



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

COSTA DA CAPARICA: APLICAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO XBEACH À AVALIAÇÃO DO RISCO COSTEIRO

Bruno, PIRES¹; Conceição J.E.M., FORTES²; Maria Teresa, REIS³, José Carlos, FERREIRA⁴, Pedro, POSEIRO⁵

¹ Eng. Ambiente, Universidade Nova de Lisboa - FCT NOVA, Campus da Caparica, 2828-516 Caparica, ba.pires@campus.fct.unl.pt

² Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, jfortes@lnec.pt

³ Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, treis@lnec.pt

⁴ Geógrafo, Universidade Nova de Lisboa – FCT NOVA & MARE - Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, jcrf@fct.unl.pt

⁵ Eng. Geógrafo, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, pposeiro@lnec.pt

Resumo

Nesta comunicação descreve uma aplicação do modelo numérico XBEACH no cálculo do espraiamento, galgamento e consequente inundação de sete praias da zona da Costa da Caparica, concelho de Almada, recorrendo à metodologia desenvolvida no âmbito do projeto de investigação HIDRALERTA.

Com base nos dados de 2007 a 2016 de agitação marítima ao largo, fornecidos pelo modelo de previsão da agitação marítima WAVEWATCH III, procede-se à transferência destes dados para locais em frente a cada uma das praias da Costa da Caparica, utilizando o modelo numérico SWAN, de modo a caracterizar o regime de agitação marítima nesses locais. De seguida, para o cálculo do espraiamento, galgamento e inundação, recorre-se ao modelo XBEACH, de previsão do efeito de tempestades marítimas na erosão e inundação de zonas costeiras. Os resultados numéricos obtidos para um conjunto de 4 tempestades e para as várias praias são comparados com valores calculados com base em fórmulas empíricas.

Os resultados numéricos e das fórmulas empíricas apresentam uma concordância razoável em termos do nível máximo de inundação para a zona norte da Praia de São João da Caparica, o mesmo não se verificando nas zonas também protegidas por estruturas de defesa costeira.

Palavras-chave: Costa da Caparica, Espraiamento, Galgamento, Inundação, XBEACH, Fórmulas empíricas.

Tema: Resiliência e gestão do risco



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

1. INTRODUÇÃO

A costa portuguesa é frequentemente destino de férias para os portugueses e para aqueles que visitam Portugal vindos do estrangeiro. Porém, também tem sido crescente a ocupação da orla costeira ao longo dos últimos anos, que com condições adversas do mar, potencia situações de perigo para pessoas e bens, com impactos diretos para a economia, sociedade e património natural. Merecem destaque as situações que envolvem o galgamento de estruturas costeiras pelas consequências associadas à destruição e à inundação das zonas que estas protegem.

A Costa da Caparica, no concelho de Almada, é um exemplo de uma zona costeira com frequentes ocorrências de galgamentos nas zonas de praia, com e sem estruturas de proteção aderente, com consequente inundação das zonas protegidas, causando importantes danos materiais e colocando em risco a população. Assim, a determinação do galgamento e consequente inundação nestas zonas é fundamental para a segurança das pessoas, bens e infraestruturas, bem como para garantir o bom desempenho e planeamento das atividades costeiras.

Este trabalho tem como objetivo calcular o espraçamento, galgamento e inundação em sete praias da Costa da Caparica, para um conjunto de tempestades, recorrendo a estimativas obtidas por fórmulas empíricas e pelo modelo numérico XBEACH (Roelvink et al., 2015), que é um modelo de previsão do efeito de tempestades marítimas na erosão e inundação de zonas costeiras. Este trabalho surge na sequência do trabalho de Martinho (2014), que utiliza apenas ferramentas empíricas para o cálculo do galgamento e da inundação, e do trabalho de Heleno (2016), que também já utiliza o modelo XBEACH, mas apenas aplicado à praia de S. João da Caparica.

A metodologia adotada no presente trabalho passa pela utilização de dados de agitação marítima ao largo, fornecidos pelo modelo de previsão da agitação marítima WAVEWATCH III (Tolman, 2009), entre 2007 e 2016, correspondente a 9 anos de dados. Esses valores são transferidos desde o largo para locais em frente a cada uma das praias da Costa da Caparica, utilizando o modelo SWAN (SWAN Team, 2007), de modo a caracterizar o regime de agitação marítima nesses locais.

De seguida, para aplicação do modelo XBEACH, selecionaram-se várias tempestades nos anos de 2007 a 2016, de modo a caracterizar situações extremas de galgamento ocorrido nessas praias. Nesta aplicação, utilizaram-se os perfis transversais das praias em estudo obtidos através de levantamentos LIDAR complementados com levantamentos DGPS realizados por Poseiro et al. (2016). Os resultados numéricos em termos de espraçamento, de galgamento e de inundação para as várias praias da Costa da Caparica são comparados com valores obtidos por fórmulas empíricas.

Depois desta introdução, na secção 2 indicam-se as principais características do modelo XBEACH. A secção 3 descreve a metodologia adotada neste trabalho. Na secção 4, apresenta-se o caso de estudo, as condições de aplicação, os resultados obtidos e a respetiva discussão. A secção 4 termina esta comunicação, com as principais conclusões do estudo.



