



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

# **SISTEMA DE PREVISÃO, ALERTA E GESTÃO DE RISCOS CAUSADOS PELA AGITAÇÃO MARÍTIMA**

**Relatório inicial – Arquitetura e características gerais  
do sistema para os portos de Madalena do Pico,  
São Roque do Pico e Praia da Vitória**

Portos dos Açores, S.A.

Lisboa • dezembro de 2018

**I&D** HIDRÁULICA E AMBIENTE

RELATÓRIO 410/2018 – **DHA/NPE**

## Título

### **SISTEMA DE PREVISÃO, ALERTA E GESTÃO DE RISCOS CAUSADOS PELA AGITAÇÃO MARÍTIMA**

Relatório inicial – Arquitetura e características gerais do sistema para os portos de Madalena do Pico, São Roque do Pico e Praia da Vitória

## Autoria

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

### **Liliana Pinheiro**

Bolseira de Pós-Doutoramento, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

### **Conceição Juana Fortes**

Investigadora Principal, Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

### **Maria Teresa Reis**

Investigadora Auxiliar, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

### **Pedro Poseiro**

Estagiário de Acolhimento, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

## Colaboração

### **Branca Branco**

Assistente Técnica, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

### **Maria da Graça Neves**

Investigadora Auxiliar com Agregação, Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: [lnec@lnec.pt](mailto:lnec@lnec.pt)

[www.lnec.pt](http://www.lnec.pt)

Relatório 410/2018

Proc. 0603/121/21062

## SISTEMA DE PREVISÃO, ALERTA E GESTÃO DE RISCOS CAUSADOS PELA AGITAÇÃO MARÍTIMA

Relatório inicial - Arquitetura e características gerais do sistema para os portos de Madalena do Pico, São Roque do Pico e Praia da Vitória

### Resumo

---

Neste relatório inicial são apresentadas a arquitetura e as características gerais dos protótipos do sistema de previsão, alerta e gestão de riscos causados pela agitação marítima para os portos de Madalena do Pico, São Roque do Pico e Praia da Vitória. Os três protótipos em desenvolvimento têm por base uma arquitetura semelhante, com características distintas, nomeadamente no que respeita à localização dos dados de base, às malhas computacionais utilizadas e às características físicas das fronteiras, tanto no plano horizontal (interface terra-mar), como no vertical (batimetria dos fundos). Caracteriza-se o *layout* geral dos portos, bem como a sua morfologia e operabilidade.

Palavras-chave: Sistema de previsão / Alerta e gestão de riscos / Agitação marítima / Porto de Madalena do Pico / Porto de São Roque do Pico / Porto de Praia da Vitória

## WAVE-GENERATED RISK FORECAST, ALERT AND MANAGEMENT SYSTEM

Initial report – System's architecture and characteristics for the ports of Madalena do Pico, São Roque do Pico and Praia da Vitória

### Abstract

---

This initial report presents the architecture and characteristics of the wave-generated risk forecast, alert and management system for the ports of São Roque do Pico, Madalena do Pico and Praia da Vitória. The three prototypes under development are based on a similar architecture, with distinct characteristics, namely the forcing data location, computational meshes and physical characteristics of the boundaries, in both the horizontal (land-sea interface) and vertical (bathymetry of the sea-floor) planes. The general layout of the ports is characterized, as well as their morphology and operability.

Keywords: Risk forecast / Alert and management system / Wave conditions / Port of Madalena do Pico / Port of São Roque do Pico / Port of Praia da Vitória



# Índice

1	Introdução .....	1
2	Portos em estudo .....	2
2.1	Porto da Madalena do Pico.....	2
2.1.1	Batimetria e ondas .....	4
2.1.2	Caraterização das estruturas marítimas.....	6
2.1.3	Situações de temporal .....	13
2.2	Porto de São Roque do Pico .....	17
2.2.1	Batimetria e ondas .....	21
2.2.2	Caraterização das estruturas marítimas.....	22
2.2.3	Situação de temporal .....	28
2.3	Porto da Praia da Vitória.....	31
2.3.1	Caraterização das estruturas marítimas.....	32
3	Sistema HIDRALERTA.....	35
3.1	Arquitetura geral do sistema .....	35
3.2	Modulo I - Caraterização da agitação marítima.....	36
3.3	Modulo II - Galgamentos e navegação.....	37
3.3.1	Galgamentos.....	37
3.3.2	Navegação.....	38
3.4	Modulo III – Avaliação do risco.....	42
3.4.1	Galgamentos.....	43
3.4.2	Navegação.....	44
3.5	Módulo IV - Sistema de alerta.....	46
3.5.1	Plataforma web .....	48
3.5.2	Boletim diário do sistema HIDRALERTA.....	49
3.6	Ferramenta de validação de resultados .....	52
4	Atividades em curso e previstas .....	54
5	Considerações finais .....	57
	Referências bibliográficas .....	59
	Anexos.....	63
	ANEXO I Plantas dos portos da Madalena do Pico e de São Roque do Pico.....	65
	ANEXO II Plantas e perfis das obras de proteção dos portos da Madalena do Pico e de São Roque do Pico .....	69
	ANEXO III Modelos numéricos.....	75

