

EROSÃO DE DUNAS DURANTE TEMPESTADES: APLICAÇÃO DE DIFERENTES MODELOS NUMÉRICOS

Filipa Simões de Brito Ferreira de Oliveira

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

Palavras-chave: Morfodinâmica costeira, Tempestade marítima, XBeach, Delft3D, Duner

Resumo. *O presente estudo enquadra-se na área da modelação numérica da dinâmica costeira. A sua motivação consiste no facto dos sistemas praia-duna serem a mais importante defesa natural costeira na interface terra-mar e a sua erosão constituir um elevado risco no que respeita a perda de território e património e a degradação ambiental. O estudo teve como objetivo melhorar a avaliação e previsão da vulnerabilidade/resiliência de sistemas praia-duna à ação das ondas e da sobrelevação do nível do mar em condições de tempestade marítima, caracterizadas por vento forte e pressão atmosférica baixa, causadoras de eventos de agitação marítima de energia elevada e sobrelevação do nível do mar. Neste estudo aplicaram-se, testaram-se, avaliaram-se e compararam-se três modelos numéricos de morfodinâmica: o modelo XBeach (versões 18 e 19), o modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983) e o modelo Duner. O caso de estudo foi um caso de erosão de um perfil de praia com duna realizado em canal de grande escala em modelo reduzido de laboratório. Para além da comparação direta entre os resultados numéricos e experimentais de evolução do perfil, utilizaram-se dois tipos de indicadores para avaliar o desempenho dos modelos: indicadores de impacte e de erro. Os indicadores de impacte foram o volume de erosão e o recuo do perfil a determinados níveis de referência. O indicador de erro utilizado foi o Brier Skill Score. O modelo XBeach (versões 18 e 19) foi o que apresentou a melhor similaridade entre resultados numéricos e resultados experimentais, seguido do modelo Duner e finalmente do modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983). O modelo XBeach (versão 19) foi o que apresentou o melhor desempenho. Esta versão do modelo apresentou um excelente desempenho, quer aplicado com os parâmetros por defeito quer calibrado. Destaca-se que a versão 19 do modelo XBeach com os parâmetros por defeito apresentou um desempenho superior ao da versão 18 do modelo calibrado, que também foi excelente e bastante superior à versão 18 do modelo com os parâmetros por defeito, cujo desempenho foi apenas bom. O modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983) apresentou um fraco desempenho após calibração e um mau desempenho quando aplicado com os parâmetros por defeito. O modelo Duner apresentou um bom desempenho, próximo do desempenho do modelo XBeach (versão 18) com os parâmetros por defeito.*

1. INTRODUÇÃO

O presente estudo enquadra-se na área da modelação numérica da dinâmica costeira, especificamente no domínio da morfodinâmica litoral de curto-prazo (horas a dias), para condições de tempestade marítima caracterizadas por ventos fortes e pressões atmosféricas baixas, causadoras de eventos de agitação marítima de energia elevada e sobrelevação do nível do mar. A sua motivação consiste no facto dos sistemas praia-duna serem a mais importante defesa natural costeira na interface terra-mar e a sua erosão, galgamento, rotura e inundação durante estes eventos extremos constituir um elevado risco no que respeita a perda de território, degradação ambiental, destruição de património e até perda de vidas humanas.

O estudo teve como objetivo melhorar a avaliação e previsão da vulnerabilidade/resiliência de sistemas praia-duna à ação das ondas e da sobrelevação do nível do mar em condições de tempestade marítima, através da aplicação, análise, avaliação de desempenho e comparação de três modelos numéricos. Dois desses modelos são baseados nos processos físicos costeiros de hidrodinâmica, transporte sedimentar e evolução do fundo, o modelo XBeach (versões 18 e 19) [1, 2] e o modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983) [3], e o outro é baseado num modelo empírico, o modelo Duner [4, 5].

O caso de estudo foi um caso de erosão de um perfil praia-duna realizado em canal de grande escala 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, conseqüentemente, garantir maior confiança nos resultados. As condições em canal equivalem a uma praia uniforme ao longo da componente longitudinal.

Este estudo segue-se na sequência de estudos anteriores realizados pela autora, que progressivamente tem vindo a desenvolver, aplicar e comparar modelos de morfodinâmica costeira, para condições extremas do estado do mar, quando ocorrem as situações de maior dinâmica sedimentar a curto-prazo dos sistemas praia-duna e, conseqüentemente, as maiores alterações morfológicas a curto-prazo. Com vista a enquadrar o presente estudo, descrevem-se seguidamente, de forma sumária, as principais conclusões dos estudos anteriores desenvolvidos pela autora para o mesmo caso de erosão de perfil praia-duna realizado em canal de grande escala em modelo reduzido de laboratório:

- i) da comparação do desempenho do modelo XBeach (versão 18) com o desempenho de outro modelo numérico baseados nos processos físicos costeiros de hidrodinâmica, transporte sedimentar e evolução do fundo, o modelo Litprof [6], concluiu-se o seguinte [7]: aplicando os parâmetros de calibração por defeito, o desempenho do modelo XBeach (versão 18) foi classificado (com base nos mesmos critérios aplicados neste estudo, que se descrevem na secção seguinte) de bom e o modelo Litprof de fraco; aplicando os dois modelos calibrados o desempenho do modelo XBeach (versão 18) foi classificado de excelente e o modelo Litprof de razoável.
- ii) da comparação do desempenho do modelo XBeach (versão 18) com o desempenho do modelo Litprof e com o desempenho do modelo Duner, concluiu-se, em acréscimo às conclusões do estudo anterior [7], o seguinte [4]: o desempenho do modelo Duner foi

classificado de razoável. Contudo, a comparação dos resultados dos dois casos de geometria de perfil de equilíbrio idealizada, proposta por Kriebel e Dean [8], utilizados no modelo Duner para simulação do caso de estudo, sugeriram a experimentação de um novo caso de geometria de perfil de equilíbrio idealizada de aproximação do caso de estudo mais adequada.

- iii) da comparação do desempenho do modelo Duner baseado nos dois casos de geometria de perfil de equilíbrio idealizada, proposta por Kriebel e Dean [8], utilizados no estudo anterior [4], com o modelo Duner baseado num novo caso de geometria de perfil de equilíbrio idealizada, implementado com vista a melhorar o desempenho do modelo Duner para simulação do caso de estudo, concluiu-se o seguinte [5]: o desempenho do modelo Duner foi classificado de bom, superior ao obtido no estudo anterior [4].