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
NOVOS
DESAFIOS

2. O MODELO NUMÉRICO XBEACH

O modelo numérico XBEACH (Xtreme Beach behaviour), Roelvink et al. (2015), é um modelo bidimensional que simula vários processos costeiros, como a propagação de ondas infra gravíticas e grupos de ondas gravíticas, espraçamento, erosão e galgamento de dunas, avalanche, transporte sedimentar e evolução do fundo, Oliveira (2011, 2012, 2013). Foi desenvolvido pelo *United States Army Corps of Engineers*, o *Rijkswaterstaat* e a União Europeia, apoiada pela UNESCO-IHE, pela Deltares, pela *Delft University of Technology* e pela *University of Miami*. Encontra-se disponível à comunidade científica em <https://publicwiki.deltares.nl/display/XBEACH/Home>.

O objetivo do modelo XBEACH é modelar processos físicos costeiros nos quatro regimes de impacto de tempestade marítima, definidos por Sallenger (2000): regime de espraçamento, regime de colisão, regime de galgamento e regime de inundação, Oliveira (2011). O modelo resolve de forma acoplada as equações bidimensionais horizontais de propagação de ondas, de escoamento, de transporte de sedimentos e de atualização do fundo (da continuidade), para condições de fronteira de espectro de ondas e escoamento não estacionárias. É utilizada uma malha estruturada alternada (*staggered grid*), retilínea e 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.

O modelo inclui processos hidrodinâmicos de transformação de ondas curtas (empolamento, refração e rebentação), transformação de ondas longas (geração, propagação e dissipação), configuração do fundo induzida pelas ondas e pelas correntes variáveis, bem como o galgamento e a inundação em zonas costeiras. Os processos morfodinâmicos incluem transporte de sedimentos em suspensão, deslizamento do talude da duna, alteração do fundo e erosão da duna. Os efeitos da vegetação e das estruturas podem ser também incluídos. O modelo foi validado com uma série de casos analíticos, laboratoriais e de campo utilizando um conjunto padrão de configurações de parâmetros (Roelvink et al., 2015).

O XBEACH tem dois modos de funcionamento: um modo hidrostático e um não-hidrostático. No modo hidrostático, a variação da amplitude da onda curta é resolvida separadamente das ondas longas, correntes e alterações morfológicas. Isso economiza tempo computacional considerável com o processo, uma vez que, a fase das ondas curtas não é simulada. Um modelo mais completo é o modelo não-hidrostático que resolve todos os processos, incluindo movimentos de ondas curtas, mas com maior exigência computacional. Este último foi desenvolvido inicialmente como uma versão do modelo SWASH (Zijlema et al., 2011).

O modo não hidrostático permite ativar a simulação da influência das ondas curtas, através da equação de balanço espectral da densidade de ação dada por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial C_{gx} A}{\partial x} + \frac{\partial C_{gy} A}{\partial y} + \frac{\partial C_{\theta} A}{\partial \theta} = \frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma} \quad (1)$$

onde D representa os termos dissipativos de ondas devido à rebentação (w), atrito de fundo (f) e vegetação (v); t, o tempo; x, y, os eixos coordenados; θ , o ângulo de incidência relativamente ao eixo x; e A representa a ação da onda descrita por:



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_w(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)} \quad (2)$$

onde S_w representa a densidade espectral da energia da onda para cada direção; σ é a frequência intrínseca da onda, descrita por:

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh(kh)} \quad (3)$$

e as velocidades de propagação do grupo de ondas, C , para as dimensões horizontais e da direção espectral são descritas por:

$$C_{g_x}(x, y, t, \theta) = C_g \cos(\theta) \quad (4)$$

$$C_{g_y}(x, y, t, \theta) = C_g \sin(\theta) \quad (5)$$

$$c_\theta(x, y, \theta) = \frac{\sigma}{\sinh(2kh)} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial h}{\partial y} \cos \theta \right) \quad (6)$$

onde h representa a profundidade do local, k o número de onda e g a aceleração da gravidade. O último termo da equação (1) que descreve a velocidade de propagação da onda no espectro é referente aos efeitos de refração que a onda sofre ao longo da sua propagação.

A rebentação de ondas possui cinco fórmulas distintas para serem aplicadas, sendo duas delas aplicadas para ondas estacionárias e três para movimentos não estacionários. Os métodos mais utilizados são descritos em Roelvink (1993) e Daly et al. (2011).

Uma descrição mais detalhada deste modelo, bem como a sua aplicação a diferentes casos de estudo, pode ser consultada em Oliveira (2011, 2012, 2013).

3. METODOLOGIA ADOTADA

A metodologia desenvolvida pelo LNEC, designada por metodologia simples e inserida no sistema HIDRALERTA, foi aplicada por vários autores a diferentes zonas costeiras (Neves et al., 2013, Raposeiro et al, 2010, 2013), com o objetivo de se avaliar o risco associado à ocorrência de galgamentos e inundação em zonas costeiras e portuárias. Naquela metodologia, recorre-se a fórmulas empíricas para a avaliação do espraçamento, galgamento e inundação nessas zonas. Estas fórmulas empíricas apresentam, contudo, limitações, porque são normalmente deduzidas para características de perfil de praia, nível de maré e de agitação marítima incidente muito específicas das zonas para as quais foram deduzidas. Nesse sentido, a utilização de um modelo como o XBEACH permite uma aplicação mais generalizada, embora também dependa de parâmetros pré-definidos.

