



LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL



FUNDAÇÃO
DA FACULDADE DE CIÊNCIAS
DA UNIVERSIDADE DE LISBOA

FCT

Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E DO ENSINO SUPERIOR

Aplicação de um modelo analítico de previsão da erosão de dunas devido ao impacto de ondas



MorFeed – *Morphodynamic feedback of estuarine margins to climate change*

Ref.^a PTDC/AAC-AMB/100092/2008

Relatório de Atividades realizadas no 2º ano de contrato pela Bolseira de Investigação
Martha Christine Medeiros Guerreiro

Autores: Martha Guerreiro e Filipa S. B. F. Oliveira

LNEC, Lisboa, Março de 2013

**APLICAÇÃO DE UM MODELO ANALÍTICO DE PREVISÃO DE EROÇÃO DE DUNAS
DEVIDO AO IMPACTO DE ONDAS**

**APPLICATION OF AN ANALYTICAL MODEL TO PREDICT DUNE EROSION DUE TO
WAVE IMPACT**

APLICAÇÃO DE UM MODELO ANALÍTICO DE PREVISÃO DE EROÇÃO DE DUNAS DEVIDO AO IMPACTO DE ONDAS

RESUMO

O presente estudo enquadra-se na área de investigação científica da dinâmica costeira tendo sido realizado no âmbito do projeto MorFeed - *Resposta morfológica das margens estuarinas ao impacto das alterações climáticas*. O objetivo do estudo foi avaliar o efeito das alterações climáticas, especificamente da subida do nível médio do mar e de eventuais alterações do regime de agitação marítima média e de extremos, na praia do Alfeite do estuário do Tejo, para os horizontes temporais de 2050 e 2100. De forma a atingir os objetivos propostos, foi desenvolvido e testado um modelo analítico, o modelo Duneforce, para erosão de dunas sob ação conjunta de ondas e nível do mar. Aplicou-se o modelo Duneforce, com base nas duas fases: i) validação do modelo para a praia do Alfeite com os dados da tempestade de 29-janeiro-2006 (os únicos dados de tempestade conhecidos para a zona de estudo) e comparação dos resultados obtidos com os de outro modelo utilizado anteriormente para o mesmo evento erosivo; e ii) realização de testes de sensibilidade do modelo para o caso da praia do Alfeite. As principais conclusões do estudo foram: i) o modelo Duneforce subestimou o volume erodido na praia do Alfeite para a tempestade analisada, ii) considerando o atual nível médio do mar e o regime de agitação característico do estuário do Tejo, para que as ondas atinjam a base da duna do perfil representativo da praia do Alfeite é necessário que ocorra uma sobrelevação de origem meteorológica muito elevada associada a ventos fortes de NE que causem valores de *runup* que atinjam a base da duna, e iii) para as condições de hidrodinâmica para os horizontes temporais de 2050 e 2100 o nível do mar dentro do estuário em frente à praia do Alfeite já se encontrará acima do topo da duna, ou seja, a restinga do Alfeite já terá sido completamente inundada.

Palavras-chave: Praia estuarina, Erosão costeira, Tempestade marítima, Morfodinâmica, Curto-prazo, Modelo Duneforce

Índice

1. Introdução e objetivo	1
2. Área de estudo	2
3. Metodologia	4
3.1 Modelo analítico de Larson <i>et al.</i> (2004)	7
3.2 Aplicação do modelo	9
4. Resultados e discussão	11
5. Conclusões	19
6. Referências	20

Índice de figuras

Figura 1 - a) Enquadramento e localização geográfica da restinga do Alfeite no contexto do estuário do Tejo; b) Pormenor da restinga do Alfeite (Ortofoto de 2007, Instituto Geográfico Português -IGP).	1
Figura 2 - Localização dos perfis transversais levantados ao longo da praia do Alfeite, em diferentes estudos.	2
Figura 3 – Estatísticas da variação do regime de ventos no fim dos séculos 20 (1970-2000) (a preto) e 21 (2070-2100) (a vermelho).	6
Figura 4 – Perfil de referência utilizado para o modelo analítico. A linha a tracejado representa o NMM atual (2.21 m acima do Zero Hidrográfico).	6
Figura 5 – Esquema conceptual da modelação de erosão de dunas devido ao impacto de ondas (<i>runup</i>). Adaptado de Larson <i>et al.</i> (2004).	7
Figura 6 – Esquema do perfil inicial usado para os testes com o modelo analítico.	9
Figura 7 – Condições hidrodinâmicas da tempestade de 29-janeiro-2006.	10
Figura 8 – Runup para os diferentes valores de H_{rms} e T_z .	12
Figura 9 – Verificação da condição $0 < Z_0 / R < 1$ necessária para a aplicação da formulação de Larson <i>et al.</i> (2004) para a praia do Alfeite. Cada cor representa um valor de Z_0 no qual as condições de aplicação do modelo são válidas.	13
Figura 10 – Tempo necessário para erodir toda a duna, T_B (dias), com base na aplicação do modelo.	14
Figura 11 – Volume erodido ao fim de 1 hora (m^3/m) com base na aplicação do modelo.	15
Figura 12 – Esquema da erosão da duna para condições constantes de agitação ao longo do tempo.	16
Figura 13 – Desenho esquemático da situação atual. Nesta figura podemos ver o ciclo de maré para um mês (síntese harmónica de 12 constituintes de maré) e as linhas a vermelho indicam possíveis níveis máximos. A linha a preto representa a base da duna.	18

Índice de tabelas

Tabela 1 - Cenários a adotar de subida do NMM relativamente a 1990 (em cm) no âmbito do projeto MorFeed.	4
Tabela 2 – Valores do nível de superfície livre para os vários cenários de subida do NMM obtidos através do modelo hidrodinâmico (Guerreiro <i>et al.</i> , 2012).	5
Tabela 3 – Parâmetros do modelo para as três primeiras horas da tempestade de 29-janeiro - 2006.	11
Tabela 4 – Valores do nível de superfície livre para os vários cenários de subida do NMM obtidos através do modelo hidrodinâmico (Guerreiro <i>et al.</i> , 2012).	17

1. Introdução e objetivo

O projeto Morfeed (*Morphodynamic feedback of estuarine margins to climate change*) visa melhorar o conhecimento sobre os efeitos das alterações climáticas nas margens estuarinas. No âmbito do projeto, este trabalho pretende avaliar o efeito conjunto das alterações climáticas, especificamente da subida do nível médio do mar (NMM) e das eventuais alterações do regime de agitação marítima média e de extremos, nas margens arenosas que constituem praias no estuário do Tejo (Figura 1), para os horizontes temporais de 2050 e 2100. Estas zonas de interface terra-água constituídas por sedimentos arenosos são mais vulneráveis uma vez que para além de submetidas à subida do NMM também estão sujeitas à ação das ondas. De forma a atingir os objetivos propostos, foi desenvolvido e testado um modelo analítico, o modelo Duneforce, com base na formulação de Larson *et al.* (2004), para erosão de dunas sob ação conjunta de ondas e nível do mar. O modelo analítico foi aplicado para os cenários mais desfavoráveis de alterações climáticas para o caso de estudo selecionado, a praia do Alfeite. Esta praia foi escolhida como caso piloto, pelo facto de ser a praia que está submetida à zona de maior *fetch* (zona de geração-propagação das ondas) do estuário (25 km com alinhamento aproximado NE) e devido à existência de um grande número de dados.



Figura 1 - a) Enquadramento e localização geográfica da restinga do Alfeite no contexto do estuário do Tejo; b) Pormenor da restinga do Alfeite (Ortofoto de 2007, Instituto Geográfico Português -IGP).

2. Área de estudo

Os estuários são zonas de elevado valor económico e de biodiversidade. O estuário do Tejo é um dos maiores da Europa e as suas margens encontram-se quase totalmente ocupadas com uma grande diversidade de ocupação antropogénica. Ao longo da margem esquerda encontram-se também praias estuarinas de dimensão reduzida, compostas por areia de origem fluvial. Estas praias são geradas pelo regime de ventos locais, já que a grande extensão do estuário permite um *fetch* suficiente para que se forme um regime de agitação, em que as ondas podem atingir alturas significativas de vários decímetros (Freire, 2003).

Na costa portuguesa os ventos tem uma direção predominante de NW. Um estudo efetuado por Valente (2006) analisou um registo de ventos com uma duração de 6 anos, de forma a estimar a potência da agitação incidente ao longo do estuário. Deste estudo concluiu-se que os valores mais elevados encontram-se ao longo da margem esquerda do estuário, diminuindo de norte para sul.

