

AVALIAÇÃO DO IMPACTO ECONÓMICO DOS GALGAMENTOS E INUNDAÇÃO NO PORTO DA PRAIA DA VITÓRIA

Pedro POSEIRO¹; João A. SANTOS²; Conceição J.E.M. FORTES³; Maria T. REIS⁴

RESUMO

A avaliação quantitativa do risco de galgamentos, e correspondente inundação, em termos de custos associados aos danos causados por estes fenómenos é de grande relevância. Com efeito, tal dotará as autoridades competentes de uma informação fulcral para o planeamento a médio e longo prazo de intervenções mitigadoras do risco.

Nesta comunicação, apresenta-se a aplicação da simulação de Monte Carlo ao porto da Praia da Vitória para a análise da incerteza das variáveis que influenciam o valor dos prejuízos causados pela ocorrência de galgamentos e inundação nesta zona portuária.

A metodologia consiste na definição de um conjunto de variáveis aleatórias, tais como: o caudal médio galgado, a área atingida pelo galgamento, o valor e o número de bens em risco e o dano causado nos bens. A cada uma destas variáveis faz-se corresponder uma distribuição de probabilidade, procede-se à geração de uma amostra de valores aleatórios, aplica-se o modelo para cálculo do prejuízo associado ao galgamento utilizando as combinações geradas pelas variáveis aleatórias e, por fim, analisam-se os resultados para avaliação da incerteza nos mesmos. Com vista a simplificar a aplicação do modelo, esta foi dividida em 3 estágios, sendo o primeiro apenas para a geração da distribuição do caudal médio galgado condicionado ao nível da altura significativa do estado de agitação incidente na estrutura, o segundo para a determinação da distribuição correspondente ao custo condicionado ao mesmo nível e o terceiro para a obtenção da distribuição para o risco. A probabilidade de excedência de cada um dos níveis referidos é determinada, com base nos últimos 30 anos de previsões da agitação marítima obtidas nesta zona. Os caudais médios galgados sobre uma estrutura portuária são obtidos com recurso à ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2. Os restantes parâmetros foram definidos empiricamente apenas com o intuito de demonstrar o modelo.

¹Mestre e Bolseiro de Doutoramento; Laboratório Nacional de Engenharia Civil; Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa; pposeiro@lnec.pt; +351 218443756.

²Doutor e Professor Coordenador; Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa; Rua do Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa; jasantos@dec.isel.ipl.pt; +351 218317002. Investigador do *Centre of Marine Technology and Ocean Engineering* (CENTEC), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.

³Doutor e Investigadora Principal; Laboratório Nacional de Engenharia Civil; Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa; jfortes@lnec.pt; +351 218443445.

⁴Doutor e Investigadora Auxiliar; Laboratório Nacional de Engenharia Civil; Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa; treis@lnec.pt; +351 218443448.

Palavras-chave: Galgamentos; Inundação; NN_OVERTOPPING2; Porto da Praia da Vitória; Risco; Simulação de Monte Carlo.

1. INTRODUÇÃO

No porto da Praia da Vitória, localizado na costa Este da Ilha Terceira (Açores), são frequentes os fenómenos de galgamento das estruturas portuárias e consequente inundação da zona por estas protegidas. A preocupação com o galgamento de estruturas marítimas resulta dos prejuízos que lhe podem estar associados: inoperacionalidade do posto de acostagem e da atividade portuária, danos nos equipamentos ou edifícios protegidos pelas estruturas galgadas, danos em navios atracados aos terminais, ferimentos em pessoas ou até perdas de vidas humanas.

Por essa razão, considera-se muito importante dotar as autoridades nacionais de um sistema de previsão e alerta que, com a devida antecedência, informe sobre a possibilidade de ocorrência de situações de emergência e permita a adoção por parte dessas entidades de medidas para evitar vítimas e minimizar prejuízos económicos e ambientais. Além disso, é importante que esse sistema seja também uma ferramenta de gestão a longo prazo, permitindo simular cenários futuros que considerem as mudanças provocadas pelas alterações climáticas, nomeadamente o aumento do nível médio das águas do mar e a ocorrência de fortes tempestades. Só deste modo, é possível fazer um planeamento e gestão integrada e sustentada das zonas portuárias e costeiras.

É nesse sentido que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Portugal, tem vindo a desenvolver uma metodologia para avaliação do risco associado à ocorrência de galgamentos em estruturas marítimas (Neves *et al.*, 2012; Poseiro *et al.*, 2014), com o objetivo final de criar um sistema de previsão e alerta em tempo real e consequentemente uma ferramenta de gestão e planeamento para as zonas portuárias e costeiras.

A metodologia de avaliação do risco tem consistido nos três passos seguintes:

1. Definir o regime de agitação marítima incidente nas estruturas portuárias recorrendo a dados obtidos *in situ* e/ou a resultados de um modelo numérico de previsão da agitação marítima gerada pelo vento à escala oceânica, WaveWatch III (Tolman, 1999) combinados com modelos numéricos para propagação de ondas, SWAN (Booij *et al.*, 1999) e DREAMS (Fortes, 2002);
2. Calcular a resposta da estrutura em termos de caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura, com a utilização de ferramentas empíricas, nomeadamente da ferramenta baseada em resultados da aplicação de redes neuronais artificiais (doravante designada por “ferramenta neuronal”) NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005), desenvolvida no âmbito do Projeto Europeu CLASH;
3. Cálculo do grau de risco associado à ocorrência de caudais médios galgados acima de um limiar pré-definido para cada secção da estrutura, em função do tipo de estrutura galgada e das atividades e bens por ela protegidos.