## Índice de figuras

Figura 2.1 – Portugal e ilhas; Arquipélago dos Açores; Ilha do Pico, Ilha Terceira .....	2
Figura 2.2 – Porto da Madalena do Pico. Fotografia aérea da vila de Madalena; Porto da Madalena – Google Earth© 2011 .....	3
Figura 2.3 – Porto da Madalena do Pico. Ocorrências de galgamentos (2012) .....	3
Figura 2.4 – Porto da Madalena do Pico. Visão geral e principais infraestruturas (adaptado de Google Earth© 2018).....	4
Figura 2.5 – Carta Náutica. Zona marítima do Porto da Madalena do Pico. Levantamento hidrográfico (jun/jul 2015) .....	5
Figura 2.6 – Boia Faial/Pico: Localização .....	6
Figura 2.7 – Boia Faial/Pico: Registo em 31 de julho de 2018 .....	6
Figura 2.8 – Porto da Madalena do Pico. Esquema em planta do quebra-mar norte (Portos dos Açores, S.A.).....	7
Figura 2.9 – Porto da Madalena do Pico. Tetrápodes de reserva (esq.); Vista do quebra-mar norte exterior (2015) (dir.) .....	7
Figura 2.10 – Porto da Madalena do Pico. Projeto atual de perfil transversal tipo do quebra-mar norte (Portos dos Açores, S.A.) .....	8
Figura 2.11 – Porto da Madalena do Pico. Perfil transversal da cabeça do quebra-mar norte (Portos dos Açores, S.A.).....	8
Figura 2.12 – Porto da Madalena do Pico. Esquema de materiais presentes na camada superior dos taludes do quebra-mar norte (adaptado de planos por Portos do Açores, S.A.) .....	9
Figura 2.13 – Porto da Madalena do Pico. Perfil transversal tipo da zona interior do quebra-mar norte (Portos dos Açores, S.A.) .....	9
Figura 2.14 – Porto da Madalena do Pico. Vista geral do intradorso do quebra-mar norte (2015).....	10
Figura 2.15 – Porto da Madalena do Pico. Rampa do porto (2015) .....	10
Figura 2.16 – Porto da Madalena do Pico. Novo Terminal de passageiros João Quaresma (à esq., 2015) e fotografia aérea (à dir.; portodamadalenablogspot.com) .....	11
Figura 2.17 – Porto da Madalena do Pico. Zona de embarcação para navios Ro/Ro no terminal em 2015 e em 2018, com mudança dos cabeços de amarração para 50 ton .....	11
Figura 2.18 – Porto da Madalena do Pico. Zona de laser/marina .....	12
Figura 2.19 – Porto da Madalena do Pico. Resumo do material do manto principal do quebra-mar oeste (adaptado de Portos dos Açores, S.A.) .....	12
Figura 2.20 – Porto da Madalena do Pico. Perfil transversal tipo do quebra-mar oeste (Portos dos Açores, S.A.).....	13
Figura 2.21 – Porto da Madalena do Pico. Alturas máxima e significativa, e períodos de pico e médio nos dias 6 e 7 de janeiro de 2014 .....	14
Figura 2.22 – Porto da Madalena do Pico. Alturas máxima e significativa, e períodos de pico e médio nos dias 27 e 28 de fevereiro de 2017 .....	15
Figura 2.23 – Porto da Madalena do Pico. Fotos dos estragos provocados pelo temporal de 6 e 7 de janeiro de 2014 .....	15
Figura 2.24 – Porto da Madalena do Pico. Fotos dos estragos provocados pelo temporal de 27 e 28 de fevereiro de 2017 .....	16
Figura 2.25 – Porto da Madalena do Pico. Foto dos estragos provocados pelo temporal de 6 de novembro de 2018 .....	17
Figura 2.26 – Porto de São Roque do Pico. Zona de estudo (Google Earth© 2012).....	18
Figura 2.27 – Porto de São Roque do Pico. Imagens aéreas.....	18
Figura 2.28 – Porto de São Roque do Pico. Vista geral e do cais interior .....	19
Figura 2.29 – Porto de São Roque do Pico. Fotografias das zonas do porto: a) cais principal; b) rampa Ro/Ro; c) porto de pesca; d) cabeça do molhe; e) armazenamento dos contentores; f) instalações portuárias .....	20