A praia do Alfeite localiza-se no extremo da zona de maior *fetch* do estuário, sendo por isso considerada a praia com maior probabilidade de sofrer a ação de ondas com altura significativa de maior dimensão, quando a direção dos ventos é NE-SW.

A praia do Alfeite tem um perfil transversal refletivo (Valente, 2006). O raso de maré é bastante extenso, quase horizontal e encontra-se a 0.5 m abaixo do NMM, enquanto a berma tem uma inclinação suave, entre 5° a 10°, e encontra-se acima do NMM.

Na praia do Alfeite, ao longo das últimas duas décadas foram realizados vários estudos de monitorização, no âmbito dos quais foram efetuados levantamentos topo-hidrográficos de perfis transversais, idealmente normais à linha de costa (Figura 2) (Freire, 2003; BERNA: Silva *et al.* 2005a,b,c,d; 2006a,b,c,d,e,f; 2007a,b,c,d; Taborda *et al.*, 2007a,b; Freire *et al.*, 2008, MorFeed: Rilo *et al.*, 2012). Esta aquisição de dados teve como objetivo avaliar a tendência evolutiva a médio termo (décadas) da praia do Alfeite, entre 1994 e 2012.

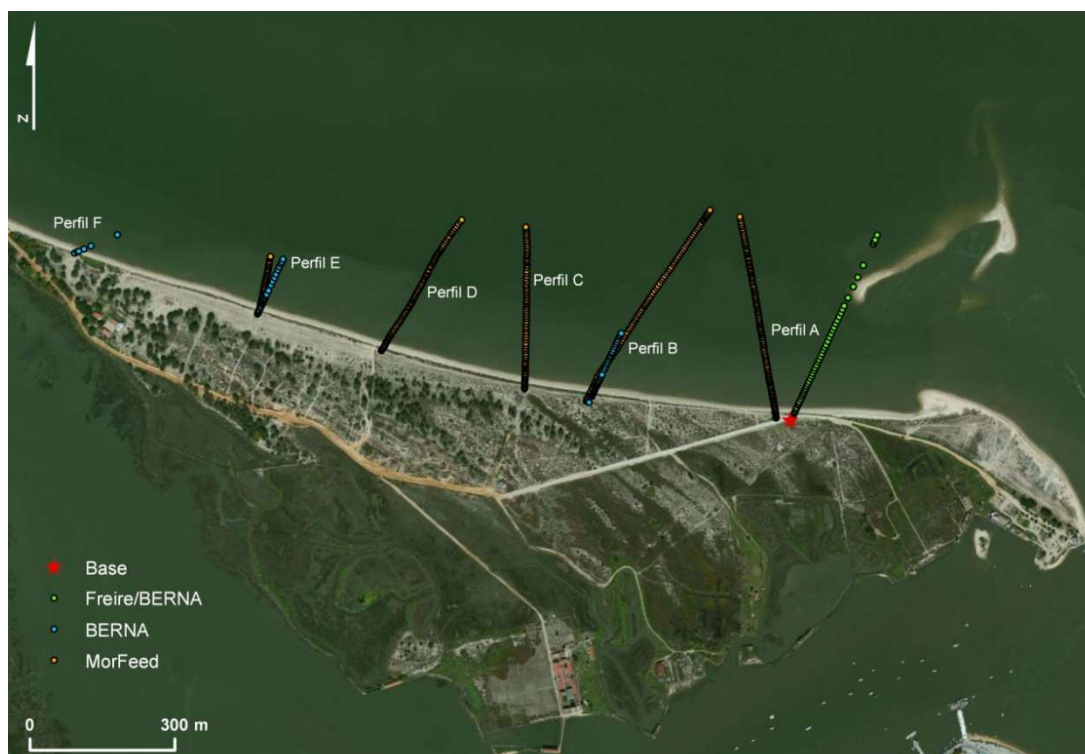


Figura 2 - Localização dos perfis transversais levantados ao longo da praia do Alfeite, em diferentes estudos.

Guerreiro *et al.* (2012) verificou que em todos os perfis medidos as características morfológicas são semelhantes tanto ao longo dos anos de medição como longitudinalmente, ou seja, ao longo da praia. Na zona superior da praia, foi também registada a formação de pequenas escarpas de erosão. Estas estão associadas a eventos de agitação local com valores dos parâmetros altura e período de onda superiores aos registos normais (mais frequentes) do estuário e localizam-se no topo do perfil transversal.

A praia do Alfeite apresenta uma grande variabilidade sedimentar (Freire, 2003). Durante o projeto BERNA foram realizadas duas campanhas onde se efetuaram amostragens dos sedimentos em 3 pontos, ao longo de 3 perfis transversais da praia, localizados na face de praia, no sopé da face de praia e no raso de maré (Silva *et al.*, 2005a,b; Freire *et al.*, 2008,). Os resultados obtidos mostram a variabilidade sedimentar da praia do Alfeite, tanto a nível espacio-temporal como na sua composição. Enquanto as areias do raso de maré são areias médias a finas, as da face de praia são areias grosseiras a muito grosseiras. Estas areias são essencialmente de origem quartzosa mas também de origem antropogénica, principalmente nas frações mais grosseiras.

3. Metodologia

A subida do NMM será a consequência das alterações climáticas que terá maior impacto nas margens costeiras e estuarinas num horizonte temporal mais alargado. Apesar da incerteza existente sobre o valor das previsões da subida do NMM disponíveis na literatura, os estudos mais recentes são consentâneos e apontam para um aumento da taxa da subida na última década. Com base na revisão bibliográfica sobre o tema, vários cenários de subida do NMM foram definidos para os horizontes temporais de 2050 e 2100 para este projeto (Tabela 1).

Tabela 1 - Cenários a adotar de subida do NMM relativamente a 1990 (em cm) no âmbito do projeto MorFeed.

Horizonte temporal	2050	2100
IPCC (2007) – B1	20	40
IPCC (2007) – A1F1		60
Limite máximo	50	100 – 150

Num horizonte temporal mais curto os eventos de tempestades estão muitas vezes associados à ocorrência de situações de inundações marginais de origem marítima ou fluvial. Este tipo de eventos, apesar de serem de curta duração, constitui uma preocupação crescente devido aos estragos que podem causar. De forma a obter valores de níveis máximos no estuário em situações extremas para vários períodos de retorno (10, 50 e 100 anos) seguiu-se a abordagem desenvolvida por Fortunato *et al.* (2012a, b). Foram geradas séries temporais que incluem estes eventos e posteriormente utilizadas para forçar o modelo hidrodinâmico do estuário e determinar mapas de inundação (Guerreiro *et al.*, 2012). Para cada cenário e período de retorno, foram realizadas simulações com o modelo de circulação baroclínico tri-dimensional SELFE – *Semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element* (Zhang & Baptista, 2008), em que se obtiveram os níveis máximo que se encontram na Tabela 2.

No estuário do Tejo a agitação oceânica não penetra significativamente no estuário. No entanto, as ondas geradas localmente podem ter alturas significativas de vários decímetros devido à extensão do *fetch* do estuário (Freire e Andrade, 1999). A segunda componente dos efeitos das alterações climáticas a ser analisada neste trabalho foi as alterações no regime de agitação. Para tal foi necessário analisar a alteração no regime de ventos locais.

Tabela 2 – Valores do nível de superfície livre para os vários cenários de subida do NMM obtidos através do modelo hidrodinâmico (Guerreiro *et al.*, 2012).

Cenários de NMM	Período de Retorno (anos)	Valores máximos obtidos (m)		
		Fora do Estuário	Dentro do Estuário (Alfeite)	Diferença (dentro – fora)
2.21	10	4.34	4.70	0.36
	50	4.52	4.89	0.37
	100	4.59	4.96	0.37
2.41	10	4.54	4.91	0.37
	50	4.72	5.10	0.38
	100	4.79	5.17	0.38
2.61	10	4.74	5.12	0.38
	50	4.92	5.30	0.38
	100	4.99	5.38	0.39
2.71	10	4.84	5.22	0.38
	50	5.02	5.41	0.39
	100	5.09	5.48	0.39
2.81	10	4.94	5.33	0.39
	50	5.12	5.52	0.40
	100	5.19	5.59	0.40
3.21	10	5.34	5.76	0.42
	50	5.52	5.95	0.43
	100	5.59	6.02	0.43
3.71	10	5.84	6.28	0.44
	50	6.02	6.47	0.45
	100	6.09	6.54	0.45

Foi realizada uma comparação entre as estatísticas de vento no fim do século 20 (1970-2000) e as previsões para o fim do século 21 (2070-2100), que revelou diferenças modestas na zona em frente ao estuário do Tejo (Figura 3). No entanto, esta análise foi efetuada com resultados de um modelo climático global. Atualmente, os modelos climáticos globais e regionais ainda não conseguem reproduzir completamente as tendências históricas e as tentativas de *downscaling* (redução de escala), através de métodos de natureza dinâmica ou empírica. Os modelos apresentam uma variabilidade entre eles superiores ao sinal associado às alterações climáticas (Pyor and Barthelmie, 2010). Ainda assim, de acordo com os mesmos autores, atendendo aos resultados da investigação realizada até à data parece pouco provável que, durante o século 21, na Europa, a velocidade do vento e a densidade de energia se alterem mais do que a presente variabilidade interanual (i.e. $\pm 15\%$). Assim, considerou-se o regime de ventos invariante.

