, J., Pan, S. e 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.