Figura 2.30 – Porto de São Roque do Pico. Zona do cais e cabeços de amarração .....	21
Figura 2.31 – Porto de São Roque do Pico. Carta Náutica. Zona marítima. Levantamento hidrográfico (junho/julho 2015) .....	22
Figura 2.32 – Porto de São Roque do Pico. Perfil do molhe do porto comercial. Retirado de “Projeto de execução do reperfilamento do manto de proteção do molhe-cais do porto de São Roque do Pico” (Consulmar, 2012) .....	23
Figura 2.33 – Porto de São Roque do Pico. Perfil da cabeça do molhe do porto comercial. Retirado de “Projeto de execução do reforço da cabeça do molhe do porto comercial de São Roque do Pico” (Consulmar, 2011) .....	24
Figura 2.34 – Porto de São Roque do Pico. Fotos do molhe do porto comercial.....	24
Figura 2.35 – Porto de São Roque do Pico. Fotos do cais do porto comercial (2015, em cima; 2018, em baixo) .....	25
Figura 2.36 – Porto de São Roque do Pico. Planta da rampa Ro/Ro. Retirado de “Projeto de execução da empreitada de construção de rampa para navios Ro/Ro e ferry, e obras complementares, no porto de São Roque do Pico” (WW, 2014) .....	25
Figura 2.37 – Porto de São Roque do Pico. Perfil da rampa Ro/Ro. Retirado de “Projeto de execução da empreitada de construção de rampa para navios Ro/Ro e ferry, e obras complementares, no porto de São Roque” (WW, 2014) .....	26
Figura 2.38 – Porto de São Roque do Pico. Foto da rampa Ro/Ro e cais ferry do porto comercial: a) 2015; b) e c) 2018.....	26
Figura 2.39 – Porto de São Roque do Pico. Planta do porto de recreio náutico (azul) .....	27
Figura 2.40 – Fotos do cais do porto de recreio náutico de São Roque do Pico.....	27
Figura 2.41 – Porto de São Roque do Pico. Galgamentos em diversas zonas durante o temporal de 8 de março de 2013 (Foto: Luís Rodrigues).....	28
Figura 2.42 – Porto de São Roque do Pico. Fotos dos estragos provocados pelo temporal de 8 de março de 2013 .....	29
Figura 2.43 – Aspeto da atracação do ferry Gilberto Mariano ao cabeço de amarração, antes do acidente de 14 de novembro de 2014 (esq.). Aspeto da zona onde estava inserido o cabeço de amarração, após o acidente (dir.) .....	30
Figura 2.44 – Localização e imagem aérea da Praia da Vitória, Ilha Terceira, Açores .....	31
Figura 2.45 – Porto da Praia da Vitória. Principais estruturas marítimas .....	32
Figura 2.46 – Porto da Praia da Vitória. Perfis do quebra-mar sul: a) Perfil D3 - perfil junto ao Cais 12; b) Perfil D8 – perfil entre o Cais 12 e a cabeça do quebra-mar .....	33
Figura 2.47 – Porto da Praia da Vitória. Perfil do quebra-mar norte.....	33
Figura 2.48 – Porto da Praia da Vitória. Perfis ao longo da defesa frontal: a) perfil junto ao esporão 3 (D1); b) perfil entre esporões (D2 e D4 a D7).....	34
Figura 3.1 – HIDRALERTA. Esquema do sistema.....	36
Figura 3.2 – Parâmetros de entrada das ferramentas NN_OVERTOPPING2 .....	37
Figura 3.3 – Estrutura do pacote numérico SWAMS e da sua introdução no sistema HIDRALERTA ..	40
Figura 3.4 – Exemplo dos painéis do casco de um navio .....	41
Figura 3.5 – Exemplo do esquema de amarração de um navio .....	42
Figura 3.6 – Série temporal de forças numa amarra, densidade espectral e curva de probabilidade de excedência.....	42
Figura 3.7 – Mapa de previsão de emissão de alerta. Exemplo da adequação de conteúdo da interface web, de acordo com as características do browser cliente .....	47
Figura 3.8 – Layouts do mapa de agitação marítima gerado pelo DREAMS e do mapa de alerta gerado pelo sistema para dois instantes de previsão .....	49
Figura 3.9 – Layouts do mapa dos esforços nas amarras e dos movimentos gerados pelo sistema para dois instantes de previsão .....	49
Figura 3.10 – Exemplo de boletim diário do HIDRALERTA na Praia da Vitória, com previsão de agitação marítima e de ocorrência de galgamentos oceânicos para 72 horas .....	50
Figura 3.11 – Praia da Vitória. Mapa de consequências e Mapa de Risco .....	50
Figura 3.12 – Fotografia da Praia da Vitória durante o furacão Alex (15 de janeiro de 2016) .....	51

Figura 3.13 – Validação dos modelos numéricos com os dados da boia ondógrafo em tempo real ....	53
Figura I.1 – Planta do Porto de Madalena do Pico .....	67
Figura I.2 – Planta do Porto de São Roque do Pico .....	68
Figura II.1 – Planta e perfis do molhe do Porto da Madalena do Pico.....	71
Figura II.2 – Planta e perfis da cabeça do molhe do Porto da Madalena do Pico .....	72
Figura II.3– Planta e perfis do molhe destacado do Porto da Madalena do Pico .....	73
Figura II.4 – Perfis das obras do Porto de São Roque do Pico .....	74
Figura III.1 – Sistema de coordenadas baricêntrico. Convenção para numeração dos painéis e seus vértices. Retirado do manual do WAMIT® (MIT, 1990).....	79

## Índice de quadros

Quadro 3.1 – Avaliação do grau de risco e da sua aceitabilidade para os galgamentos .....	43
Quadro 3.2 – Avaliação do grau de risco e da sua aceitabilidade para a navegação .....	43
Quadro 3.3 – Grau de probabilidade associado à ocorrência de acontecimento perigoso .....	44
Quadro 3.4 – Níveis de risco .....	46



# 1 | Introdução

A Portos dos Açores, S.A., solicitou ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. (LNEC) o desenvolvimento/aplicação do sistema HIDRALERTA para previsão, alerta e gestão de riscos causados pela agitação marítima nos seguintes portos: Madalena do Pico e São Roque do Pico (Cais do Pico), ambos na Ilha do Pico, Açores. Também se pretende garantir a funcionalidade e operacionalidade do sistema atualmente implementado no porto da Praia da Vitória, na Ilha Terceira.

Os sistemas pretendem avaliar e prever, com periodicidade, o risco de galgamento costeiro e inundação e o risco para navios amarrados nos três portos atrás referidos.

O objetivo final deste trabalho é o aumento do nível de segurança das operações portuárias, que inclui a segurança de pessoas, navios, veículos, edifícios, equipamento e infraestruturas portuárias, nos portos da Madalena do Pico, São Roque do Pico e Praia da Vitória.

A proposta para a realização deste trabalho foi solicitada, por correio eletrónico, pela Portos dos Açores, em 6 de dezembro de 2017, onde foram fornecidas as peças do procedimento de ajuste direto para a prestação dos serviços denominados: "Desenvolvimento do sistema de previsão, alerta e gestão de riscos causados pela agitação marítima – HIDRALERTA, nos portos de São Roque e Madalena na Ilha do Pico e garantia da funcionalidade e operacionalidade do sistema atualmente implementado no porto da Praia da Vitória, na Ilha Terceira", nomeadamente o Convite e os seus anexos e o Caderno de Encargos. Em 30 de julho de 2018 foi adjudicado o trabalho ao LNEC.

Este trabalho insere-se no Programa Operacional INTERREG MAC 2014-2020 - ECOMARPORT.

O presente relatório descreve, de forma geral, as principais características dos portos em estudo e a arquitetura geral do sistema HIDRALERTA.

