



PORTO DA PRAIA DA VITÓRIA. ESTIMATIVA DOS GALGAMENTOS DA PROTECÇÃO MARGINAL DA BAÍA.

Eunice Silva¹, João Alfredo Santos¹, Maria Teresa Reis²

¹ Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL)

² Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)

RESUMO

O objectivo principal do presente trabalho é o estudo dos galgamentos de estruturas marítimas tendo em vista a modelação do fenómeno na análise de risco e em sistemas de alerta.

Sendo o cálculo dos galgamentos a operação fundamental para a análise que se pretende efectuar, utilizaram-se formulações empíricas e uma ferramenta desenvolvida com base em redes neuronais para determinar os caudais médios de galgamento.

Compararam-se os resultados das várias ferramentas no cálculo dos galgamentos em dois pontos da protecção marginal da baía da Praia da Vitória (Ilha Terceira, Açores). As características da agitação marítima incidente foram obtidas da propagação dos estados de agitação fornecidos por modelos de escala regional para a agitação marítima gerada pelo vento.

Relativamente aos resultados obtidos com as diferentes ferramentas de cálculo confirma-se que o estudo dos caudais médios de galgamento não deve ser efectuado com recurso a uma única ferramenta de cálculo, pois a disparidade das estimativas resultantes das mesmas alerta-nos para a existência de situações imprevistas. Todas as ferramentas apresentam limitações, pelo que a sua utilização se deve restringir à fase de estudo prévio de um projecto. Em fase de projecto de execução, é muito importante a realização de ensaios em modelo físico reduzido.

Palavras-chave: Galgamentos, Fórmulas empíricas, Redes neuronais.

1. INTRODUÇÃO

O galgamento é um dos fenómenos mais importantes que ocorrem em estruturas marítimas e que influencia o seu comportamento. O fenómeno pode ser caracterizado pelo caudal que transpõe a estrutura exposta à acção directa das ondas. Sendo o principal objectivo das estruturas marítimas a protecção e o abrigo, a existência de galgamentos pode originar a ocorrência de danos pessoais, inundações e outros prejuízos.

O galgamento de estruturas marítimas em zonas costeiras e portuárias é uma matéria de grande importância para a avaliação, quer do risco de falha das próprias estruturas, quer dos riscos ligados à inundações dessas zonas. Trata-se de uma temática importante em Portugal, dada a severidade do clima de agitação marítima, a dimensão da costa, a fixação da população e das actividades económicas nas zonas costeiras e o interesse dos portos para a economia nacional. É clara a necessidade de prever situações de risco nessas zonas, de forma a reduzir os prejuízos associados a este fenómeno e a minimizar a perda de vidas.

A segurança e funcionalidade destas zonas dependem, em grande parte, do comportamento das estruturas marítimas que as abrigam, especialmente no que concerne à sua estabilidade e galgamento. É cada vez mais exigida uma quantificação dos riscos e um acréscimo de fiabilidade das estruturas marítimas, o que torna indispensável a existência de ferramentas rigorosas e eficazes para o estudo da estabilidade e do galgamento.

Face ao carácter irregular da agitação marítima que solicita as zonas costeiras, à diversidade das soluções construtivas e aos diferentes materiais empregues, a estimativa do caudal galgado por unidade de comprimento de determinada estrutura marítima é um processo complexo e que deve ser efectuado levando em conta os valores daquelas variáveis para a estrutura em causa. No entanto, o tempo e os recursos associados a um procedimento tão detalhado são proibitivos. Por essa razão, é comum a utilização de expressões empíricas e semi-empíricas baseadas em resultados de ensaios em modelo físico. Importa referir que a aplicação directa de tais formulações é limitada às condições específicas da agitação e às configurações das estruturas consideradas nos ensaios que originaram aquelas fórmulas.

A modelação física continua a ser o método mais fiável para caracterizar o galgamento, de estruturas marítimas. Contudo, o tempo e o custo associados à sua construção e operação, para além das infra-estruturas, equipamentos e operadores qualificados necessários limitam a utilização da modelação física a estudos de grande importância e à fase de projecto de execução.

Recentemente, a melhoria dos meios de cálculo e o desenvolvimento de modelos numéricos mais eficazes tornaram comum a utilização deste tipo de modelos na determinação dos caudais que galgam estruturas marítimas. Os modelos numéricos são cada vez mais atractivos pois são mais económicos e mais rápidos do que a modelação física. Além disso, uma vez feita a calibração e validação de um modelo deste género, o mesmo é relativamente flexível em relação à geometria da estrutura e às condições de agitação marítima. Embora ainda não existam modelos numéricos que sejam simultaneamente precisos e eficientes do ponto de vista computacional, os vários modelos disponíveis apresentam, individualmente, algumas destas propriedades.

O uso de redes neuronais tem tido também um papel importante na determinação dos galgamentos. A ferramenta NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al. 2005), baseada na análise de redes neuronais e desenvolvida no âmbito do Programa Europeu CLASH (Coeveld et. al. 2005; Van Der Meer et. al. 2005; Van Gent et. al. 2005), tem fornecido importantes avanços nesta matéria.

Nesta comunicação, analisam-se os valores produzidos por várias metodologias para avaliação dos caudais médios de galgamento em estruturas marítimas. Assim, recorreu-se à utilização de fórmulas empíricas e da ferramenta NN_OVERTOPPING2.

No presente trabalho, no ponto 2, faz-se uma breve introdução ao fenómeno do galgamento e explicitam-se os limites admissíveis para os caudais médios de galgamento. No ponto 3, descrevem-se as ferramentas empíricas aplicáveis, sendo a apresentação do caso de estudo da protecção marginal da baía da Praia da Vitória feita no ponto 4. A descrição da metodologia de cálculo dos galgamentos através das ferramentas empíricas é realizada no ponto 5. No ponto 6 são apresentados e analisados os resultados obtidos com as diferentes ferramentas. A comunicação termina no ponto 7, com as principais conclusões do estudo.

2. GALGAMENTO DE ESTRUTURAS MARÍTIMAS

2.1. Considerações Gerais

O galgamento de uma estrutura marítima caracteriza-se por uma transmissão de energia inserida num conjunto de processos da interacção onda-estrutura. Parte da energia de uma onda incidente é dissipada de várias formas (tais como, rebentação, atrito ou percolação), outra parte é reflectida e a excedente dá origem ao escoamento que ocorre sobre a estrutura.

O galgamento é, habitualmente, descrito como um caudal médio por metro linear de desenvolvimento do coroamento da estrutura de protecção marginal, q ($m^3/s/m$). As ocorrências de galgamentos são muito irregulares, quer em termos temporais, quer em termos de volume. As ondas mais altas farão galgar um maior volume de água sobre o coroamento num curto período de tempo, enquanto ondas mais pequenas não provocarão sequer galgamentos.

A partir dos valores médios do caudal galgado é possível definir os efeitos que cada gama de caudais médios por metro linear poderá provocar, quer na estrutura galgada, quer nas pessoas, veículos, navios, edifícios e equipamento localizados na zona abrigada pela estrutura (Pullen et al. 2007).

Existem três tipos possíveis de galgamento, consoante o modo como o volume de água passa sobre a estrutura: i) quando o espraiamento é muito grande e se cria uma lâmina contínua de água que passa sobre a estrutura, verifica-se um galgamento por “green water”; ii) quando a onda rebenta sobre a parede exterior da obra e origina um grande volume de salpicos que passam sobre a estrutura, o galgamento denomina-se “splash”; e iii) apenas por acção do vento, podem ocorrer galgamentos sobre a forma de borrifos, denominando-se então “spray” ou “white water”.

2.2. Valores Admissíveis de Galgamento

Quando se procede ao dimensionamento de uma estrutura marítima, à avaliação do risco de ocorrência de galgamento ou à criação de um sistema de alerta de ocorrência de galgamentos, um critério indispensável a considerar é o chamado valor admissível de galgamento, usualmente definido por um valor máximo do caudal médio de galgamento por metro linear da estrutura, q . Tal valor depende das consequências económicas da inundação provocada pelo galgamento, do tipo de actividade desenvolvida na zona protegida pela estrutura, do perfil da estrutura galgada e da necessidade de garantir a segurança de pessoas e infraestruturas localizadas na zona protegida pela estrutura. Nos quadros seguintes, apresentam-se os valores críticos de q recomendados no actual manual dos galgamentos (Pullen et al. 2007).