No presente trabalho, com o objetivo de determinar o galgamento e a consequente inundação nas praias da Costa da Caparica, desde São João da Caparica até à Praia Nova (7 praias), Figura 1, utilizou-se a metodologia referida, calculando o espraçamento, galgamento e inundação não só com recurso a fórmulas empíricas, mas também ao modelo XBEACH. Assim, efetuou-se:



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

- A caracterização da agitação marítima em frente a cada uma das praias da Costa da Caparica - Com base em 9 anos (outubro de 2007 a agosto de 2016) de dados de agitação marítima (Hs, Tp, Dirmed), fornecidos pelo WAVEWATCH III, efetuou-se a propagação desses dados com o modelo SWAN para pontos em frente às sete praias da Costa da Caparica e estabeleceram-se regimes de agitação marítima locais;
- O cálculo do espraçamento e do galgamento - Este cálculo é efetuado com recurso a duas metodologias:
 - Fórmulas empíricas, aplicadas ao longo de vários perfis estabelecidos em frente às praias da Costa da Caparica, o que nos permite o cálculo das cotas de inundação e do caudal médio galgado na zona protegida, considerando os 10 anos de dados de agitação marítima obtidos no ponto correspondente a cada praia. A cota de inundação (ou nível máximo de inundação, NMI) é obtida pela soma do espraçamento com o nível de maré, tendo ainda em consideração o efeito da sobrelevação meteorológica do nível do mar. Neste trabalho, por uma questão de simplicidade e para ilustrar a metodologia utilizada, foi considerado apenas um perfil por praia. No caso das praias sem estrutura de proteção aderente, as fórmulas empíricas utilizadas para o cálculo do espraçamento e da cota de inundação, foram as fórmulas desenvolvidas por Hunt (1959), Guza e Thornton (1982), Holman (1986), Nielsen e Hanslow (1991), Ruggiero et al. (2001), Stockdon et al. (2006) e Teixeira (2009). Da Praia do Norte à Praia Nova, onde existe uma estrutura de proteção aderente, foi utilizada a metodologia de Mase et al. (2013), que inclui o cálculo do espraçamento e do caudal médio galgado por metro linear de estrutura, Heleno (2016) e Pires (2017);
 - Modelo XBEACH, para cálculo do caudal galgado e do NMI, para as condições de agitação marítima em frente a cada uma das praias em estudo. No entanto, devido ao tempo elevado de cálculo do modelo para cada condição de agitação marítima, não foi possível efetuar os cálculos para toda a série temporal de 9 anos. Decidiu-se, assim, selecionar quatro situações de tempestade recorrendo a critérios baseados na altura da onda ao largo (com base nos resultados do WAVEWATCH III) e em acontecimentos de galgamento importante nessas zonas, relatados pelos meios de comunicação;
- Comparação dos resultados do modelo numérico com os obtidos pelas fórmulas empíricas.

4. CASO DE ESTUDO – COSTA DA CAPARICA

4.1 Introdução

A Costa da Caparica é uma cidade portuguesa do concelho de Almada, sendo que foi elevada a cidade em 9 de dezembro de 2004. É sede de freguesia e integra as localidades de São João, Santo António, Terras da Costa e Fonte da Telha. Localizada na orla costeira, a sede de freguesia da Costa da Caparica tem uma área aproximada de 10 km² entre o mar e a escarpa. As suas praias estendem-se por uma zona de aproximadamente 30 km, sendo a maior do país entre a margem esquerda do Tejo e a Lagoa de Albufeira, Figura 1 (esq.).



Figura 1. Praias da Costa da Caparica (esq.). Zona norte da Praia de São João da Caparica (dir. em cima); Estrutura de proteção costeira das restantes praias (dir. em baixo)

As praias em estudo são divididas em dois grupos, que se podem observar na Figura 1: a Praia de São João da Caparica, cuja parte norte não contém qualquer tipo de proteção costeira, e as restantes praias da vila da Costa da Caparica (Praia do Norte à Praia Nova), que todas incluem estruturas de proteção costeira. As estruturas de proteção longitudinais aderentes são semelhantes em todas as praias (incluindo tabelaa zona sul), sendo compostas por uma camada de enrocamento de diversas dimensões, Figura 1 (dir. em baixo).

A parte norte de São João da Caparica é protegida por um sistema dunar em restauro pelo Projeto ReDuna (Recuperação e Restauração Ecológica do Sistema Dunar de São João da Caparica) (Figura 1, dir. em cima), sendo que as dunas têm uma extensão de 750 m.

As praias do segundo grupo (do Norte, de Santo António da Caparica, do CDS, do Tarquinio/Paraíso, do Dragão Vermelho e Nova) são mais pequenas, mas são muito procuradas por surfistas e pela população residente no concelho de Almada, devido à proximidade com a cidade e por terem ligações privilegiadas com os transportes públicos.

4.2 Caraterização da agitação marítima

Utilizaram-se os resultados das previsões da agitação marítima ao largo da zona considerada para o período correspondente a 9 anos (outubro de 2007 a agosto de 2016) de dados de altura significativa de onda (H_s), período de pico de onda (T_p) e direção de onda (Dir_{med}), fornecidos pelo WAVEWATCH III, no ponto localizado ao largo da Costa da Caparica, com coordenadas -9.748801 W, 38.56720 N.

Aqueles resultados foram transferidos com o modelo SWAN para pontos em frente às sete praias em estudo da Costa da Caparica. Relativamente ao nível de maré, usaram-se dados fornecidos pelo marégrafo de Cascais (plataforma iGEO), pelo que a sobrelevação do nível de mar já se encontra incluída. Foram, assim, calculados os resultados (H_s , T_p , - período de

pico, T_m - período médio e Dirmed) em 7 pontos (P1 a P7), Figura 2 (esq.), com cota batimétrica de -10 m referente ao Zero Hidrográfico (ZH).