## 2 | Portos em estudo

Os portos em estudo situam-se nos Açores, na Ilha do Pico, o porto da Madalena do Pico e o porto de São Roque do Pico, e na Ilha Terceira, o porto da Praia da Vitória, Figura 2.1.

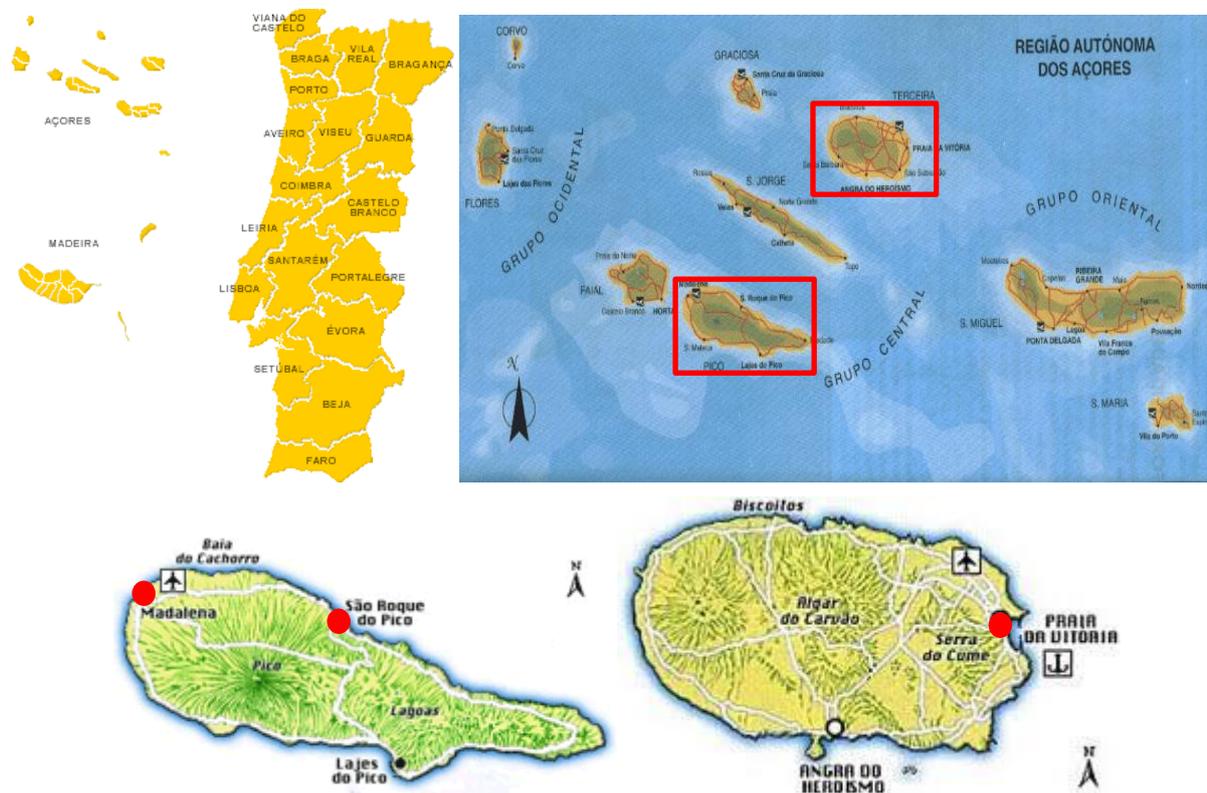


Figura 2.1 – Portugal e ilhas; Arquipélago dos Açores; Ilha do Pico, Ilha Terceira

### 2.1 Porto da Madalena do Pico

A vila da Madalena da Ilha do Pico da Região Autónoma dos Açores localiza-se na zona Oeste da ilha e alberga cerca de 2500 habitantes, sendo sede de um município de 149.08 km<sup>2</sup> com 6049 habitantes (Censos, INE, 2011).

A vila é o resultado do desenvolvimento populacional gerado à volta do Forte da Madalena (desenvolvido para combater a pirataria em outras épocas) e tem vindo a desenvolver-se nos últimos 50 anos através do seu porto. Atualmente, a vila define-se como principal eixo de comunicação com a Ilha do Faial.

A Figura 2.2 mostra como era o porto da Madalena do Pico antes da implantação de um segundo quebra-mar a Oeste. O porto dispunha apenas de um molhe a Norte, protegendo as embarcações e as instalações portuárias. Não existia nenhuma estrutura de dissipação de energia das ondas provenientes do lado Oeste, o que sujeitava todo o porto ao constante perigo de galgamento em toda a sua extensão.



Figura 2.2 – Porto da Madalena do Pico. Fotografia aérea da vila de Madalena; Porto da Madalena – Google Earth© 2011

Apesar de o molhe Norte desempenhar a função de dissipação de energia das ondas, servindo também como base para muitas operações portuárias, a sua estrutura não era suficiente para mitigar os efeitos do fenómeno do galgamento, Figura 2.3.



Figura 2.3 – Porto da Madalena do Pico. Ocorrências de galgamentos (2012)

Em 2013/2014 foram realizadas obras no sentido de criar um novo molhe a Oeste, tendo-se reforçado também o molhe a Norte, implementando um farol para guia de embarcações e visibilidade no mar e modificado alguns aspetos construtivos ao longo da sua extensão, nomeadamente alteração do declive do talude e reforço do número de tetrápodes.

Foi também inaugurado o novo Terminal de Passageiros, Figura 2.4a, permitindo um serviço mais eficiente no transporte de pessoas entre as Ilhas do Pico e do Faial. Na Figura 2.4b estão identificadas as infraestruturas principais do porto.