Quadro 1 - Valores críticos do caudal médio de galgamentos para a estrutura marítima (adaptado de Pullen et al. 2007)

Condições e Tipo de Danos		Caudal médio q (m ³ /s/m)
Estrutura de defesa com talude no tardoz	Sem danos se o coroamento e o tardoz estiverem bem protegidos	0.05 - 0.2
	Sem danos no coroamento e no tardoz de um dique de argila coberto por relva	0.001 - 0.01
	Sem danos no coroamento e no tardoz mesmo se não estiverem protegidos	0.0001
Defesas frontais	Danos em zonas de circulação pavimentadas localizadas atrás da defesa frontal	0.2
	Danos em zonas de circulação relvadas ou levemente protegidas	0.05

Quadro 2 - Valores críticos do caudal médio de galgamentos para pessoas (adaptado de Pullen et al. 2007)

Condições e Tipo de Danos	Caudal médio q (m ³ /s/m)
Pessoal treinado, com equipamento e calçado adequado, com percepção de que se pode molhar, galgamento gera escoamentos de pouca altura, sem jactos de água a cair, perigo reduzido de queda para o mar	0.001 - 0.01
Pessoas cientes, com visão clara do mar, que não ficam facilmente perturbadas ou assustadas, capazes de tolerar o facto de ficarem molhadas, que se deslocam numa zona larga ⁽¹⁾	0.0001

⁽¹⁾ Estas condições não têm que se verificar em simultâneo.

Quadro 3 - Valores críticos do caudal médio de galgamentos para veículos
(adaptado de Pullen et al. 2007)

Condições e Tipo de Danos	Caudal médio q ($m^3/s/m$)
Circulação a baixa velocidade, galgamento gera escoamentos de pouca altura (<i>pulsating overtopping</i>), sem jactos de água a cair na via, veículo não imerso	0.01 - 0.05 ⁽¹⁾
Circulação a velocidade moderada ou alta, galgamento projectado com grande velocidade (<i>impulsive overtopping</i>) ou com jactos de água a cair na via que podem imergir o veículo	1×10^{-5} - 5×10^{-5} ⁽²⁾

⁽¹⁾ Estes limites estão relacionados com o galgamento efectivo obtido na via de circulação.

⁽²⁾ Estes limites estão relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima, mas é assumido que a via de circulação se encontra imediatamente atrás da estrutura.

Quadro 4 - Valores críticos do caudal médio de galgamentos para barcos, edificios e equipamento localizado na zona abrigada pela estrutura (adaptado de Pullen et al. 2007)

Condições e Tipo de Danos	Caudal médio q ($m^3/s/m$)
Danos significativos ou afundamento de grandes barcos	0.05
Afundamento de barcos pequenos localizados a 5-10m da estrutura	0.01 ⁽¹⁾
Danos em grandes barcos	0.001 ⁽²⁾
Danos em edificios	0.0004 ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Estes limites estão relacionados com o galgamento obtido na estrutura marítima.

⁽²⁾ Estes limites estão relacionados com o galgamento efectivo obtido no edificio.

É de destacar o facto de, nos quadros acima, a gama de caudais médios por metro linear de estrutura, q , tomar valores desde $1 \times 10^{-5} m^3/s/m$ (para veículos) até $0.2 m^3/s/m$ (para a estrutura galgada). Com o objectivo de garantir a segurança de pessoas que se encontram na proximidade da estrutura marítima, é ainda referido no manual (Pullen et al. 2007) um caudal admissível de galgamento inferior ao menor valor indicado no Quadro 2, $q=3 \times 10^{-5} m^3/s/m$, nas situações excepcionais em que as pessoas estão totalmente desprevenidas, que não conseguem observar a agitação incidente, que podem facilmente ficar assustadas ou perturbadas, que não estejam vestidas de forma apropriada para se molharem ou que se desloquem numa zona estreita ou propícia a tropeções e quedas.

Considera-se também relevante referir, como regra expedita apresentada no manual (Pullen et al. 2007), que o caudal efectivo de galgamento num ponto x -metros atrás do coroamento da estrutura galgada pode ser estimado por redução do galgamento obtido na estrutura, q , por um factor de x , para x num intervalo de 5 a 25m. Em suma, o galgamento a uma distância x da estrutura, q_x , é dado por $q_x=q/x$. A aplicação dessa regra expedita pode ter interesse na medida em que os caudais admissíveis referidos nos quadros acima têm como referência o ponto de interesse, por exemplo, a estrada, o passeio ou um edificio, que se encontram alguns metros afastados do coroamento da estrutura.

3. MÉTODOS DE CÁLCULO

Neste estudo utilizam-se quatro formulações empíricas para determinar os caudais médios de galgamento da protecção marginal da baía da Praia da Vitória. São elas: as propostas pelo actual manual dos galgamentos (Pullen et al. 2007), pelo antigo manual dos galgamentos do Reino Unido (Besley 1999), a fórmula de Bradbury e Allsop (1988) e a fórmula de Pedersen (Pedersen 1996). Os resultados obtidos da aplicação destas fórmulas são

analizados em paralelo com os valores obtidos com uma ferramenta baseada em redes neuronais, NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al. 2005).

3.1. Fórmulas Empíricas

As expressões empíricas para o cálculo do galgamento de estruturas marítimas apresentam a vantagem de terem uma implementação bastante rápida e económica. Todavia, estão restringidas a um número limitado de configurações, representando estruturas simplificadas. A sua aplicação a outro tipo de configuração, que não o mais simples, pode implicar extrapolações, que podem conduzir à obtenção de resultados afastados da realidade.

As expressões empíricas têm origem em resultados obtidos em modelo reduzido, para estruturas com uma geometria específica. Tais resultados são aproximados por uma lei que irá descrever o fenómeno em estudo.

3.1.1. Pullen et al. (2007)

No actual manual dos galgamentos (Pullen et al. 2007) são apresentadas duas abordagens para a estimativa do caudal de galgamento, nomeadamente uma abordagem determinística e outra probabilística. A abordagem determinística é mais aconselhável para o dimensionamento, pois trata-se de uma estimativa não apenas do caudal médio de galgamento, mas de um caudal médio acrescido de uma margem de segurança que normalmente toma o valor de uma vez o desvio padrão da fórmula. A abordagem probabilística fornece a estimativa do valor médio do caudal de galgamento, conduzindo sempre a resultados inferiores aos obtidos na abordagem determinística. É aconselhada para comparação com medições em laboratório ou no protótipo e, como tal, será utilizada neste trabalho.

A expressão proposta pelo manual para o cálculo probabilístico do caudal médio de galgamento em quebra-mares de taludes revestidos por enrocamento é (Pullen et al. 2007):

$$\frac{q}{\sqrt{g \times H_{m0}^3}} = 0.2 \times \exp\left(-2.6 \frac{R_c}{H_{m0} \times \gamma_f \times \gamma_\beta}\right) \quad (1)$$

onde:

q – caudal médio de galgamento (m³/s/m)

g – aceleração da gravidade (9.81 m/s²)

H_{m0} – altura significativa espectral (m)

R_c – distância entre o nível de repouso e o coroamento da estrutura (m)

γ_f – factor de correcção do galgamento para ter em linha de conta a permeabilidade e rugosidade do talude (Quadro 5)

γ_β – factor de correcção do galgamento para ter em linha de conta a obliquidade das ondas

Quadro 5 - Factor de correcção do galgamento para ter em linha de conta a permeabilidade e rugosidade de um talude de enrocamento a 1:1.5 (adaptado de Pullen et al. 2007)

Tipo de revestimento	γ _f
Enrocamento (1 camada, núcleo impermeável)	0.60
Enrocamento (1 camada, núcleo permeável)	0.45
Enrocamento (2 camadas, núcleo impermeável)	0.55
Enrocamento (2 camadas, núcleo permeável)	0.40

O factor de correcção do galgamento para ter em linha de conta a obliquidade das ondas, γ_β , é dado pela expressão:

$$\gamma_\beta = 1 - 0.063 \times |\beta| \text{ para } 0 \leq |\beta| \leq 80^\circ \quad (2)$$

onde β é o ângulo entre a direcção de propagação das ondas e a direcção perpendicular à estrutura. (Figura 1). Quando a onda for quase colinear com o eixo longitudinal da estrutura, $|\beta| > 80^\circ$, continua a utilizar-se a equação (2) mas com $|\beta| = 80^\circ$.