A inovação do presente estudo foi a aplicação, análise e avaliação do desempenho dos modelos numéricos XBeach (versão 19) e Delft3D (versão 5.00.10.1983) e a comparação destes com os modelos que nos estudos anteriores, desenvolvidos pela autora para o mesmo caso de estudo [4, 5, 7], tiveram a melhor classificação de desempenho, ou seja, o modelo XBeach (versão 18) e o modelo Duner na sua versão melhorada [5].

Na secção seguinte descreve-se em detalhe o caso de estudo, as principais diferenças entre os modelos numéricos e o critério usado na avaliação dos seus desempenhos, baseado em indicadores de impacto e de erro. Na secção 3 apresentam-se e discutem-se os resultados de cada modelo de forma sistemática e depois comparam-se os resultados dos melhores casos de cada um deles. Na secção 4 apresentam-se as conclusões principais do estudo.

2. MÉTODOS

A modelação numérica da erosão de um sistema praia-duna caracteriza-se em três tipos de modelos conceptuais [4]: 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 [9] 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 (versões 18 e 19) [1, 2] e Delft3D (versão 5.00.10.1983) [3] 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 (versão 19) e Delft3D (versão 5.00.10.1983) 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 e com os resultados do modelo XBeach (versão 18) e do modelo Duner que se faz a avaliação do desempenho dos modelos XBeach (versão 19) e Delft3D (versão 5.00.10.1983) para o caso de estudo considerado.

Seguidamente descreve-se o caso de estudo, faz-se uma descrição de todos os modelos numéricos aplicados, com maior detalhe no caso do modelo Duner, desenvolvido pela autora, uma vez que não se encontra tão divulgado como os outros modelos, XBeach (versões 18 e 19) e Delft3D (versão 5.00.10.1983), que são modelos abertos, i.e., disponíveis à comunidade científica, e finalmente descreve-se o critério de avaliação de desempenho dos modelos aplicado.

2.1. Caso de estudo

O caso de estudo, descrito em [10] 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 (versão 18), Delft3D (versão 5.00.10.1983) 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. Os sedimentos utilizados caracterizam-se pelos parâmetros de dimensão granulométrica $D_{50}=0.2$ mm e $D_{90}=0.3$ mm (diâmetro mediano e percentil 90, respetivamente) e pela 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 m³/m 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).

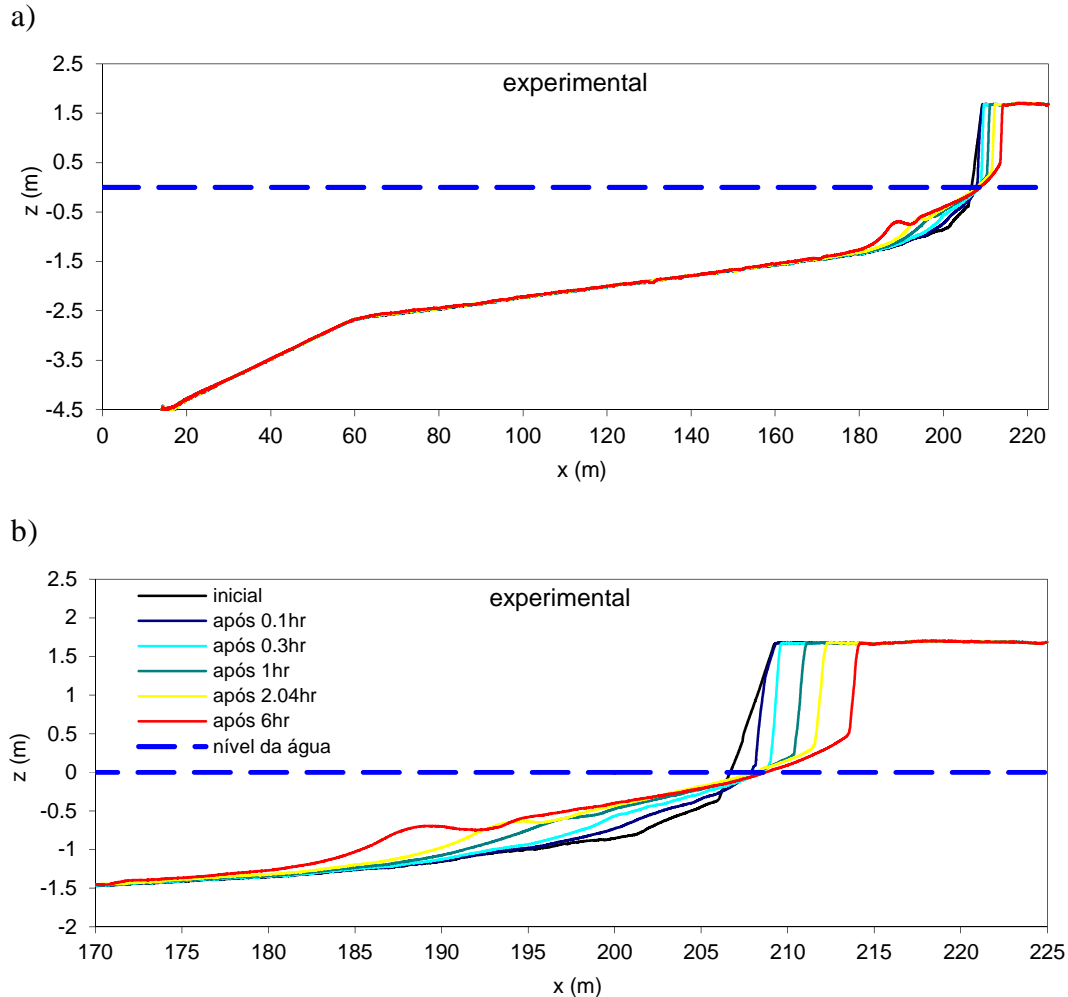


Figura 1. Evolução do perfil do caso de estudo: a) perfil completo e b) pormenor.

2.2. Modelo XBeach

O modelo XBeach (eXtreme Beach behaviour) é um modelo bidimensional no plano horizontal (2DH) constituído por vários sub-modelos dos processos costeiros propagação de ondas infragravíticas e grupos de ondas gravíticas, hidrodinâmica, espraiamento, transporte sedimentar, evolução do fundo, e erosão, avalanche, galgamento, rotura e inundação de dunas [1, 2, 7]. O objetivo do XBeach é modelar estes processos nos quatro regimes de impacto de tempestade marítima definidos por Sallanger [11]: regime de espraiamento, regime de colisão, regime de galgamento e regime de inundação. Neste

estudo em particular, apenas ocorrem os regimes de espraiamento e colisão.

