

A DIMENSÃO LONGILITORAL NA RESILIÊNCIA DUNAR DURANTE TEMPESTADES MARÍTIMAS

Filipa S. B. F. OLIVEIRA¹

RESUMO

Durante temporais marítimos que atingem a costa ocorre, frequentemente, a erosão de sistemas praia-duna. Apesar da componente transversal dos processos costeiros ser predominante relativamente à componente longitudinal durante eventos deste tipo, é importante conhecer como os gradientes longitudinais da geomorfologia afetam a morfodinâmica do sistema praia-duna no seu todo. Este estudo teve como objetivo analisar o efeito da variação longitudinal da morfologia da duna frontal na morfodinâmica do sistema praia-duna sob ação de ondas incidentes oblíquas e variação do nível do mar devida à ação das marés astronómica e meteorológica. A insuficiência de dados de campo ou laboratório deste tipo para condições de temporal marítimo é uma limitação à compreensão dos processos costeiros subjacentes. Por isso, nesta análise recorreu-se a um modelo numérico 2DH de morfodinâmica baseado nos processos costeiros. A morfologia do caso de estudo foi simplificada para limitar a complexidade dos fenómenos físicos envolvidos e, assim, melhor se identificarem os mecanismos responsáveis pela evolução morfológica verificada. Inicialmente apenas a altura da duna frontal variava na direção longitudinal. Contudo, no decorrer da tempestade, com a erosão da duna, outras características morfológicas no topo e acima da face de praia deixaram de ser uniformes na direção longitudinal. Apesar do volume de sedimentos erodidos da zona face de praia-berma-duna frontal ser mais elevado para os trechos de duna mais alta e o recuo da duna frontal ser maior para os trechos de duna mais baixa, a nova topo-hidrografia das zonas de rebentação e face de praia continuou bastante uniforme na direção longitudinal. Concluiu-se que parte do volume de sedimentos erodidos da zona face de praia-berma-duna frontal dos trechos de duna mais alta é transportada pela corrente longitudinal e depositada na área submersa dos trechos de duna mais baixa, atenuando assim os gradientes longitudinais da topo-hidrografia das zonas de rebentação e face de praia.

Palavras-chave: Praia; Erosão; Morfodinâmica; Temporal marítimo; Proteção costeira.

¹ Investigadora Auxiliar; Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa; +351218443457; foliveira@lnec.pt

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas praia-duna são a mais importante proteção natural costeira na interface terra-mar em costas baixas e arenosas. A ocorrência episódica dos mecanismos erosão-galgamento-rotura-inundação, devida à ação combinada de ondas com elevada altura e sobrelevação do nível médio do mar durante tempestades marítimas, caracterizadas por ventos fortes e pressões atmosféricas baixas, pode ter graves consequências, danos ou mesmo perdas, em ambientes naturais e infraestruturas costeiras localizadas em frentes marítimas, como já tem acontecido em vários trechos da costa portuguesa (Pinto, 2014). Por este motivo, é essencial para a gestão da zona costeira que se possa prever com credibilidade o impacto de episódios marítimos extremos. Para tal, é necessária a compreensão e reprodução analítica, com recurso a modelos numéricos, dos processos físicos envolvidos na morfodinâmica costeira durante este tipo de episódios.

A resiliência de sistemas praia-duna a tempestades marítimas tem sido analisada principalmente através da aplicação de modelos numéricos de morfodinâmica designados como modelos de perfil, uma vez que a componente transversal (normal à linha de costa) dos processos físicos costeiros é predominante durante a ação deste tipo de condições de hidrodinâmica. Conceptualmente, existem três tipos de modelos de perfil: modelos 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 (Oliveira, 2012b; 2012c; 2013) 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 (Larson e Kraus, 1989) 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. O modelo Litprof (DHI, 2013) é um exemplo deste tipo. No entanto, com vista a melhorar a previsão da resposta morfológica do sistema praia-duna sob condições extremas de energia e sobrelevação do nível do mar, é importante compreender como é que o gradiente longitudinal dos processos físicos costeiros (que pode ter várias proveniências, entre as quais o gradiente longitudinal da geomorfologia) afeta a morfodinâmica do sistema praia-duna no seu todo.

O presente estudo teve como objetivo analisar o efeito da variação da morfologia da duna frontal ao longo da direção longitudinal na morfodinâmica do sistema praia-duna, mais especificamente, avaliar a resiliência do sistema praia-duna como um todo durante eventos de tempestade, nos quais se verifica erosão na zona face de praia-berma-duna frontal.