O procedimento descrito nesta comunicação pretende contribuir para melhorar esta metodologia no que se refere a este último passo de avaliação do risco. Com efeito, o risco é definido como o valor esperado dos prejuízos associados à ocorrência de um acontecimento perigoso, neste caso, valores excessivos do caudal médio galgado.

Até agora, tem-se utilizado uma abordagem simples que consiste em atribuir aos prejuízos associados ao acontecimento perigoso um valor único, independente do valor do caudal médio que ultrapassou o limiar pré-estabelecido. Isto é, substitui-se uma distribuição contínua de prejuízos por uma variável aleatória de Bernoulli em que o sucesso corresponde à ultrapassagem do limiar definido para o caudal médio galgado. Neste caso, para o insucesso o prejuízo é nulo, enquanto para o sucesso o valor do prejuízo é único, não variando com o valor do caudal médio galgado, sendo o risco dado pelo produto da probabilidade do sucesso pelo prejuízo associado a esse sucesso.

Para evitar as dificuldades associadas à avaliação dos prejuízos resultantes da ultrapassagem do limiar de caudal médio galgado que define um acontecimento perigoso, é usual calcular-se o grau de risco (Raposeiro *et al.*, 2010), dado pelo produto do grau de probabilidade pelo grau de consequências (prejuízos). O estabelecimento do limiar para a definição de acontecimento perigoso apoia-se nas recomendações de Pullen *et al.* (2007) e na utilização prevista da zona protegida por cada trecho da estrutura. A avaliação do grau de consequências pode ser efetuada de forma simplista, como proposto por Poseiro *et al.* (2013a), ou de forma mais elaborada, como proposto em Poseiro *et al.* (2013b).

A questão a resolver é a determinação do valor esperado dos prejuízos associados à ocorrência de galgamentos excessivos. Embora seja claro o carácter aleatório do caudal médio galgado, como variável determinante da ocorrência do acontecimento perigoso, há mais grandezas envolvidas neste fenómeno e na determinação dos prejuízos associados ao mesmo, cuja ausência de melhor caracterização recomenda serem consideradas variáveis aleatórias.

Resulta, assim, um problema dependente de várias variáveis aleatórias, não sendo clara a independência entre todas essas variáveis, o que aconselha uma abordagem baseada na probabilidade condicionada e na utilização da simulação de Monte Carlo para obter as distribuições das diversas variáveis envolvidas. Os procedimentos multi-estágio descritos por Gouldby e Kingston (2007) e que se baseiam na abordagem referida acima são empregues para se obter a distribuição do risco. Tal abordagem tem a vantagem de simplificar este problema tão complexo, permitindo ainda, numa fase não implementada nesta comunicação, a avaliação da importância relativa das diversas variáveis, denominada de análise de sensibilidade. Esta análise facilita a identificação das variáveis sobre as quais vale a pena intervir para reduzir o risco associado a um determinado fenómeno, fulcral para o planeamento a médio e a longo prazo de intervenções mitigadoras do risco.

Nesta comunicação, apresenta-se a primeira aplicação da abordagem acima referida aos galgamentos no porto da Praia da Vitória para a análise da incerteza na avaliação do risco. Depois deste capítulo de introdução, apresenta-se no capítulo 2 a metodologia implementada e as variáveis aleatórias consideradas e no capítulo 3 a caracterização do porto da Praia da Vitória e a aplicação da metodologia a um trecho de uma estrutura deste porto. No capítulo 4 tecem-se as considerações finais.

2. METODOLOGIA DE ANÁLISE DA INCERTEZA NO RISCO

O valor dos prejuízos provocados pela ocorrência de galgamentos pode ser influenciado por diversas variáveis aleatórias, desde variáveis relacionadas com a solicitação (altura

significativa, período de pico do espectro e ângulo de incidência do estado de agitação, nível de maré), a variáveis relacionadas com as consequências do galgamento (caudal médio galgado, área afetada pelo galgamento, número de pessoas e veículos presentes nessa área, valor dos bens aí existentes), passando pelas características da estrutura galgável (tipo de estrutura, geometria do talude, porosidade do manto, superestrutura).

Face às dificuldades de avaliação do valor esperado do custo associado à ocorrência de acontecimentos perigosos devidos ao galgamento, uma vez que este custo pode depender de muitas variáveis aleatórias, optou-se por implementar a chamada “análise de incerteza por etapas” (*staged uncertainty analysis*) (Gouldby e Kingston, 2007).

Das diversas variáveis aleatórias referidas acima, seleciona-se uma que se considera básica, no caso a altura significativa do estado de agitação $X_1 = H_s$, e definem-se limiares l_i para essa variável com base na probabilidade de excedência da mesma, por exemplo (x_{1i} : $P(X_1 > x_{1i}) = l_i$).

Fixa-se então um conjunto de n níveis para essa variável e na primeira etapa da análise de incerteza vai determinar-se, para cada um desses níveis, a distribuição de uma variável que é fundamental na avaliação do custo dos prejuízos, para o caso, o caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura num estado de agitação, q .