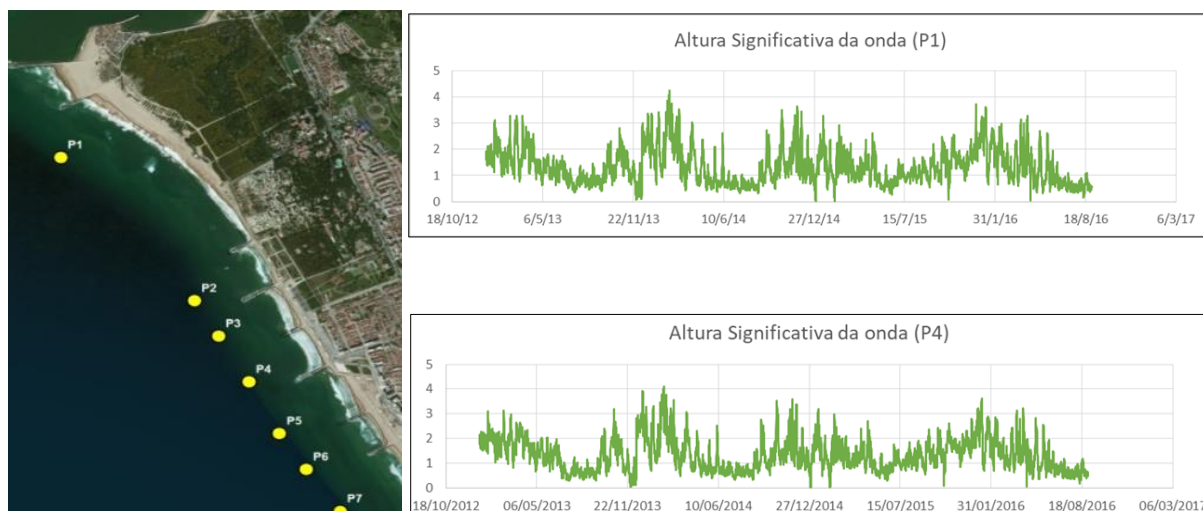


Figura 2. Localização dos pontos P1 a P7 (esq.) e série temporal de Hs nos pontos P1 e P4 (dir.)

Tabela 1. Características da agitação marítima nos pontos P1 a P7, com base na série temporal de 9 anos (2007 a 2016) transferida do largo até junto à costa com o modelo SWAN

Ponto	Hs (m)		Tp (s)	
	Máximo	Média	Máximo	Média
P1	4.25	1.33	16.4	9.2
P2	4.23	1.31	16.4	9.2
P3	4.12	1.34	16.4	9.2
P4	4.12	1.34	16.4	9.2
P5	4.08	1.41	16.4	9.2
P6	4.17	1.38	16.4	9.2
P7	3.54	1.37	16.4	9.2

Verifica-se que a altura de onda decresce do P1 para o P7 (Tabela 1), mas os valores são muito semelhantes, uma vez que estes pontos têm aproximadamente a mesma cota batimétrica e que estão numa zona onde as linhas batimétricas se apresentam praticamente paralelas à costa (Martinho, 2014).

4.3 Cálculo do espraçamento, galgamento e cota de inundação

Para o cálculo do espraçamento e galgamento, quer utilizando fórmulas empíricas, quer usando o modelo XBEACH, os perfis das praias considerados em cada ponto resultam de um levantamento LIDAR realizado em 2011 para Portugal Continental (Silva et al., 2012) e do levantamento DGPS efetuado em 2016, Poseiro et al. (2016). Para esses perfis, e para as condições de agitação marítima estimadas em cada um dos pontos P1 a P7, obtêm-se os valores de espraçamento, caudal médio galgado e cota de inundação. No presente trabalho, apenas se apresenta a aplicação do modelo XBEACH para um conjunto de 4 tempestades,

analisando-se o espraçamento na zona norte da Praia de São João da Caparica (P1) e o galgamento e cota de inundação para a Praia do CDS (P4).

Seleção das tempestades

A seleção das tempestades baseou-se, primeiramente, em considerar os estados de agitação caracterizados por uma altura significativa ao largo superior a 5 m e com uma persistência de pelo menos 2 dias, os quais podem, de algum modo, afetar a zona costeira.

Após análise e filtragem dos dados ao largo oriundos do WAVEWATCH III, foram identificadas 4 tempestades, todas elas nos períodos de inverno: a tempestade 1, também conhecida por tempestade “Hércules”, foi identificada com a maior duração (5 dias) e registada entre os dias 3 e 7 de janeiro de 2014; a tempestade 2 foi registada entre os dias 8 e 10 de fevereiro de 2014; a tempestade 3 foi registada entre os dias 24 e 25 de fevereiro de 2015 e, por fim, a tempestade 4 foi registada entre os dias 14 e 16 de fevereiro de 2016. As principais características destas tempestades ao largo são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Principais características das tempestades selecionadas ao largo