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. Após teste e análise pormenorizada dos parâmetros de calibração do modelo XBeach (versão 18), a autora concluiu que os parâmetros mais influentes na evolução morfológica foram os parâmetros beta, break, facua, gammax, hswitch, lws e wetslp [7]. Os parâmetros lws e wetslp do modelo XBeach (versão 18) foram aqueles que conferiram ao perfil final uma geometria mais próxima da configuração observada. Os resultados obtidos evidenciaram que o melhor desempenho foi obtido com alteração do parâmetro lws e que o segundo melhor desempenho foi obtido com a alteração do parâmetro wetslp, sendo a ambos atribuída a classificação de excelente. Contudo, uma vez que a modificação do parâmetro lws permitiu melhorar a previsão de duas características fundamentais sob o ponto de vista da engenharia que são o recuo do topo da duna e o limite da extensão da zona ativa (onde se observou a formação da barra submersa durante a experiência), considera-se que este parâmetro é de grande relevância na simulação da evolução da erosão de dunas com o modelo XBeach.

A versão 19 do modelo XBeach resulta de melhoramentos da versão 18 realizados nas áreas de processamento de dados, da estrutura da programação (dos algoritmos) e dos processos físicos costeiros dos sub-modelos de ondas, hidrodinâmica e avalanche da duna. Neste estudo, a aplicação do modelo XBeach (versão 19) foi feita em duas fases: na primeira, testou-se o modelo com os parâmetros por defeito; na segunda, calibrou-se o modelo para o parâmetro lws (adimensional). À semelhança da metodologia aplicada no anterior estudo da autora [7], utilizou-se uma malha estruturada alternada, retilínea e equidistante, de espaçamento horizontal 1 m, implementada num sistema de coordenadas cartesianas no qual o eixo-x está orientado na direção do canal, i.e., perpendicular à linha de costa.

2.3. Modelo Delft3D

O modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983) é constituído por vários sub-modelos dos processos costeiros de hidrodinâmica, de ondas e de morfodinâmica [3]. O modelo de hidrodinâmica resolve a equação de Navier Stokes para escoamento de fluídos incompressíveis, ou seja, baseia-se na equação de conservação da massa, na equação da conservação da quantidade de movimento e na equação do transporte (advecção-difusão) de constituintes conservativos [3]. As equações de hidrodinâmica podem ser resolvidas de forma bidimensional no plano horizontal (2DH), se negligenciadas as acelerações verticais na equação do momento vertical, ou seja, considerado a pressão hidrostática, ou de forma tridimensional (3D) em que as velocidades verticais são calculadas através da equação da continuidade. O conjunto das equações diferenciais parciais governantes combinadas com as equações de fronteira e as equações de condições iniciais é resolvido através da técnica

numérica de diferenças finitas aplicada a uma malha estruturada alternada no plano horizontal, referenciada num sistema de coordenadas cartesianas ou esféricas. No caso de simulações 3D, em que as equações de águas pouco profundas também são resolvidas na dimensão vertical, o modelo permite utilizar dois tipos de malha vertical, cada uma referenciada no seu sistema de coordenadas, o sistema de coordenadas sigma (modelo- σ) e o sistema de coordenadas cartesianas (modelo-Z).

O modelo de hidrodinâmica considera a interação entre ondas e correntes através do acoplamento com um modelo de ondas curtas, o modelo SWAN (Simulating Waves Nearshore) [12, 13]. O modelo SWAN calcula a evolução do espectro direcional de onda através da equação do balanço espectral da ação de onda numa malha referida a um sistema de coordenadas cartesianas. Os processos considerados são a geração devida ao vento, os processos físicos de refração e empolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, interações não lineares de ondas curtas (mas não considera a geração de ondas longas devido à interação onda-onda), dissipação de energia devido ao excesso de declividade (*whitecapping*), atrito de fundo e rebentação induzida pela profundidade, bloqueio e reflexão por correntes opostas, transmissão através de obstáculos e sobrelevação da superfície livre induzida pelas ondas.

O modelo de morfodinâmica considera o transporte em suspensão e o transporte de fundo (por arrastamento) de sedimentos e a atualização do fundo (da batimetria) [3]. O transporte de sedimento em suspensão é calculado através da equação de advecção-difusão tridimensional para sedimento em suspensão. O transporte de fundo é calculado através da formulação de Van Rijn [14], que define uma altura de referência abaixo da qual o transporte de sedimentos é tratado como transporte de fundo e acima da qual o transporte de sedimento é tratado como sedimento em suspensão. Contudo, as tensões de atrito no fundo devido às correntes são baseadas nas velocidades junto ao fundo extraídas do modelo de hidrodinâmica e não da velocidade média na coluna de água considerada por Van Rijn na formulação original [14]. Para evitar instabilidades numéricas os cálculos do transporte sedimentar a cada passo de cálculo (temporal) são baseados nos cálculos do modelo de hidrodinâmica correspondentes a metade do passo de cálculo anterior. Finalmente, a atualização do fundo é calculada através de um volume de controlo, correspondente a uma célula, da malha estruturada alternada no plano horizontal, cujo centro é o ponto de cálculo onde é estimado o nível da água, tendo em conta o transporte de fundo.

2.4. 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 [8].

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 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 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 usou-se o melhoramento do modelo Duner realizado por Oliveira [5] para calcular o parâmetro R_{∞} . Utilizou-se um caso de geometria de perfil de equilíbrio idealizada proposto por Kriebel e Dean [8] em que a geometria do perfil inicial pode ser aproximada por um perfil de equilíbrio com duna sem berma.

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 [15, 16], 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. Para a geometria do perfil acima do topo do perfil de equilíbrio consideraram-se dois trechos de declive constante, um primeiro, com declive 1:9.6, 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 de um segundo, a face da duna, com declive 1:3.7, entre a interseção do nível da água com a face da duna e o topo da duna (Figura 2).

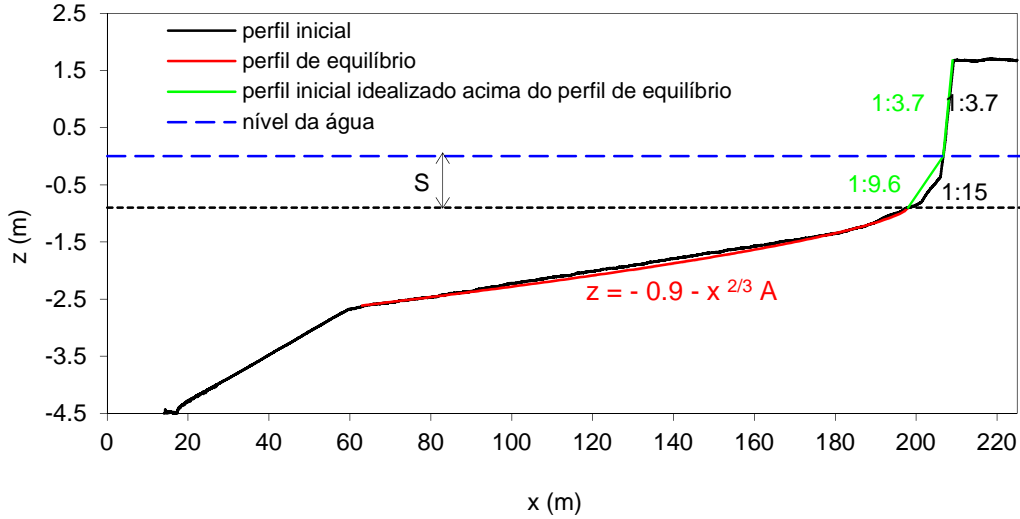


Figura 2. Condições de aplicação do modelo Duner: geometria de perfil de equilíbrio idealizada aplicada, baseada nos casos propostos em [8], para estimar R_{∞} .

