

## AVALIAÇÃO DO RISCO DE GALGAMENTO: O PORTO DE PONTA DELGADA Overtopping Risk Evaluation: Ponta Delgada Harbour

JOANA RODRIGUES <sup>(1)</sup>, PEDRO POSEIRO <sup>(2)</sup>, MARIA TERESA REIS <sup>(3)</sup>,  
CONCEIÇÃO FORTES <sup>(4)</sup> e FRANCISCO TAVEIRA-PINTO <sup>(5)</sup>

<sup>(1)</sup> Mestre em Engenharia Civil, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, joana.rsilva.rodrigues@gmail.com

<sup>(2)</sup> Mestre em Engenharia Civil, LNEC,  
Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, pposeiro@lnec.pt

<sup>(3)</sup> Doutora em Engenharia Civil, LNEC,  
Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, treis@lnec.pt

<sup>(4)</sup> Doutora em Engenharia Civil, LNEC  
Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, jfortes@lnec.pt

<sup>(5)</sup> Professor Catedrático, FEUP,  
Rua do Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, fpinto@fe.up.pt

### Resumo

O fenómeno de galgamento representa uma das maiores preocupações nas zonas costeiras e portuárias na medida em que o seu impacto tem implicações ao nível da segurança das pessoas, bens, equipamentos e infraestruturas localizadas nas zonas protegidas por estruturas marítimas, bem como da segurança e funcionalidade das próprias estruturas, com importância ao nível socioeconómico.

Com o presente estudo pretende-se aplicar a metodologia desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (Reis *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2011; Neves *et al.*, 2012a e Rocha *et al.*, 2013) para a avaliação do risco de galgamento de estruturas portuárias ao porto de Ponta Delgada, nos Açores.

Esta avaliação implica uma caracterização adequada dos estados de mar junto das estruturas baseando-se num período de trinta e quatro anos (1979 – 2013) de dados de agitação marítima e de nível de mar e foi realizada para doze secções transversais.

A metodologia de avaliação do risco é efetuada em três fases: caracterização da agitação incidente nas estruturas do porto; cálculo do galgamento; avaliação do risco de galgamento que inclui a avaliação da probabilidade de ocorrência de galgamentos (acima de um certo limiar predefinido), assim como a avaliação das consequências dessas ocorrências.

Os resultados da aplicação desta metodologia de avaliação do risco são apresentados sob a forma de mapas de consequências e de risco, ferramentas importantes para o planeamento de operações e de futuras intervenções no porto de Ponta Delgada.

**Palavras-chave:** Risco, galgamento, inundação, portos, estruturas marítimas.

### Abstract

Overtopping is a major concern in coastal and port areas, for their impact in the security level of people, goods, equipment and infrastructures located at the areas protected by marine structures as well as the safety and the functionality of the structures themselves, with socio-economical importance.

The present study aims to apply the methodology developed at the National Laboratory for Civil Engineering (LNEC) (Reis *et al.*, 2011, Santos *et al.*, 2011, Neves *et al.*, 2012a and Rocha *et al.*, 2013) to evaluate the overtopping risk on port structures in Ponta Delgada's port, Azores.

This evaluation implies an adequate characterization of the wave conditions near the structures based on a time frame of thirty four years (1979 – 2013) of wave data as well as tide level data, and it is carried out for twelve cross-sections.

The methodology of risk evaluation is described in three steps: characterization of the incident wave conditions; calculation of the overtopping occurrence; evaluation of the overtopping risk, including determination of the probability of overtopping occurrence (above predefined thresholds) and the assessment of the consequences of such events.

The results of applying this methodology of risk evaluation are represented with risk and consequences maps, essential tools for operations management and future interventions in Ponta Delgada's port.

**Keywords:** Risk, overtopping, floods, ports, maritime structures.

## 1. Introdução

O fenómeno de galgamento representa uma das maiores preocupações nas zonas costeiras e portuárias, na medida em que o seu impacto tem implicações ao nível da segurança das pessoas, bens, equipamentos e infraestruturas localizadas nas zonas protegidas por estruturas marítimas, bem como da segurança e funcionalidade das próprias estruturas, com importância ao nível socioeconómico.

Com o presente trabalho pretende-se aplicar a metodologia desenvolvida pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) (Reis *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2011; Neves *et al.*, 2012b e Rocha *et al.*, 2013) para a avaliação do risco de galgamento de estruturas portuárias ao porto de Ponta Delgada, nos Açores, onde ocorrem eventos de galgamento nas estruturas portuárias, obrigando à interrupção de algumas das suas atividades, no seguimento dos trabalhos de Silva (2012) e Pereira (2013).

Nas próximas secções apresenta-se uma breve descrição do estudo realizado (Rodrigues, 2013), nomeadamente do fenómeno de galgamento e dos fatores que o condicionam, a metodologia de cálculo e os valores admissíveis de galgamento segundo Pullen *et al.* (2007). De seguida, apresenta-se a metodologia de avaliação de risco e de elaboração de mapas de riscos.

Na aplicação ao caso de estudo de Ponta Delgada, referem-se os dados utilizados e a aplicação dos mesmos nos modelos de propagação da agitação marítima SWAN e DREAMS, bem como a ferramenta neuronal NN\_Overtopping2 para o cálculo do caudal médio de galgamento.

Para avaliar o desempenho do modelo SWAN são comparados os resultados do modelo com dados obtidos pela boia ondógrafo localizada próximo do porto. Finalmente, é feita uma avaliação do risco de galgamento e a elaboração do mapa de risco.

## 2. Caracterização do Fenómeno de Galgamento

Pode definir-se o fenómeno de galgamento como o transporte de uma massa de água sobre o coroamento de uma estrutura por efeito da agitação marítima. O caudal médio que passa sobre o coroamento da estrutura,  $q$ , é expresso em  $m^3/s$  por metro linear de estrutura (ou em  $L/s/m$ ).