Assim sendo, de forma a caracterizar os efeitos dos eventos de agitação mais significativos no estuário do Tejo, utilizaram-se os dados da tempestade de 29-janeiro-2006 (os dados correspondente à maior tempestade que se conhece no local). Apesar de eventos climáticos deste tipo serem muito energéticos para uma zona de *fetch* restrito, são pouco frequentes (Valente, 2006).

Como já mencionado anteriormente, nas últimas duas décadas foram realizados vários estudos de monitorização da praia do Alfeite, que incluíram levantamentos topo-hidrográficos e recolha de amostras de sedimento. Para este estudo escolheu-se um perfil representativo da praia do Alfeite, monitorizado à data 21-julho-2005 (Figura 4). A escolha da data do perfil justifica-se por ser final da época e verão e, por isso, haver maior garantia do perfil ser representativo do perfil de equilíbrio (perfil médio, cuja geometria prevalece,

independentemente de alterações devidas a eventos extremos de curto prazo e a alterações sazonais) da zona de estudo. No entanto, é sabido que o perfil de praia recupera rapidamente esta geometria após as alterações morfológicas que lhe são conhecidas devido a eventos extremos e que não foram verificadas até à data variações morfológicas sazonais da praia.

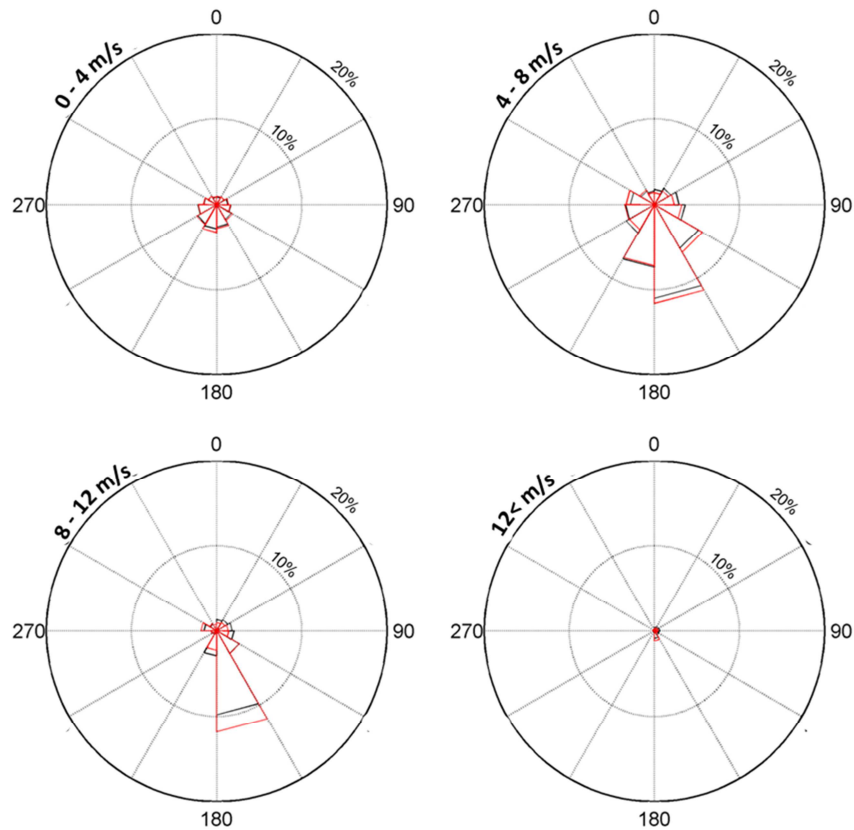


Figura 3 – Estatísticas da variação do regime de ventos no fim dos séculos 20 (1970-2000) (a preto) e 21 (2070-2100) (a vermelho).

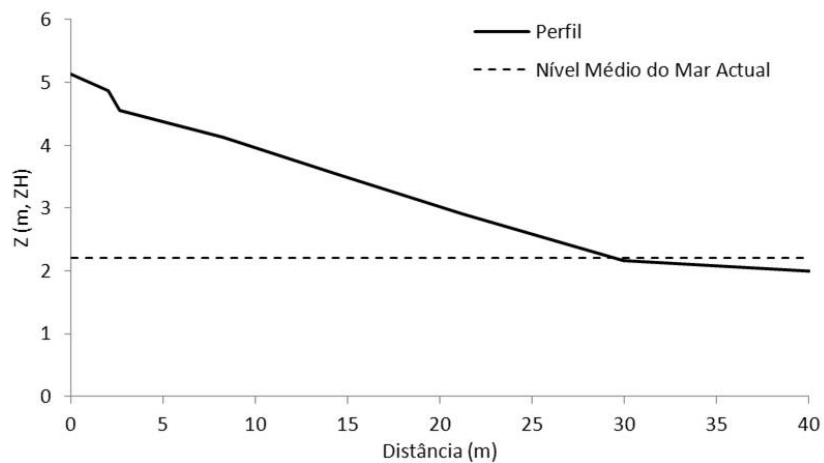


Figura 4 – Perfil de referência utilizado para o modelo analítico. A linha a tracejado representa o NMM atual (2.21 m acima do Zero Hidrográfico).

Posteriormente a estas análises, realizadas para definir as condições de teste da vulnerabilidade/resiliência da praia do Alfeite às alterações climáticas previstas para os horizontes temporais definidos no âmbito do estudo, 2050 e 2100, foi então desenvolvido e aplicado o modelo analítico Duneforce baseado na formulação de Larson *et al.* (2004).

3.1 Modelo analítico de Larson *et al.* (2004)

Os modelos analíticos são aproximações simplificadas e de fácil aplicação, que se tornam uma ferramenta útil, para uma primeira abordagem no início de um projeto, de forma a obter estimativas. Por vezes, devido a falta de dados, ou incerteza sobre os mesmos, acabam por ser ferramentas de verificação de modelos determinísticos, mais complexos, que consideram mais aprofundadamente os processos físicos costeiros envolvidos. Larson *et al.* (2004) desenvolveu um modelo analítico que calcula o volume erodido e a distância de recuo de dunas durante eventos de tempestade. Este modelo analítico baseia-se na teoria do impacto de onda, i.e., relaciona a taxa de variação de momento de uma partícula de fluido, ou seja, a força da partícula resultante da ação da onda, com a variação do peso do volume de areia erodido da duna. O modelo considera o efeito do somatório da erosão induzida por ondas individuais que alcançam a face da duna primária.

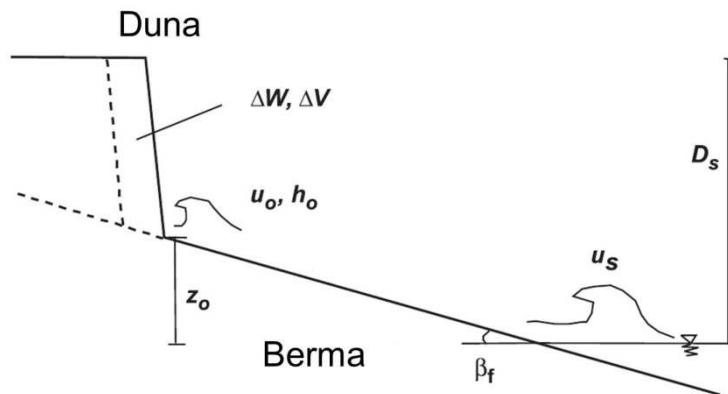


Figura 5 – Esquema conceptual da modelação de erosão de dunas devido ao impacto de ondas (*runup*). Adaptado de Larson *et al.* (2004).