2.5. Avaliação de desempenho

Utilizaram-se os mesmos dois tipos de indicadores para avaliar o desempenho dos modelos aplicados nos estudos anteriores [4, 5, 7]: 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

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

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 [17], 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

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

onde os parêntesis angulares denotam a média.

Apresenta-se na Tabela 1 a classificação do desempenho de modelos morfodinâmicos proposta em [17].

	BSS
Excelente	1.0 – 0.8
Bom	0.8 – 0.6
Razoável	0.6 – 0.3
Fraco	0.3 – 0.0
Mau	< 0.0

Tabela 1. Classificação de desempenho com base no Brier Skill Score (BSS).

3. RESULTADOS

Aplicaram-se os modelos numéricos baseados nos processos costeiros, o modelo XBeach (versão 18), o modelo XBeach (versão 19) e o modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983), à escala laboratorial, com os parâmetros por defeito. Posteriormente, procedeu-se à calibração de cada um deles, ou seja, testaram-se os diversos parâmetros de calibração, fazendo variar um de cada vez, mantendo os restantes constantes com os valores por defeito. Apresentam-se nas Figuras 3, 4 e 5 os resultados obtidos com os parâmetros por defeito e com o melhor parâmetro de calibração (o mais influente na evolução morfológica, i.e., aquele que conferiu ao perfil final uma geometria mais próxima da observada) para os modelos XBeach (versão 18), XBeach (versão 19) e Delft3D (versão 5.00.10.1983), respetivamente. Os resultados do modelo empírico Duner, à escala laboratorial, apresentam-se nas Figuras 6 e 7. Calcularam-se os indicadores de desempenho para todas as simulações numéricas realizadas. Apresentam-se os indicadores de impacte, volume de erosão, recuo da duna e recuo do topo da duna na Tabela 2 e o indicador de erro BSS na Figura 8. Destes resultados salientam-se os principais:

- i) A análise da similaridade entre os resultados do modelo XBeach (versão 18) com os parâmetros por defeito e os resultados experimentais (Figura 3) mostrou que o modelo simula o declive da face da duna mais suave do que o observado durante a experiência laboratorial e que não reproduz a barra submersa formada na extremidade da zona ativa do perfil (para valores de x entre 185 e 192 m). O volume de erosão simulado foi cerca de 75% do valor observado e o recuo da duna ao nível da água e do topo da duna foram superior e inferior, respetivamente, ao observado (Tabela 2). O desempenho do modelo é classificado de bom com base no BSS (Figura 8).
- ii) A análise da similaridade entre os resultados do modelo XBeach (versão 18) calibrado e os resultados experimentais (Figura 3) permitiu concluir que a calibração do modelo melhorou consideravelmente a concordância entre a configuração do perfil numérico e experimental, quer na face da duna quer na parte submersa do perfil. O volume de erosão simulado foi semelhante ao observado, sendo no entanto o recuo da duna ao nível da água e do topo da duna ligeiramente superiores aos observados (Tabela 2). O desempenho do modelo é classificado de excelente com base no BSS (Figura 8).
- iii) A análise da similaridade entre os resultados do modelo XBeach (versão 19) com os

parâmetros por defeito e os resultados experimentais (Figura 4), mostrou que o modelo simulou com elevada concordância a erosão da face da duna e a acumulação do sedimento na zona submersa da praia. O volume de erosão simulado foi igual ao observado (Tabela 2). As maiores fraquezas da concordância entre a configuração do perfil numérico e experimental verificaram-se ao nível da água, onde o recuo da duna simulado foi superior ao observado, e na forma da barra submersa do lado do mar, onde a extensão da zona de deposição da areia erodida foi superior à observada fazendo com que o declive da barra submersa do lado do mar fosse mais suave do que o observado. O desempenho do modelo é classificado de excelente com base no BSS (Figura 8).

- iv) A análise da similaridade entre os resultados do modelo XBeach (versão 19) com o parâmetro $lws=1$ (adimensional) e os resultados experimentais (Figura 4) confirmou a relevância deste parâmetro no aumento da erosão da face da duna, tal como se tinha constatado na versão 18 do modelo XBeach. Contudo, nesta versão 19 do modelo, o aumento da erosão é muito pequeno, cerca de $0.4 \text{ m}^3/\text{m}$ (Tabela 2). Constata-se que este pequeno aumento de erosão se verifica na face da duna ao nível do mar (Figura 4) e que por isso agrava as maiores fraquezas da concordância entre a configuração do perfil numérico e experimental verificadas com o modelo XBeach (versão 19) com os parâmetros por defeito, ou seja, ao nível da água, onde o recuo da duna simulado foi superior ao observado, e na forma da barra submersa do lado do mar, onde a extensão da zona de deposição da areia erodida foi superior à observada fazendo com que o declive da barra submersa do lado do mar fosse mais suave do que o observado. Assim, apesar de inferior ao desempenho do modelo com os parâmetros por defeito, o desempenho do modelo XBeach com o parâmetro $lws=1$ é classificado de excelente com base no BSS (Figura 8).
- v) A análise da similaridade entre os resultados do modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983) com os parâmetros por defeito e os resultados experimentais (Figura 5) mostrou que o modelo não simulou a erosão da face da duna acima da profundidade -0.1 m observada durante a experiência laboratorial e, conseqüentemente, não reproduziu a barra submersa formada na zona adjacente à duna observada durante a experiência laboratorial (para valores de x entre 185 e 192 m). O modelo simulou seis zonas distintas de evolução abaixo do nível da água (no sentido de terra para mar): a primeira zona de erosão entre os níveis iniciais 0 e -0.7 m ; a primeira zona de acumulação entre os níveis iniciais -0.7 e -1.6 m ; a segunda zona de erosão entre os níveis iniciais -1.6 e -2.0 m ; uma zona de manutenção da profundidade inicial entre os níveis iniciais -2.0 e -2.2 m ; a terceira zona de erosão entre os níveis iniciais -2.2 e -3.6 m ; e a segunda zona de acumulação entre os níveis iniciais -3.6 e -3.9 m ; fenómenos que não se observaram durante a experiência laboratorial, uma vez que abaixo do limite da barra submersa do lado do mar não se observou alteração do fundo durante a experiência laboratorial. Os indicadores de impacte mostram que o modelo simulou um volume total de erosão de cerca de $16 \text{ m}^3/\text{m}$ em zonas onde o fenómeno não ocorreu durante a experiência laboratorial e mostram que o modelo não simulou o recuo da duna ao nível do mar e do topo da duna (Tabela 2). O desempenho do modelo é classificado de mau com base no

BSS (Figura 8).