### 2.1. Fatores condicionantes

#### 2.1.1. Agitação marítima

O regime de agitação marítima numa zona costeira ou portuária pode ser obtido por medições *in situ* (como boias ondógrafo), ou através de modelos numéricos de previsão e de propagação de ondas em zonas costeiras e portuárias.

Uma vez que na maioria das zonas costeiras a existência de instrumentos de medição não é comum, o recurso a modelos numéricos é normalmente a solução mais utilizada. Desta forma, aplicam-se modelos numéricos quer para a obtenção de estimativas da agitação marítima ao largo (em zonas de grande profundidade), quer para propagar essas condições de agitação marítima do largo para junto da costa, ou para o interior de zonas abrigadas, como portos ou baías.

#### 2.1.2. Nível médio da água do mar

O nível médio da água do mar varia consoante a maré astronómica, sendo mais elevado em preia-mar, para a qual há menor área de talude emersa para dissipação de energia da agitação, o que leva a uma maior probabilidade de ocorrência de galgamento.

A determinação da maré astronómica é realizada com base em análises harmónicas de séries de observações maregráficas de duração variável e podem ser obtidas facilmente a partir do *software* XTide (Flatter, 1998).

O nível médio da água do mar varia ainda com as condições meteorológicas, como é o caso da sobrelevação meteorológica (ou *storm surge*), que consiste numa subida temporária do nível do mar devido à variação no campo de pressões atmosféricas, ou à ação de ventos fortes e prolongados (Taborda e Dias, 1992).

#### 2.1.3. Características da estrutura

A geometria e o tipo de elementos constituintes do quebramar determinam o galgamento verificado. O dimensionamento destas estruturas depende da sua função, das características da agitação marítima, do nível médio da água do mar, da morfologia do local e das operações a realizar na área que se pretende abrigar.

O parâmetro mais condicionante no dimensionamento deste tipo de estruturas é a definição da cota de coroamento, que influencia de forma direta o controlo ou redução do galgamento. No entanto, cotas de coroamento demasiado elevadas requerem custos construtivos adicionais, de mobilização de equipamento e de mão-de-obra, e podem implicar também impactos visuais e ambientais indesejados.

## 2.2. Metodologia de cálculo do galgamento

### 2.2.1. Generalidades

Em rigor, a análise do caudal de galgamento deveria ser feita utilizando metodologias desenvolvidas e aplicadas especificamente para cada caso de estudo.

No entanto, tornando-se um processo moroso e dispendioso, a melhor solução passa por utilizar, em fase de Estudo Prévio de uma estrutura, metodologias baseadas em situações semelhantes ensaiadas em laboratório e, em fase de Projeto de Execução, a utilização de modelação física específica (Reis e Neves, 2010).

Para a determinação do caudal de galgamento, é possível recorrer a fórmulas empíricas e semi-empíricas, modelos físicos e, mais recentemente, a modelos numéricos e redes neuronais (Brito, 2007).

### 2.2.2. Redes neuronais artificiais

O objetivo das redes neuronais artificiais passa por simular, em computadores, o funcionamento do cérebro humano. São capazes de reconhecer padrões e de detetar relações entre um conjunto de variáveis com base em dados aparentemente ilógicos.

Além disso, revelam a capacidade de lidar com dados incompletos, imprecisos, conflituosos e de prever sistemas não lineares.

Todos estes fatores tornam a sua aplicação no campo da engenharia, nomeadamente engenharia costeira e portuária, bastante atrativa, visto que, nestas áreas, se trabalha com fenómenos físicos complexos, como é o caso do galgamento de estruturas marítimas.

Um exemplo de uma ferramenta neuronal é o NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005), que permite o cálculo do caudal médio de galgamento, tendo em conta informação sobre a agitação marítima e a geometria da estrutura.

Trata-se de uma ferramenta que se baseia em 700 redes neuronais, com uma base de 8400 combinações de input-output provenientes de dados de campo e de ensaios em modelo físico reduzido, para diversas características de agitação e diferentes geometrias de estruturas. As 700 redes neuronais são semelhantes e desenvolvem-se em 3 camadas (Figura 1).

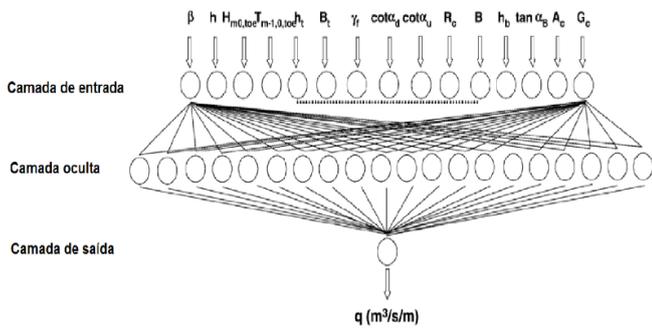


Figura 1. Esquema de uma rede neuronal artificial em 3 camadas (Van Gent *et al.*, 2007).

Relativamente às variáveis de entrada, três são referentes à agitação marítima e as restantes doze relacionadas com as características da estrutura (Figura 2).

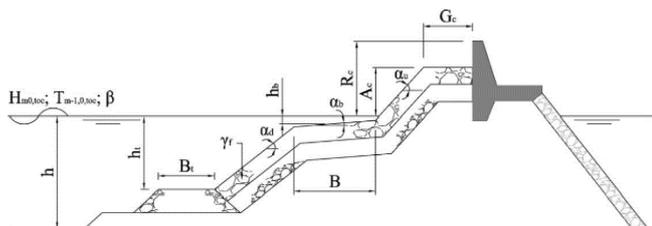


Figura 2. Parâmetros de entrada da ferramenta NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005).

### 2.3. Valores admissíveis do caudal de galgamento

As estruturas marítimas são normalmente dimensionadas para admitirem um certo valor do caudal de galgamento.

Esse mesmo valor é condicionado principalmente pelo uso a dar à zona protegida pela estrutura em estudo. Pullen *et al.*, (2007) estabeleceram valores críticos recomendados para o caudal médio de galgamento, considerando as eventuais consequências para a própria estrutura galgada, navios, equipamento, edifícios, pessoas e veículos.