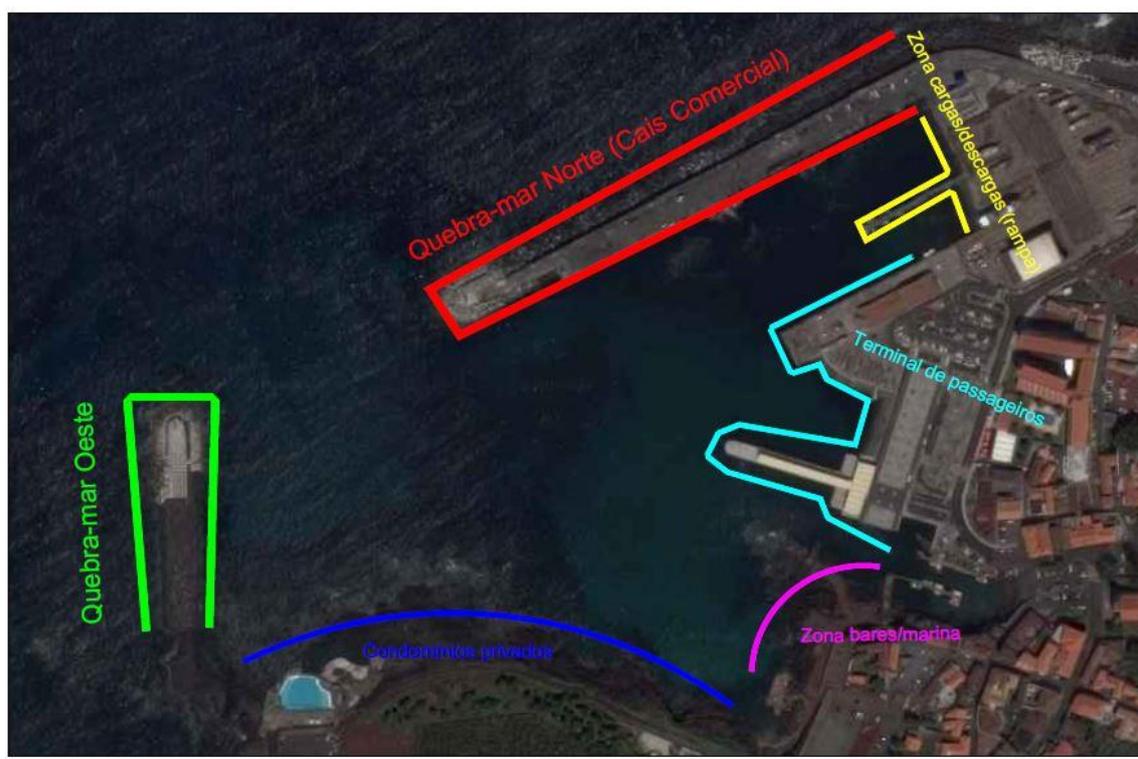


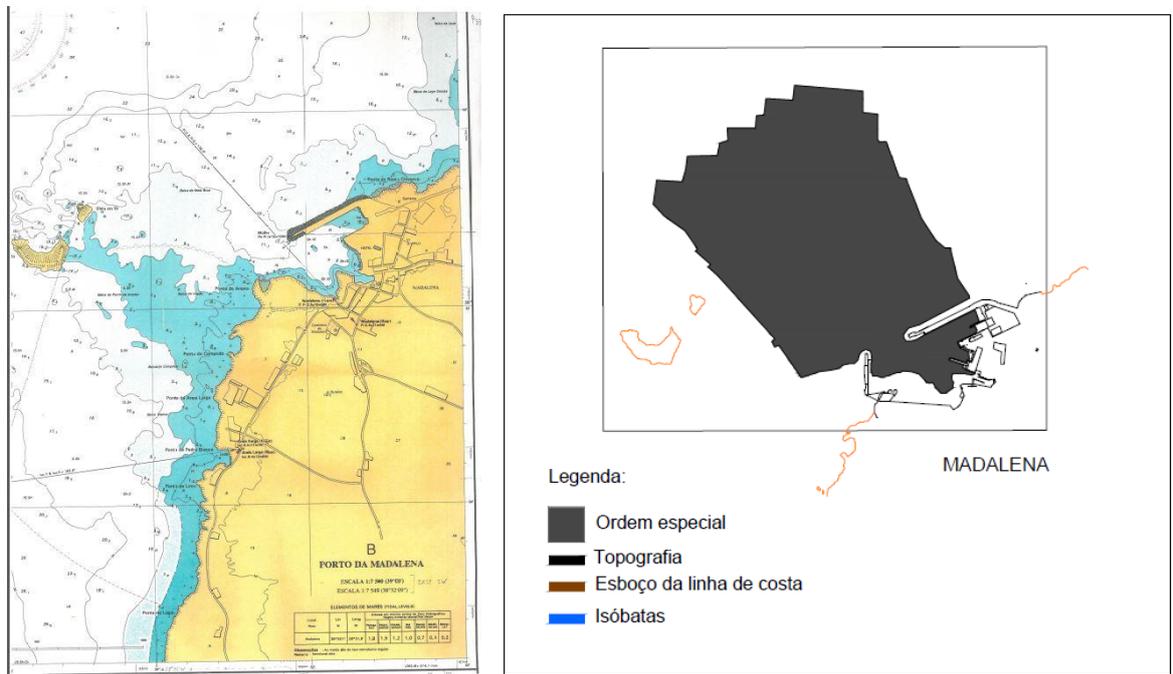
Figura 2.4 – Porto da Madalena do Pico. Visão geral e principais infraestruturas (adaptado de Google Earth© 2018)

### 2.1.1 Batimetria e ondas

A batimetria da zona em estudo, Figura 2.5., foi fornecida pela Portos dos Açores sob diversas formas, nomeadamente, cartas náuticas e levantamento hidrográfico em formato DWG, nomeadamente:

- Carta Náutica. Arquipélago dos Açores – Grupo Central. Canal de São Jorge (Ilhas de São Jorge e Pico). Escala 1:75000. Maio de 2000. Instituto Hidrográfico;
- Porto da Madalena. Escala 1: 7500. Instituto Hidrográfico;
- Ilha do Pico. Porto da Madalena. 46403B1/15ST. Jun - Jul 2015 - Escala 1: 2500. Instituto Hidrográfico.