Dados de campo (resultantes de monitorização em locais de estudo) ou de laboratório (resultados experimentais de modelação física a escala reduzida) relativos à evolução do sistema praia-duna durante eventos de tempestade que incluam a direção longitudinal são muito raros. O conhecimento existente sobre a erosão destes sistemas é maioritariamente baseado em experimentação em canais laboratoriais de grande escala. A insuficiência deste tipo de dados constitui um obstáculo à compreensão da dimensão longitudinal na resiliência de sistemas dunares durante tempestades marítimas. Para ultrapassar esta limitação, recorreu-se à utilização de um modelo numérico bi-dimensional no plano horizontal (2DH) baseado nos processos físicos costeiros, o modelo XBeach (Roelvink *et al.*, 2009). Os resultados obtidos foram comparados com os resultados da simulação uni-dimensional

transversal (1D) tendo em vista identificar o impacto do gradiente longitudinal da morfologia da duna frontal na evolução morfológica do sistema praia-duna.

2. DADOS E MÉTODO

2.1 Condições morfo-sedimentares

Simplificou-se a morfologia da zona de estudo tendo em vista limitar a complexidade dos processos físicos costeiros envolvidos na morfodinâmica e, assim, melhor se identificarem os mecanismos responsáveis pela evolução morfológica verificada. A zona de estudo, que coincide com o domínio de cálculo, tem uma área com $3500 \times 1000 \text{ m}^2$ (nas direções longitudinal e transversal, respetivamente). As condições morfológicas iniciais (para $t=0 \text{ s}$) basearam-se num perfil transversal à linha de costa (perfil original da Figura 1), localizado na península do Ancão, pertencente ao sistema designado por ilhas-barreira da Ria Formosa, na costa sul portuguesa, região onde ocorre erosão e galgamento de dunas frontais, como se ilustra na Figura 2. Consideraram-se uniformes na direção longitudinal da zona de estudo a topo-hidrografia abaixo da base da duna frontal e o declive da face da duna frontal. Fez-se variar a altura da duna frontal ao longo de uma sequência de cinco trechos, alternados entre si, constituídos por perfil de duna alta e perfil de duna baixa (sendo alta e baixa designações pelas quais se optou para distinguir os dois casos de altura da duna frontal), conforme se ilustra na Figura 3. Nos trechos laterais e central, com 1000 e 500 m de comprimento, respetivamente, considerou-se a altura da duna frontal igual a 9 m acima do zero hidrográfico (ZH), que se considerou 2.15 m abaixo no nível médio do mar (NMM) nesta região costeira. O perfil transversal correspondente a estes trechos foi designado por perfil duna alta (DA) (Figura 1). Nos dois trechos intermédios, com 500 m de comprimento, considerou-se a altura da duna frontal igual a 6 m acima do ZH. O perfil transversal correspondente a estes trechos foi designado por perfil duna baixa (DB) (Figura 1). No sistema uniforme de coordenadas no plano cartesiano no qual se implementou a malha de cálculo consideraram-se as direções dos eixos x e y coincidentes com as direções transversal e longitudinal, respetivamente. Usou-se o espaçamento da malha $dx=1 \text{ m}$ e $dy=20 \text{ m}$.

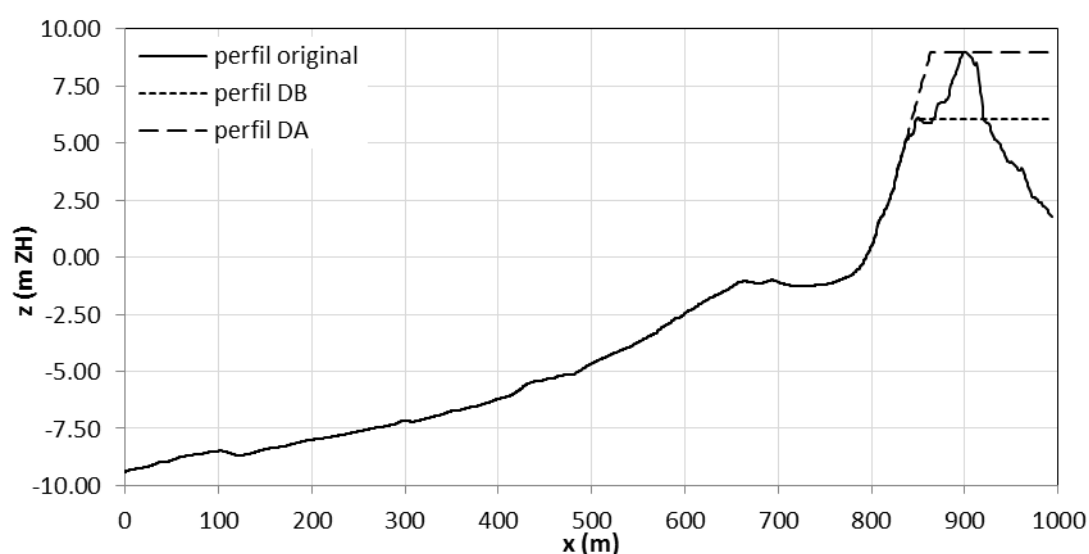


Figura 1. Perfis topo-hidrográficos original e de teste (DB e DA).