O Quadro 1 apresenta um conjunto de valores admissíveis do caudal de galgamento de modo a garantir a segurança das pessoas.

Quadro 1. Valores do caudal médio de galgamento admissível para pessoas (adaptado de Pullen *et al.*, 2007).

Condições e tipo de danos*	Caudal médio q (L/s/m)
Pessoal treinado, com equipamento e calçado adequado, com perceção de que se pode molhar. O galgamento gera escoamentos de pouca altura, sem jatos de água a cair, perigo reduzido de queda para o mar.	1 - 10
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.	0.1
Pessoas totalmente desprevenidas, que não conseguem observar a agitação incidente, que podem facilmente ficar assustadas ou perturbadas, com vestuário inapropriado para se molharem, que se deslocam numa zona estreita ou propícia a tropeções e quedas.	0.03

\* Estas condições não têm que ocorrer em simultâneo.

### 3. Metodologia de Avaliação do Risco

A avaliação do risco de galgamento de uma dada estrutura é baseada na combinação entre:

- Grau de probabilidade de ocorrência de um galgamento superior a um determinado valor limite considerado admissível;
- Grau de consequências associadas à transposição desse limite.

Considerou-se a avaliação do grau de risco, como sendo o produto entre o grau de probabilidade e o grau de consequências:

$$\text{Grau de risco} = \text{Grau de probabilidade} * \text{Grau de consequências} \quad [1]$$

A metodologia expedita de avaliação do risco compreende quatro passos fundamentais, Santos *et al.* (2011):

1. Avaliação do grau de probabilidade de ocorrência de valores de caudal médio de galgamento que excedam os limites pré-estabelecidos, tendo em conta os graus definidos no Quadro 2;
2. Qualificação (grau) das consequências da ocorrência de galgamentos, baseado no Quadro 3;
3. Cálculo do grau de risco através do produto dos graus atribuídos à probabilidade e às consequências de ocorrência de galgamentos;
4. Avaliação da aceitação do grau de risco obtido, com base no Quadro 4;

Quadro 2. Graus de probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis.

GRAU	DESCRIÇÃO	PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA
1	Improvável	0 - 1%
2	Raro	1 - 10%
3	Ocasional	10 - 25%
4	Provável	25 - 50%
5	Frequente	>50%

Quadro 3. Grau de consequências associadas à ocorrência de um acontecimento perigoso.

Grau	Descrição	Consequências						
		Pessoas	Ambiente	Gestão portuária	Edifícios	Equipamentos	Estrutura	Veículos
1	Insignificantes	Possibilidade de ferimentos muito ligeiros	Impacto ambiental desprezável	Alterações ligeiras nas atividades portuárias	Danos exteriores quase inexistentes	Danos quase inexistentes	Dano na zona ativa da estrutura não necessitando de reparação	Danos quase inexistentes
2	Reduzidas	Uma única lesão ligeira	Pequenos derrames (por exemplo de combustível)	Algumas alterações nas atividades portuárias; má publicidade para o porto a nível local	Danos interiores e exteriores insignificantes	Danos ligeiros que não implicam a paragem do equipamento; resolução de problemas quase imediata	Ocorrência de movimentos e quedas de blocos sem exposição de filtros; reparação imediata desnecessária	Danos insignificantes que não afetam a sua utilização
5	Sérias	Múltiplas lesões ligeiras ou uma única lesão grave	Algumas áreas com acesso proibido devido a poluição causada por derrames	Operações de carga e descarga condicionadas; possibilidade de paragem parcial do porto; má publicidade generalizada	Danos interiores moderados	Danos que implicam inatividade temporária do equipamento para reparação	Ocorrência de movimentos e quedas de blocos com exposição de filtros; superestrutura afetada mas sem movimentos significativos	Danos sérios com consequências na sua utilização, mas que não levam à sua paragem temporária
10	Muito sérias	Muitas lesões graves ou uma perda de vida	Episódios de poluição dentro e fora do porto com possibilidade de consequências irreparáveis para o ambiente	Impossibilidade de realização de operações de carga e descarga durante vários dias; má publicidade a nível nacional	Grandes danos no interior; estrutura do edifício afetada	Danos graves; inatividade prolongada do equipamento	Filtros afetados; movimentos substanciais da superestrutura	Danos exteriores sérios com consequências na sua utilização que levam a uma paragem prolongada
25	Catastróficas	Muitas perdas de vidas	Derrames generalizados; contaminação muito grave; consequências irreparáveis para o ambiente; necessidade de ajuda internacional	Restrições muito sérias às operações de carga e descarga durante muito tempo; perda de trocas comerciais durante muito tempo; má publicidade internacional	Danos interiores muito graves; estrutura do edifício seriamente afetada; colapso iminente	Perda do equipamento (reparação impossível)	Colapso da estrutura	Danos sérios inviabilizando a sua utilização em definitivo

Quadro 4. Avaliação da aceitação do grau de risco obtido.

GRAU DE RISCO	DESCRIÇÃO	CONTROLO DO RISCO
1-3	Insignificante	Risco desprezável; não é preciso levar a cabo medidas de controlo de risco.
4-10	Reduzido	Risco que pode ser considerado aceitável/tolerável caso se selecione um conjunto de medidas para o seu controlo.
15-30	Indesejável	Risco que deve ser evitado se for razoável em termos práticos; requer uma investigação detalhada e análise de custo-benefício; é essencial a monitorização.
40-125	Inaceitável	Risco intolerável; tem de se proceder ao controlo do risco (e.g. eliminar a origem dos riscos, alterar a probabilidade de ocorrência e/ou as consequências, transferir o risco, etc.).

#### 4. Caso de Estudo

##### 4.1. O porto de Ponta Delgada

O porto de Ponta Delgada encontra-se situado na costa sul da ilha de S. Miguel, Região Autónoma dos Açores, Portugal.

É o principal porto dos Açores construído na cidade mais populosa do arquipélago (cerca de 26% da população açoriana) e tem cerca de 32 ha de área de baía protegida pelo molhe principal sul (Figura 3 e Figura 4).