No Anexo I encontram-se os dados relativos a plantas do porto, batimetrias e zonas delimitadas, assim como os desenhos técnicos dos perfis das obras portuárias, fornecidos pela Portos dos Açores, S.A..



Quanto à agitação marítima, os dados foram retirados da boia Faial/Pico. Esta boia encontra-se fundeada a 123 m de profundidade, nas coordenadas 38°35.03'N 28°32.47'W (M=366088.0089 m e P=4274219.3091 m, Figura 2.6, para o sistema de coordenadas associado ao Grupo Central dos Açores EPSG 5015 – ITRF 93/PT RA 08 – UTM zona 26 N).

A boia fornece dados a cada 10 minutos, aproximadamente, das condições de agitação marítima traduzidas pelos parâmetros da altura significativa ( $H_s$ ), direção média ( $\theta$ ) e período médio ( $T_{zmed}$ ) entre outros, desde 1 de janeiro de 2007, Figura 2.7.

Os dados da boia são igualmente utilizados para verificação das previsões dos modelos numéricos e posterior calibração, com vista a otimizar o sistema para as especificidades do local.

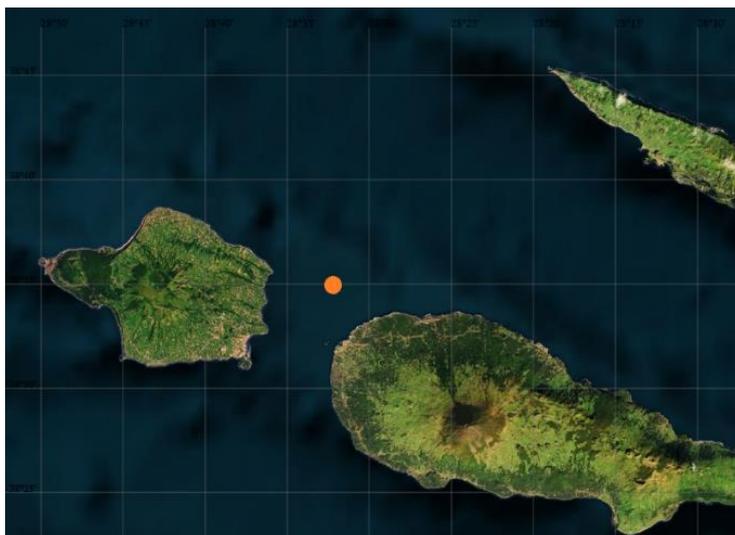


Figura 2.6 – Boia Faial/Pico: Localização

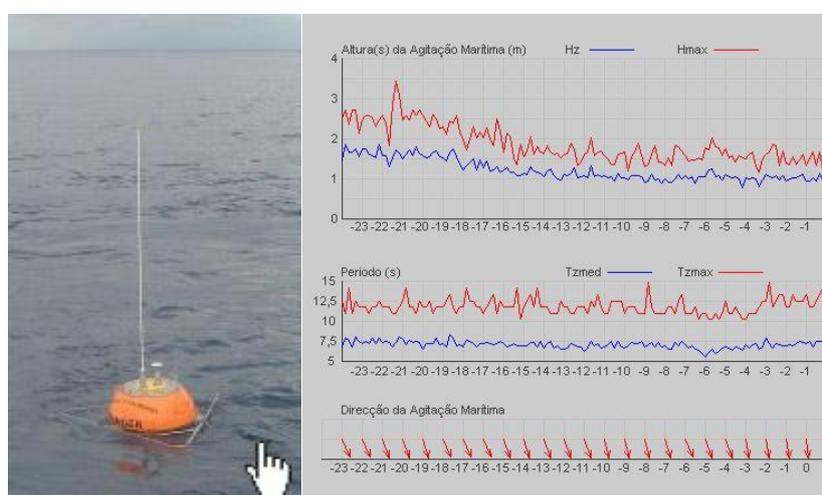


Figura 2.7 – Boia Faial/Pico: Registo em 31 de julho de 2018

## 2.1.2 Caracterização das estruturas marítimas

### 2.1.2.1 Quebra-mar norte (cais comercial)

O quebra-mar norte representa a principal proteção portuária contra a ação constante do mar. Com uma extensão total de aproximadamente 530 m, apenas cerca de 250 m são acostáveis, constituindo a chamada “Doca da Madalena”. Na cabeça do molhe, eleva-se um farolim. Apresenta-se, na Figura 2.8, o esquema do quebra-mar norte.



Figura 2.8 – Porto da Madalena do Pico. Esquema em planta do quebra-mar norte (Portos dos Açores, S.A.)

Na zona onde se inicia a estrutura do quebra-mar, o perfil contém tetrápodes da ordem dos 150 kN e enrocamentos de 90-120 kN. É aqui que se encontra um pequeno stock de tetrápodes, prontos para servirem como peças de substituição em qualquer parte do quebra-mar, caso seja necessário, Figura 2.9.



Figura 2.9 – Porto da Madalena do Pico. Tetrápodes de reserva (esq.); Vista do quebra-mar norte exterior (2015) (dir.)

Cerca de 150 m após o cotovelo, o peso dos tetrápodes passa a 240 kN, colocados sobre uma camada de enrocamento de 1-3 ton, num declive de 3:4 (v:h), Figura 2.10.