O valor de q depende de m variáveis que podem ser consideradas aleatórias, $q_i = g_1(X_1, X_{2i}, \dots, X_{mi})$, uma das quais, a altura significativa do estado de agitação incidente, é constante para cada um dos n níveis já referidos ($X_{1i} = x_{1i}, i = 1, \dots, n$). Importa referir que as $m - 1$ variáveis aleatórias podem depender do nível de H_s .

Para cada um dos níveis ($i = 1, \dots, n$), utilizando a técnica de simulação de Monte Carlo, geram-se p amostras das $m - 1$ variáveis aleatórias X_{2ji}, \dots, X_{mji} ($j = 1, \dots, p$), para cada $i = 1, \dots, n$, a partir das quais se obtêm p valores de caudais médios galgados, $q_{ji} = g_1(x_{1i}, X_{2ji}, \dots, X_{mji})$ ($j = 1, \dots, p$), ($i = 1, \dots, n$), com os quais se pode estabelecer a distribuição de caudais médios galgados correspondente, q_i .

Na segunda fase da análise determina-se a distribuição dos valores do prejuízo associado à ocorrência de galgamentos para cada um dos n níveis estabelecidos para a altura significativa do estado de agitação incidente na estrutura galgável (consequências C_i condicionadas ao nível i de X_1). Este prejuízo depende de r variáveis $C_i = g_2(Y_{1i}, Y_{2i}, \dots, Y_{ri})$ ($i = 1, \dots, n$), que podem ser consideradas aleatórias, sendo que uma delas é ($Y_{1i} = q_i, i = 1, \dots, n$) o caudal médio galgado associado ao nível de solicitação considerado (uma variável aleatória cuja distribuição foi determinada no passo anterior).

Utilizando a técnica de Monte Carlo, para cada nível, geram-se t amostras das r variáveis aleatórias $(Y_{1ji}, Y_{2ji}, \dots, Y_{rji})$ ($j = 1, \dots, t$), para cada $i = 1, \dots, n$. Com isso obtêm-se t valores de consequências $C_{ji} = g_2(Y_{1ji}, Y_{2ji}, \dots, Y_{rji})$ ($j = 1, \dots, t$), para cada $i = 1, \dots, n$, com os quais se pode estabelecer a distribuição de consequências para cada um dos níveis i já referidos, C_i .

Na terceira fase da análise determina-se a distribuição do risco partindo de amostras de risco obtidas da soma do produto de valores amostrais de prejuízos para cada nível i , utilizando as distribuições correspondentes obtidas na segunda fase, pela probabilidade de ocorrência de alturas significativas em intervalos centrados nos valores de H_s respetivos. Ou seja, vão gerar-se u amostras de risco sendo que cada valor de risco, R_j é obtido por (Eq. 1):

$$R_j = \sum_{i=1}^n C_{ji} P\left(\frac{H_{si}+H_{si-1}}{2} < H_s < \frac{H_{si+1}+H_{si}}{2}\right) (j = 1, \dots, u) \quad (1)$$

em que cada valor C_{ji} das consequências associadas ao nível i para a amostra j satisfaz a distribuição estabelecida na fase anterior para os prejuízos (consequências) associados ao nível i criado para a altura significativa do estado de agitação incidente. Com os u valores de risco pode estabelecer-se a distribuição do risco.

3. APLICAÇÃO AO PORTO DA PRAIA DA VITÓRIA

3.1 Características gerais do porto

O porto e a baía da Praia da Vitória localizam-se na costa Este da ilha Terceira, uma das nove ilhas do arquipélago dos Açores, Portugal. A baía, limitada a norte pela Ponta da Má Merenda e a sul pela Ponta do Espírito Santo, tem cerca de 2400 m de comprimento e 1100 m de largura máxima (Figura 1).



Figura 1. Porto da Praia da Vitória. Local de galgamentos (Perfil 1) (Fotografia de C. Medeiros).

Enraizado na Ponta da Má Merenda e com a direção norte-sul, encontra-se o chamado quebra-mar norte, com 560 m de comprimento, destinado a dar abrigo às instalações portuárias de apoio à Base Aérea das Lajes. O quebra-mar sul, com cerca de 1300 m de comprimento e um traçado curvo, encontra-se enraizado no lado sul da baía, para abrigar o Cais 12 e as instalações portuárias dos setores comercial e das pescas do porto da Praia da Vitória. A linha de costa da baía caracteriza-se pela existência de uma defesa frontal

aderente com cerca de 1 km de comprimento e de um campo de cinco esporões na zona central que enraízam na defesa frontal. Existem algumas praias ao longo da baía, onde se destaca a Praia Grande, no lado norte. Junto a esta praia encontra-se uma marina com cerca de 210 postos de amarração, cais de receção e infraestruturas de apoio.

A estrutura marítima considerada neste trabalho é o quebra-mar sul do porto e mais concretamente, o trecho que protege o Cais 12 (secção da estrutura em D3). Este trecho tem o manto protetor constituído por tetrápodes e um muro-cortina com 3.9 m de altura (Figura 2).