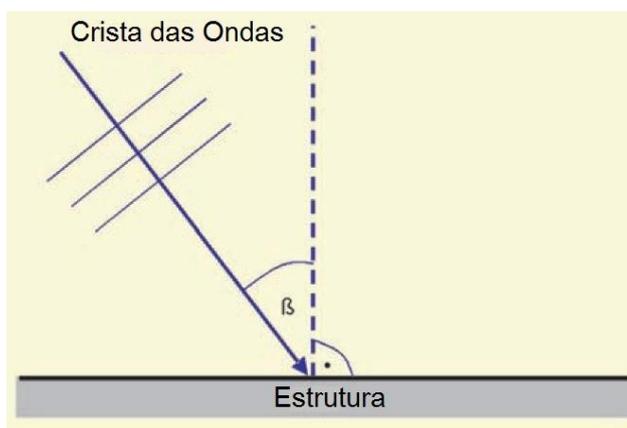


Figura 1 – Representação esquemática do ângulo β (adaptado de Pullen et al. 2007)

Para que se tenha em conta a existência de uma berma no topo do talude, o caudal q deve ser multiplicado por um factor de correcção, C_r , obtendo-se o caudal médio por metro linear de estrutura na base do muro, q' ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$):

$$q' = q \times C_r \quad (3)$$

$$C_r = 3.06 \times \exp\left(-1.5 \times \frac{G_c}{H_{m0}}\right) \quad (4)$$

$$\text{com } C_{r \text{ máx}} = 1$$

onde G_c é a largura da berma do coroamento.

3.1.2. Besley (1999)

Segundo Besley (1999), a expressão que permite obter o caudal médio de galgamento, para quebra-mares de taludes é:

$$A_c^* = \frac{A_c}{(T_m \times (g \times H_s)^{0.5})} \quad (5)$$

$$q^* = A \times \exp\left(\frac{-B \times A_c^*}{\gamma_f}\right) \text{ para } 0.02 < A_c^* < 0.3 \quad (6)$$

$$q = q^* \times T_m \times g \times H_s \quad (7)$$

onde:

A_c – distância entre o nível de repouso e a berma do coroamento (m)

T_m – período médio do estado de agitação (s)

H_s – altura significativa do estado de agitação (m)

A e B – coeficientes empíricos da fórmula em função da inclinação do talude (Quadro 6)

γ_f – factor de correcção do galgamento para ter em linha de conta a permeabilidade e rugosidade do talude (Quadro 7)

q^* – q adimensional

A^*_c – A_c adimensional

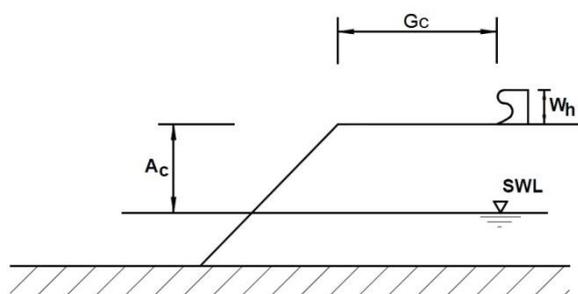


Figura 2 - Representação esquemática da estrutura tipo segundo Besley (adaptado de Besley 1999)

Quadro 6 - Coeficientes empíricos em função da inclinação do talude (Besley 1999)

Inclinação do talude	A	B
1:1	7.94×10^{-3}	20.1
1:1.5	8.84×10^{-3}	19.9
1:2	9.39×10^{-3}	21.6
1:2.5	1.03×10^{-2}	24.5
1:3	1.09×10^{-2}	28.7
1:3.5	1.12×10^{-2}	34.1
1:4	1.16×10^{-2}	41.0
1:4.5	1.20×10^{-2}	47.7
1:5	1.31×10^{-2}	55.6

Quadro 7 - Factor de correcção do galgamento para ter em linha de conta a permeabilidade e rugosidade de um talude de enrocamento (adaptado de Besley 1999)

Tipo de estrutura	γ_f
Enrocamento (1 camada, núcleo impermeável)	0.80
Enrocamento (1 camada, núcleo permeável)	0.55 – 0.60
Enrocamento (2 camadas)	0.50 - 0.55

Para que se tenha em conta a existência de uma berm de coroamento, o caudal q calculado deve ser multiplicado pelo factor de correcção, C_r , da equação (4):

$$q' = q \times C_r \quad (8)$$

Da mesma forma que se utiliza um factor de correcção do galgamento devido à existência da berm de coroamento, também se determina um parâmetro, D_f , que tem em conta a existência de um muro-cortina de altura W_h (Figura 2), que por sua vez vai ser multiplicado a q' para fornecer o caudal médio galgado por metro linear de estrutura após o muro, q'' ($m^3/s/m$):

$$q'' = q' \times D_f \quad (9)$$

O factor D_f é obtido do gráfico da Figura 3 partindo de Q_c^* e de W^* :

$$W^* = \frac{W_h}{A_c} \quad (10)$$

$$Q_c^* = q^* \times C_r \quad (11)$$

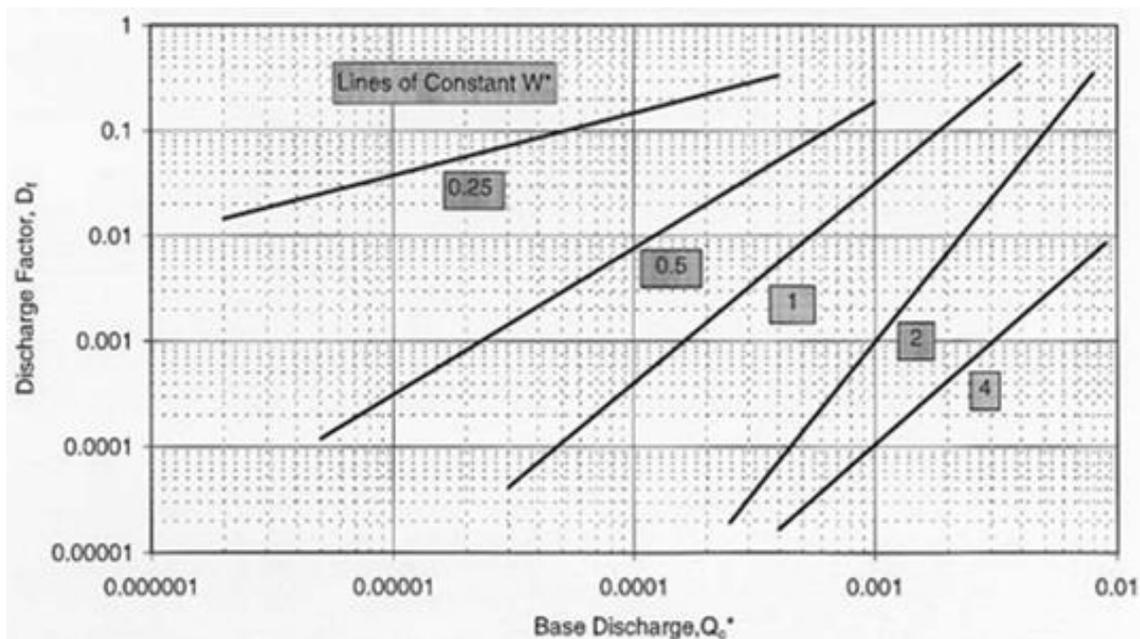


Figura 3 - Gráfico para a determinação do factor D_f (Besley 1999)

Finalmente, para que seja considerado o ângulo de ataque das ondas, existe também um factor de correcção, γ_β , a multiplicar pelo caudal q'' caso o ângulo β não seja nulo (incidência das ondas normal à estrutura), para fornecer o caudal médio galgado por metro linear de estrutura após o muro tendo em conta a obliquidade das ondas, q_β ($m^3/s/m$):

$$q_\beta = \gamma_\beta \times q'' \quad (12)$$

$$\gamma_{\beta} = -1.18 \times \ln(D_f) - 0.40 \quad (13)$$

onde deve ser considerado um valor mínimo de $\gamma_{\beta}=0.1$, quer o valor calculado através da equação (12) seja inferior ao mesmo, quer o ângulo β seja superior a 45°.