Figura 2. Cortes de galgamento da duna frontal, costa sul portuguesa.

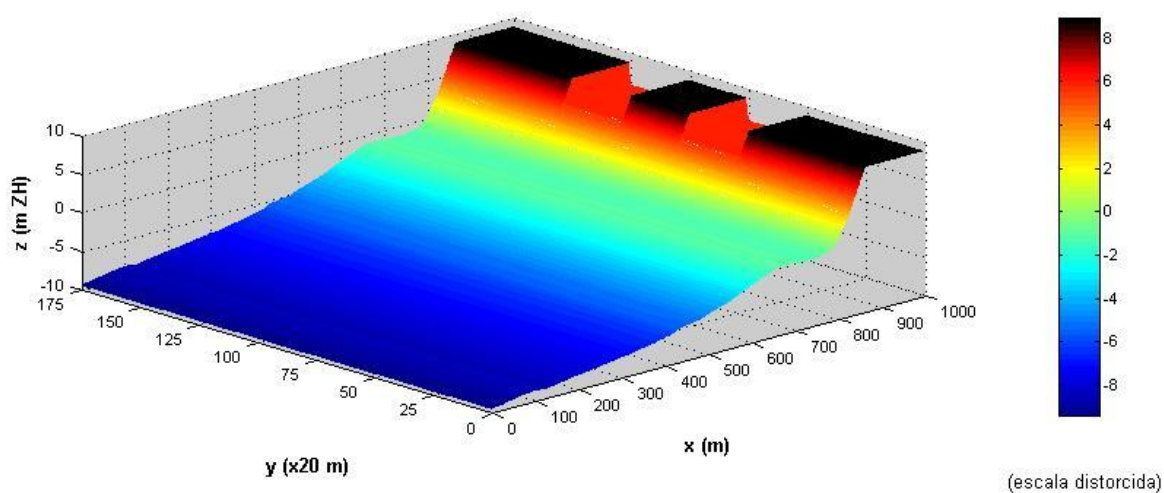


Figura 3. Topo-hidrografia inicial da zona de estudo.

Consideraram-se as características granulométricas dos sedimentos da zona de estudo definidas com base nos parâmetros estatísticos diâmetro mediano (D50) igual a 0.5 mm e percentil 90 (D90) igual a 0.8 mm, com base em resultados de análises granulométricas efetuadas para amostras recolhidas na proximidade do perfil original. A densidade do sedimento foi considerada igual a 2.65.

2.2 Condições de hidrodinâmica

As series temporais de ondulação e nível do mar consideradas no caso de estudo basearam-se em parâmetros de hidrodinâmica com período de retorno de 50 anos correspondentes a tempestades marítimas em frente à península do Ancão. Para a sobrelevação de origem meteorológica (calculada como sendo a diferença entre o nível do mar observado e o nível do mar previsto devido à maré astronómica) considerou-se um valor constante durante a tempestade simulada. Aplicou-se a sobrelevação com período de retorno de 50 anos, que é 0.9 m, calculada como descrito em Sancho *et al.* (2012). O máximo nível do mar considerado na fronteira de entrada do domínio de cálculo (*offshore boundary*) foi 4.42 m ZH e resultou da soma do valor correspondente ao nível de preia-mar de águas vivas (PMAV) determinado em Faro, 3.52 m ZH, com a sobrelevação (Figura 4). A duração da tempestade simulada foi 24 horas. Consideraram-se a altura significativa máxima e o período de pico com períodos de retorno de 50 anos ao largo da península do Ancão, $H_{s_{máx}}=7.00$ m e $T_p=12.5$ s, de acordo com os mesmos autores. Estes parâmetros de caracterização da ondulação, associados à direção de onda incidente cujo ângulo relativamente à normal à linha de costa é igual a 30° (no sentido dos ponteiros do relógio), foram considerados constantes na serie temporal definida como condição fronteira de onda à entrada do domínio de cálculo (*offshore wave boundary condition*) para as simulações 1D e 2DH.