A sua importância está associada ao elevado fluxo de pessoas e mercadorias, bem como às ligações que proporciona com as restantes ilhas do arquipélago, o continente e o resto do mundo. Encontra-se na rota turística transatlântica, permitindo receber ferryboats e cruzeiros turísticos.



Figura 3. Fotografia aérea do porto de Ponta Delgada (Silva, 2012).



Figura 4. Zonas do porto de Ponta Delgada com características distintas (adaptado de Google Earth).

## 4.2. Metodologia

A dificuldade em recorrer à monitorização *in situ* para caracterização dos parâmetros de agitação marítima – que se traduz na melhor técnica, mas que apresenta um reduzido número de medições e pequenos períodos de duração – obriga à aplicação de modelos numéricos. Estes modelos permitem caracterizar a agitação marítima nas zonas costeiras e portuárias.

Dada a vasta área a modelar e a variação das profundidades da zona em estudo, são utilizados vários modelos de propagação da agitação marítima que permitem transferir as condições ao largo até ao interior do porto. Assim, utilizaram-se três modelos para a realização desta previsão: um primeiro modelo (WAM) (WAMDI Group, 1988) que fornece estimativas da agitação marítima para cada 6 horas num ponto ao largo da costa Sul da Ilha de São Miguel, próximo do porto; outro modelo para a propagação dessas ondas desde o largo até à zona costeira (SWAN) (Booij *et al.*, 1999, SWAN Team, 2008); e um terceiro modelo para a propagação até ao interior do porto (DREAMS) (Fortes, 2002), tendo este último em conta os efeitos da difração, refração e reflexão das ondas.

Nestas aplicações foi usado o programa de interface SOPRO (Pinheiro *et al.*, 2007) para uma utilização mais eficiente dos modelos SWAN e DREAMS, particularmente na elaboração dos ficheiros de *input*.

Foram assim obtidos regimes de agitação marítima em frente às doze secções selecionadas anteriormente. Para avaliar o desempenho do modelo SWAN foram comparados os resultados do modelo com dados obtidos pela boia ondógrafo localizada próximo do porto.

## 4.3. Dados utilizados

### 4.3.1. Dados de agitação marítima do WAM

Com o modelo de terceira geração WAM (WAMDI Group, 1988) foram fornecidas as estimativas da agitação marítima num ponto ao largo da costa sul da Ilha de S. Miguel (Figura 5).



Figura 5. Localização do ponto de previsão do modelo WAM e coordenadas (Google Earth).

Estas estimativas são definidas em função dos valores de  $H_s$  (altura significativa da onda),  $T_m$  (período médio da onda) e  $\theta_m$  (direção média de propagação das ondas) para o período de 1 de janeiro de 1979 a 31 de dezembro de 2013 com intervalos de 6 horas.

### 4.3.2. Dados da boia ondógrafo

As boias do Arquipélago dos Açores são operadas pela Universidade dos Açores, em particular a utilizada como referência neste estudo – boia ondógrafo de Ponta Delgada. Estes equipamentos permitem obter as seguintes características das ondas: altura de onda significativa ( $H_s$ ), altura de onda máxima ( $H_{m\acute{a}x}$ ), período de onda médio ( $T_z$ ), período de onda máximo ( $T_{m\acute{a}x}$ ) e direção média de propagação das ondas ( $\theta_m$ ).

Esta boia encontra-se em funcionamento desde o ano de 2005, apesar de haver inúmeros intervalos sem registos, por questões de manutenção, avarias, entre outros.

Os registos disponibilizados pela Universidade dos Açores para este trabalho dizem respeito ao período desde janeiro de 2005 até dezembro de 2013, com intervalos de 10 minutos.

### 4.3.3. Dados de níveis de maré

Face à insuficiência de dados registados pelo marégrafo na zona em estudo, optou-se pela utilização conjunta de dados de marégrafo e dados estimados para a maré astronómica. Assim, os valores dos níveis de maré adotados resultaram de:

- Valores obtidos no registo do marégrafo de Ponta Delgada, localizado na raiz do molhe de Ponta Delgada, cujos dados foram retirados da base de dados da rede de marégrafos GLOSS;
- Resultados do *software* XTide (Flatter, 1998), que fornece os dados da maré astronómica obtidos através de séries harmónicas que são ajustadas a cada local.

Os primeiros valores obtidos com o marégrafo incluem já o valor da sobrelevação meteorológica do nível do mar (*storm surge*). Quanto aos segundos valores, correspondem a valores calculados por estimativa de uma onda harmónica, aos quais foi posteriormente adicionado um valor constante de sobrelevação de 0.4m. Este valor foi estimado com base na média da diferença entre os valores obtidos no marégrafo e os obtidos com o *software* XTide, devido à dificuldade em obter a variação da sobrelevação no período considerado. O nível de maré em relação ao plano do Zero Hidrográfico (Z.H.) varia entre 0.17m e 2.19m.

#### 4.4. Aplicação do modelo SWAN

##### 4.4.1. Batimetria e ventos

A execução do modelo SWAN requer a introdução dos dados de base que permitem uma adequada calibração do modelo para cada zona de estudo. Esses dados são relativos às variáveis físicas que caracterizam a batimetria, à agitação marítima ao largo, aos ventos e às marés. A batimetria da envolvente da cidade de Ponta Delgada, à escala 1:100000, foi obtida com base na informação fornecida pela Carta Náutica nº 46406 do Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa e foi ilustrada com o *software* comercial ArcGIS 10.1™ (Figura 6).

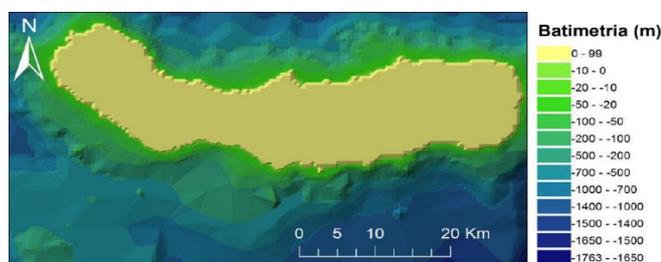


Figura 6. Batimetria da envolvente da ilha de S. Miguel, Açores, ArcGIS 10.1™.