- vi) O processo de calibração do modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983) é significativamente mais simples do que o processo de calibração do modelo XBeach, uma vez que o número de parâmetros de calibração é significativamente inferior. O parâmetro de calibração $\gamma=0.55$ (adimensional) foi aquele que conferiu ao perfil final uma geometria mais próxima da configuração observada. Contudo, o modelo calibrado apresentou a mesma tendência de evolução do perfil praia-duna que apresentou o modelo com os parâmetros por defeito, conforme se verifica através da análise da similaridade entre os resultados do modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983) calibrado e os resultados experimentais (Figura 5). Os indicadores de impacte mostram que o modelo simulou um volume total de erosão inferior ao obtido com o modelo com os parâmetros por defeito, cerca de $12.3 \text{ m}^3/\text{m}$ (Tabela 2), sendo que esta redução foi principalmente obtida à custa da redução das alterações do perfil da parte submersa da praia relativamente ao perfil inicial na terceira zona de erosão mencionada acima (em v) (Figura 5). Tal como o modelo com os parâmetros por defeito, o modelo calibrado não simulou o recuo da duna ao nível do mar e do topo da duna (Tabela 2). Pelas razões descritas, o desempenho do modelo foi ligeiramente superior ao desempenho do modelo com os parâmetros por defeito, contudo, é classificado de fraco com base no BSS (Figura 8).
- vii) A análise da similaridade entre os resultados do modelo Duner e os resultados experimentais (Figura 6) mostrou que o modelo simulou o recuo da duna mas não a formação da barra submersa. A resposta do perfil praia-duna obtida com o modelo Duner mostrou que o máximo recuo devido à erosão, R_{\max} , foi 3.4 m e que foi cerca de 14% do respetivo potencial de erosão (parâmetro R_{\max}/R_{∞}). A máxima erosão ocorreu com um desfasamento de $2.77-(\pi/2)$ radiano (Figura 7). O parâmetro β , que indica o rácio entre a escala temporal de erosão e a duração da tempestade, foi 19.24. O volume de erosão simulado foi cerca de 82% do valor observado e o recuo da duna ao nível da água e do topo da duna foi cerca de 4 m (Tabela 2). O desempenho do modelo é classificado de bom com base no BSS (Figura 8).

Compararam-se os resultados do melhor caso de cada um dos modelos numéricos baseados nos processos costeiros, o modelo XBeach (versão 18) calibrado, o modelo XBeach (versão 19) com os parâmetros por defeito e o modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983) calibrado, com os resultados do modelo numérico empírico Duner, tendo como base os resultados experimentais (Figura 9). A melhor similaridade entre resultados numéricos e observados na zona onde ocorreram alterações do perfil de praia foi obtida com o modelo XBeach (versão 19), ou seja, foi este o modelo que conferiu ao perfil final uma geometria mais próxima da configuração observada. Todos os modelos, com exceção do Delft3D (versão 5.00.10.1983), sobrestimam o recuo da duna ao nível do mar (Tabela 2), facto que, apesar de revelar imprecisão de previsões, é importante em aplicações de engenharia, nas quais importa não só a precisão como também estar do lado da segurança.

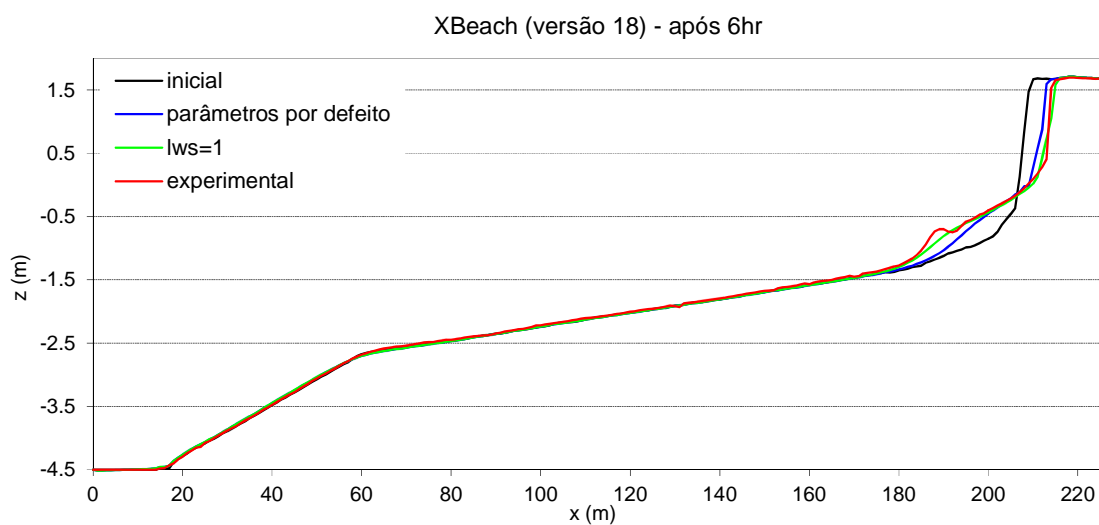


Figura 3. Resultados do modelo XBeach (versão 18), à escala laboratorial, ao final de 6 horas, com os parâmetros por defeito e o parâmetro de calibração mais eficiente.