Tempestade	Parâmetro Estatístico	Largo			P1			P4		
		Hs (m)	Tp (s)	Dirmed (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dirmed (°)	Hs (m)	Tp (s)	Dirmed (°)
1 3 e 7 de janeiro 2014	Média	5.0	13.6	296	2.0	9.6	243	2.0	9.9	243
	Máximo	6.4	16.5	301	2.4	10.7	248	2.4	10.0	248
	Mínimo	3.4	10.8	285	1.8	8.2	236	1.7	8.1	240
	Desvio Padrão	1.0	1.7	4	0.2	0.9	5	0.2	0.9	2
2 8 a 10 de fevereiro 2014	Média	6.3	12.9	303	3.6	13.0	236	3.6	13.0	239
	Máximo	8.0	15.4	314	4.2	16.4	244	4.1	16.0	240
	Mínimo	4.9	11.4	283	2.6	10.7	232	2.5	10.0	236
	Desvio Padrão	1.0	1.4	10	0.5	1.5	4	0.5	1.5	2
3 24 a 25 de fevereiro 2015	Média	4.5	13.2	326	2.1	13.3	242	2.0	13.0	240
	Máximo	5.4	14.4	328	2.5	14.2	244	2.4	14.0	240
	Mínimo	3.2	10.2	322	1.3	10.7	236	1.2	10.0	240
	Desvio Padrão	0.7	1.4	2	0.3	1.3	3	0.4	1.2	0
4 14 e 16 de fevereiro 2016	Média	5.5	10.8	322	2.2	11.1	244	2.1	11.0	245
	Máximo	6.5	11.7	344	2.8	12.4	248	2.6	12.0	264
	Mínimo	4.0	9.9	296	2.0	9.62	243	2.0	9.9	243
	Desvio Padrão	0.9	0.6	16	2.4	10.7	248	2.4	10.0	248

A consulta dos meios de comunicação, que foi outro dos critérios de seleção de tempestades, mostrou que apenas as tempestades 1 e 2 conduziram a situações de galgamento e inundação. Nas tempestades 3 e 4 não houve relatos de inundações nas praias da Costa da Caparica.

Fórmulas empíricas

Para o cálculo do espraçamento na zona norte da praia de S. João da Caparica, utilizaram-se as fórmulas empíricas de Hunt (1959), Guza e Thornton (1982), Holman (1986), Nielsen e Hanslow (1991), Ruggiero et al. (2001), Stockdon et al. (2006) e Teixeira (2009), com recurso ao *software* de Fortes et al. (2013a,b).

Na zona sul da Praia de São João da Caparica e nas restantes praias, desde a Praia do Norte até à Praia Nova, que são protegidas por uma defesa frontal aderente, é estimado o espraçamento e o galgamento com as fórmulas empíricas de Mase et al. (2013), utilizando o *software* de Fortes et al. (2013a,b). A cota de inundação é dada pela soma das contribuições da maré astronómica (referente ao ZH), com a sobrelevação meteorológica e com o valor do espraçamento, $R_{1\%}$.

Modelo XBEACH

Admitiu-se o tipo de fronteira geração-absorção (*abs_1D*) na fronteira de entrada do domínio de cálculo do modelo XBEACH, para impor as condições de agitação incidente transferidas do largo (Tabela 2). Este tipo de fronteira é de baixa reflexão. Assim, considerou-se uma série temporal de um espectro de ondas JONSWAP, proveniente do modelo SWAN, nos pontos em frente a cada praia e nas datas desejadas das tempestades. Este tipo de fronteira foi também aplicado na fronteira de saída (*back*) do domínio, permitindo que as ondas saiam do domínio sem reflexões. Para as fronteiras laterais, adotou-se uma condição de Neumann, conforme recomendado pelo manual, Roelvink et al. (2009, 2010).

Em relação ao nível de maré, a opção recaiu por impor a variação temporal do nível de maré nas duas fronteiras, que normalmente são a fronteira do lado do mar (*front*) e do lado de terra (*back*). Com base no marégrafo de Cascais, considerou-se a informação referente ao nível de maré para as datas desejadas. Quanto aos restantes parâmetros do modelo, admitiram-se os sugeridos por defeito no manual, Roelvink et al. (2009, 2010). Considerou-se o processo não hidrostático e o do espraio de ondas curtas.

Para calcular o caudal médio galgado (valor que não é um resultado direto do modelo), recorre-se ao cálculo da altura e da velocidade da água que transpõe a estrutura.

4.4 Comparação de resultados numéricos e empíricos

O modelo foi aplicado a todas as praias em estudo, mas neste trabalho apresentam-se apenas os resultados em termos de nível máximo de inundação na zona norte da Praia de São João da Caparica (ponto P1) e em termos de caudal médio galgado sobre a estrutura de defesa costeira na Praia do CDS (ponto P4).

Cota de inundação no ponto P1 (zona norte da Praia de São João da Caparica)

Apresentam-se na Tabela 3 e na Figura 3 os valores da cota de inundação (m ZH) obtidos com as diferentes formulações e com o modelo XBEACH, para as diferentes tempestades, para o ponto P1 (zona norte da Praia de São João da Caparica).

Tabela 3. Valores do NMI (m ZH) calculados pelo modelo XBEACH e pelas fórmulas empíricas para o ponto P1 (zona norte da Praia de São João da Caparica)

Tempestade Metodologia	1			2			3			4		
	Mín. (mZH)	Máx. (mZH)	Méd. (mZH)	Mín. (mZH)	Máx. (mZH)	Méd. (mZH)	Mín. (mZH)	Máx. (mZH)	Méd. (mZH)	Mín. (mZH)	Máx. (mZH)	Méd. (mZH)
XBEACH	0.95	5.53	2.57	1.04	6.78	3.03	0.70	6.76	2.71	0.89	5.87	2.73
Hunt (1959)	1.18	3.96	2.58	2.14	3.33	2.73	1.38	3.73	2.59	1.57	3.68	2.54
Guza e Thornton (1982)	2.83	5.69	4.43	4.57	7.38	6.17	2.58	5.78	4.48	3.68	6.32	4.61
Holman (1986)	1.52	4.31	2.96	2.64	4.16	3.44	1.63	4.11	2.98	2.11	4.23	2.97
Nielsen e Hanslow (1991)	1.95	4.78	3.42	3.27	4.87	4.14	2.10	4.75	3.64	2.64	4.79	3.52
Ruggiero et al. (2001)	1.59	4.38	3.08	2.87	4.81	3.92	1.57	4.19	3.06	2.41	4.52	3.12
Stockdon et al. (2006)	1.44	4.24	2.87	2.52	3.82	3.20	1.63	4.08	2.95	1.92	4.06	2.87
Teixeira 1 (2009)	2.91	5.71	4.45	4.40	6.76	5.72	2.77	5.65	4.46	3.84	6.10	4.56
Teixeira 2 (2009)	1.19	3.97	2.59	2.15	3.34	2.75	1.39	3.74	2.60	1.58	3.70	2.55