A equação governante da qual o modelo analítico deriva é a seguinte:

$$\Delta W = C_E F \quad (1)$$

onde F é a força induzida pela onda devido à variação do momento em ordem ao tempo (taxa do momento) da onda com impacto na duna e ΔW o peso do volume de sedimento erodido da duna. Desta equação resulta a equação que resolve a taxa de erosão da duna, q_D , ou seja, a variação do volume, dV , durante a tempestade dt :

$$q_D = \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{C_E \rho}{C_u^2 \rho_s} \frac{u_0^4}{g^2 T (1-p)} \quad (2)$$

onde C_u é um coeficiente empírico, ρ e ρ_s são a densidade da água e do sedimento respetivamente, u_0 é a velocidade da frente da onda, g a aceleração da gravidade, T o período com que a onda alcança a duna e p a porosidade do sedimento. O modelo analítico de Larson *et al.* (2004) resulta da introdução de algumas simplificações assumidas como hipótese. Os procedimentos destas simplificações não serão aqui abordados, apenas serão abordados os resultados destas simplificações. Assim sendo, o volume inicial V_0 é determinado por:

$$V_0 = \frac{1}{2} \frac{(D_s - z_o)^2}{\tan \beta_f} \quad (3)$$

onde z_o é a diferença de cota no plano vertical (altura), entre a base da duna e o início da zona de espraiamento (*swash*); D_s é a altura entre o topo da duna e o nível de referência do parâmetro z_o ; e β_f é a inclinação da berma da praia, considerada constante durante o recuo da duna, conforme observado em testes laboratoriais de grande escala (Larson *et al.*, 2004).

O tempo total necessário para erodir toda a duna, t_B , para o caso de as condições de agitação e o nível de água serem constantes, é dado por:

$$t_B = \frac{T}{4C_s} \frac{V_0}{(R-z_0)^2} \quad (4)$$

onde R é o valor da sobrelevação (*runup*) devido à combinação dos processos de espraio (*swash*) e de sobrelevação do nível da água devida à rebentação (*setup*). Para calcular o valor de R Larson *et al.* (2004) sugerem uma nova formulação empírica:

$$R = 0.158 \sqrt{H_0 L_0} \quad (5)$$

onde H_0 é a altura significativa das ondas e L_0 é o comprimento de onda ao largo que é dado por:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (6)$$

O C_s é um coeficiente empírico que é calculado através da seguinte equação:

$$C_s = A e^{-b \frac{H_{rms,0}}{D_{50}}} \quad (7)$$

onde $A = 1.34 \times 10^{-3}$ e $b = 3.19 \times 10^{-4}$. Os valores de C_s , A e b são coeficientes empíricos derivados com base nos quatro casos de estudo para quais Larson *et al.* (2004) testaram o modelo analítico. O valor da altura média quadrática da onda ao largo, $H_{rms,0}$, é dado por $H_0 = 1.416 \times H_{rms,0}$ (Goda, 1985).

Para as condições constantes do nível de água (z_0) e de agitação (R), o volume erodido é dado por:

$$\Delta V_E = 4C_s (R - z_0)^2 \frac{t}{T} \quad (8)$$

Onde t é o tempo total da simulação. Para as condições em que a agitação é constante mas há variação do nível de água, o volume erodido da duna é dado pela equação:

$$\Delta V_E = 4 \frac{C_s}{T} \left((R - z_i)^2 t + a(R - z_i)t^2 + \frac{1}{3} a^2 t^3 \right) \quad (9)$$

onde a variação do nível de água é descrita como: $z_0 = z_i - at$, em que z_i é a distância vertical do início da rebentação até à base da duna para o instante $t = 0$ e a é a taxa de subida do nível da água.

Para o caso de ocorrência de tempestades em que há variação das condições de agitação e do nível de água, o volume erodido durante uma tempestade é dado pela seguinte equação:

$$\Delta V_E = 8 \frac{C_s}{T} \left(\left(\frac{T_S}{2} - t_L \right) \left(\frac{1}{2} R_T^2 + Z_D^2 \right) + R_T^2 \frac{T_S}{4\pi} \sin \left(2 \frac{\pi t_L}{T_S} \right) - 2R_T Z_D \frac{T_S}{\pi} \cos \left(\frac{\pi t_L}{T_S} \right) \right) \quad (10)$$

em que a variação do nível da água e da agitação são descritas por:

$$R_T = R_a + z_a \quad (11)$$

$$z_D = z_i + R_i \quad (12)$$

onde z_a e R_a são a amplitude da variação do nível de água e do *runup*, respetivamente, e z_i e R_i são os valores iniciais, quando $t = 0$. O tempo em que as ondas chegam à duna, t_L é determinado por:

$$t_L = \frac{T_S}{\pi} \arcsin \left(\frac{z_D}{R_T} \right) \quad (13)$$

3.2 Aplicação do modelo

Aplicou-se o modelo Duneforce, baseado na formulação de Larson *et al.* (2004), ao caso de estudo com base nas seguintes fases:

- 1) Validação do modelo para a praia do Alfeite com os dados da tempestade de 29-janeiro-2006 registados e comparação com os resultados de modelos utilizados anteriormente para o mesmo evento;
- 2) Realização de testes de sensibilidade do modelo para o caso da praia do Alfeite;

Foram utilizados os dados do perfil transversal da praia do Alfeite representado na Figura 6 para calcular os parâmetros necessários para o modelo: o declive da berma de praia (β_f), a elevação desde o nível de água até ao topo da duna (D_s), a elevação desde o nível de água até à base da duna (z_0), o volume inicial da duna (V_0) e da análise granulométrica o valor do diâmetro médio dos sedimentos (D_{50}).

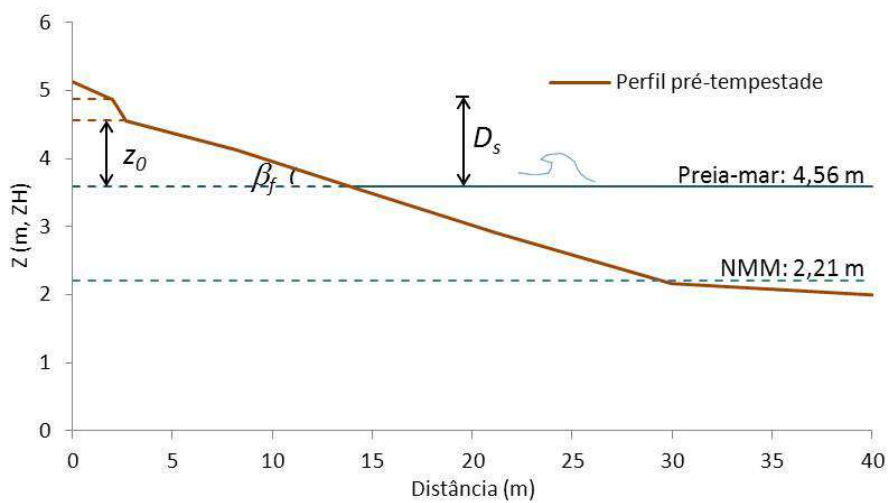


Figura 6 – Esquema do perfil inicial usado para os testes com o modelo analítico.

Na primeira fase da aplicação do modelo foram utilizados as condições hidrodinâmicas correspondentes à tempestade que ocorreu no dia 29-janeiro-2006 (Figura 7). Os valores de agitação foram obtidos através da aplicação do modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999), para o qual foram utilizados os registos de ventos e os valores de previsão de maré para aquele dia (Vargas *et al.*, 2008).

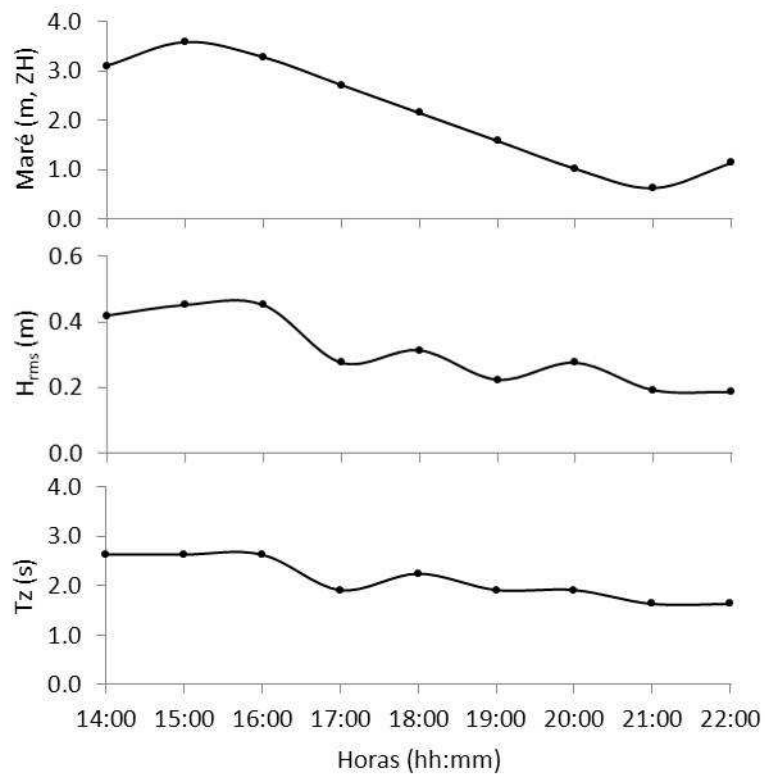


Figura 7 – Condições hidrodinâmicas da tempestade de 29-janeiro-2006.