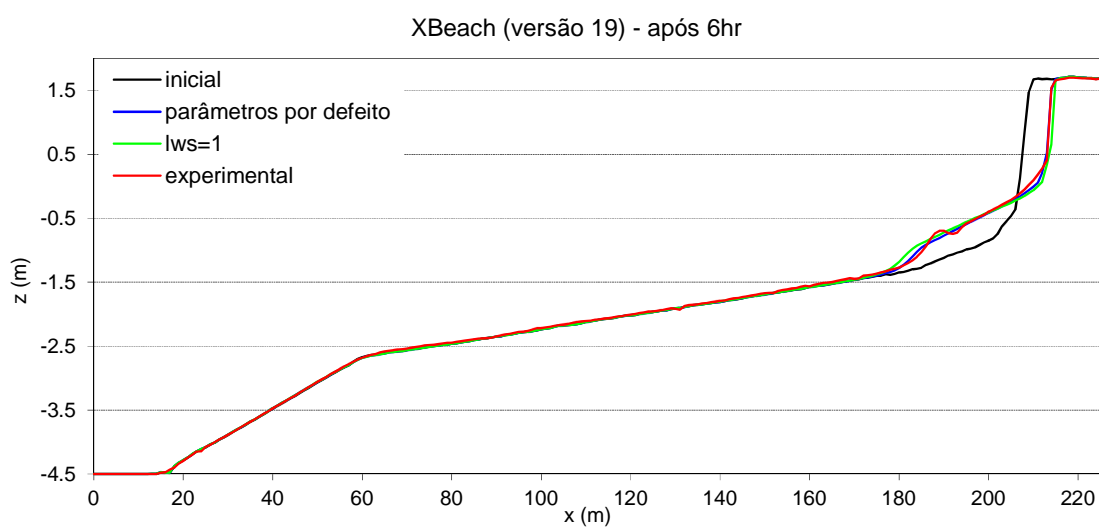


Figura 4. Resultados do modelo XBeach (versão 19), à escala laboratorial, ao final de 6 horas, com os parâmetros por defeito e o parâmetro de calibração mais eficiente.

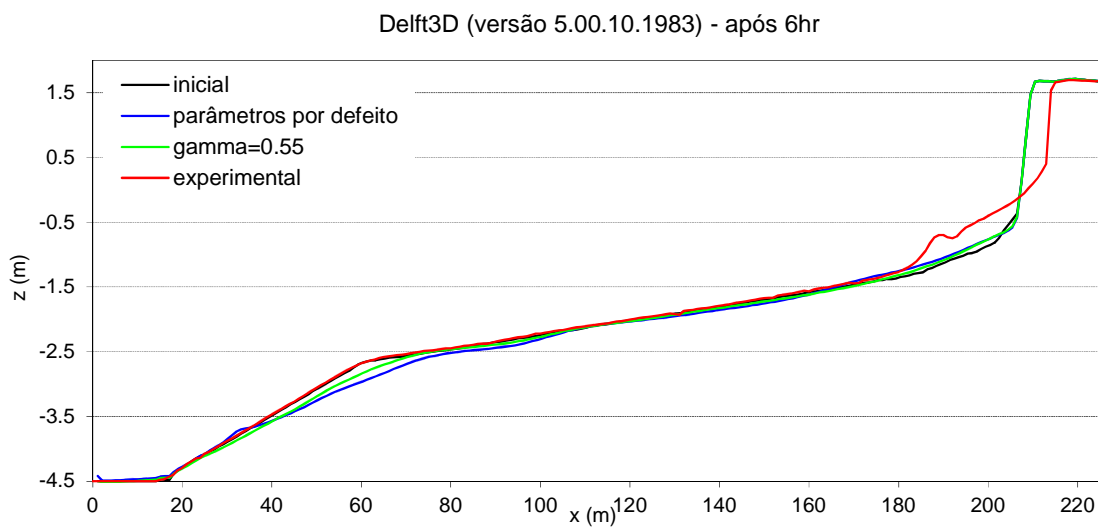


Figura 5. Resultados do modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983), à escala laboratorial, ao final de 6 horas, com os parâmetros por defeito e o parâmetro de calibração mais eficiente.

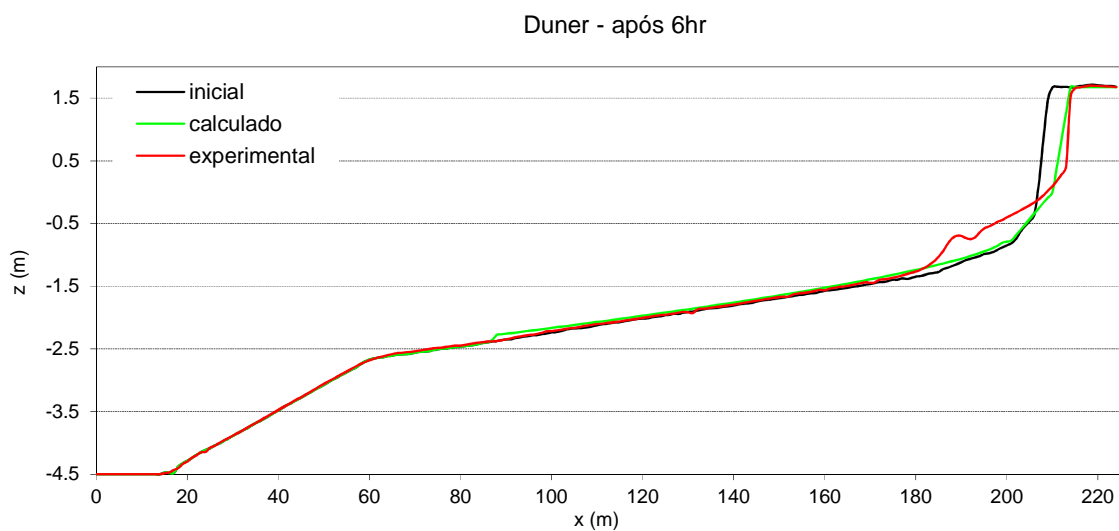


Figura 6. Resultados do modelo morfodinâmico Duner, à escala laboratorial, ao fim de 6 horas.

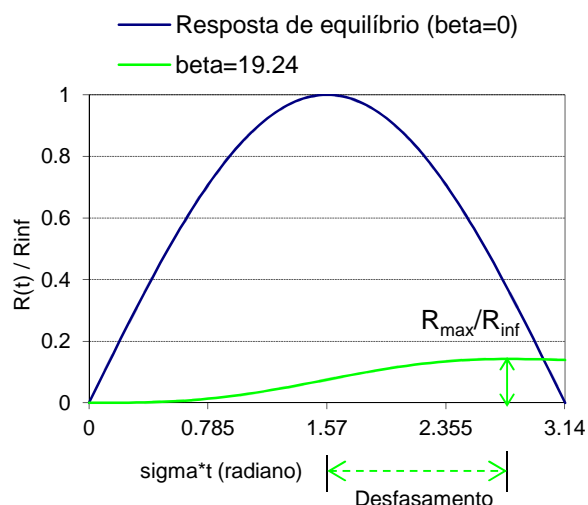


Figura 7. Resposta do perfil de praia (amplitude e desfasamento da erosão máxima).