Consideraram-se como condições ao largo os estados de mar estimados pelo modelo de 3ª geração e propagação de ondas WAM (WAMDI Group, 1988) e disponibilizados pela instituição ECMWF, que correspondem a valores de  $H_s$ ,  $T_m$  e  $\theta_m$ , para o período de 1 de janeiro de 1979 a 31 de dezembro de 2013, com intervalos de 6 horas. Ao longo deste estudo, a ação do vento foi desprezada, uma vez que a zona em estudo é de dimensão reduzida face à escala regional.

##### 4.4.2. Domínio computacional e malhas de cálculo

O domínio computacional abrange toda a ilha de São Miguel e foi discretizado por duas malhas computacionais (Figura 7): a malha maior (*main grid*) que abrange toda a ilha de São Miguel, e apresenta dimensões de 71.0km × 38.5km e uma resolução de 500m; e a malha menor (*nested grid*), dentro da malha principal, que engloba a zona do porto e tem como dimensões 22.5km × 13.2km, com uma resolução de 100m (Silva, 2012 e Pereira, 2013).

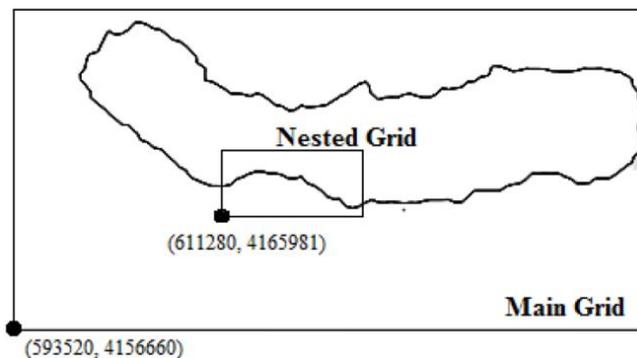


Figura 7. Malhas utilizadas na aplicação do modelo SWAN.

##### 4.4.3. Características gerais das simulações

As simulações com o modelo SWAN foram feitas para o período de janeiro de 1979 a dezembro de 2013 em modo estacionário. As principais características das simulações foram:

- A versão SWAN 40.72, sem considerar a interação das ondas com correntes e ventos;
- O espectro direcional caracterizado por um espectro em frequência de JONSWAP de 21 intervalos, de 0.04 a 0.5Hz, com distribuição logarítmica e uma discretização em direção que abrange 360°, dividida em 24 intervalos;
- Um coeficiente de rebentação constante de 0.65 para o período total;
- Inclusão dos fenómenos físicos de difração, interação onda-onda tripla e rebentação induzida pelo fundo e por excesso de declividade (*whitcapping*), tendo sido utilizada a formulação de Komen *et al.* (1984). O atrito de fundo é introduzido segundo a expressão semi-empírica de JONSWAP.

A execução do modelo SWAN permite a visualização dos seus resultados para cada uma das malhas e mais especificamente em quatro pontos (S1, S2, S3 e S4). Estes pontos, representados na Figura 8, foram selecionados de modo a constituírem as condições de fronteira para o modelo DREAMS.

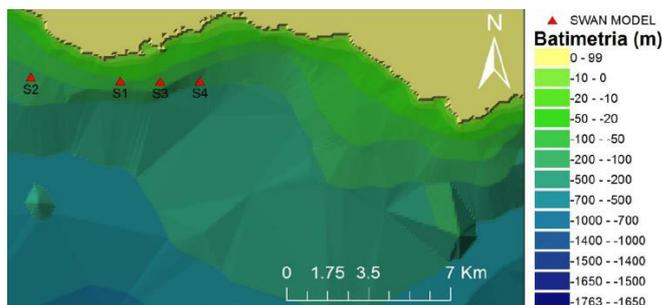


Figura 8. Localização dos pontos S1, S2, S3 e S4 na *nested grid*.

O ponto S2 corresponde à localização da boia ondógrafo de Ponta Delgada, permitindo assim a comparação entre os dados reais de altura da onda significativa ( $H_s$ ), do período da onda de pico ( $T_p$ ) e da direção média de ondas ( $\theta_m$ ) e os dados estimados através da aplicação do modelo SWAN. O objetivo de se considerar estes três pontos é avaliar a influência da sua posição, quer nos regimes de agitação marítima, quer nas séries de galgamento obtidas.

#### 4.4.4. Resultados do SWAN de janeiro de 1979 a dezembro de 2013

Os resultados do SWAN no período de janeiro de 1979 a dezembro de 2013 foram obtidos para os quatro pontos S1 a S4 e comparados entre si. Verificou-se que:

- Devido à refração, a altura da onda significativa diminui de forma considerável desde a posição ao largo até à entrada do porto em qualquer dos pontos e existe uma rotação da direção da crista da onda de modo a esta se dispor paralelamente às batimétricas;
- A maior altura de onda (quer média, quer máxima) foi registada para o ponto S1, muito provavelmente devido não só à maior proximidade do local, mas também à menor profundidade registada nesse ponto;
- O período das ondas mantém-se igual para os quatro pontos.

#### 4.4.5. Comparação dos resultados do modelo SWAN com os dados *in situ*

Os registos da boia ondógrafo apenas estiveram disponíveis a partir do dia 25 de agosto de 2005, pelo que a comparação realizada compreende o período que se inicia nessa data e termina a 31 de dezembro de 2013. Sendo o intervalo de tempo de registo da boia variável, fez-se uma filtragem dos valores para que fossem comparáveis com os obtidos através do modelo SWAN, ou seja, de seis em seis horas. No entanto, verifica-se ainda a falta de alguns registos que, como já foi referido anteriormente, podem estar relacionados com operações de manutenção, avarias, entre outros.