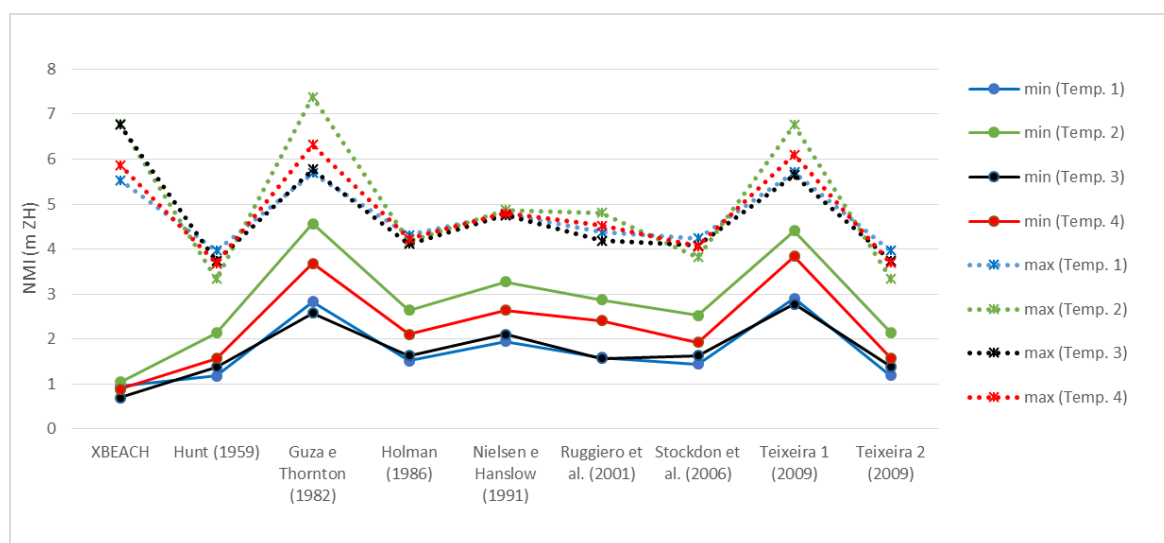


Figura 3. Comparação dos valores da cota de inundação (m ZH) calculados pelo modelo XBEACH e pelas fórmulas empíricas para o ponto P1 (zona norte da Praia de São João da Caparica)

Analisando os resultados do modelo numérico e das fórmulas empíricas, verifica-se que existe uma concordância razoável entre os valores obtidos pelo modelo XBEACH e pelas fórmulas empíricas para as diferentes tempestades. Verifica-se que, em geral, o modelo XBEACH subestima os valores mínimos e sobrestima os valores máximos de NMI, relativamente aos valores obtidos com todas as fórmulas empíricas, exceto as fórmulas de Guza e Thornton (1982) e Teixeira 1 (2009).



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

Para as tempestades 1 e 2, os valores máximos e médios obtidos com o XBEACH encontram-se de acordo com os valores resultantes das fórmulas empíricas. Já os valores mínimos são inferiores aos valores das fórmulas. Em termos de valores máximos, as formulações desenvolvidas por Guza e Thornton (1982) e Teixeira 1 (2009) são aquelas que mais se aproximam dos valores obtidos através do XBEACH, enquanto para os valores médios são as formulações de Hunt (1959) e de Teixeira 2 (2009).

Observa-se que existe uma menor concordância nas tempestades 3 e 4 do que a observada para as tempestades 1 e 2. Na tempestade 3 observa-se que só os valores médios se encontram em concordância. Em relação à tempestade 4, observa-se que os valores máximos e médios se encontram na gama de valores das fórmulas, e só os valores mínimos se encontram abaixo dos valores das fórmulas. Em termos de valores máximos, tal como para as tempestades 1 e 2, as formulações de Guza e Thornton (1982) e de Teixeira 1 (2009) são aquelas que mais se aproximam dos valores obtidos através do XBEACH, enquanto para os valores médios são as formulações de Hunt (1959) e de Teixeira 2 (2009).

A grande diferença nestas abordagens é que o modelo XBEACH faz registos, a cada segundo, da variação do espraçamento, medido através de uma sonda numérica colocada no perfil da praia, enquanto as fórmulas empíricas calculam, a cada 6 horas, estimativas do valor de NMI. Estas estimativas referem-se à cota máxima possível ser alcançada para uma determinada condição de agitação marítima. Sendo assim, já era esperado que os valores mínimos de NMI obtidos através do modelo XBEACH fossem menores que os resultados das fórmulas empíricas.

Caudal médio galgado

Na Tabela 4 apresentam-se os valores mínimo e máximo do caudal médio galgado obtido através do modelo XBEACH e da fórmula empírica de Mase et al. (2013), para o perfil da Praia do CDS (ponto P4).