3.1.3. Bradbury e Allsop (1998)

A fórmula definida por estes autores foi testada para estruturas de núcleo impermeável e com um talude com uma inclinação de 1:2. Mas, posteriormente, Aminti e Franco (1988) definiram os coeficientes empíricos aplicáveis à formulação proposta por Bradbury e Allsop (1988) para núcleos não totalmente impermeáveis e taludes com inclinações de 1:2 e 3:4:

$$R^*_c = \left(\frac{R_c}{H_s}\right)^2 \times \sqrt{\frac{s_{0m}}{2\pi}} \quad (14)$$

$$q^* = A \times R^*_c^{-B} \quad (15)$$

$$q = q^* \times g \times T_m \times H_s \quad (16)$$

$$L_{0m} = \frac{g \times T_m^2}{2\pi} \quad (17)$$

$$s_{0m} = \frac{H_s}{L_{0m}} \quad (18)$$

onde:

R^*_c – R_c adimensional

s_{0m} – declividade do estado de agitação em grandes profundidades

A, B – coeficientes empíricos de Aminti e Franco (Quadro 8)

L_{0m} – comprimento de onda em grandes profundidades cujo período é T_m (m)

Quadro 8 – Coeficientes de Aminti e Franco para mantos de enrocamento (adaptado de USACE 2006)

Talude	G_c/H_s	A	B
1:2	1.10	1.67×10^{-8}	2.41
	1.85	1.85×10^{-7}	2.30
	2.60	2.27×10^{-8}	2.68
3:4	1.10	5.05×10^{-8}	3.10
	1.85	6.83×10^{-8}	2.65
	2.60	3.07×10^{-8}	2.69

3.1.4. Pedersen (1996)

A equação proposta por Pedersen (1996) é aplicável a estruturas de talude permeável com uma berma de coroamento e um muro-cortina:

$$q^* = \frac{q \times T_m}{L_{0m}^2} = 3.2 \times 10^{-5} \times \frac{H_s^5}{R_c^3 \times A_c \times G_c \times \cot \alpha} \quad (19)$$

onde α é o ângulo (em graus) do talude com a horizontal.

A fórmula de Pedersen é aplicável se os parâmetros utilizados se encontrarem dentro das gamas de aplicabilidade apresentadas no Quadro 9, onde ξ é o número de Iribarren:

$$\xi = \frac{tg\alpha}{\frac{H_s}{\sqrt{L_{om}}}} \quad (20)$$

Quadro 9 – Gamas de aplicabilidade dos parâmetros da fórmula de Pedersen (1996)

Parâmetros da Fórmula	Gamas de Aplicabilidade
ξ	1.1 – 5.1
H_s/A_c	0.5 – 1.7
R_c/A_c	1 – 2.6
A_c/G_c	0.3 – 1.1
$\cotg\alpha$	1.5 – 3.5

3.2. NN_OVERTOPPING2

A ferramenta de cálculo NN_OVERTOPPING2 foi desenvolvida no âmbito do projecto europeu CLASH - *Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network Prediction and Hazard Analysis on Permissible Overtopping* (Coeveld et. al. 2005; Van Der Meer et. al. 2005; Van Gent et. al. 2005). Esta iniciativa financiada pela União Europeia abordou a problemática da modelação e previsão do caudal médio galgado numa variada gama de estruturas marítimas, em protótipo e em laboratório, tendo como objectivos principais a análise de efeitos de escala e o desenvolvimento de um método de previsão do caudal médio galgado baseado em redes neuronais.

A ferramenta resulta da análise conjunta de 700 redes neuronais. Os valores do caudal médio de galgamento calculados pela ferramenta e os intervalos de confiança associados têm como base cerca de 8400 combinações de input-output resultantes de ensaios em modelo físico para várias características de agitação e diferentes tipos de estrutura, como por exemplo, quebra-mares de taludes, de estrutura mista ou verticais. São utilizados 15 parâmetros de entrada, que incluem informação relativa à agitação marítima e à geometria da estrutura, conferindo-lhe uma maior flexibilidade do que as fórmulas empíricas (Figura 4).

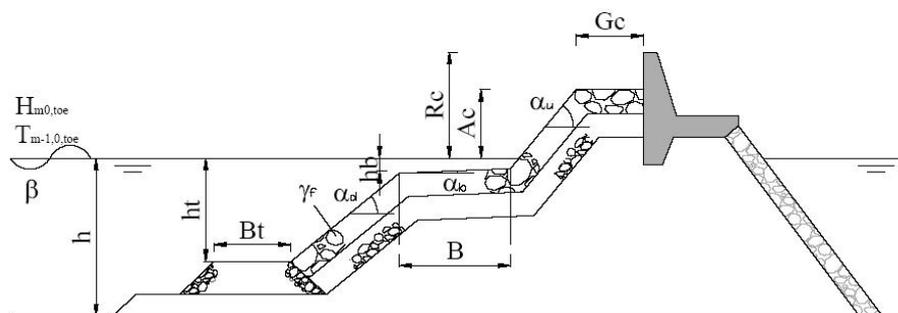


Figura 4 - Parâmetros de entrada da ferramenta NN_OVERTOPPING2 (Coeveld et al. 2005).

Tal como indicado na Figura 4, os parâmetros de entrada referentes à influência da agitação marítima são β , $H_{m0, Toe}$ e $T_{m-1,0, Toe}$, em que:

$H_{m0, Toe}$ – altura significativa espectral no pé da estrutura (m)

$T_{m-1,0, Toe}$ – período médio espectral no pé da estrutura (s)

Os parâmetros de entrada referentes às características da estrutura são h , h_t , B_t , γ_f , $cot\alpha_d$, $cot\alpha_u$, R_c , B , h_B , $\tan\alpha_B$, A_c e G_c , em que:

h – altura de água no pé da estrutura (m)

h_t – profundidade de água na banquetta de pé do talude (m)

B_t – largura da banquetta de pé do talude (m)

α_d – ângulo do talude com a horizontal imediatamente abaixo da berma (°)

α_u – ângulo do talude com a horizontal imediatamente acima da berma (°)

B – largura da berma da estrutura (m)

h_B – profundidade de água na berma da estrutura (m)

α_B – ângulo que a berma faz com a horizontal (°)

4. CASO DE ESTUDO

4.1. Caracterização Geral do Local

A baía da Praia da Vitória localiza-se na costa Este da ilha Terceira, no arquipélago dos Açores, Portugal (Figura 5). Na zona sul da baía está localizado o porto da Praia da Vitória e na zona norte encontra-se uma marina e o terminal de abastecimento da base aérea nº4. As estruturas de protecção das infra-estruturas portuárias referidas, o molhe sul e o molhe norte, definem a baía, que apresenta uma área com aproximadamente 2km².



Figura 5 – Baía da Praia da Vitória (Reis et al. 2011)

A linha de costa desta baía é caracterizada pela existência de uma defesa frontal aderente com cerca de 1km de comprimento (Figuras 6 a 8) e de um campo de esporões na zona central que nascem na defesa frontal e são designados como esporões 1 a 5 de sul para norte. Próximo do enraizamento do esporão 3 encontra-se um edifício no qual funciona um bar (Figura 8). Entre alguns dos esporões existem pequenas praias, nas quais a quantidade de areia vai diminuindo à medida que se avança para sul, sendo a praia mais extensa a que se localiza entre o esporão 5 e a marina.