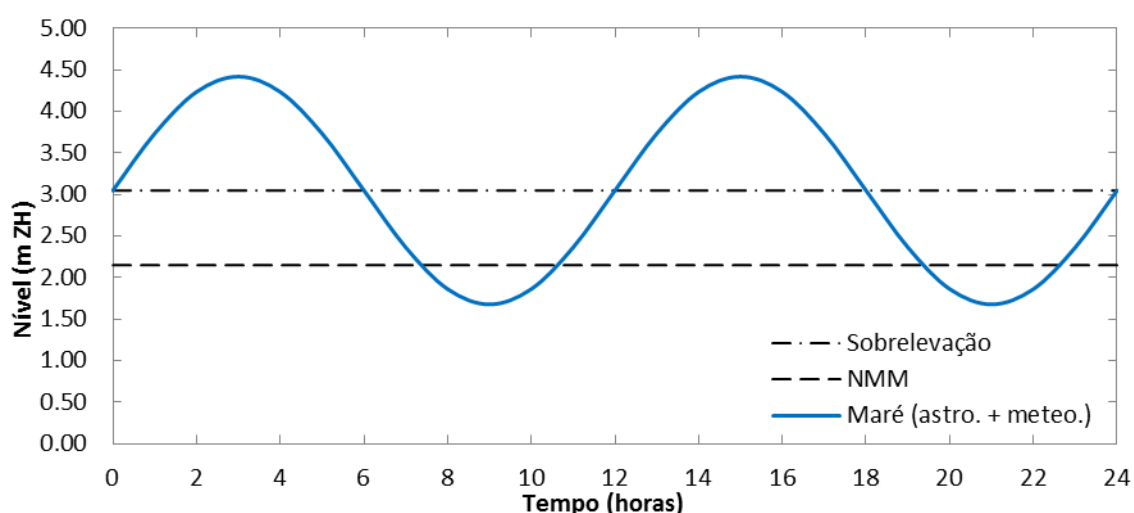


Figura 4. Série temporal do nível do mar na fronteira de entrada do domínio de cálculo.

2.3 Modelo numérico de morfodinâmica

O modelo XBeach (*eXtreme Beach behaviour*) (Roelvink *et al.*, 2009; 2010) é um modelo 2DH, constituído por vários sub-modelos dos processos costeiros propagação de ondas infragravíticas e grupos de ondas gravíticas, espriamento, erosão e galgamento de dunas, avalanche, transporte sedimentar e evolução do fundo. O objetivo do XBeach é modelar estes processos nos quatro regimes de impacte de tempestade marítima definidos por Sallanger (2000): regime de espriamento, regime de colisão, regime de galgamento e

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

O modelo resolve de forma acoplada as equações bi-dimensionais no plano horizontal de propagação de ondas, de escoamento, de transporte de sedimentos e de atualização do fundo (equação da continuidade), para condições de fronteira de espectro de ondas e escoamento não estacionárias. A descrição detalhada das principais equações governantes pode ser vista em Oliveira (2012a). As condições fronteira garantem que o sistema de equações produz uma única solução possível no interior do domínio de cálculo.

O modelo usa uma malha estruturada alternada (*staggered grid*), retilínea (que poderá ser não equidistante), implementada num sistema de coordenadas no qual o eixo-x está orientado em direção à costa, i.e., perpendicular à linha de costa, e o eixo-y está orientado ao longo da costa. Nesta malha, as grandezas conservativas (nível da água, batimetria, etc) são calculadas no centro das células e os fluxos (velocidade, transporte sedimentar, gradiente da tensão de radiação, etc) são calculados nas interfaces das células.

Uma vez que as escalas de comprimento são pequenas, frequentemente ocorre escoamento super-crítico ($Fr > 1$, sendo Fr o número de Froude) e se dá prioridade à estabilidade numérica, os esquemas de discretização numérica predominantes são *upwind* de primeira ordem, por forma a resolver os elevados gradientes da hidrodinâmica e morfodinâmica na zona de rebentação e espraiamento minimizando oscilações numéricas. São utilizados esquemas explícitos com passo de cálculo automático baseado no critério de Courant. Estes esquemas implementados numa malha estruturada alternada garantem a robustez do modelo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No âmbito das simulações 1D os perfis DB e DA exibiram a seguinte evolução sob ação das ondas e variação do nível do mar devida à ação conjunta da sobrelevação e maré astronómica (Figura 5): i) elevado recuo da duna frontal e face de praia associado a uma diminuição do declive da face de praia, que se prolongou até à base da duna frontal, e um aumento do declive da face da duna frontal, que se tornou quase vertical; ii) ligeira erosão do perfil submerso na extensão localizada entre as profundidades aproximadas de -3 e -1 m ZH; e iii) transporte da areia erodida (predominantemente da duna frontal e face de praia) em direção ao mar e sua deposição ao longo do perfil até à profundidade -8 m ZH, com particular incidência na extensão da zona de rebentação localizada entre a profundidade aproximada de -1 m ZH e a face de praia.