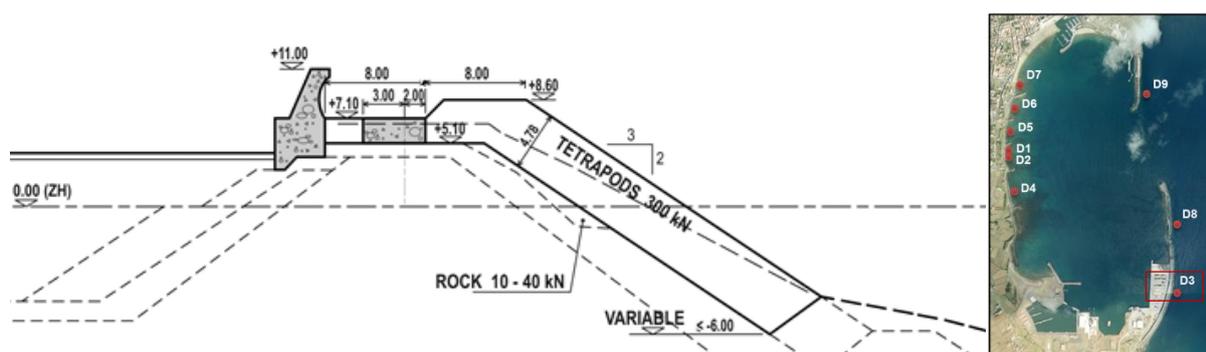


Figura 2. Perfil da secção do quebra-mar sul em D3 (secção que protege o Cais 12).

O objetivo deste trabalho é testar a metodologia desenvolvida para análise da incerteza na avaliação dos prejuízos causados pela ocorrência dos fenómenos de galgamentos e inundação da zona portuária adjacente ao Cais 12, uma vez que esta é a zona do porto mais sujeita a esses fenómenos e com maior impacto económico.

A metodologia envolve a avaliação do caudal médio galgado para diversos níveis da altura significativa do estado de agitação incidente na estrutura. Tal avaliação é um subproduto interessante deste procedimento pois permite identificar as situações de agitação marítima incidente mais críticas para o desempenho da estrutura, algo relevante, por exemplo, para o planeamento de ensaios de galgamento em modelo físico reduzido deste trecho da estrutura, a realizar brevemente para validação dos resultados da ferramenta neuronal.

3.2 Parâmetros base para a aplicação da metodologia

Neste estudo dos galgamentos no Cais 12 do porto da Praia da Vitória, fixaram-se os níveis para a altura significativa do estado de agitação incidente na estrutura com base na distribuição de valores dessa variável, calculados com os modelos numéricos SWAN (Booij, 1999) e DREAMS (Fortes, 2002) a partir das previsões do modelo WAM (Hasselmann *et al.*, 1988) em D3 (Figura 2) para um período de 34 anos. Além dessa distribuição de valores, levou-se também em conta os valores de H_s abaixo dos quais não há galgamentos na estrutura. Resultaram, assim, os níveis indicados na Tabela 1, que inclui as probabilidades de ocorrência de valores no intervalo centrado nos correspondentes valores de H_s , *i.e.*, (Eq. 2):

$$P(H_s^*) = P((H_{si} + H_{si-1})/2 < H_s < (H_{si+1} + H_{si}/2)) \quad (2)$$

Tabela 1. Níveis para a altura significativa do estado de agitação incidente na estrutura.

Nível i	$H_{s(i)}$	$P(\%)$
1	4.0	0.104
2	4.5	0.061
3	5.0	0.045
4	5.5	0.037
5	6.0	0.022
6	6.5	0.020
7	7.0	0.002
8	7.5	0.002

As variáveis relevantes para a determinação do caudal médio galgado e consideradas com carácter aleatório neste estudo foram apenas o período de pico do espectro do estado de agitação marítima incidente na estrutura, T_p , a altura de maré, η , e o ângulo entre o eixo longitudinal da estrutura e as cristas do estado de agitação (assumidas como retilíneas), θ (Figura 3).

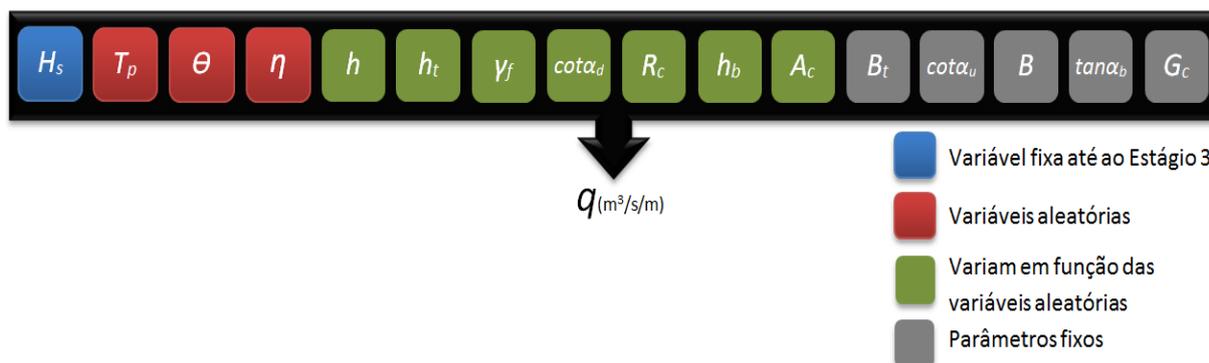


Figura 3. Parâmetros utilizados para a determinação do caudal médio galgado.