Já do lado interior, a estrutura apresenta enrocamento de dois pesos: no manto principal, de 5-8 ton e no filtro de 1-3 ton, Figura 2.10.

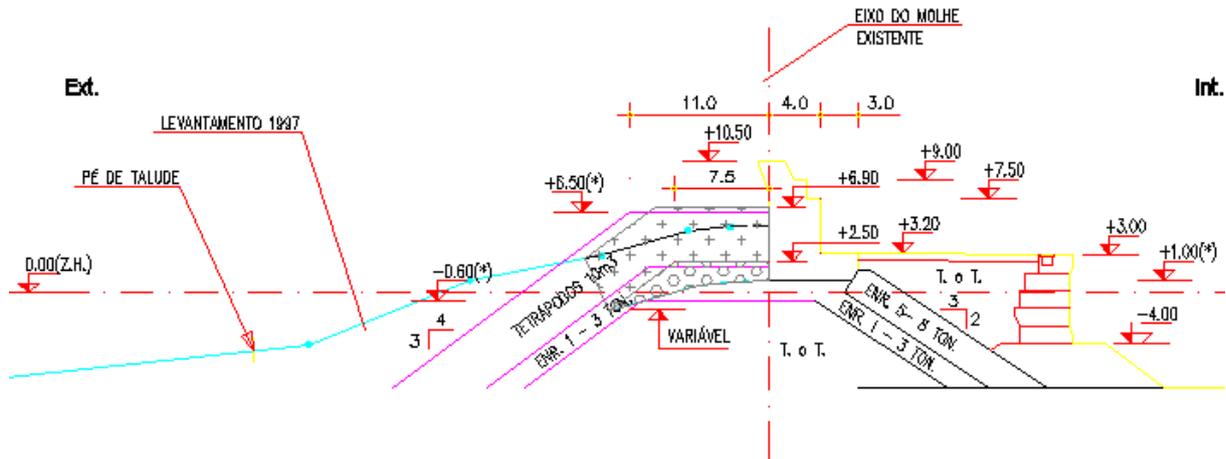


Figura 2.10 – Porto da Madalena do Pico. Projeto atual de perfil transversal tipo do quebra-mar norte (Portos dos Açores, S.A.)

Esta secção é comum até ao início da rotação da cabeça do molhe-cais, e a partir daí a configuração da secção apresenta as características constantes da Figura 2.11.

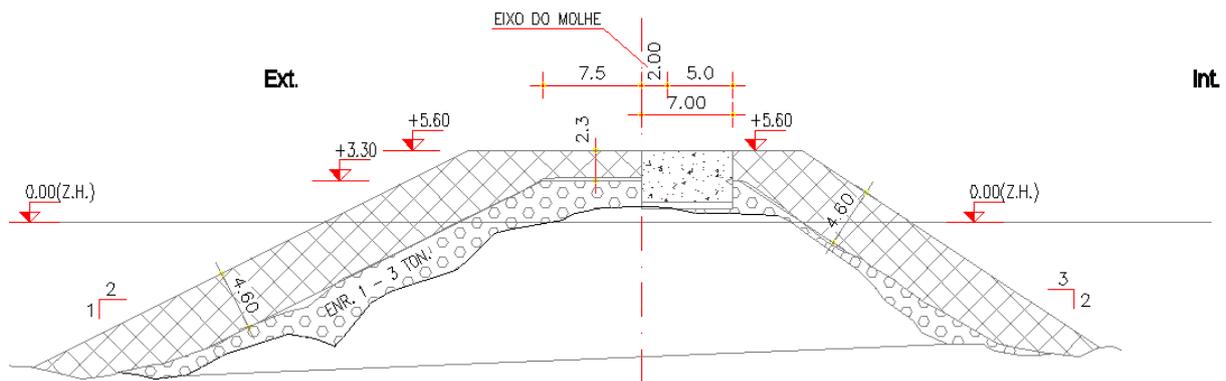


Figura 2.11 – Porto da Madalena do Pico. Perfil transversal da cabeça do quebra-mar norte (Portos dos Açores, S.A.)

Observa-se então que o declive do extradorso muda de 3:4 para 1:2 e que os tetrápodos são substituídos por cubos Antifer de 300 kN, contornando por completo toda a zona abrangente ao farolim. O declive de 1:2 passa para 2:3, na zona onde os cubos já se podem considerar estar no intradorso.

Apresenta-se, na Figura 2.12, o resumo dos materiais presentes em cada parte do molhe-cais Norte.

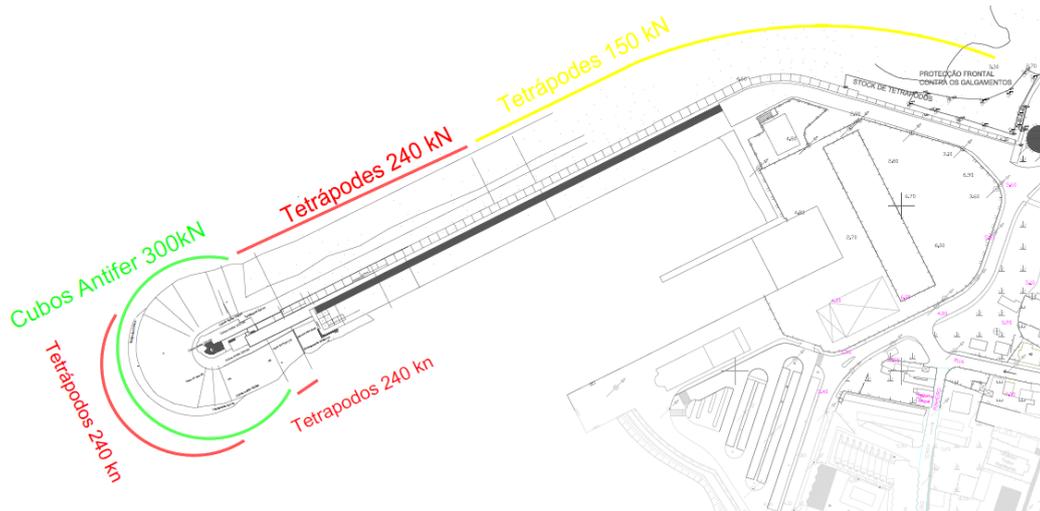


Figura 2.12 – Porto da Madalena do Pico. Esquema de materiais presentes na camada superior dos taludes do quebra-mar norte (adaptado de planos por Portos do Açores, S.A.)