As simulações 1D revelaram que o recuo da crista da duna frontal foi maior (superior ao dobro) no perfil DB do que no perfil DA (Figura 5 e Tabela 1) e que o volume de erosão (de valor negativo) da face de praia (localizada entre os níveis 1.68 e 4.42 m ZH) e acima desta zona foi 15% maior no perfil DA do que no perfil DB (Figura 6). Como resultado, observaram-se as seguintes principais diferenças entre os perfis DB e DA pós-tempestade (Figura 5): o enchimento do fundo na extensão da zona de rebentação localizada entre a profundidade aproximada de -1 m ZH e a face de praia foi ligeiramente superior no perfil DA; a face da duna frontal ficou mais avançada no perfil DA; e o declive da face de praia ficou mais baixo no perfil DB.

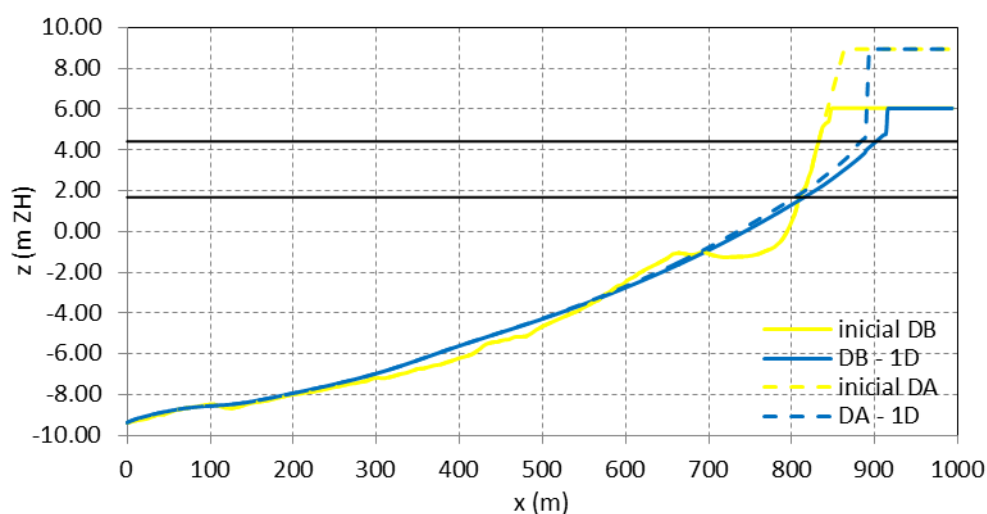


Figura 5. Evolução dos perfis DB e DA nos casos 1D.

Tabela 1. Recuo da crista da duna frontal nos casos simulados.

| Caso | Recuo da crista da duna frontal (m) |
|----------|-------------------------------------|
| DB - 1D | 68 |
| DB - 2DH | 40 |
| DA - 1D | 31 |
| DA - 2DH | 15 |

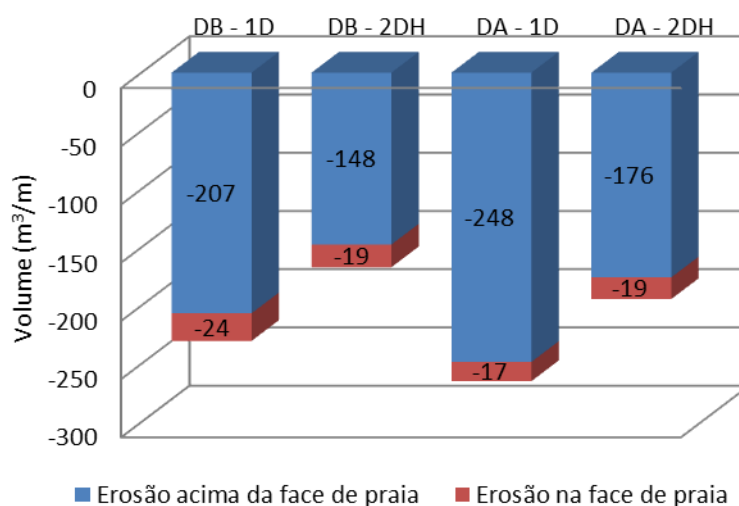


Figura 6. Volume de erosão (< 0) dos perfis DB e DA nos casos 1D e 2DH.