Tendo em conta os oito anos em análise, verificou-se que a variação de  $H_s$  para a boia ondógrafo é de 0.30m a 6.96m, e para o modelo SWAN é de 0.26m a 5.17m o que, juntamente com a análise do modelo, sugere uma subestimação dos valores de  $H_s$  pelo SWAN;

Através da comparação dos valores de  $T_z$  da boia com os de  $T_{m02}$  obtidos pelo SWAN, concluiu-se que há sobrestimação dos valores do período médio pelo modelo numérico. Verifica-se que há uma variação de  $T_z$  para a boia ondógrafo de 0.46s a 12.5s e, para o modelo SWAN, de  $T_{m02}$  de 3.76s a 10.72s;

Relativamente aos valores de  $\theta_m$ , concluiu-se que, tal como para  $H_s$ , há também neste caso uma subestimação dos valores de  $\theta_m$ , sendo que as duas curvas têm tendência a acompanhar-se ao longo do período em análise.

Com o intuito de avaliar a consistência destas comparações, foram calculados parâmetros que avaliam, estatisticamente, esses resultados: o ME (*mean error* ou valor médio do erro) e o RMSE (*root mean square error* ou valor médio do erro quadrático) e o SI (*Scatter index* ou índice de desvio). O ideal é que o ME se aproxime de 0, podendo ter valor positivo ou negativo, conforme se trate de uma sobrestimação ou subestimação, dos valores da boia pelo SWAN, respetivamente. Quanto ao RMSE, tem sempre valor positivo e quanto mais próximo de 0 se encontrar, maior a qualidade dos resultados do SWAN relativamente às medições da boia. O valor de SI representa o quociente entre a média dos registos totais e o valor de RMSE para essa variável, e o ideal é também que seja próximo de 0.

Relativamente a  $H_s$ , obteve-se  $ME=-0.096$  (subestimação),  $RMSE=0.455$  e  $SI=0.332$ . Em relação ao período médio, obteve-se  $ME=0.678$  (sobrestimação),  $RMSE=1.303$  e  $SI=0.211$ . No que diz respeito à direção média, obteve-se  $ME=-26.83$  (subestimação),  $RMSE=61.8$  e  $SI=4.042$ . Pode então concluir-se que o modelo SWAN consegue representar, de forma satisfatória, as condições de agitação predominantes na zona, sendo no entanto recomendável considerar a ação dos ventos no modelo, quando se pretende uma análise mais exaustiva de  $H_s$ . Além disso, a disponibilidade de dados mais completos é também bastante importante.

#### 4.5. Aplicação do modelo DREAMS

A aplicação do modelo DREAMS tem por objetivo a propagação das características da agitação desde os pontos do SWAN (pontos S) até à zona exterior e interior do porto (pontos D) (Figura 9 e Figura 10).



Figura 9. Representação geral dos pontos dos modelos SWAN (S) e DREAMS (D) (basemap do ArcGIS 10.1™).



Figura 10. Representação dos 12 pontos em estudo no modelo DREAMS (basemap do ArcGIS 10.1™).

Os dados de entrada para este modelo são:

- O domínio de cálculo: engloba o interior do porto até à zona exterior (pontos S1, S3 e S4 definidos no modelo SWAN);
- A malha de elementos finitos: utilizou-se a malha de elementos finitos criada no LNEC para o anterior estudo de Silva (2012), obtida pelo *software* GMALHA (Pinheiro *et al.*, 2008) e baseada nas condições de fronteira e na batimetria da zona em estudo, idêntica à utilizada no modelo SWAN;
- As características das fronteiras do domínio computacional que correspondem às fronteiras marítimas (onde são impostas as condições de agitação marítima obtidas com o modelo SWAN) e às fronteiras terrestres, que são trechos que delimitam toda a fronteira física do porto de Ponta Delgada;

- As características da agitação incidente: correspondem aos resultados dos cálculos efetuados com o modelo SWAN para os pontos S1, S3 e S4.

#### 4.6. Resultados do modelo DREAMS

Os resultados do modelo DREAMS no período de janeiro de 1979 a dezembro de 2013 foram obtidos para os 12 pontos, considerando como condições de agitação marítima incidente as correspondentes a cada um dos pontos S1, S3 e S4. Verifica-se que:

- Não existem diferenças muito significativas ao serem considerados diferentes pontos ao longo da fronteira de cálculo do DREAMS;
- As condições de agitação incidente nos pontos S3 e S4 conduziram a valores muito semelhantes em cada um dos pontos D1 a D12, relativamente ao que se verifica quando se considera a condição de agitação no ponto S1;
- Note-se que, no caso do período de onda, não há diferenças, qualquer que seja o ponto S considerado.

#### 4.7. Caudal médio de galgamento

##### 4.7.1. Ferramenta neuronal NN\_OVERTOPPING2

O uso da ferramenta NN\_OVERTOPPING2 implica o *input* dos dados de agitação marítima resultantes do modelo DREAMS, bem como uma pormenorizada descrição da geometria e características físicas de cada estrutura segundo o perfil da mesma.

No que diz respeito aos dados que definem as características físicas e geométricas das estruturas, é necessário, como *input*, inserir o valor de 12 parâmetros que permitem caracterizar o perfil da estrutura, alguns dos quais variam com o nível de maré (NM), Coeveld *et al.* (2005).

##### 4.7.2. Resultados e análise dos casos em estudo

Aquando da ocorrência do temporal de dezembro de 1996 e segundo os resultados dos modelos numéricos, a estrutura mais afetada foi o molhe do cais comercial, mais concretamente o ponto D1, onde o caudal de galgamento atingiu os 9.289 L/s/m, e para o qual a direção da agitação em relação ao norte era de 195°.

No mesmo molhe, mas no ponto D2, também ocorreu galgamento, desta vez de 0.946 L/s/m para uma direção bastante semelhante, a rondar os 198°. Finalmente, para o ponto D8, zona de enraizamento do molhe da marina nascente, resultaram dos cálculos de caudais de galgamento de 0.229 L/s/m, com direção próxima de 170°.