Os parâmetros considerados para definir as características geométricas da secção da estrutura em D3 são os seguintes (Figura 3):

- h : profundidade em frente à estrutura [m] (varia com η);
- h_t : profundidade na banquetta do pé do talude [m] (varia com η);
- B_t : largura da banquetta do pé do talude [m];
- γ_f : permeabilidade/porosidade da estrutura/manto [-] (varia em função de R_c/H_s);
- $\cot \alpha_d$: inclinação do talude na parte inferior à berma [-] (varia em função de $\eta - 1.5 H_s$);
- $\cot \alpha_u$: inclinação do talude na parte superior à berma [-];

- R_c : cota de coroamento da parte impermeável da estrutura [m] (varia com η);
- B : largura da berma [m];
- h_b : profundidade na berma [m] (varia em função de $\eta - 1.5 H_s$);
- $\tan \alpha_b$: inclinação da berma relativamente à horizontal [-];
- A_c : cota de coroamento da parte permeável da estrutura [m] (varia com η);
- G_c : largura da berma de coroamento da estrutura [m].

Enquanto para η e para θ as distribuições respetivas não variam com o nível de H_s , o mesmo não acontece com T_p . Para analisar esta variação ajustou-se uma reta aos dados de H_s e T_p obtidos pelo modelo SWAN para um ponto em frente à secção em estudo (Figura 4).

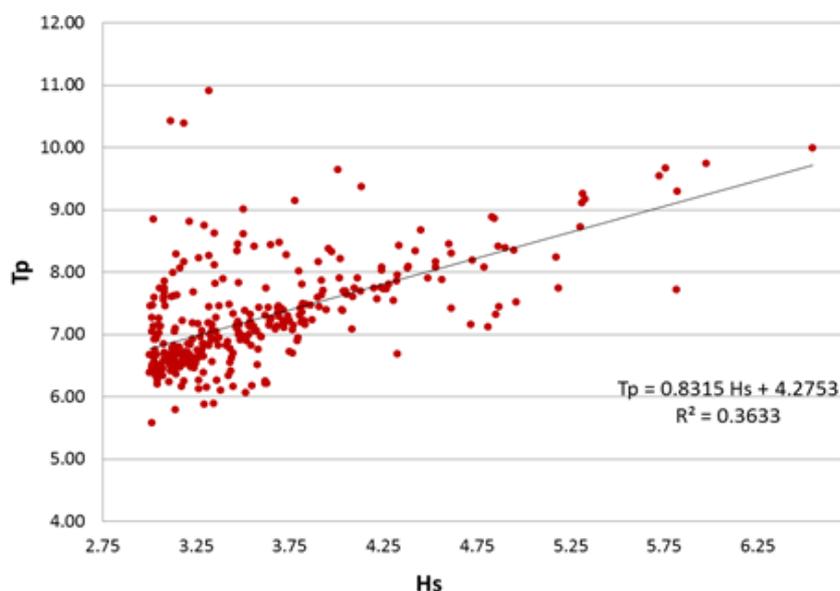


Figura 4. Correlação entre T_p e H_s .

Apesar do valor baixo obtido para o coeficiente de determinação R^2 , verificou-se que a maior dispersão acontece nos valores mais baixos de H_s e T_p . Assim, ajustou-se uma distribuição triangular para limitar os valores de T_p , cujo valor da abcissa correspondente à ordenada máxima é obtido através da expressão $T_p = 0.8315 H_s + 4.2753$ e os valores dos extremos nas abcissas são iguais a $a = T_p - \partial$ e $b = T_p + \partial$, sendo que $\partial = [1.5; 3]$.

Para o nível de maré considerou-se a seguinte variável aleatória (Eq. 3):

$$\eta = \eta_{med} + \eta_{amp} \cos(U(0,2\pi)) \quad (3)$$

em que $\eta_{med} = 1.478$ m é o nível médio do mar, obtido da média entre as alturas de maré extremas observadas, $\eta_{amp} = 0.638$ m é a semi-amplitude da maré calculada como metade da diferença entre as alturas já referidas e $U(0,2\pi)$ é uma variável uniforme com valores entre 0 e 2π .

Para o ângulo entre o eixo longitudinal e as cristas do estado de agitação considerou-se uma variável uniforme com valores entre 0° e 65° .

No cálculo dos valores dos prejuízos associados à ocorrência de galgamentos levou-se em conta os efeitos dos galgamentos nas pessoas, em viaturas e em equipamentos colocados na área eventualmente afetada pelos galgamentos, bem como nas infraestruturas existentes na mesma área (*i.e.*, $r=4$, o número de indicadores considerados). Os prejuízos foram calculados pela (Eq. 4):

$$C_{ji} = \sum_{k=1}^r f_k(q_{ji}) \times Custo_k \quad (4)$$

em que $f_k(q_{ji})$ é o fator de dano em função do caudal médio galgado obtido para cada indicador considerado k , Figura 5.