Aplicou-se o modelo 2DH à zona de estudo. Os resultados obtidos denotam que a evolução dos perfis DB e DA é influenciada pela evolução da zona adjacente localizada do lado da onda incidente. O recuo da crista da duna frontal é aproximadamente 60 e 50% do recuo obtido nas simulações 1D para o perfil DB e DA, respetivamente (Tabela 1 e Figuras 7 e 8).

O volume de areia erodido da face de praia e acima desta zona foi 17% maior no perfil DA do que no perfil DB (Figura 6), aproximadamente a mesma correlação observada no caso das simulações 1D. Contudo, na simulação 2DH a magnitude deste volume foi reduzida em cerca de 25% em ambos os perfis, DB e DA. Dado que em condições de tempestade a componente devida às ondas infragravíticas é dominante no espraiamento (Raubenheimer e Guza, 1996) e, por isso, a erosão de dunas é dominada por ondas longas (que resultam de interações harmónicas não lineares de grupos de ondas curtas), uma possível explicação para o menor impacte da tempestade na simulação 2DH é o efeito da dispersão de ondas curtas nas ondas infragravíticas, assunto que deverá ser investigado.

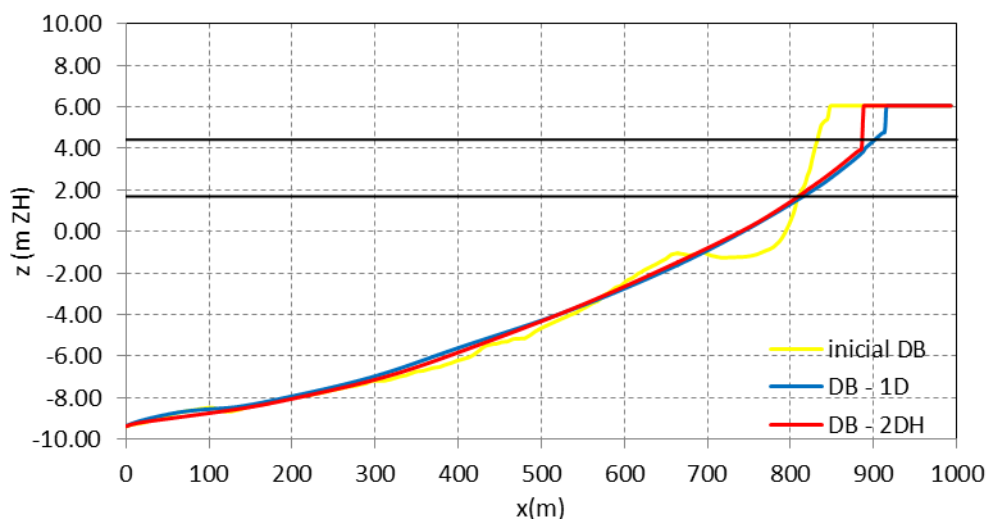


Figura 7. Evolução do perfil DB nos casos 1D e 2DH.

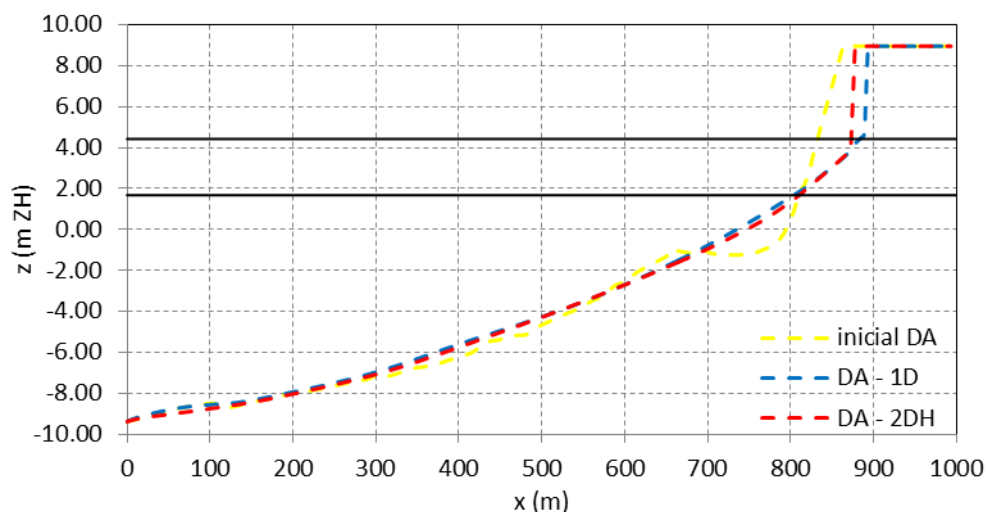


Figura 8. Evolução do perfil DA nos casos 1D e 2DH.