Tabela 4. Valores máximos e mínimos do caudal médio galgado (l/s/m) na praia do CDS (ponto P4)

Metodologia	Tempestade							
	1		2		3		4	
	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.
<i>XBEACH</i>	0.00	0.91	0.00	5.66	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>Mase et al. (2013)</i>	0.00	3.20	0.00	15.60	0.00	0.00	0.00	0.00

Em termos gerais, existe alguma concordância entre os valores da formulação de Mase et al. (2013) e do modelo XBEACH, isto é, ambas as metodologias conduziram a valores significativos do caudal médio galgado nas tempestades 1 e 2, para as quais há registos da ocorrência de galgamentos na zona da Praia do CDS. No entanto, os valores da formulação são sempre superiores aos numéricos e a ordem de grandeza é diferente.

É importante avaliar-se o caudal médio galgado através do modelo XBEACH, uma vez que os valores médios provenientes das formulações empíricas não fornecem informações pormenorizadas. Neste caso, o caudal médio galgado não traduz o número de ondas que galgam, nem o volume correspondente a cada galgamento, podendo a média resultar de

realidades diversas, uma vez que uma pequena quantidade de ondas pode introduzir grandes volumes de água e as restantes serem responsáveis por galgamentos pouco significativos, ou *vice-versa*.

5. CONCLUSÕES

O principal objetivo desta comunicação foi avaliar o desempenho do modelo XBEACH (Roelvink et al., 2009, 2010, 2015) na determinação dos valores do espraimento, do caudal médio galgado e do nível máximo de inundação em sete das praias que constituem a zona costeira da Costa da Caparica, no concelho de Almada. Este trabalho encontra-se enquadrado no projeto de investigação HIDRALERTA (Fortes et al., 2015).

Foi utilizado um conjunto de dados de agitação marítima fornecidos pelo modelo de previsão WAVEWATCH III (Tolman, 2009) e transferido para junto à costa recorrendo ao modelo SWAN (SWAN Team, 2002). Destes resultados do modelo SWAN foram selecionadas 4 tempestades, para as quais foram efetuadas as simulações com o modelo SWAN e obtidos os resultados em termos de espraimento, caudal médio galgado e nível máximo de inundação. Estes resultados foram comparados com diferentes fórmulas empíricas.

Na comparação dos resultados do modelo numérico e das fórmulas empíricas, observou-se uma concordância razoável nos valores de espraimento na zona da Praia de São João da Caparica sem estrutura de defesa costeira, registando o modelo XBEACH valores máximos semelhantes às formulações de Guza e Thornton (1982) e de Teixeira 1 (2009). Em termos de valores mínimos, o modelo XBEACH estima valores inferiores às fórmulas empíricas. Já em relação aos valores do caudal médio galgado, constata-se que existe uma concordância razoável de valores entre as duas metodologias, isto é, ambas conduziram a valores de galgamento nas tempestades 1 e 2, enquanto no caso das tempestades 3 e 4, o valor é nulo, o que está de acordo com os relatos disponíveis na comunicação social. No entanto, a ordem de grandeza dos valores do caudal médio galgado obtidos pelo modelo numérico e pelas fórmulas empíricas é diferente.

Note-se que o modelo XBEACH e as fórmulas empíricas foram aplicadas para perfis de praia obtidos em 2016 e considerando os parâmetros do modelo indicados por defeito no manual do mesmo, elementos que podem não ter correspondência às situações que se verificavam durante as tempestades estudadas. Seria importante efetuar uma monitorização detalhada do local numa situação de tempestade, quer da agitação marítima, quer do espraimento e do galgamento obtidos nas diferentes praias, bem como efetuar os levantamentos dos perfis dessas praias nessa situação. Com dados mais precisos será possível uma melhor calibração da modelo numérico e das fórmulas empíricas e, nessas condições, seria mais fidedigno avaliar o desempenho do modelo XBEACH e das fórmulas. Deve também realizar-se um estudo de sensibilidade do XBEACH aos diferentes parâmetros do modelo.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Restaurante Pé Nu pelo apoio na logística necessária aos levantamentos dos perfis da Praia de São João da Caparica. Este trabalho insere-se no projeto HIDRALERTA (PTDC/AAC-AMB/120702/2010).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Daly, C., Roelvink, D., van Dongeren, A., de Vries, J. T. e McCall, R. (2011). Short wave breaking effects on low frequency waves. *Proc. Coastal Eng.*, 1, pp. 1-20.
- Fortes, C., Reis, M. T., Poseiro, P., Santos, J., Garcia, T., Capitão, R., Pinheiro L. V, Reis, R., Craveiro, J., Lourenço, I., Lopes, P., Rodrigues, A., Sabino, A., Araújo, J. P., Ferreira, J. C., SILVA, S. F. Raposeiro, P. D., Simões, A., Azevedo, E. B., Reis, F. V., Rodrigues, M. C. e Pereira da Silva, C. (2015). Ferramenta de apoio à gestão costeira e portuária: o sistema HIDRALERTA. *Proc. VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*. Universidade de Aveiro. Aveiro.
- Fortes, C.J.E.M., Reis, M. T. e Neves, P. (2013a). Programa Calcula_Runup_NovasEquacoes_Condicoeslargo1.f. Programa de Cálculo do Runup e do Nível Máximo de Inundação Utilizando Várias Formulações Empíricas. Relatório 01/2013 – HIDRALERTA. LNEC, maio, Lisboa.
- Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T. e Neves, P. (2013b). Programa Calcula_Runup_Galgamento_Mase.f. Programa de Cálculo do Runup e do Galgamento Utilizando as Formulações Empíricas de Mase et al. (2013). Relatório 03/2013 – HIDRALERTA. LNEC, maio, Lisboa.
- Guza, R. T. e Thornton, E. B. (1982). Swash oscillations on a natural beach. *Journal of Geophysical Research*, 87(C1), 483-491.
- Heleno, A. (2016). Avaliação do Espraçamento e Inundação nas praias da Costa da Caparica. Modelação com o modelo XBEACH. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, ISEL, Lisboa.
- Holman, R. A. (1986). Extreme value statistics for wave runup on a natural beach. *Coastal Engineering*, 527-544.
- Hunt, I. A. (1959). Design of seawalls and breakwaters. *Journal of Waterways and Harbours Division*, 85, 123-152.
- Martinho, M. (2014). Avaliação e Gestão de Riscos em Áreas Litorais. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Ambiente, FCT, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- Mase, H., Tamada, T., Yasuda, T., Hedges, T. S. e Reis, M. T. (2013). Wave runup and overtopping at seawalls built on land an in very shallow water. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 139, 346-357.
- Neves, P., Poseiro, P., Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., Capitão, R., Antunes do Carmo, J., Raposeiro, P. e Ferreira, J. C. (2013). Aplicação da metodologia de avaliação do risco de inundação/galgamento na praia de São João da Caparica. *Proc. 8as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/ PIANC*, Lisboa.
- Nielsen, P. e Hanslow, D. J. (1991). Wave runup distributions on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, 7, 1139-1152.
- Oliveira, F. S. B. F. (2011). Avaliação do modelo de erosão de praias e dunas – XBEACH: Resultados Preliminares. *Proc. 11º Congresso da Água, APRH*, Porto.
- Oliveira, F. S. B. F. (2012). Modelação numérica da erosão de dunas durante tempestades. *Proc. IV Conferência Nacional em Mecânica dos Fluidos, Termodinâmica e Energia*, Lisboa.
- Oliveira, F. S. B. F. (2013). Erosão de dunas durante tempestades: aplicação de diferentes modelos numéricos. *Proc. Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, Bilbao, España.
- Pires, B. (2017) Vulnerabilidade e risco de galgamento oceânico em litorais baixos e arenosos. Tese de Mestrado em Eng. do Ambiente. FCT-UNL. dezembro.
- Poseiro, P., Reis, R., Ferreira, J.C., Fortes, C.J.E.M., Capitão, R. (2014). Relatório do levantamento de