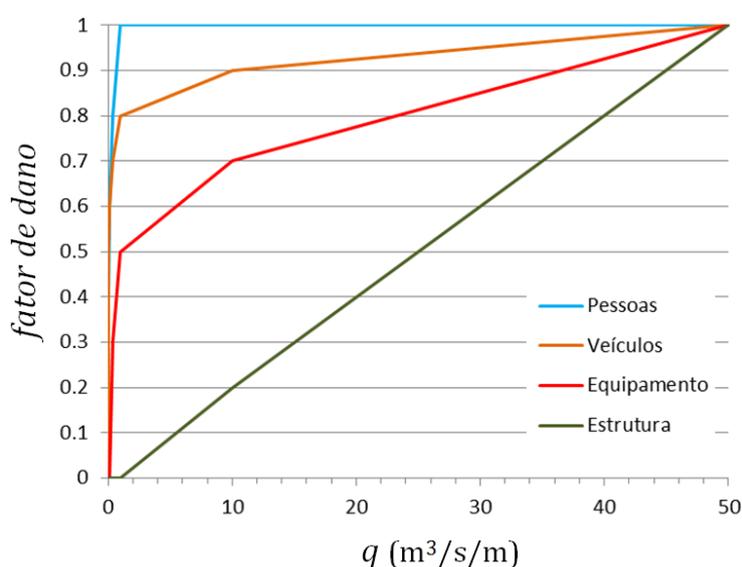


Figura 5. Fator de dano associado a cada indicador considerado para cada caudal baseado nas tabelas de Pullen *et al.* (2007).

Os custos associados a cada indicador foram definidos da seguinte forma (Eq. 5):

$$\begin{aligned} Custo_{veículos} &= 10000\text{€/veículo} \times n^{\circ} \text{veículos} \\ Custo_{pessoas} &= 100000\text{€/pessoa} \times n^{\circ} \text{pessoas} \\ Custo_{estrutura} &= 1000\text{€/m}^2 \times \text{Área afetada}(li) \\ Custo_{equipamento} &= 2500\text{€/m}^2 \times \text{Área afetada}(li) \end{aligned} \quad (5)$$

sendo que o n° de pessoas e o n° de veículos presentes na zona afetada seguem uma função de probabilidade discreta, tal como descrita na Tabela 2.

Tabela 2. Funções de probabilidade para o número de pessoas ou de veículos, x , na região afetada pelo galgamento.

Número x	$P(X = x)$	
	Pessoas	Veículos
0	0.551	0.420
1	0.247	0.255
2	0.111	0.155
3	0.050	0.094
4	0.022	0.057
5	0.010	0.021
6	0.005	0
7	0.002	0
8	0.001	0

Apenas a área da região afetada pelo galgamento varia com o nível da altura significativa (Eq. 6), tendo sido considerada também uma distribuição normal para cada nível.

$$\text{Área afetada}(li) = 10 + 6990 \left(\frac{li-3.5}{3.5} \right)^3 \quad (6)$$

3.3 Resultados e discussão

Para os 10000 valores gerados para cada nível de H_s obtiveram-se os valores do caudal médio galgado apresentados na Tabela 3:

Tabela 3. Caudal médio galgado mínimo, médio, máximo e nº de ocorrências não nulas na amostra de 10000 valores.

	H_s (m)							
	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
Min (m³/s/m)	0.190	0.208	0.225	0.242	0.289	0.401	0.566	0.778
Médio (m³/s/m)	0.193	0.227	0.274	0.369	0.531	0.782	1.173	1.860
Max (m³/s/m)	0.197	0.294	0.445	0.692	1.050	1.688	3.051	5.773
Ocorrência (Max. 10000)	4	1256	7006	9879	10000	10000	10000	10000

Com vista à elaboração de uma matriz de frequências construiu-se a Tabela 4.

Como seria de esperar, a tabela mostra o crescimento com o nível da altura significativa, não só do caudal mínimo, como da gama de caudais.

Partindo das frequências acumuladas do caudal médio galgado para cada nível de altura significativa geraram-se amostras com 10000 valores para o mesmo nível. Essas amostras, em conjunto com as amostras das outras variáveis de carácter aleatório, permitiram calcular os custos associados a cada nível (Eq. 4) e obter a Tabela 5 com os valores mínimo, médio e máximo do custo associado a cada nível, bem como a Tabela 6 com a matriz de frequências acumuladas normalizada para o mesmo custo.

Tabela 4. Matriz de frequências acumuladas normalizada para o caudal médio galgado.