No caso 2DH, apesar do volume de erosão acima do limite inferior da face de praia do perfil DA ser superior ao volume de erosão acima do limite inferior da face de praia do perfil DB (tal como no caso da simulação 1D), os perfis pós-tempestade DB e DA (Figura 9) revelam

que a erosão na parte inferior da face de praia e a deposição na zona de rebentação são muito semelhantes em ambos os perfis (Figura 10). Constata-se que os perfis DB e DA são mais semelhantes entre si na zona da face de praia e abaixo desta do que no caso da simulação 1D (Figura 5). Daqui se conclui que parte do volume de sedimentos erodidos acima do limite inferior da face de praia do perfil DA é mobilizada pela corrente longitudinal e depositada na zona submersa do perfil DB, promovendo a uniformidade da topo-hidrografia na direção longitudinal. Esta redistribuição de sedimentos na direção longitudinal resulta na proteção do perfil DB pelo perfil DA contra o impacto da tempestade.

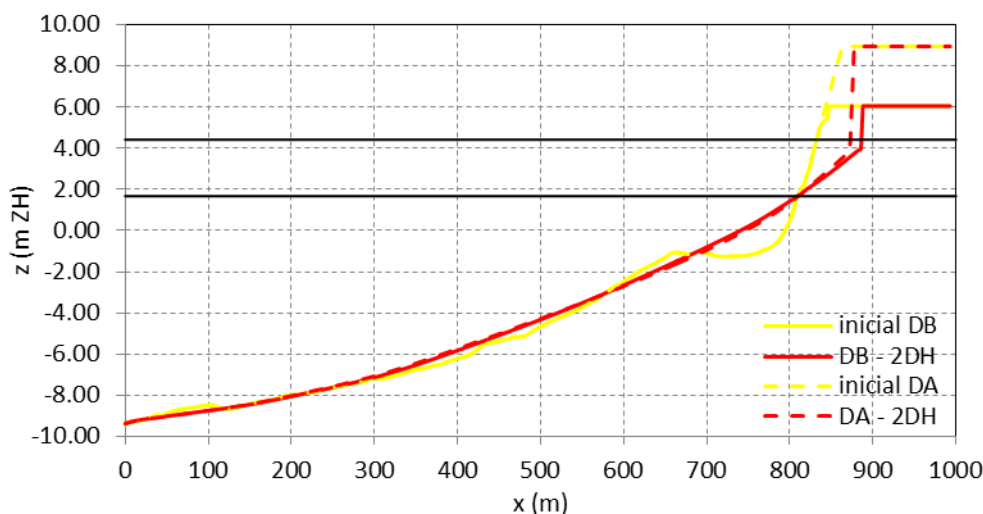


Figura 9. Evolução dos perfis DB e DA no caso 2DH.

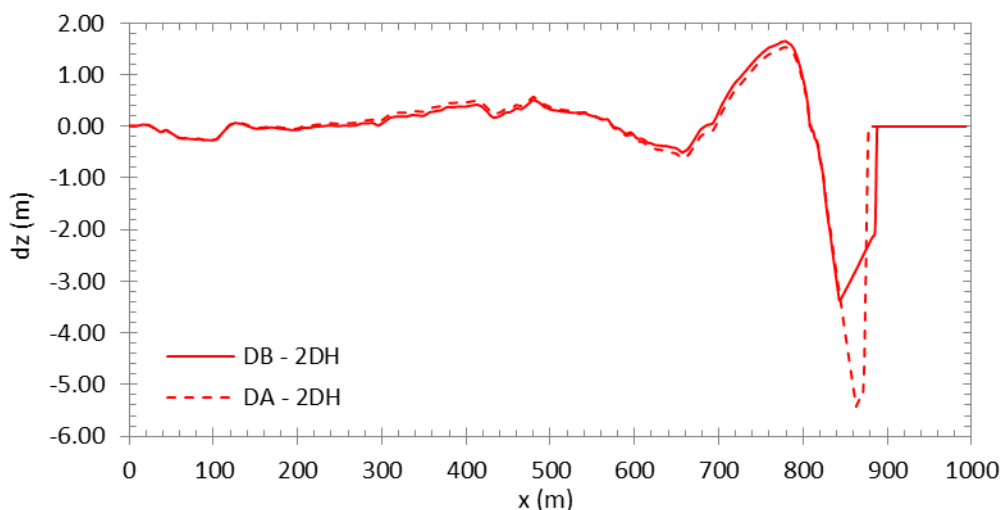


Figura 10. Variação do nível topo-hidrográfico nos perfis DB e DA no caso 2DH.