	<i>Volume de erosão (m³/m)</i>	<i>Recuo da duna (m)</i>	<i>Recuo do topo da duna (m)</i>
Experiência	-9.0	2	5
XBeach (versão 18) – parâmetros por defeito	-6.7	3	4
XBeach (versão 18) – lws=1	-9.4	3	6
XBeach (versão 19) – parâmetros por defeito	-9.0	5	5
XBeach (versão 19) – lws=1	-9.4	5	5
Delft3D (versão 5.00.10.1983) – parâmetros por defeito	-16.0	0	0
Delft3D (versão 5.00.10.1983) – gamma=0.55	-12.3	0	0
Duner	-7.4	4	4

Tabela 2. Indicadores de impacto para avaliação do desempenho dos modelos morfodinâmicos XBeach (versão 18), XBeach (versão 19), Delft3D (versão 5.00.10.1983) e Duner.

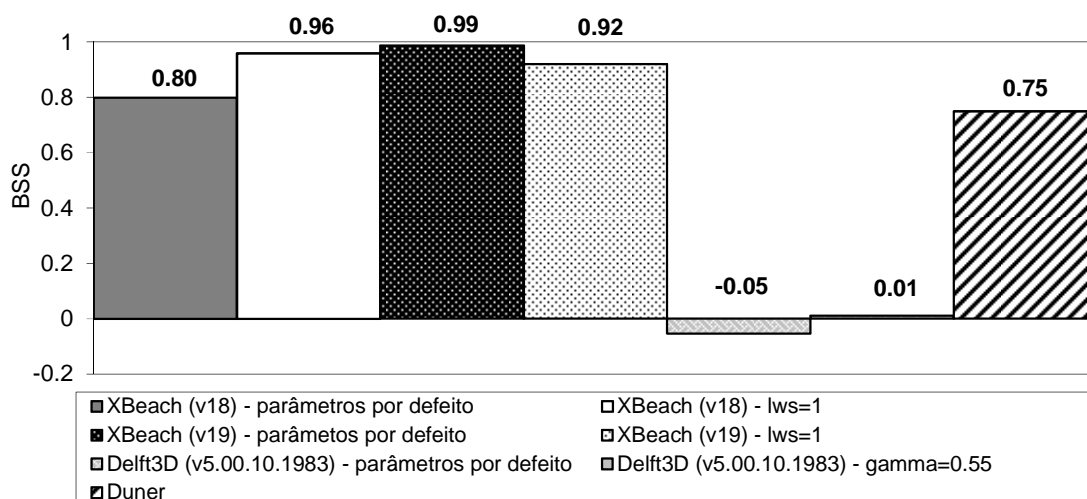


Figura 8. Indicador de erro (BSS) para avaliação do desempenho dos modelos morfodinâmicos XBeach (versão 18), XBeach (versão 19), Delft3D (versão 5.00.10.1983) e Duner.

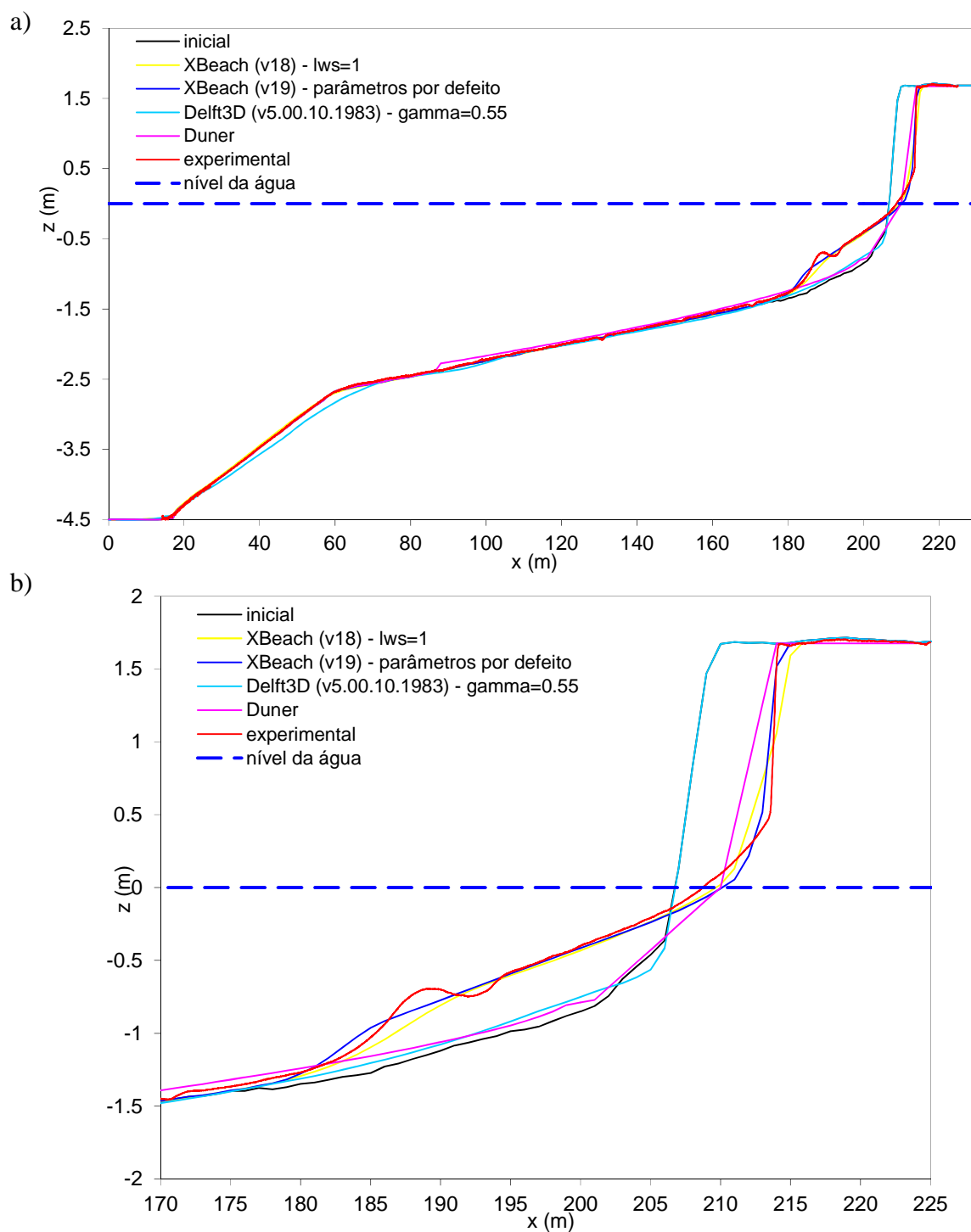


Figura 9. Resultados do melhor caso de cada um dos modelos morfodinâmicos XBeach (versão 18), XBeach (versão 19), Delft3D (versão 5.00.10.1983) e Duner, à escala laboratorial, ao fim de 6 horas: a) perfil completo e b) pormenor.