Figura 6 – Marginal da Praia da Vitória (Reis et al. 2011)

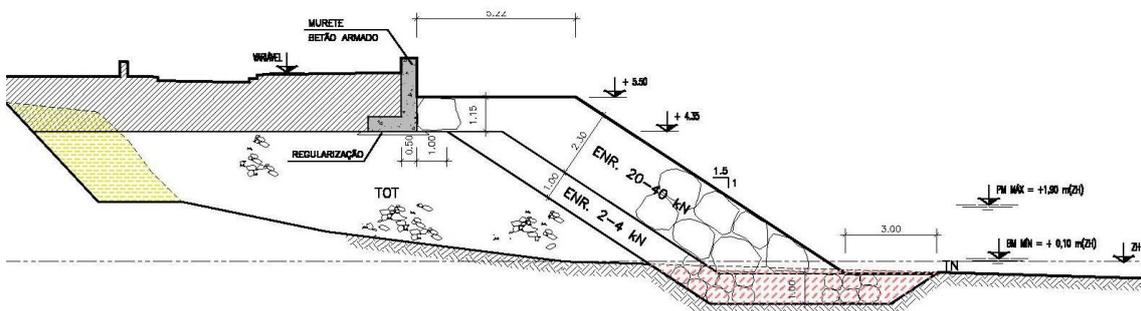


Figura 7 – Perfil tipo da defesa frontal (Reis et al. 2011)

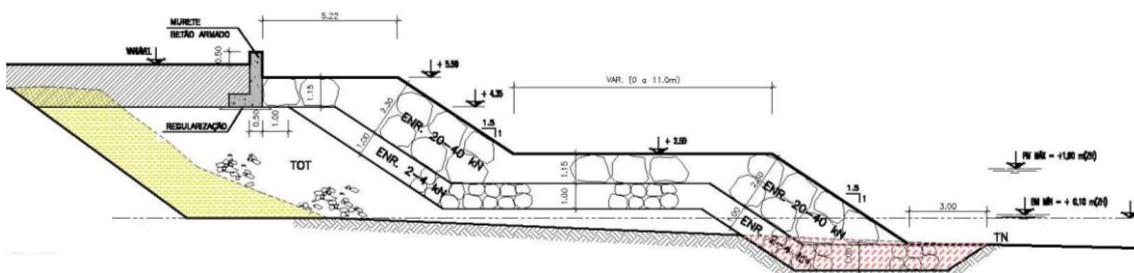
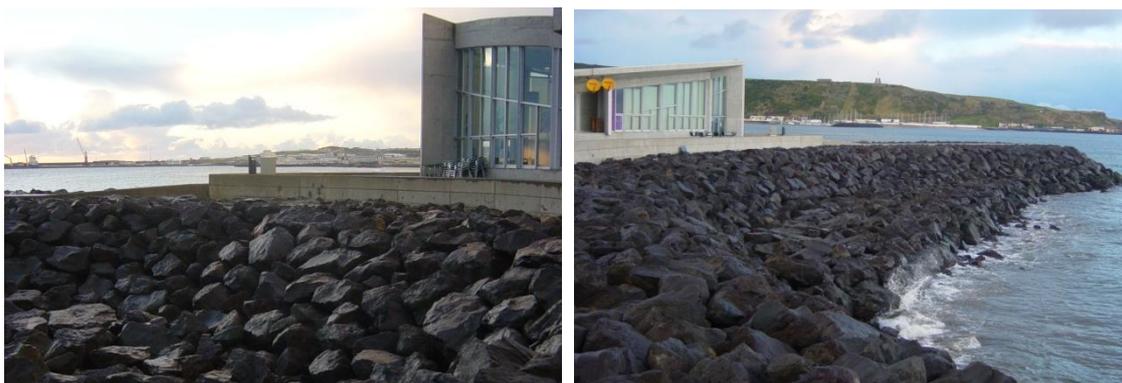


Figura 8 – Perfil tipo da defesa frontal junto ao esporão 3 (Reis et al. 2011)

4.2. Caudais de Galgamento Admissíveis

A ocorrência de galgamentos na zona em estudo pode originar estragos na defesa frontal, na estrada marginal e no edifício localizado no enraizamento do esporão 3, e pode ainda condicionar a utilização em segurança da estrada marginal e dos passeios por veículos e por pessoas. Assim, e de acordo com os quadros apresentados em 2.2, os caudais efectivos admissíveis adoptados são:

Estrutura galgada e estrada marginal: $0.2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

Veículos: $0.01 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

Edifício: $0.001 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

Pessoas: $0.0001 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

4.3. Regime de Agitação Marítima

Tendo em conta que os dispositivos de medição da agitação marítima raramente se encontram implantados na zona de estudo, é necessário fazer a transferência destes dados para a zona de interesse, através de modelos numéricos. Quando a zona em estudo corresponde a uma área muito grande pode ser necessária a aplicação de vários modelos, pois não existem modelos com a capacidade de simular eficazmente a propagação da agitação marítima tendo em conta todos os fenómenos relevantes à propagação.

No presente trabalho, o conjunto dos dados analisados perfaz um total de 8760 valores horários correspondentes a um ano de previsão, desde o dia 1 de Janeiro de 2009 até 1 de Janeiro de 2010.

As características da agitação marítima previstas ao largo pelo modelo de escala regional WAVEATCH III (WWIII) foram transferidas para o interior da baía da Praia da Vitória com recurso a dois modelos de propagação e deformação da agitação marítima (Figura 9): o modelo SWAN e o modelo DREAMS. Foi assim possível a caracterização da agitação marítima em qualquer ponto dentro da baía. Obtiveram-se primeiramente os valores da agitação

marítima num ponto exterior à baía com o modelo SWAN (Ponto P) e posteriormente com o modelo DREAMS os correspondentes valores nos pontos no interior da baía (Figura 10).

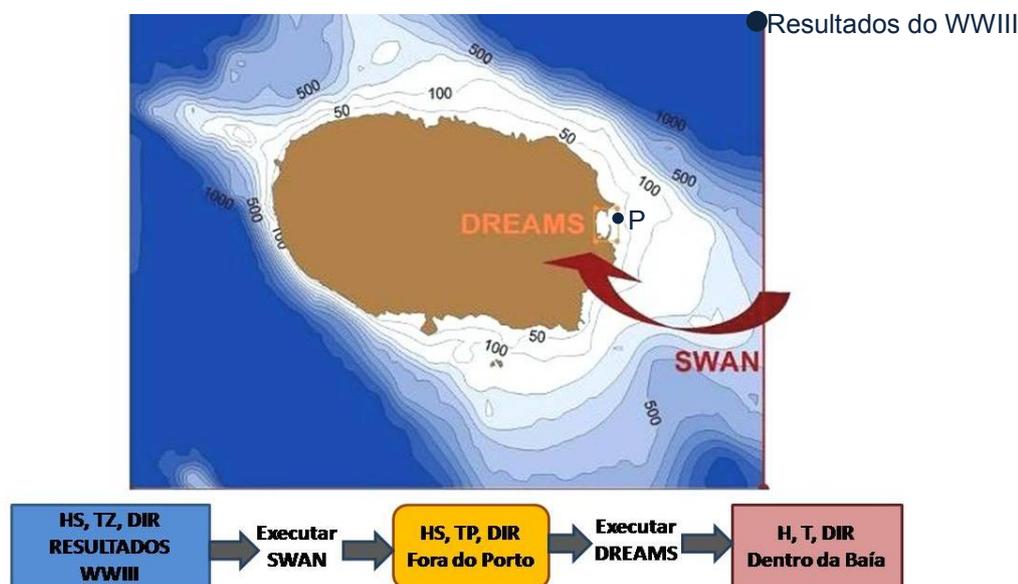


Figura 9 – Metodologia para a transferência da agitação marítima do largo para o interior da baía da Praia da Vitória (adaptado de Reis et al. 2011)

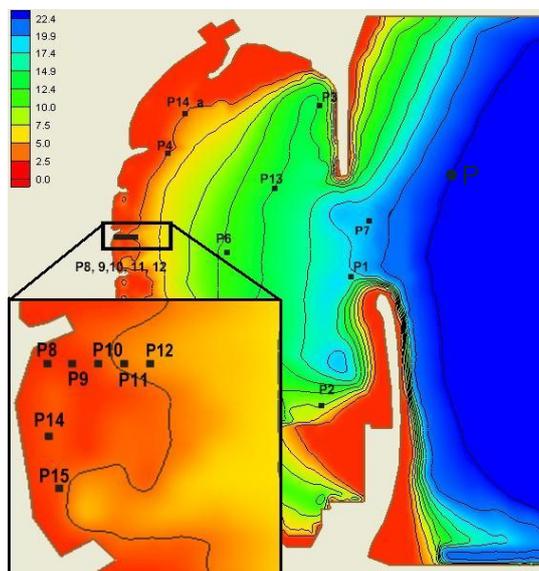


Figura 10 – Pontos de definição da agitação na baía da Praia da Vitória (adaptado de Reis et al. 2011)

Os valores em estudo foram obtidos para dois níveis de maré: +1.4m (ZH), resultante da coincidência do nível médio de +1.0m (ZH) e de uma sobrelevação meteorológica de 0.4m; e +2.5m (ZH), nível muito extremo que resulta da coincidência de uma preia-mar máxima de +2.0m (ZH) e de uma sobrelevação meteorológica de 0.5m.