4. CONCLUSÕES

O objetivo do presente estudo foi analisar o efeito da variação longitudinal da morfologia da duna frontal, especificamente, do parâmetro altura da crista, na morfodinâmica do sistema praia-duna, em particular, na resiliência do sistema praia-duna como um todo durante

eventos de tempestade marítima caracterizados por incidência de ondas oblíquas e variação do nível do mar devida à ação combinada de maré astronómica e meteorológica. A insuficiência de dados, de campo ou laboratório, que incluam a componente longitudinal para determinadas condições ambientais extremas é um obstáculo à compreensão dos processos físicos costeiros subjacentes. Assim, para alcançar o objetivo do estudo, procedeu-se da seguinte forma: aplicou-se um modelo numérico de morfodinâmica 2DH (bi-dimensional no plano horizontal) baseado nos processos físicos costeiros, o modelo XBeach, a uma morfologia simplificada, estabelecida tendo em vista limitar a complexidade dos processos físicos subjacentes e, assim, melhor identificar os agentes indutores e os mecanismos responsáveis pela evolução morfológica verificada; e compararam-se os resultados obtidos aos resultados de simulações 1D (uni-dimensionais, transversais).

Em suma, as principais conclusões desta investigação foram as seguintes:

- a variação da altura da duna frontal ao longo da direção longitudinal resulta na erosão de maior volume sedimentar da duna frontal e face de praia nos trechos de duna mais alta e no maior recuo da crista da duna frontal nos trechos de duna mais baixa;
- parte dos sedimentos erodidos das dunas mais altas é posteriormente redistribuída pela corrente longitudinal e depositada na zona submersa em frente às dunas mais baixas, que assim melhoram a sua proteção contra o impacto da tempestade;
- apesar da componente transversal dos processos físicos costeiros ser predominante durante eventos de tempestade, a obliquidade das ondas incidentes atenua as variações longitudinais da topo-hidrografia nas zonas de rebentação e face de praia, ou seja, torna-as mais uniformes nesta direção;
- sob ação de ondas oblíquas o modelo 2DH produz efeitos longitudinais que resultam em menor erosão da duna frontal e face de praia do que a ocorrida nas simulações 1D. Uma possível explicação é o efeito da dispersão de ondas curtas nas ondas infragravíticas. No entanto, este assunto deverá ser investigado pois tais previsões não estão do lado da segurança para estudos de engenharia, uma vez que reduzem a intensidade da erosão das dunas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- DHI (2013). *Profile development. LITPROF user guide*. Danish Hydraulic Institute, Denmark, 74 p.
- Larson, M., Kraus, N.C. (1989). *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, 256 p.
- Oliveira, F.S.B.F. (2012a). Erosão de dunas com os modelos XBeach e Litprof. *Revista da Gestão Costeira Integrada*, 12(2): 195-222.
- Oliveira, F.S.B.F. (2012b). Numerical modelling of dune erosion during storms. *IV Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia*, LNEC, Lisboa, Portugal, pen-drive, 10 p.
- Oliveira, F.S.B.F. (2012c). Application of the Duner model for dune erosion. *2as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, IH, Lisboa, Portugal, 315-318.

Oliveira, F.S.B.F. (2013). Dune erosion during storms: application of different numerical models. *Congress on Numerical Methods in Engineering*, Bilbao, Spain, (<http://congress.cimne.com/metnum2013/Proceedings/>), 20 p.

Pinto, C.A. (2014). *Registo das ocorrências no litoral. Temporal de 3 a 7 de janeiro de 2014*. Relatório da Agência Portuguesa do Ambiente. Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia. 123 p.

Roelvink, D., Reniers, A., Dongeren, A., Vries, J.T., McCall, R., Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56: 1133-1152.

Roelvink, D., Reniers, A., Dongeren, A., Vries, J.T., Lescinski, J., McCall, R. (2010). *XBeach model description and manual*. Report. Unesco-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology, 106 p.

Raubenheimer, B., Guza, R.T. (1996). Observations and predictions of run-up. *Journal of Geophysical Research*, 101 (C10) 25575-25587.

Sallanger, A.H. (2000). Storm impact scale for barrier islands. *Journal of Coastal Research*, 16(3):890-895.

Sancho, F., Oliveira, F.S.B.F., Freire, P. (2012). Coastal dunes vulnerability indexes: a new proposal and application to Ria Formosa coast (Portugal). *33rd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Santander, Spain, pen-drive, 12 p.