7, 8 e 9
Março 2018
ÉVORA
Évora Hotel

GESTÃO DOS
RECURSOS HÍDRICOS:
**NOVOS
DESAFIOS**

- perfis morfológicos do sistema praia-duna da Costa da Caparica, entre Cova do Vapor e Ribeira Foz do Rego. 10 de outubro de 2014. Rel. HIDRALERTA 04/2014, LNEC, outubro.
- Raposeiro, P. D., Fortes, C. J., Capitão, R., Reis, M. T., Ferreira, J. C., Pereira, M. T. e Guerreiro, J. (2013). Preliminary phases of the HIDRALERTA system: Assessment of the flood levels at S. João da Caparica beach, Portugal. *Journal of Coastal Research*, 65, 808-813.
- Raposeiro, P. D., Fortes, C. J., Reis, M. T. e Ferreira, J. C. (2010). Análise de cotas de inundação na praia de Vale do Lobo. *Proc. 10º Congresso da Água, APRH, Alvor*.
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A. P., de Vries, J. V. T., Lescinski, J. e McCall, R. (2010). XBEACH Model Description and Manual. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft University of Technology, The Netherlands.
- Roelvink, D., Reniers, A., Van Dongeren, A. P., de Vries, J. V. T., McCall, R. e Lescinski, J. (2009). Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands. *Coastal Engineering*, 56(11), 1133-1152.
- Roelvink, D., Van Dongeren, A. P., McCall, R., Hoonhout, B., Van Rooijen, A., Van Geer, P., de Vet, L., Nederhoff, K. e Quataert, E. (2015). XBEACH Technical Reference: Kingsday Release. UNESCO-IHE Institute for Water Education, Deltares and Delft Univ. Tech., The Netherlands.
- Roelvink, J. A. (1993). Dissipation in random wave group incident on a beach. *Coastal Engineering*, 19, 127-150.
- Roelvink, J. A. e Stive, M. J. F. (1989). Bar-generating cross-shore flow mechanisms on a beach. *Journal of Geophysical Research*, 94, 4785-4800.
- Ruggiero, P., Komar, P. D., McDougal, W. G., Marra, J. J. e Beach, R. A. (2001). Wave runup, extreme water levels and the erosion of properties backing beaches. *Journal of Coastal Research*, 17, 407-419.
- Sallenger, A. H. (2000). Storm impact scale for barrier islands. *J. of Coastal Research*, 16(3), 860-895.
- Silva, S. A. (2012). Gestão de Praias da Costa de Caparica, A capacidade de carga, o valor da onda, a segurança e informação. Tese de Mestrado. FCT, Universidade Nova de Lisboa. Lisboa.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A. e Sallenger Jr., A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53, 573-588.
- SWAN Team (2007). SWAN Technical Documentation. SWAN Cycle III version 40.51 A, 98 pp., Delft University of Technology, The Netherlands.
- Teixeira, S. B. (2009). Demarcação do Leito e da Margem das Águas do Mar no Litoral Sul do Algarve. Administração da Região Hidrográfica do Algarve, Faro.
- Tolman, H. L. (2009). User Manual and System Documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/ NWS/ NCEP/ MMAB Technical Note.
- Zijlema, M., Stelling, G. e Smit, P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58(10), 992-1012.