Na segunda fase da aplicação do modelo foram realizados os testes de sensibilidade variando os parâmetros hidrodinâmicos do modelo, ou seja: a altura significativa (H_s : 0.05 – 0.65m), o período de pico (T_p : 1 – 4s) e a distância, no plano vertical, do nível de água à base da duna (Z_0 : 0.1 – 0.5m).

4. Resultados e discussão

Para que a aplicação do modelo Duneforce seja válida, os valores de Z_0 e R têm de satisfazer a condição de $0 < Z_0 / R < 1$, equivalente a $0 < Z_0 < R$, ou seja, têm de ser verificadas três condições:

1. Z_0 tem de ser superior a zero, o que significa que o nível do mar, em cada instante, tem de estar abaixo da base da duna;
2. R não pode ser zero (nem infinito), o que significa que tem de existir sobrelevação (*runup*);
3. Z_0 tem de ser inferior a R , ou seja, a distância, no plano vertical, da base da duna ao nível do mar, em cada instante, tem de ser inferior à sobrelevação (*runup*) causada pela onda que atua nesse mesmo instante.

Os resultados da aplicação do modelo às três primeiras horas de duração da tempestade de 29-janeiro-2013, quando o nível do mar se encontra mais elevado devido ao facto corresponder a condições de preia-mar (conforme Figura 7), mostram-se na Tabela 3. Os parâmetros e respetivos valores a sombreado são constantes no tempo.

Tabela 3 – Parâmetros do modelo para as três primeiras horas da tempestade de 29-janeiro -2006.

Abreviatura do parâmetro ¹	Hora (hh:mm)	14:00	15:00	16:00
a)	Nível do mar ² (m, ZH)	3.11	3.59	3.28
b)	Topo da duna (m, ZH)	4.88	4.88	4.88
c)	Base da duna (m, ZH)	4.56	4.56	4.56
b) - c)	Duna	0.315	0.315	0.315
d) = c) - a)	Zo	1.45	0.97	1.28
e) = b) - d)	Ds	1.77	1.29	1.60
	Bf	0.09	0.09	0.09
	A	1.34E-03	1.34E-03	1.34E-03
	b	3.19E-04	3.19E-04	3.19E-04
	g	9.80665	9.80665	9.80665
	D ₅₀ (m)	0.0005	0.0005	0.0005
	H _{rms}	0.42	0.45	0.45
	Tz	2.63	2.63	2.63
	Lo	10.81	10.81	10.81
	Cs	1.11E-03	1.09E-03	1.09E-03
	R	0.34	0.35	0.35
	Ds/R	5.24	3.68	4.57
	Zo/R	4.31	2.78	3.66

Conforme se comprova com base nos resultados da Tabela 3, as condições da praia transgridem as condições de aplicação do modelo uma vez que Z_0 / R nunca é inferior ao valor 1, o que significa que o *runup* causado pelas alturas de onda mais elevadas, que ocorrem simultaneamente em condição de nível do mar (devido à maré) mais elevado, não atingem a base da duna.

Como tal, e como normalmente se regista em eventos de tempestade, devido ao efeito de baixas pressões atmosféricas e vento forte, deverá ter ocorrido uma sobrelevação do nível do mar. Para que a condição de aplicação do modelo seja válida para o pico da maré, é necessário que ocorra uma sobrelevação superior a 0.62 m, sendo este valor a diferença entre a base da duna e o valor da soma da sobrelevação (*runup*) com o nível de maré ($Z_0/R < 1$) para as 15h.

¹ Abreviatura usada na Tabela 3 para explicação da relação entre parâmetros

² Considerada apenas a maré astronómica e não a sobrelevação de origem meteorológica

Só nestas condições a onda tem impacte na duna, ou seja, é verificada a condição 3 descrita no primeiro parágrafo desta secção, das condições de aplicação do modelo.

O valor real de sobrelevação para este dia não foi possível de obter, porque não existem registos do nível que se encontrava junto à praia do Alfeite nem registos do marégrafo de Cascais (desativado para obras de manutenção e troca por um equipamento mais moderno).

Se se assumir uma sobrelevação do estuário do Tejo de 0.65 m (que origina um nível do mar igual a 4.24 m ZH), o volume erodido para as condições de agitação de agitação das 15h seria de $0.005 \text{ m}^3/\text{m}$, para o tempo total de 1 hora (equivalente ao impacte de 1369 ondas). Os resultados da primeira fase demonstram que o volume erodido é muito inferior ao obtido anteriormente com o modelo Litprof (Vargas *et al.*, 2008), que aponta para um valor de erosão da ordem de $9 \text{ m}^3/\text{m}$ ao final de atuação das 8 horas de tempestade. A explicação para esta diferença é o facto do modelo Litdrift, baseado nos processos físicos de transformação da onda refração, empolamento, rebentação e dispersão direcional, e nos processos de transporte sedimentar (em ambos os modos, suspensão e arrastamento) assimetria vertical, fluxo Lagrangiano, corrente de circulação junto à camada limite (*streaming*), corrente de retorno (*undertow*) e deslocação de massa à superfície gerada pela rebentação (*surface roller*), apesar de não considerar o processo de espraçamento, causar uma taxa de momento proporcional à força que atua nas partículas de sedimento que constituem a duna superior à força estimada com o modelo analítico de Larson aplicado à praia do Alfeite.

De seguida foram realizados testes de sensibilidade do modelo com os dados característicos da praia do Alfeite, onde se variou os valores de H_{rms} (0.05 – 0.65 m), de T_z (1 – 4 s) e de Z_0 (0.1 – 0.5 m). Estes valores baseiam nos dados adquiridos nas várias campanhas do BERNA. Nas seguintes figuras apresentam-se os resultados obtidos para o parâmetro sobrelevação (*runup*) em função da altura de onda média quadrática e do período médio da onda incidente (Figura 8); e as condições de aplicação do modelo relativas ao parâmetro Z_0 (diferença, no plano vertical, entre a base da duna e o nível do mar) em função da altura de onda média quadrática e do período médio da onda incidente, com base na não transgressão da condição $0 < Z_0 < R$ (Figura 9):

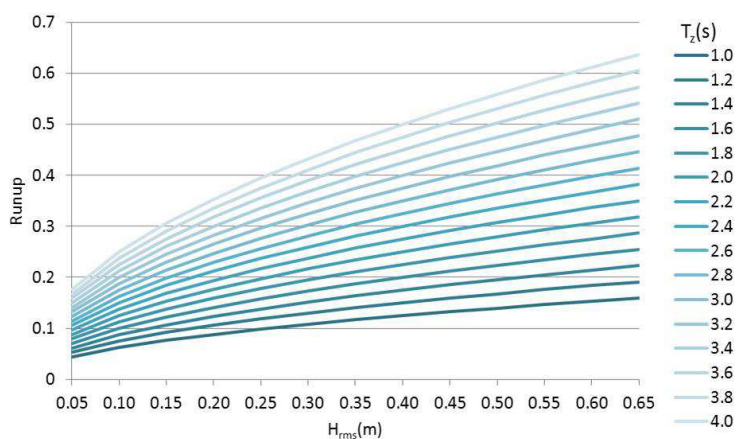


Figura 8 – Runup para os diferentes valores de H_{rms} e T_z .