q (m ³ /s/m)	H_s (m)							
	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5	8.0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
0.10	0	0	0	0	0	0	0	0
0.15	0	0	0	0	0	0	0	0
0.20	1	0	0	0	0	0	0	0
0.25	1	0.892	0.316	0.013	0	0	0	0
0.30	1	1	0.786	0.166	0	0	0	0
0.35	1	1	0.952	0.444	0.025	0	0	0
0.40	1	1	0.993	0.705	0.108	0	0	0
0.45	1	1	1	0.865	0.258	0.005	0	0
0.50	1	1	1	0.943	0.447	0.032	0	0
0.55	1	1	1	0.982	0.616	0.089	0	0
0.60	1	1	1	0.995	0.752	0.168	0.001	0
0.65	1	1	1	0.999	0.852	0.275	0.010	0
0.70	1	1	1	1	0.914	0.391	0.032	0
0.75	1	1	1	1	0.953	0.502	0.065	0
0.80	1	1	1	1	0.976	0.603	0.106	0.001
0.85	1	1	1	1	0.989	0.693	0.160	0.004
0.90	1	1	1	1	0.995	0.765	0.232	0.013
0.95	1	1	1	1	0.998	0.823	0.303	0.028
1.00	1	1	1	1	0.999	0.867	0.383	0.056
1.05	1	1	1	1	1	0.902	0.457	0.087
1.10	1	1	1	1	1	0.927	0.524	0.124
1.15	1	1	1	1	1	0.945	0.588	0.172
1.20	1	1	1	1	1	0.959	0.648	0.227
1.25	1	1	1	1	1	0.970	0.703	0.287
1.30	1	1	1	1	1	0.979	0.752	0.346
1.35	1	1	1	1	1	0.986	0.791	0.411
1.40	1	1	1	1	1	0.990	0.830	0.479
1.45	1	1	1	1	1	0.993	0.864	0.548
1.50	1	1	1	1	1	0.996	0.894	0.613
1.55	1	1	1	1	1	0.997	0.920	0.675
1.60	1	1	1	1	1	0.999	0.943	0.747
1.65	1	1	1	1	1	1	0.960	0.812
1.70	1	1	1	1	1	1	0.975	0.875
1.75	1	1	1	1	1	1	0.989	0.939
1.80	1	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 5. Matriz de frequências acumuladas normalizada com 10000 valores para o custo associado a cada nível.

Custo (€)	H_s (m)						
	4.5	5.0	5.5	6.0	6.5	7.0	7.5
0	0	0	0	0	0	0	0
20	0.127	0	0	0	0	0	0
40	0.542	0	0	0	0	0	0
60	0.758	0.018	0	0	0	0.003	0.000
80	0.856	0.181	0	0	0	0.018	0.001
100	0.921	0.472	0.003	0	0	0.065	0.003
120	0.957	0.714	0.014	0.001	0	0.177	0.008
140	0.976	0.856	0.051	0.002	0	0.361	0.017
160	0.986	0.927	0.114	0.006	0.003	0.563	0.038
180	0.992	0.962	0.206	0.015	0.003	0.741	0.077
200	0.995	0.982	0.314	0.030	0.003	0.862	0.133
220	0.997	0.991	0.425	0.055	0.006	0.939	0.217
240	0.998	0.996	0.535	0.089	0.011	0.977	0.322
260	0.999	0.998	0.637	0.136	0.016	0.992	0.442
280	1	0.999	0.730	0.195	0.027	0.998	0.570
300	1	1	0.802	0.262	0.037	1	0.686
320	1	1	0.860	0.332	0.054	1	0.789
340	1	1	0.903	0.407	0.068	1	0.866
360	1	1	0.933	0.488	0.098	1	0.918
380	1	1	0.957	0.566	0.146	1	0.954
400	1	1	0.973	0.640	0.205	1	0.976
420	1	1	0.983	0.716	0.251	1	0.989
440	1	1	0.989	0.783	0.329	1	0.995
460	1	1	0.994	0.848	0.440	1	0.998
480	1	1	0.997	0.904	0.608	1	1
500	1	1	0.999	0.955	0.794	1	1
520	1	1	1	1	1	1	1

Com as distribuições de custos para cada nível de altura significativa é possível gerar amostras de custos para cada nível cujo produto pela probabilidade de ocorrência do nível respetivo, seguido da soma para todos os níveis, permite obter um valor amostral para o risco (Tabela 5). Do tratamento dos valores amostrais obtidos para o risco pode definir-se o histograma de risco mostrado na Figura 6.