4. CONCLUSÕES

Pretendeu-se melhorar a avaliação e previsão da vulnerabilidade/resiliência de sistemas praia-duna à ação das ondas e da sobrelevação do nível do mar em condições de tempestade marítima, através da aplicação, análise, avaliação de desempenho e comparação de três modelos numéricos de morfodinâmica, o modelo XBeach (versões 18 e 19), o modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983) e o modelo Duner. Para isso, aplicaram-se os modelos a um caso de erosão de um perfil praia-duna simulado em canal de grande escala (experiência laboratorial). As principais conclusões foram as seguintes:

- i) o modelo XBeach, pelo facto de ter um elevado número de parâmetros de calibração, resultantes da inclusão de um elevado número de processos e de diferentes opções de modelação, tem um elevado potencial para reproduzir corretamente os processos costeiros, consequentemente, requer um exaustivo procedimento de teste na sua aplicação. Dos três modelos testados neste estudo é o modelo cuja calibração é mais complexa.
- ii) o modelo XBeach (versões 18 e 19) foi o que apresentou a melhor similaridade entre os resultados numéricos e os resultados experimentais, seguido do modelo Duner e finalmente do modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983).
- iii) o modelo XBeach (versão 19) foi o que apresentou o melhor desempenho. Esta versão do modelo apresentou um excelente desempenho, quer aplicado com os parâmetros por defeito quer calibrado. Destaca-se que a versão 19 do modelo XBeach com os parâmetros por defeito apresentou um desempenho superior ao desempenho da versão 18 do modelo calibrado, que também foi excelente, e bastante superior à versão 18 do modelo com os parâmetros por defeito, cujo desempenho foi apenas bom. Este resultado deve-se aos melhoramentos da versão 19 do modelo XBeach. Neste caso de estudo, os melhoramentos da versão 19 que especificamente contribuíram para o melhoramento de resultados foram as alterações introduzidas no processo físico costeiro do sub-modelo de avalanche da duna, concretamente a discretização do processo de avalanche para frações múltiplas do sedimento.
- iv) o modelo Delft3D (versão 5.00.10.1983) apresentou um fraco desempenho após calibração e um mau desempenho quando aplicado com os parâmetros por defeito. Verificou-se que o modelo não reproduziu a erosão da duna e atribui-se esta limitação ao facto do modelo não considerar o efeito de ondas infragravíticas (que resultam de interações harmónicas não lineares de grupos de ondas curtas), ao contrário do modelo XBeach, que considera. Uma vez que a altura de onda da banda espectral correspondente às ondas infragravíticas aumenta linearmente com a altura significativa de onda ao largo, enquanto a energia correspondente às ondas curtas da banda espectral atinge um limite devido à dissipação ao longo da zona de rebentação, em condições de tempestade a componente devida às ondas infragravíticas é dominante no espraiamento. Este processo é por isso determinante na erosão da duna. Verificou-se também que no processo de calibração o modelo nunca reproduziu corretamente a tendência de evolução do perfil praia-duna na zona submersa.
- v) o modelo Duner apresentou um bom desempenho, próximo do desempenho do modelo

XBeach (versão 18) com os parâmetros por defeito. A sua limitação advém da incapacidade de reprodução da barra submersa, uma vez que assume que o perfil praia-duna adquire a geometria de perfil de equilíbrio na parte submersa. É um modelo cuja capacidade de simulação da erosão da duna é quase tão eficiente como a do modelo XBeach e tem as vantagens de requerer um menor número de parâmetros físicos locais para calibração e um custo computacional bastante inferior. Confirmou-se que é um instrumento simples e eficiente na impossibilidade de aplicar modelos numéricos mais complexos e recomenda-se a sua aplicação para estimativas preliminares em problemas de engenharia.

AGRADEDIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- [1] D. Roelvink, A. Reniers, A. Dongeren, J.T. Vries, R. McCall e J. Lescinski, “Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands.” *Coastal Engineering*, 56, pp. 1133-1152, (2009).
- [2] D. Roelvink, A. Reniers, A. Dongeren, J.T., Vries, J. Lescinski e R. McCall, *XBeach model description and manual. Report*. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology, (2010).
- [3] Deltares, *Delft3D-Flow. Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Hydro-Morphodynamics*. Version 3.15. Revision 18392, Deltares, The Netherlands, (2011).
- [4] F.S.B.F. Oliveira, *Modelação numérica da erosão de dunas durante tempestades*. IV Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia (MEFTE 2012), LNEC, Lisboa, Portugal, (2012), pen-drive, 10 pp.
- [5] F.S.B.F. Oliveira, *Aplicação do modelo Duner para erosão de dunas*. 2^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica, IH, Lisboa, Portugal, (2012), pp. 315-318.
- [6] DHI, *Profile development. LITPROF user guide*. Danish Hydraulic Institute, Denmark, (2008).
- [7] F.S.B.F. Oliveira, “Erosão de dunas com os modelos XBeach e Litprof”. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 12(2), pp. 195-222, (2012).
- [8] D.L. Kriebel e R.G. Dean, “Convolution method for time-dependent beach-profile response.” *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 119(2), pp. 204-226, (1993).
- [9] 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).
- [10] WL | Delft Hydraulics, *Dune erosion, Large-scale model tests and dune erosion prediction method*. Report H4357, Delft, The Netherlands, (2006).

- [11] A.H. Sallanger, “Storm impact scale for barrier islands.” *Journal of Coastal Research*, 16 (3), 890-895, (2000).
- [12] N. Booij, R.C. Ris e L.H. Holthuijsen, “A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation.”, *J. Geoph. Research*, 104, C4, pp. 7649-7666, (1999).
- [13] Deltares, *Delft3D-Wave. Simulation of short-crested waves with SWAN. User Manual. Hydro-Morphodynamics*. Version 3.04.1933, Deltares, The Netherlands, (2012).
- [14] L.C. van Rijn, *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas*. Aqua Publications, The Netherlands, (1993).
- [15] R.G. Dean, “Beach erosion: causes, processes, and remedial measures.” *CRC Critical Review of Envir. Control*, 6(3), pp. 259-296, (1976).
- [16] R.G. Dean, *Equilibrium beach profiles: U.S. Atlantic and Gulf Coasts*. Oc. Engrg. Report No. 12, Univ. of Delaware, Newark, (1977).
- [17] L.C. Van Rijn, D.J.R. Walstra, B. Grasmeyer, 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, pp. 295-327, (2003).