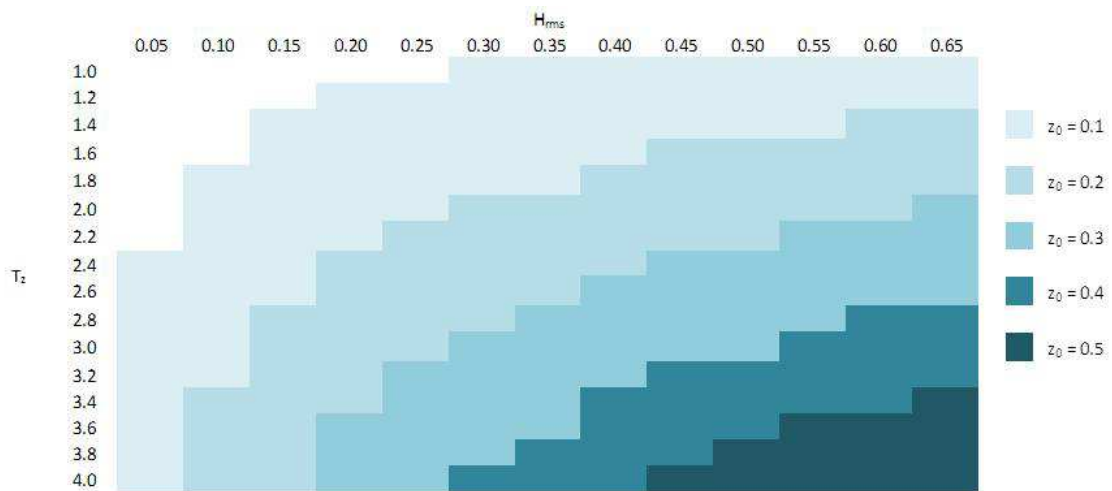


Figura 9 – Verificação da condição $0 < Z_0 / R < 1$ necessária para a aplicação da formulação de Larson *et al.* (2004) para a praia do Alfeite. Cada cor representa um valor de Z_0 no qual as condições de aplicação do modelo são válidas.

Destes resultados observa-se que para ondas de baixa energia, as quais geram valores de *runup* baixos, é necessário existir uma sobrelevação muito elevada para que as ondas atinjam a base da duna, pois nestes casos o valor de Z_0 terá sempre que ser inferior ao *runup* para se iniciar o processo de erosão da duna. Sendo que os efeitos de sobrelevação estão associados a eventos de baixas pressões/tempestades, pode-se dizer que para as condições atuais de nível médio do mar as ondas de baixa energia não terão impacto na erosão das dunas, porque o *runup* não é suficiente para atingir a base da duna.

Com base nestes valores de Z_0 e R validos para a condição $0 < Z_0 / R < 1$, calculou-se o tempo necessário para erodir totalmente a duna, T_b , (Figura 10) e o volume erodido em função da altura de onda média quadrática e do período médio da onda incidente ao fim de 1 hora de incidência de ondas com essas mesmas características (Figura 11). Salienta-se que o volume total de erosão da duna para as condições geomorfológicas da praia do Alfeite, segundo a aplicação do modelo é $1.86 \text{ m}^3/\text{m}$.

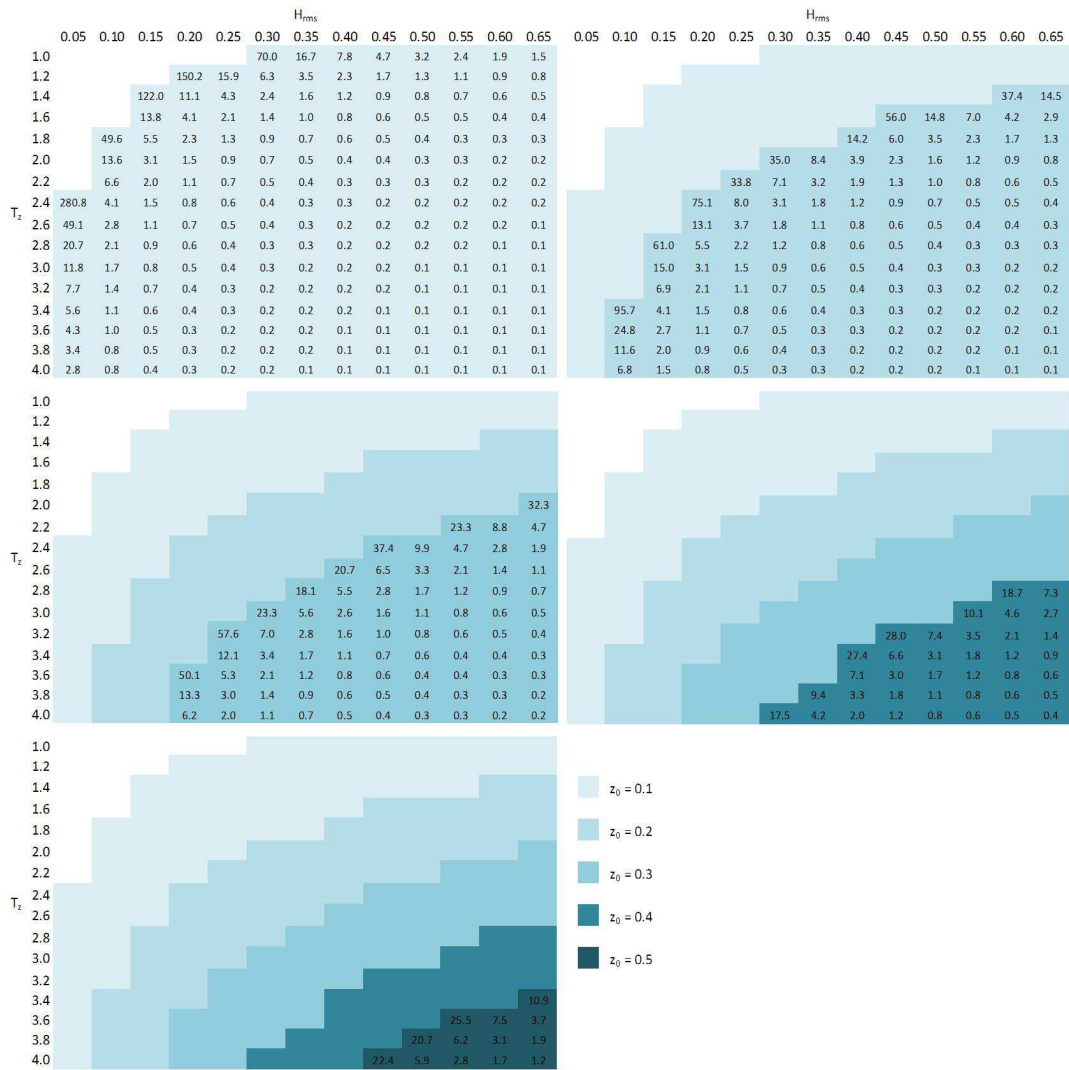


Figura 10 – Tempo necessário para erodir toda a duna, T_B (dias), com base na aplicação do modelo.