Estes resultados estão de acordo com a realidade uma vez que as três estruturas referidas são as que se encontram mais expostas à agitação marítima incidente nesta gama de direções e, dentro do conjunto das três, a mais exposta é a D1, ao passo que a D8 será a mais resguardada.

Pode então concluir-se que os pontos cujos cálculos resultaram em fenómenos de galgamento são, na sua maioria, aqueles que se encontram mais expostos, isto é, os pontos exteriores D1, D2, D7 e D8.

#### 4.8. Avaliação do risco de galgamento

##### 4.8.1. Valores admissíveis

Após a obtenção dos valores de caudal médio de galgamento por metro linear de estrutura através da ferramenta NN\_OVERTOPPING2, é necessário fazer uma comparação dos mesmos com os valores admissíveis estabelecidos por Pullen *et al.* (2007). No Quadro 5 estão resumidos os valores críticos acima referidos para cada local.

Quadro 5. Valores críticos/admissíveis de caudal médio de galgamento.

LOCAL	Estrutura marítima	Pessoas	Veículos	Edifícios	Equipamentos	Barcos
D1	200	1	5	1	0.4	-
D2	200	1	5	1	0.4	-
D7	200	-	-	-	-	10
D8	200	0.1	-	1	-	-
D10	200	0.03	5	0.4	0.4	-
D11	200	0.03	5	0.4	0.4	-
D12	200	0.03	-	-	-	-

##### 4.8.2. Probabilidade de ocorrência

A probabilidade de determinado valor de caudal de galgamento exceder o valor admissível pode ser calculada através do quociente entre o número de vezes em que esse valor foi ultrapassado e o número de casos registados (com ou sem galgamento) na propagação da agitação a partir de S1 – Quadro 6.

Quadro 6. Probabilidade de ocorrência de um determinado acontecimento para as diversas utilizações.

LOCAL	Estrutura marítima	Pessoas	Veículos	Edifícios	Equipamentos	Barcos
D1	0	0.0352	0.002	0.0352	0.2112	-
D2	0	0.0039	0	0.0039	0.332	-
D7	0	-	-	-	-	0
D8	0	0.71	-	0	0.002	-
D10	0	0.0059	0	0	0	-
D11	0	0	0	0	0	-
D12	0	0	-	-	-	-

##### 4.8.3. Consequências da ocorrência de galgamento utilizando a metodologia simples

Recorrendo ao Quadro 3 e à informação disponibilizada pela autoridade portuária, pode fazer-se uma avaliação expedita das consequências. A aplicação dessa classificação ao caso de estudo resultou no Quadro 7.

Quadro 7. Grau de consequências considerado em cada secção/ponto.

LOCAL	Pessoas	Ambiente	Gestão portuária	Edifícios	Equipamentos	Estruturas	Veículos
D1	25	5	25	10	25	15	10
D2	10	5	10	5	10	5	5
D7	2	1	1	-	2	5	-
D8	10	2	2	10	10	10	-
D10	2	1	1	2	-	-	1
D11	1	1	1	1	-	-	1
D12	1	1	1	1	-	1	-

#### 4.8.4. Grau de risco

O grau de risco obtém-se pela multiplicação do grau de probabilidade de ocorrência e do grau de consequência de ocorrência (sendo, neste caso, o maior de todos os graus admitidos). Pode então classificar-se o risco segundo a Quadro 8 e, caso necessário, impor medidas de controlo do mesmo.

Quadro 8. Grau de risco de galgamento em cada um dos pontos.

LOCAL	Grau de probabilidade	Grau de consequências	Grau de risco	Descrição	Controlo do risco
D1	1	25	25	Indesejável	Risco que deve ser evitado se for razoável em termos práticos; requer uma investigação detalhada e análise de custo-benefício; é essencial a monitorização.
D2	1	10	10	Reduzido	Risco que pode ser considerado aceitável, caso se seleccione um conjunto de medidas para o seu controlo
D7	1	5	5		
D8	1	10	10		
D10	1	2	2	Insignificante	Risco desprezável; não é preciso realizar medidas de controlo de risco
D11	1	1	1		
D12	1	1	1		

#### 4.8.5. Mapa de risco obtido com a metodologia simples

Na Figura 11 é possível analisar os resultados das avaliações anteriores em forma de mapa de risco. Cada bandeira representa uma cor que está relacionada com o grau de risco no ponto em estudo, resultado da combinação entre o grau de consequência de ocorrência e o grau de probabilidade de ocorrência.

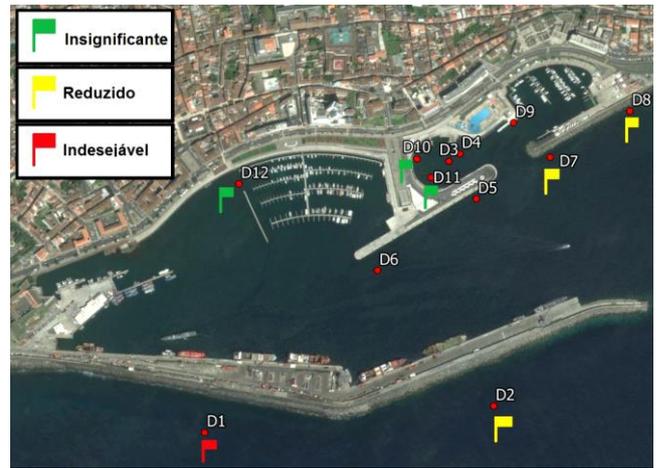


Figura 11. Representação gráfica do grau de risco de galgamento (adaptado de Google Earth).

## 5. Conclusões e Desenvolvimentos Futuros

O desenvolvimento deste trabalho permitiu perceber a importância de uma correta caracterização do regime de agitação marítima.