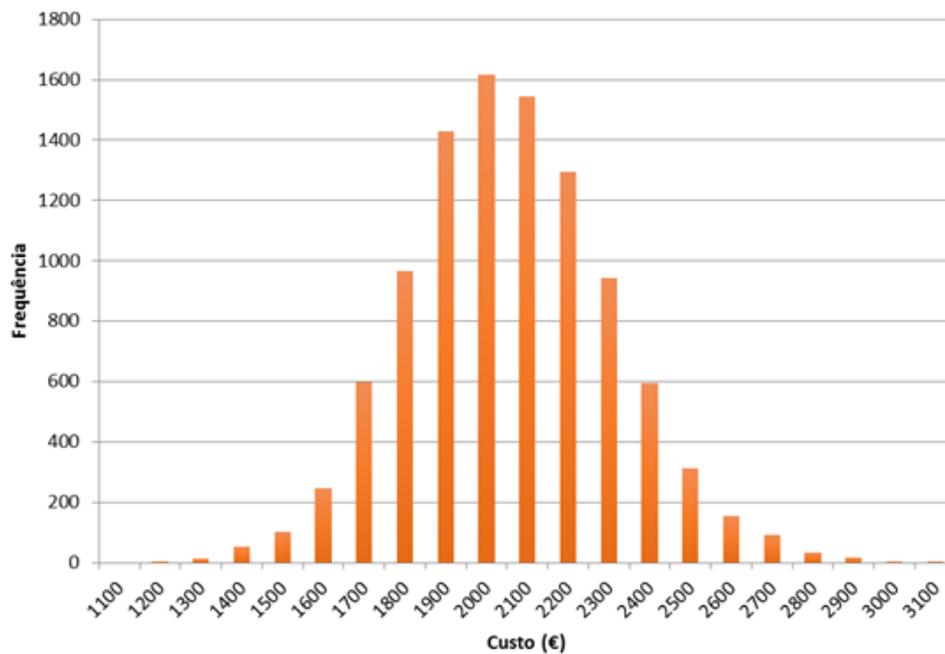


Figura 6. Distribuição de risco obtida de amostra com 10 000 valores aleatórios.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta comunicação trata da implementação da simulação de Monte Carlo para a avaliação do risco associado aos galgamentos no porto da Praia da Vitória, tendo em conta a probabilidade de ocorrência do fenómeno e as consequências associadas ao mesmo. Essas consequências foram definidas em termos de custos, com vista à obtenção de um custo associado ao risco.

O facto de se terem considerado diferentes estágios para esta metodologia possibilita tratar das diferentes componentes do risco de forma independente, isto é, a probabilidade de ocorrência, as consequências dessa ocorrência e o risco.

Uma das limitações existentes no modelo atual diz respeito à simplificação “exagerada” nos custos associados ao fenómeno, pelo que, no futuro será necessário considerar um conjunto mais vasto de variáveis aleatórias para conseguir representar adequadamente todas as características do local que podem ser afetadas, bem como validar as atuais.

Numa próxima etapa será necessário proceder à análise de sensibilidade das variáveis aleatórias consideradas, uma vez que será esse procedimento que permitirá identificar quais as variáveis com maior influência no risco.

Uma avaliação mais minuciosa de uma possível correlação entre parâmetros também será desejável, uma vez que a ferramenta neuronal não apresentou alguns resultados para os valores aleatórios gerados, por estes estarem fora da gama de valores para os quais foram realizados os ensaios que deram origem às redes neurais que estão na base da ferramenta NN_OVERTOPPING2.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o financiamento concedido através do projeto HIDRALERTA, ref. PTDC/AAC-AMB/120702/2010. A obtenção de dados da agitação marítima foi feita no âmbito do projeto ESTRAMAR (FEDER-MAC/3/C117). Agradece-se a ajuda dos colegas E.B. Azevedo, Conceição Rodrigues e Anabela Simões. Agradece-se também o apoio dos Portos dos Açores (Francisco Silva) e da Câmara Municipal de Praia da Vitória.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *J. Geographical Res.*, C4(104), 7649-7666.

Coeveld, E.M., Van Gent, M.R.A., Pozueta, B. (2005). *Neural Network: Manual NN_OVERTOPPING2*. CLASH WP8 – Report.

Fortes, C.J.E.M. (2002). *Transformações Não Lineares de Ondas em Zonas Portuárias. Análise pelo Método dos Elementos Finitos*. Tese de Doutoramento, Eng. Mecânica, IST.

Gouldby, B., Kingston, G. (2007). Uncertainty and Sensitivity Analysis Method for Flood Risk Analysis. HR Wallingford, Report no. T024-10-07 of FLOODsite Project, October 2007. Wallingford, UK.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Janssen, P.A.E.M., Bauer, E., Komen, G.J., Bertotti, L., Lionello, P., Guillaume, A., Cardone, V.C., Greenwood, J.A. (1988). The WAM model - A third generation ocean wave prediction model. *Journal of Physical Oceanography*, 18, 1775-1810.

Neves, D.R., Santos, J.A., Reis, M.T., Fortes, C.J.E.M., Simões, A., Azevedo, E.B., Rodrigues, M.C. (2012). Metodologia de avaliação do risco associado ao galgamento de estruturas marítimas. Aplicação ao porto e à baía da Praia da Vitória, Açores, Portugal. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 12(3), 291-312.

Poseiro, P., Fortes, C., Reis, M.T., Santos, J.A. (2014). Aplicações do sistema de previsão e alerta do risco de galgamentos em zonas costeiras e portuárias: Costa da Caparica e Praia da Vitória. In *Atas do VI SEMENGO – Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*. Rio Grande, Brasil.

Poseiro, P., Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Santos, J.A., Simões, A., Rodrigues, C., Azevedo, E. (2013a). A methodology for overtopping risk assessment in port areas: Application to the Port of Praia da Vitória (Azores, Portugal). In *Proc. SCACR 2013, 6th International Conference on Applied Coastal Research*. Lisboa, Portugal.

Poseiro, P., Fortes, C.J.E.M., Santos, J.A., Reis, M.T., Craveiro, J. (2013b). Aplicação do processo de análise hierárquica (AHP) à análise das consequências de ocorrência de galgamentos. O caso da baía da Praia da Vitória. In *Atas das 8^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. LNEC, Lisboa, Portugal.

Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H., Van der Meer, J.W. (2007). *EurOtop: Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: Assessment Manual*. Environment Agency, UK, Exper. Netwerk Waterkeren, NL, Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, DE, August.

Raposeiro, P.D., Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Ferreira, J.C. (2010). Development of a methodology to evaluate the flood risk at the coastal zone. In *Geographic Techs. Applied to Mar. Spatial Plan. and Int. Coastal Zone Manag.*, 129-137.

Tolman, H. (1999). *User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III. Version 1.18*. NOAA/NWS/NCEP/OMB, Technical Note 166. Washington, E.U.A.