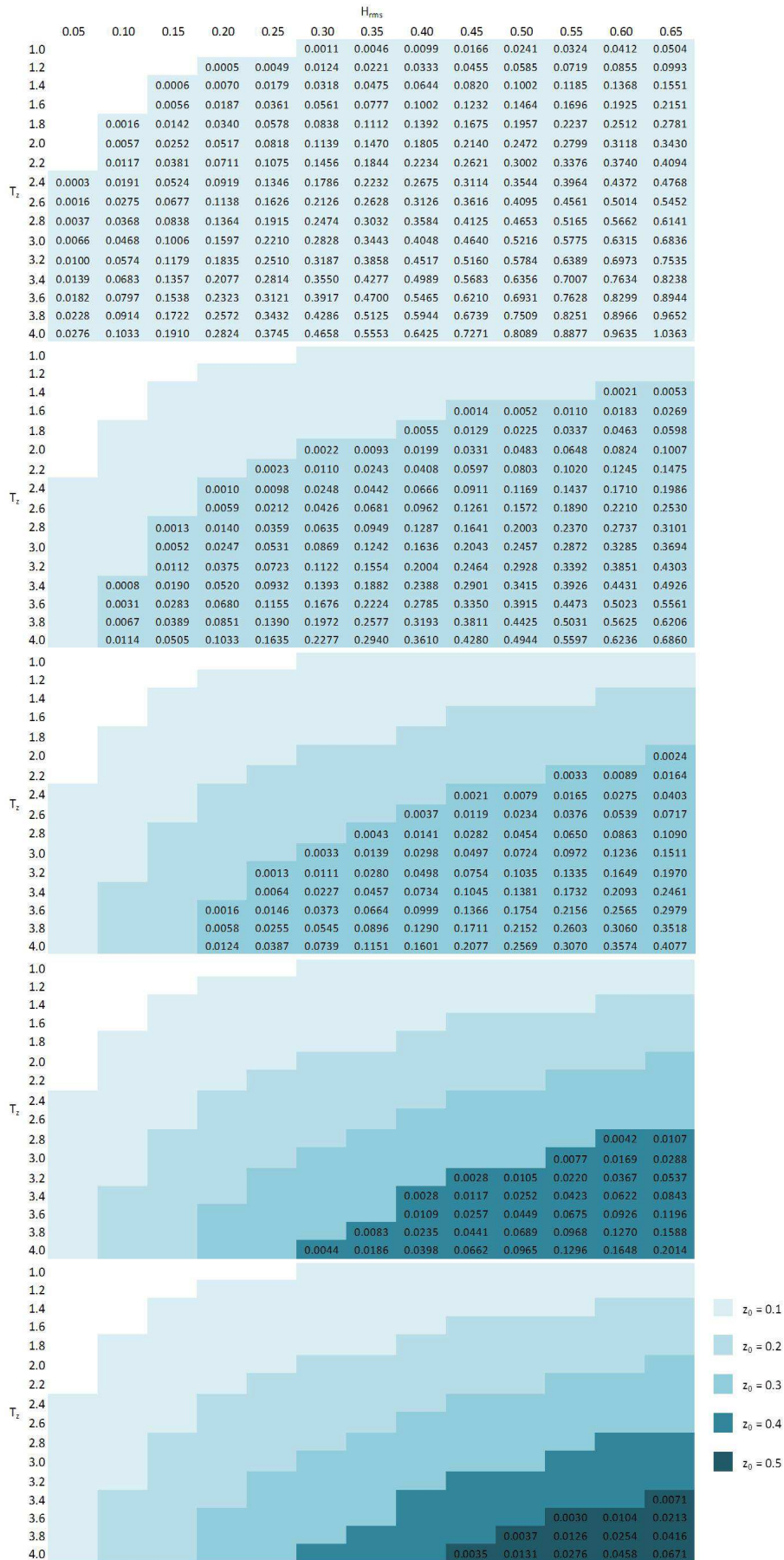


Figura 11 – Volume erodido ao fim de 1 hora (m^3/m) com base na aplicação do modelo.

Tabela 4 – Valores do nível de superfície livre para os vários cenários de subida do NMM obtidos através do modelo hidrodinâmico (Guerreiro *et al.*, 2012).

Cenários de NMM	Período de Retorno (anos)	Valores máximos de nível do mar (m)		Diferença entre níveis (m)	
		Fora do Estuário (a)	Dentro do Estuário (Alfeite) (b)	(b) – (a)	(b) – nível da base da duna ³
2.21	10	4.34	4.70	0.36	0.14
	50	4.52	4.89	0.37	0.33
	100	4.59	4.96	0.37	0.40
2.41	10	4.54	4.91	0.37	0.35
	50	4.72	5.10	0.38	0.54
	100	4.79	5.17	0.38	0.61
2.61	10	4.74	5.12	0.38	0.56
	50	4.92	5.30	0.38	0.74
	100	4.99	5.38	0.39	0.82
2.71	10	4.84	5.22	0.38	0.66
	50	5.02	5.41	0.39	0.85
	100	5.09	5.48	0.39	0.92
2.81	10	4.94	5.33	0.39	0.77
	50	5.12	5.52	0.40	0.96
	100	5.19	5.59	0.40	1.03
3.21	10	5.34	5.76	0.42	1.20
	50	5.52	5.95	0.43	1.39
	100	5.59	6.02	0.43	1.46
3.71	10	5.84	6.28	0.44	1.72
	50	6.02	6.47	0.45	1.91
	100	6.09	6.54	0.45	1.98

³ Conforme **Tabela 3** a base da duna está ao nível 4.56 m ZH.

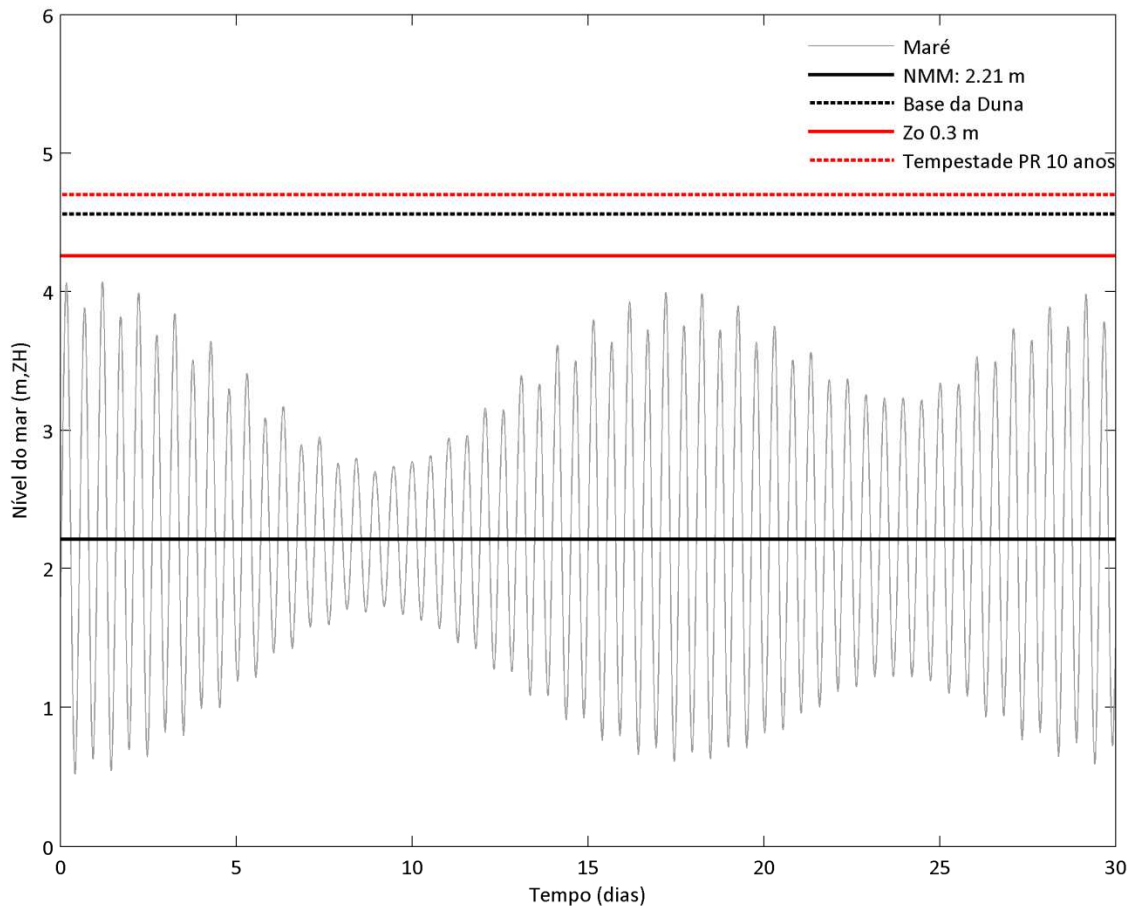


Figura 13 – Desenho esquemático da situação atual. Nesta figura podemos ver o ciclo de maré para um mês (síntese harmônica de 12 constituintes de maré) e as linhas a vermelho indicam possíveis níveis máximos. A linha a preto representa a base da duna.

5. Conclusões

Os testes efetuados com o modelo Duneforce, desenvolvido no âmbito deste estudo, baseado na formulação de Larson *et al.* (2004), demonstram que os volumes erodidos na praia do Alfeite para um período de tempestade são inferiores aos esperados e obtidos com o modelo Litprof num trabalho anterior (Vargas *et al.*, 2008). O modelo Litprof é um modelo morfodinâmico quasi-3D baseado nos processos físicos, que oferece maior precisão nos resultados desde que sejam conhecidos todos os parâmetros necessários à sua aplicação. A formulação de Larson *et al.* (2004), tal como o autor menciona, devido à sua simplicidade, é satisfatória como primeira abordagem para o cálculo de estimativas para um novo estudo. Contudo, o exercício de aplicação de modelos matemáticos para estimativa de erosão de sistemas praia-duna demonstra que nem sempre os modelos mais complexos, baseados nos processos físicos, são os mais eficazes. A prova disso é que atualmente continuam a desenvolver-se modelos empíricos com vista a ultrapassar as dificuldades associadas à aplicação de modelos numéricos bastante mais complexos, que, muitas vezes, pela necessidade de conhecimento de uma grande quantidade de parâmetros, na maioria das vezes não medidos *in situ* pelos utilizadores, os tornam de difícil aplicação ou fazem com que os modelos sejam aplicados com grande incerteza e erro.

Neste trabalho, o modelo Duneforce, baseado no modelo analítico de Larson *et al.* (2004) foi aplicado para a praia do Alfeite. Desta aplicação verificou-se que considerando o atual nível médio do mar e um regime de agitação característico do estuário do Tejo, para as ondas atingirem a base da duna do perfil representativo da praia do Alfeite é necessário que ocorra uma sobrelevação de origem meteorológica muito elevada associada a ventos fortes de NE.