A exatidão dos seus resultados depende principalmente da qualidade e da quantidade dos dados de agitação marítima disponíveis, do conhecimento dos locais em estudo, da fiabilidade dos valores críticos admissíveis e da identificação das consequências associadas a um dado caudal médio de galgamento superior ao admissível. Permitiu também confirmar a necessidade de evoluir para uma metodologia mais elaborada, que considere a análise da inundação da zona galgada e uma análise mais sistemática e fundamentada das consequências de ocorrência de galgamento, uma vez que os resultados obtidos são pouco objetivos.

As classificações que são feitas ao longo desta avaliação ignoram fatores bastante relevantes para a avaliação do risco, resultando numa análise subjetiva que não contribui da melhor forma para a tomada de decisão na gestão de zonas costeiras e portuárias.

## Agradecimentos

Agradece-se à FCT o financiamento do projeto HIDRALERTA, ref. PTDC/AAC-AMB/120702/2010.

Agradece-se também às empresas CONSULMAR - Projetistas e Consultores, Lda. e Portos dos Açores, S.A., pela total disponibilidade de informações, particularmente à Eng<sup>a</sup> Lucília Luís e ao Eng<sup>o</sup> Vasco Antunes (CONSULMAR) e ao Sr. Hernâni Vicente e ao Eng<sup>o</sup> Francisco Silva (Portos dos Açores).

À Câmara Municipal de Ponta Delgada (CMPD), ao Instituto Hidrográfico (IH) e à Universidade dos Açores (UAc), em especial ao João Moniz (CMPD) ao Nuno Pereira da Costa (IH), ao Prof. Eduardo de Azevedo, ao Dr. Francisco Reis e à Dra. Anabela Simões (UAc), pela disponibilização de dados de base importantes para a realização deste trabalho.

## Referências

- Booij, N., Ris, R. C., Holthuijsen, L. H. (1999). *A third-generation wave model for coastal regions. Part I. Model description and validation*. Journal of Geophysical Research, C4, 104, 7649-7666.
- Brito, S. (2007). *Estudo de Galgamento em Estruturas Marítimas*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Coeveld, E. M., Van Gent, M. R. A., Pozueta, B. (2005). *Neural network manual: NN\_OVERTOPPING 2*. CLASH: WP8, WL/Delft Hydraulics, Delft.
- Flatter, D. (1998). *XTide Manual: Harmonic tide clock and tide predictor*. E.U.A.
- Fortes, C. J. E. M. (2002). *Transformações Não Lineares de Ondas em Zonas Portuárias. Análise pelo Método dos Elementos Finitos*. Tese de Doutoramento (Engenharia Mecânica), Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Komen, G., Hasselmann, S., Hasselmann, K. (1984). *On the existence of a fully developed wind-sea spectrum*. Journal of Physical Oceanography, 14, 1271-1285.
- Neves, D. R., Santos, J. A., Reis, M. T., Fortes, C. J. E. M., Simões, A., Azevedo, E. B., Rodrigues, M. C. (2012a). *Metodologia de avaliação do risco associado ao galgamento de estruturas marítimas. Aplicação ao porto e à baía da Praia da Vitória, Açores, Portugal*. Revista da Gestão Costeira Integrada, 12(3), 291-312.
- Pereira, D. M. F. (2013). *Avaliação do risco de galgamento de estruturas portuárias: o caso do porto de Ponta Delgada (Açores, Portugal)*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Universidade da Madeira, Funchal.
- Pinheiro, L. V., Fortes, C. J. E. M., Fernandes, J. L. (2008). *Gerador de malhas de elementos finitos para a simulação numérica de propagação de ondas marítimas*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 24(4), 369-391.
- Pinheiro, L., Santos, J. A., Fortes, C. J. E. M., Capitão, R. (2007). *SOPRO - Pacote integrado de modelos para avaliação dos efeitos das ondas em portos*. Revista da Tecnologia da Água, Edição I, março.
- Pullen, T., Allsop, N. W. H., Bruce, T., Kortenhuis, A., Schüttrumpf, H., van der Meer, J. W. (2007). *EurOtop – Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual*. Environment Agency, UK, Exper. Network Waterkeren, NL, 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*, in VI Congresso sobre Planeamento e Gestão de Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Ilha da Boa Vista, Cabo Verde.
- Reis, M. T., Neves, M. G. (2010). *Estudo do galgamento de estruturas marítimas utilizando um modelo numérico baseado na teoria da onda em condições de água pouco profunda*. Revista da Gestão Costeira Integrada, 10(4), 397-417.
- Rocha, T. S., Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., Santos, J. A., Neves, D., Portela, L., Pinto, F. T. (2013). *Avaliação comparativa do risco de galgamentos na Praia da Vitória, Terceira, Açores*. Vetor – Revista de Ciências Exatas e Engenharias, 23(1), 104-120.
- Rodrigues, J. (2014). *Avaliação do risco e aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP) na avaliação das consequências de galgamento em zonas costeiras e portuárias: aplicação ao porto de Ponta Delgada*, Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Santos, J. A., Reis, M. T., Neves, D., Fortes, C. J. E. M., Rodrigues, S., Azevedo, E., Rodrigues, M., Simões A., Ramalheira, J., Raposeiro, P. (2011). *Aplicação de uma metodologia para avaliação do risco para a navegação e galgamentos no porto de Praia da Vitória*, in 7.as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/ PIANC, Porto.
- Silva, D. M. F. (2012). *Avaliação do galgamento de estruturas portuárias*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra.
- SWAN Team. (2008). *Technical Documentation SWAN Cycle III version 40.51*. Delft University of Technology, The Netherlands.
- Taborda, R., Alveirinho Dias, J. M. (1992). *Análise da sobrelevação do nível do mar de origem meteorológica durante os temporais de fevereiro/março de 1978 e dezembro de 1981*. Geonovas, Número 1, Especial Geologia e o Ambiente, 89-97.
- Van Gent, M. R. A., van der Boogaard, H., Pozueta, B., Medina, J. (2007). *Neural network modeling of wave overtopping at coastal structures*. Coastal Engineering, 586-593
- WAMDI Group (1988). *The WAM model - A third generation ocean wave prediction model*. Journal of Physical Oceanography, 18, 1775-1810.