5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE CÁLCULO AO CASO DE ESTUDO

No presente trabalho, os caudais médios de galgamento foram calculados nos pontos P8 e P14 (Figura 10) assumindo os níveis de maré de +1.4m (ZH) e +2.5m (ZH) constantes ao longo do ano de 2009. É de notar que ao efectuar a análise dos resultados considerando os níveis de maré constantes ao longo do ano se compromete a veracidade dos resultados, todavia não invalida a análise pretendida.

5.1. Fórmulas Empíricas

As fórmulas empíricas utilizadas no presente estudo foram implementadas num programa em *Visual Basic for Applications* (VBA) de forma a facilitar a repetição dos cálculos para os 8760 valores de previsões da agitação marítima em frente às duas secções pré-definidas da estrutura (P8 e P14).

Face à dificuldade de adaptação das formulações à geometria da estrutura em estudo e às limitações de aplicação das próprias fórmulas, utilizaram-se algumas simplificações de forma a obter resultados. De facto, a análise efectuada neste trabalho corresponde ao perfil tipo da defesa frontal representado na Figura 7, visto que, no caso do perfil tipo representado na Figura 8, apenas é aconselhado na bibliografia a utilização da ferramenta NN_OVERTOPPING2.

Na maioria das formulações é necessário aplicar coeficientes empíricos que se obtêm através de tabelas ou gráficos partindo dos dados da geometria da estrutura e das características da agitação marítima. Numa tentativa de utilizar as formulações empíricas de uma forma expedita, recorreu-se à interpolação e à extrapolação dos coeficientes, o que pode levar à obtenção de valores que se afastam da realidade.

Tendo em consideração a informação apresentada nos Quadros 1 a 4 acerca dos valores críticos do caudal médio de galgamento, q ($m^3/s/m$), considerou-se que qualquer estimativa do mesmo obtido através das fórmulas empíricas cujos valores sejam inferiores a $q=1 \times 10^{-6} m^3/s/m$ é desprezável no âmbito deste estudo.

5.1.1. Pullen et al. (2007)

Para a aplicação da fórmula definida em 3.1.1. consideraram-se dois factores possíveis de correcção da permeabilidade e rugosidade do talude, γ_f , pois o revestimento da estrutura é constituído por duas camadas de enrocamento e a estrutura não é totalmente permeável nem totalmente impermeável. Então, por análise dos valores do coeficiente γ_f propostos no Quadro 5, utilizou-se $\gamma_{f1}=0.45$ e $\gamma_{f2}=0.50$.

5.1.2. Besley (1999)

No que diz respeito à aplicação da fórmula definida em 3.1.2., primeiramente definiram-se os coeficientes empíricos, A e B, em função da inclinação 1:1.5 do talude, que tomam os valores 8.84×10^{-3} e 19.9, respectivamente. Em seguida, considerou-se um valor de γ_f igual a 0.50 tendo em consideração que a estrutura é revestida por duas camadas de enrocamento (ver Quadro 7).

Para tornar possível o cálculo do coeficiente que tem em conta a altura do muro-cortina, D_f (ver Figura 3), foi necessário explicitar analiticamente duas das rectas de W^* constante ($W^*=0.25$ e $W^*=0.5$). Ainda se efectuou o traçado aproximado das rectas de W^* que não se encontravam definidas, nomeadamente, $W^*=0.33$ e $W^*=0.37$, cujas expressões analíticas também se definiram.

5.1.3. Bradbury e Allsop (1988)

No que concerne à aplicação da fórmula definida em 3.1.3. em conjunto com os coeficientes de Aminti e Franco (1988), visto que a inclinação do talude em estudo é de 1:1.5, criou-se através de interpolação do Quadro 8 um novo quadro (Quadro 10), que por sua vez também teve que ser interpolado no decorrer dos cálculos. A dupla interpolação tornou-se necessária dado que a variação dos valores da altura significativa da onda, H_s , conduz a valores de G_c/H_s não coincidentes com as três hipóteses possíveis definidas no Quadro 10.

Quadro 10 – Tabela interpolada a partir dos coeficientes de Aminti e Franco (1988)

Enrocamento talude 1:1.5	G_c/H_s	A	B
	1.10	3.923×10^{-8}	2.870
1.85	1.072×10^{-7}	2.533	
2.60	2.803×10^{-8}	2.687	

5.1.4. Pedersen (1996)

Para a aplicação da fórmula definida em 3.1.4. não são aplicados coeficientes empíricos como nos exemplos anteriores, apenas se entrando com o valor da co-tangente do ângulo que o talude faz com a horizontal, que é 1.5. Finalmente, para que os valores do caudal médio de galgamento calculados tenham validade, é necessário que os parâmetros definidos para a estrutura em estudo estejam dentro das gamas de aplicabilidade apresentadas no Quadro 9.

5.2. NN_OVERTOPPING2

Após a realização do *download* da ferramenta NN_OVERTOPPING2, que se encontra disponível on-line (http://www.overtopping-manual.com/calculation_neural.html) sem quaisquer custos associados, procedeu-se à sua aplicação aos 8760 valores de previsões da agitação marítima em frente às duas secções pré-definidas da estrutura (P8 e P14).

Na aplicação desta ferramenta, utilizou-se um valor de γ_f de 0.5, como recomendado por Coeveld et al. (2005) para estruturas de enrocamento.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nas Figuras 11 e 12 apresentam-se os resultados obtidos para os caudais médios de galgamento, q ($m^3/s/m$), através das várias ferramentas utilizadas.

No ponto P8, para um nível de maré de +1.4m (ZH), são registadas quatro ocorrências de galgamento segundo a ferramenta NN_OVERTOPPING2. Ao comparar a estimativa obtida com os caudais admissíveis referidos em 4.2 e nos Quadros 1 a 4, constata-se que não ocorrerão danos na estrutura e que a segurança do edifício ou a passagem de veículos a baixa velocidade estão asseguradas. A segurança de pessoas que transitem nesta zona encontra-se próxima do limite admissível em três dos casos, o que conduziria à necessidade de emissão de alertas às entidades responsáveis.

No caso da estimativa resultante da fórmula proposta por Pullen et al. (2007), tanto para γ_{f1} , como para γ_{f2} , o resultado do caudal médio de galgamento nas quatro situações acima referidas é nulo, pois os valores obtidos são inferiores ao valor mínimo considerado como caudal relevante para o estudo, $q=1 \times 10^{-6} m^3/s/m$. Este valor mínimo foi definido tendo como base os valores dos caudais de galgamento admissíveis apresentados no ponto 2.2.