A aplicação do modelo Duneforce neste caso de estudo é válida apenas em condições em que a energia das ondas é suficiente para causar um *runup* que atinja a base da duna. As ondas mais frequentes registadas durante as campanhas do BERNA têm uma altura significativa que varia entre 0.1 e 0.3 m. Para que estas atinjam a base da duna terão que ocorrer em condições de preia-mar e com uma sobrelevação de origem meteorológica elevada.

Com base em testes realizados para condições de sobrelevação meteorológica bastante elevada a ocorrer simultaneamente com as condições de tempestade marítima verificada em 29-janeiro-2006, o modelo Duneforce reproduz erosão da duna. No entanto, verificou-se que os resultados obtidos aparentam estar subestimados com base na comparação com resultados obtidos através do modelo Litprof para as mesmas condições.

Para as condições de hidrodinâmica para os horizontes temporais de 2050 e 2100 o nível do mar dentro do estuário em frente à praia do Alfeite já se encontrará acima do topo da duna, ou seja, a restinga do Alfeite já terá sido completamente inundada.

6. Referências

- Booij, N., Ris, R.C., & Holthuijsen, L.H., 1999. "A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation." *Journal of Geophysical Research*, C4, 104, 7649-7666.
- Freire, P. & Andrade, C., 1999. Wind-induced sand transport in Tagus estuarine beaches. First results. *Aquatic Ecology*, 33(3): 225–233.
- Freire, P., 2003. Evolução Morfo-Sedimentar de Margens Estuarinas. Estuário do Tejo, Portugal. Tese de Doutoramento apresentada à Universidade de Lisboa, LNEC, TPI 28, 380 pp.
- Freire, P., Oliveira, F.S.B.F., Valente, C., Vargas, C., Fortes, C., Capitão, R., Santos, J.A., Coli, A., Taborda, R., Silva, A.M., Ferreira, Ó, Carrasco, A.R., Matias, A.M., Garcia, T. & Pacheco, A., 2008. BERNAL: Evolução de Praias em Zonas de Fetch Restrito: Análise Experimental e Numérica, Relatório Final. Relatório de Execução Material, Lisboa, Julho 2008, 115 pp.
- Fortunato, A.B., Rodrigues, M., Dias, J.M. & Oliveira, A., 2012. Modelação da inundação costeira na Ria de Aveiro. 11º Congresso da Água, 15p., CD-ROM.
- Fortunato, A.B., Rodrigues, M., Dias, J.M., Lopes, C. & Oliveira, A., 2012. Generating inundation maps for a coastal lagoon: a case study in the Ria de Aveiro (Portugal). *Ocean Engineering*.
- Goda, Y., 1985. Random Seas and Design of Maritime Structures. University of Tokyo Press, 323 pp.
- Guerreiro, M., Fortunato, A.B., Freire, P., Rilo, A., Taborda, R., Freitas, M.C., Andrade, C. & Silva, T., 2012. Consequências da subida do nível médio do mar na hidrodinâmica do estuário do Tejo. Actas das 2ª Jornadas de Engenharia Hidrográfica, 341-344, Instituto Hidrográfico, ISBN – 978-989-705-035-0.
- Guerreiro, M., Oliveira, F.S.B.F., Freire, P. & Rilo, A., 2013. Evolução recente da praia do Alfeite do estuário do Tejo. Relatório Técnico do projecto Morfeed (Morphodynamic feedback of estuarine margins to climate change), LNEC, Lisboa, 16 pp.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Larson, M., Erikson, L. & Hanson, H., 2004. An analytical model to predict dune erosion due to wave impact. *Coastal Engineering*, 51, 675-696.
- Pryor, S.C. & Barthelmie, R.J., 2010. Climate change impacts on wind energy: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 430-437.
- Silva, A., Remédio, A., Mendes, T., Taborda, R. & Freire, P., 2005a. Campanha BERNAL I - 12/04/2005. Relatório do projeto BERNAL: Beach Evolution in Áreas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Abril de 2005, 18 pp, 2005.
- Silva, A., Carrasco, A.R., Remédio, A., Mendes, T., Taborda, R. & Freire, P., 2005b. Campanha BERNAL II - 21/07/2005. Relatório do projeto BERNAL: Beach Evolution in Áreas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Julho de 2005, 29 pp, 2005.
- Silva, A. & Valente, C., 2005c. Campanha BERNAL III - 07/11/2005. Relatório do projeto BERNAL: Beach Evolution in Areas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Novembro de 2005, 11 pp, 2005.
- Silva, A., Taborda, R., Freire, P. & Valente, C., 2005d. Campanha BERNAL IV - 17/11/2005. Relatório do projeto BERNAL: Beach Evolution in Áreas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Novembro de 2005, 14 pp, 2005.

- Silva, A., Taborda, R. & Freire, P., 2006a. Campanha BERNA V - 29/01/2006. Relatório do projeto BERNA: Beach Evolution in Áreas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Fevereiro de 2006, 15 pp, 2006.
- Silva, A., Freire, P. & Valente, C., 2006b. Campanha BERNA VI – 01/02/2006. Relatório do projeto BERNA: Beach Evolution in Áreas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Fevereiro de 2006, 11 pp, 2006.
- Silva, A., Taborda, R., Freire, P. & Valente, C., 2006c. Campanha BERNA VII – 15/05/2006. Relatório do projeto BERNA: Beach Evolution in Áreas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Junho de 2006, 14 pp, 2006.
- Silva, A., Taborda, R. & Freire, P., 2006d. Campanha BERNA VIII – 06/09/2006. Relatório do projeto BERNA: Beach Evolution in Areas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Setembro de 2006, 11 pp, 2006.
- Silva, A. & Taborda, R., 2006e. Campanha BERNA X – 09/10/2006. Relatório do projeto BERNA: Beach Evolution in Areas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Outubro de 2006, 12 pp.
- Silva, A., Taborda, R., Freire, P. & Vargas, C., 2006f. Campanha BERNA XI – 07/11/2006. Relatório do projeto BERNA: Beach Evolution in Areas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Dezembro de 2006, 14 pp.
- Silva, A., Taborda, R. & Freire, P., 2007a. Campanha BERNA XIII - 12/01/2007. Relatório do projeto BERNA: Beach Evolution in Areas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Janeiro de 2007, 12 pp.
- Silva, A. & Taborda, R., 2007b. Campanha BERNA XIV - 21/03/2007. Relatório do projeto BERNA: Beach Evolution in Areas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Novembro de 2007, 15 pp.
- Silva, A., Taborda, R. & Freire, P. 2007c. Campanha BERNA XV - 29/03/2007. Relatório do projeto BERNA: Beach Evolution in Areas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Novembro de 2007, 13 pp.
- Silva, A., Taborda, R., Freire, P. & Catalão, J. 2007d. Campanha BERNA XVI - 01/06/2007. Relatório do projeto BERNA: Beach Evolution in Areas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Novembro de 2007, 15 pp.
- Rilo, A., Guerreiro, M. & Oliveira, F.S.B.F., 2012. Campanha MORFEED X – 18/09/2012. Relatório técnico do projeto MORFEED: Morphodynamic feedback of estuarine margins to climate change. LNEC, Lisboa, Setembro, 2012, 8 pp.
- Taborda, R. & Freire, P., 2007a. Campanha BERNA XVII- 09/07/2007. Relatório do projeto BERNA: Beach Evolution in Areas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Julho de 2007, 9 pp.
- Taborda, R., Silva, A. & Freire, P., 2007b. Campanha BERNA XVIII - 11/07/2007. Relatório do projeto BERNA: Beach Evolution in Areas of Restricted Fetch: Experimental and Numerical Analysis. GEOFCUL, LNEC, Lisboa, Julho de 2007, 13 pp.
- Valente, C., 2006. “Evolução morfo-sedimentar de praias estuarinas”. Relatório de estágio do curso Pós-Graduado de Especialização em Geologia Aplicada, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Vargas, I.C.C., Oliveira, F.S.B.F. & Carvalho, F.L.M., 2008. Estudo da morfodinâmica de uma praia de baixa energia. Hidráulica e Recursos Hídricos, APRH, Vol. 29, No. 1, pp. 43-56.
- Zhang, Y. & Baptista, A.M., 2008. SELFE: A semi-implicit Eulerian-Lagrangian finite-element model for cross-scale ocean circulation. Ocean Modeling, 21 (3-4), 71-96.