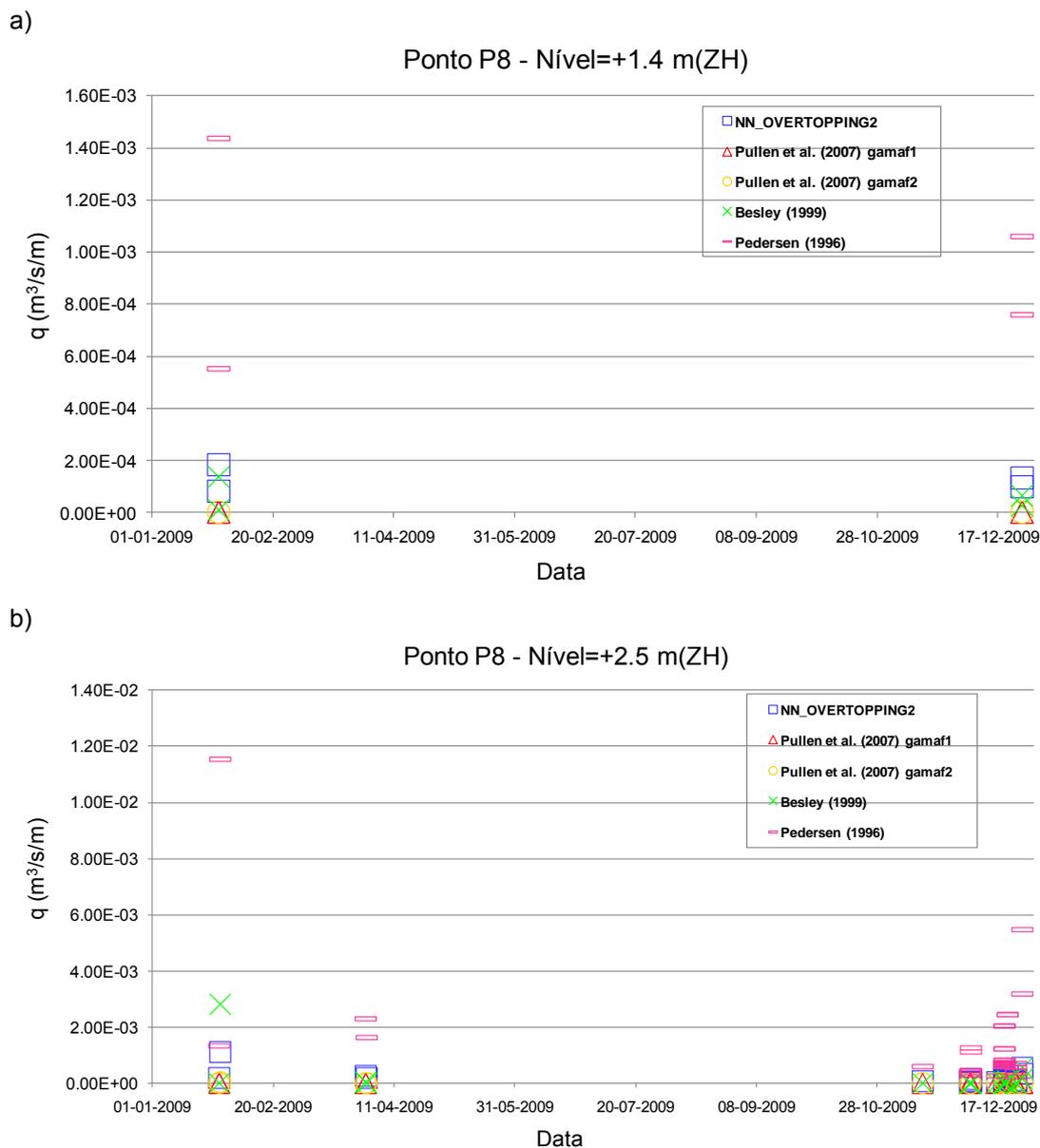


Figura 11 – Série temporal dos caudais médios, q , obtidos em 2009 no ponto P8:
a) para um nível de maré de +1.4m (ZH); b) para um nível de maré de +2.5m (ZH).

Relativamente à estimativa obtida através da fórmula apresentada por Besley (1999), os valores resultantes para o caudal médio de galgamento, q , também são inferiores aos estimados pela ferramenta NN_OVERTOPPING2. Todavia, deve ser tomando em consideração que os resultados obtidos através da NN_OVERTOPPING2 são afectados por um coeficiente devido aos efeitos de escala em estruturas de quebra-mar de taludes. O facto de a ferramenta permitir um ajuste dos resultados face aos efeitos de escala, que por sua vez não se consegue contabilizar através das fórmulas empíricas, manifesta-se numa disparidade dos resultados finais da NN_OVERTOPPING2 em relação aos resultados obtidos com a fórmula de Besley (1999). À excepção da correcção implementada na ferramenta NN_OVERTOPPING2, os resultados obtidos com as duas ferramentas seriam muito semelhantes.

Quanto à utilização da fórmula proposta por Bradbury e Allsop (1988) com os coeficientes de Aminti e Franco (1988), não é possível a obtenção de uma estimativa para o

galgamento, dado que a determinação dos coeficientes A e B definidos no Quadro 10 não é possível através de interpolação (só seria possível por extrapolação, o que não seria correcto).

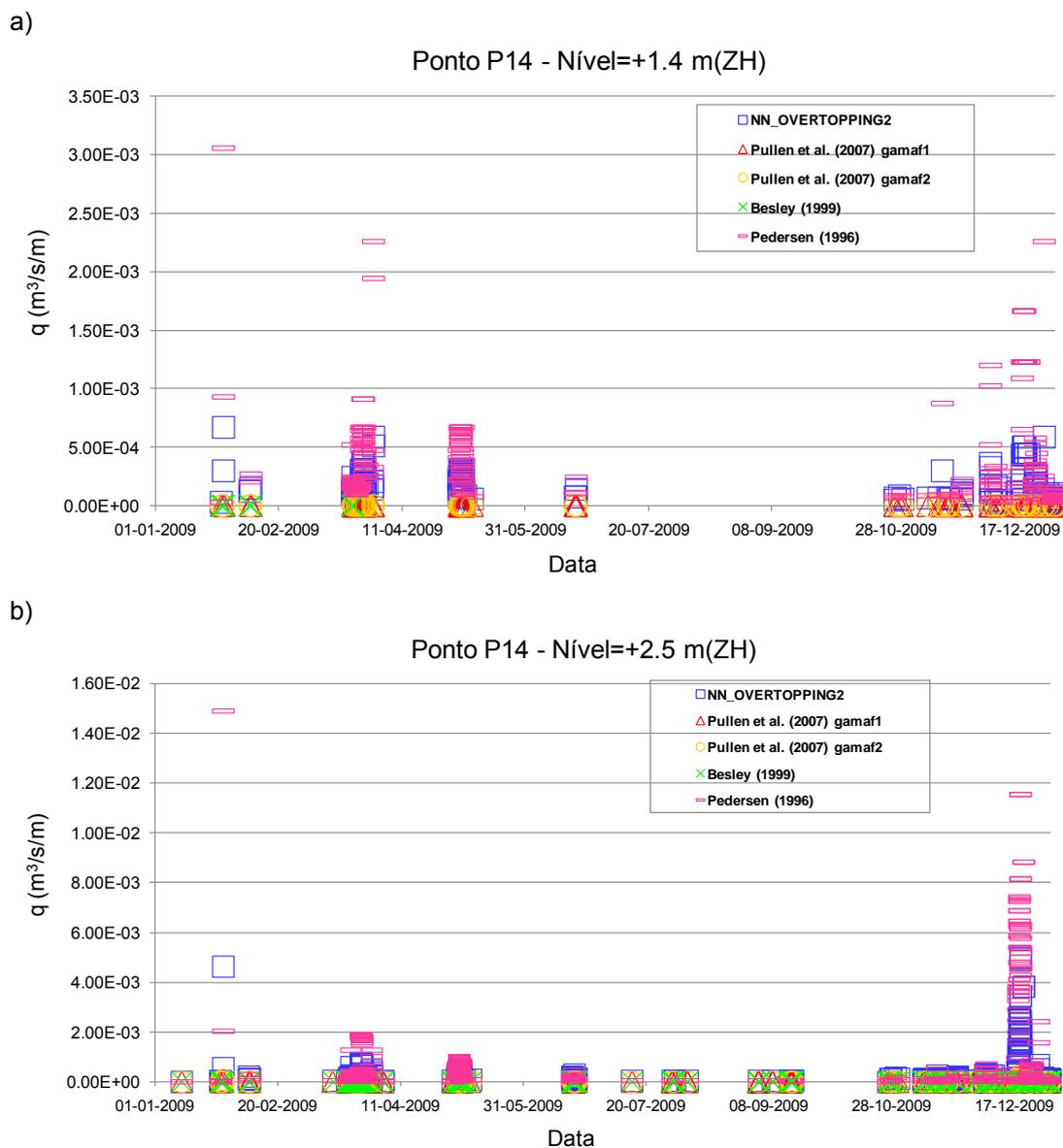


Figura 12 – Série temporal dos caudais médios, q , obtidos em 2009 no ponto P14:
a) para um nível de maré de +1.4m (ZH); b) para um nível de maré de +2.5m (ZH).

Finalmente, em relação aos resultados obtidos com a equação proposta por Pedersen (1996) para o cálculo do caudal médio de galgamento, q , esta é a que oferece a estimativa mais alta, na maioria dos casos superior à obtida por NN_OVERTOPPING2. Contudo, deve considerar-se esta estimativa com alguma reserva pois, em todos os casos, os dois primeiros parâmetros definidos no Quadro 9 encontram-se fora dos limites de aplicabilidade da fórmula, e ainda, os resultados obtidos através de Pedersen (1996) encontram-se fora dos intervalos de confiança emitidos pela NN_OVERTOPPING2.

No ponto P8, para um nível de maré de +2.5m (ZH), verificam-se quarenta e uma ocorrências de galgamento segundo a ferramenta NN_OVERTOPPING2. Tal como para o nível de +1.4m (ZH), não ocorrerão danos na estrutura e a segurança do edifício e da circulação de

veículos a baixa velocidade não se encontra em risco. A segurança de pessoas que transitem nesta zona encontra-se próxima do limite admissível em vinte dos casos, o que conduziria à necessidade de emissão de alertas às entidades responsáveis.

No caso da estimativa resultante da fórmula proposta por Pullen et al. (2007), na maioria dos valores ocorre o descrito para o nível de +1.4m (ZH), ou seja, os valores estimados são inferiores a $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Nos restantes valores, onde é obtida uma estimativa diferente de zero, existe uma grande discrepância de valores em relação aos que se obtiveram através da NN_OVERTOPPING2, o que se considera não ser apenas devido aos efeitos de escala corrigidos nos resultados desta ferramenta.

Relativamente à estimativa obtida através da fórmula proposta por Besley (1999), a análise dos resultados obtidos é idêntica à análise realizada no parágrafo anterior, pois a discrepância entre os valores obtidos pela fórmula e pela NN_OVERTOPPING2 é muito grande.

Tal como para o nível de +1.4m (ZH), a utilização da fórmula de Bradbury e Allsop (1988) não é possível devido à não aplicabilidade dos coeficientes empíricos de Aminti e Franco (1988).

Em relação aos resultados obtidos com a equação proposta por Pedersen (1996), a análise da estimativa obtida é semelhante à efectuada para o nível de +1.4m (ZH), pois ocorrem as mesmas situações.

No ponto P14, para um nível de maré de +1.4m (ZH), são registadas duzentas e noventa ocorrências de galgamento segundo a ferramenta NN_OVERTOPPING2. Tal como para o ponto P8, não ocorrerão danos na estrutura e a segurança do edifício e da circulação de veículos a baixa velocidade não se encontra em risco. A segurança de pessoas que transitem nesta zona encontra-se próximo do limite admissível em duzentos e vinte dos casos, o que conduziria à necessidade de emissão de alertas às entidades responsáveis.

A análise dos resultados obtidos através da fórmula proposta por Pullen et al. (2007), da equação de Bradbury e Allsop (1988) e da fórmula de Pedersen (1996) é análoga à efectuada para o ponto P8 com um nível de maré de +2.5m (ZH). Quanto aos resultados obtidos com a fórmula de Besley (1999), os valores obtidos são inferiores ao valor mínimo considerado como caudal relevante para o estudo, $q=1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

No ponto P14, para um nível de maré de +2.5m (ZH), são registadas quatrocentas e setenta e três ocorrências de galgamento segundo a ferramenta NN_OVERTOPPING2. Tal como para o ponto P8, não ocorrerão danos na estrutura e a segurança do edifício e da circulação de veículos a baixa velocidade não se encontra em risco. A segurança de pessoas que transitem nesta zona encontra-se próximo do limite admissível em duzentos e sessenta e um dos casos, o que conduziria à necessidade de emissão de alertas às entidades responsáveis.

A análise dos resultados obtidos através da fórmula proposta por Pullen et al. (2007), da fórmula de Besley (1999) e da equação de Bradbury e Allsop (1988), é similar à efectuada para o ponto P8 com um nível de maré de +2.5m (ZH). Quanto aos resultados obtidos com a fórmula de Pedersen (1996), os valores obtidos apresentam-se em alguns casos acima e noutros abaixo das estimativas dadas pela NN_OVERTOPPING2, devendo manter-se a reserva em relação a estas estimativas, dado que não são cumpridos todos os requisitos de aplicação da fórmula.

7. CONCLUSÕES

O presente trabalho consiste no estudo dos galgamentos em dois pontos da protecção marginal da baía da Praia da Vitória (Ilha Terceira, Açores) tendo em vista a modelação do fenómeno na análise de risco e em sistemas de alerta.

Sendo o cálculo dos galgamentos a operação fundamental para a análise que se pretende efectuar, compararam-se os caudais médios de galgamento obtidos através de



formulações empíricas e de uma ferramenta desenvolvida com base em redes neuronais, NN_OVERTOPPING2. As características da agitação marítima incidente foram obtidas da propagação dos estados de agitação fornecidos por modelos de escala regional para a agitação marítima gerada pelo vento.

É extremamente importante referir que a presente análise dos caudais médios de galgamento com apoio em diferentes ferramentas de cálculo pretende demonstrar que este tipo de estudo não deve ser efectuado com recurso a uma única ferramenta de cálculo, pois a disparidade das estimativas obtidas alerta o utilizador para a existência de situações imprevistas. Em todos os casos, as ferramentas apresentam limitações, pelo que a sua utilização deve ser vista como uma pré-análise, anterior à realização de ensaios em modelo físico reduzido.

Contudo, perante a necessidade de seleccionar alguma das estimativas obtidas, a ferramenta NN_OVERTOPPING2 apresenta várias vantagens que conduzem a uma maior confiança, tal como a aplicabilidade a várias configurações estruturais, a obtenção de um valor médio do caudal de galgamento com um intervalo de confiança definido para 95% dos valores e o facto de ter em consideração alguns efeitos de escala e de modelo em estruturas de quebra-mar de taludes.

BIBLIOGRAFIA

- AMINTI, P.; FRANCO, L. (1988). "Wave overtopping on rubble mound breakwaters". *Proc. 21st ICCE*, June 20-25, 1988, Malaga, Spain (ed. Edge, B.L.), ASCE, New York, 1989, pp. 770-781.
- BESLEY, P. (1999). *Overtopping of Seawalls: Design and Assessment Manual*, Environment Agency, R&D Technical Report W178, UK. (ISBN: 1-85705-069-X).
- BRADBURY, A.P.; ALLSOP, N.W.H. (1988). "Hydraulic effects of breakwater crown walls." *Proc. ICE Breakwaters '88*, Thomas Telford, London, 385-396.
- COVELD, E.M.; VAN GENT, M.R.A.; POZUETA, B. (2005). *Manual Neural Network: NN_OVERTOPPING 2*. CLASH WP8 – Report.
- PEDERSEN, J. (1996). *Experimental Study of Wave Forces and Wave Overtopping on Breakwater Crown Walls*, Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering, Aalborg University, Denmark.
- 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*, EA Environment Agency, UK, ENW Expertise Netwerk Waterkeren, NL and KFKI Kuratorium fur Forschung im Kusteningenieurwesen, DE, August.
- REIS, M.T.; FORTES, C.J.E.M.; NEVES, D.R.C.B.; RODRIGUES, S.; SANTOS, J.A.; VIEIRA, A.S.; SIMÕES, A.; AZEVEDO, E.B. (2011). "Previsão dos galgamentos na baía da Praia da Vitória para avaliação de risco e alerta". *Proc. VI Congresso Sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, 4 a 8 de Abril, Ilha da Boa Vista, Cabo Verde (CD-Rom).
- USACE (2006). *Coastal Engineering Manual*, Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (in 6 volumes).
- VAN DER MEER, J.W.; VAN GENT, M.R.A.; POZUETA, B.; VERHAEGHE, H., STEENDAM, G.J.; MEDINA, J.R. (2005). "Applications of a neural network to predict wave overtopping at coastal structures", in *Proc. ICE Coastlines, Structures & Breakwaters '05*, Thomas Telford, London, pp. 259-268.
- VAN GENT, M.R.A.; POZUETA, B.; VAN DEN BOOGAARD, H.F.P.; MEDINA, J.R. (2005). *D42 Final Report on Generic Prediction Method*, CLASH WP8 – Report, 33pp.