A zona do cais é constituída por betão assente num talude de enrocamento de 200-500 kg, que, na zona mais profunda, chega a atingir -6 m (ZH), Figura 2.13. A altura máxima da plataforma pedonal e de circulação de veículos é de 9 m (desde o fundo à base da plataforma). A largura da zona acessível é de 17 m. Trata-se, evidentemente, da zona de todo o porto mais afetada pelo galgamento marítimo.

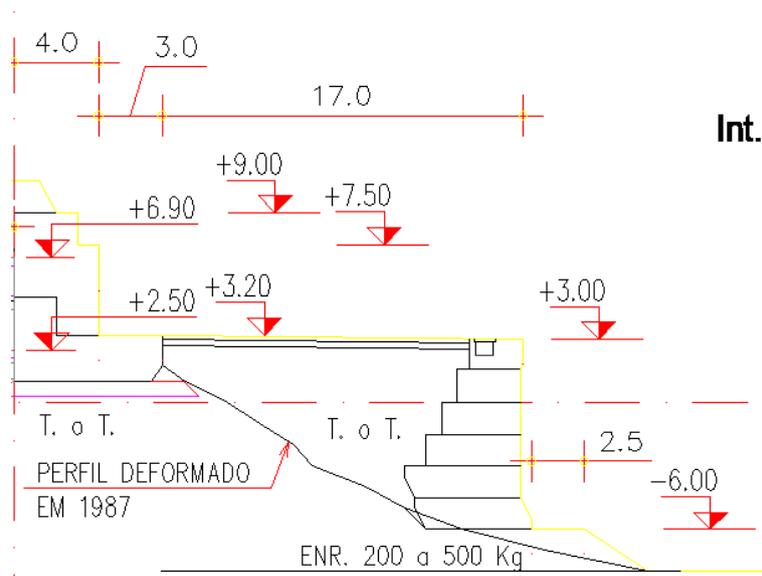


Figura 2.13 – Porto da Madalena do Pico. Perfil transversal tipo da zona interior do quebra-mar norte (Portos dos Açores, S.A.)

O molhe-cais permite a atracação de navios e a realização das operações comerciais de carga e descarga, visível na Figura 2.14. No entanto, nem todas as embarcações conseguem atracar ao longo de toda a extensão, visto que a zona junto à cabeça do molhe está, como já referido, a -6.0 m (ZH) e diminui para terra, até atingir -4.0 m (ZH).



Figura 2.14 – Porto da Madalena do Pico. Vista geral do intradorso do quebra-mar norte (2015)

### 2.1.2.2 Rampa do porto

A rampa serve principalmente para que as embarcações sejam transportadas para terra, por meio de reboques ou qualquer outro sistema, servindo também como zona de estacionamento de barcos que precisem de qualquer tipo de reparo ou manutenção (Figura 2.15).

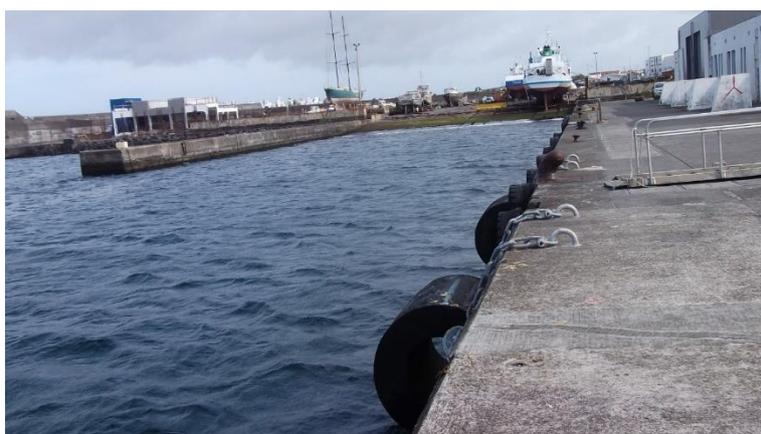


Figura 2.15 – Porto da Madalena do Pico. Rampa do porto (2015)

### 2.1.2.3 Terminal marítimo João Quaresma

Construído durante 2013, o Terminal marítimo João Quaresma, Figura 2.16, foi inaugurado em março de 2014 e veio reforçar a gestão do transporte de pessoas e viaturas para a principal ligação da Madalena do Pico, que é a Ilha do Faial. Desde então, o terminal tem servido para as funções para que foi concebido, não obstante se terem verificado situações em que os navios de passageiros não atracam ao mesmo devido à intensa agitação marítima.



Figura 2.16 – Porto da Madalena do Pico. Novo Terminal de passageiros João Quaresma (à esq., 2015) e fotografia aérea (à dir.; portodamadalenablogspot.com)

A infraestrutura está dotada com salas de embarque e desembarque de passageiros, *check-in*, posto de turismo, bar com esplanada, três balcões comerciais e uma sala de apoio à transferência de doentes ([www.radiopico.com](http://www.radiopico.com)). A Figura 2.17 mostra a zona de embarcação para navios *Roll-On/Roll-Off* (Ro/Ro).



Figura 2.17 – Porto da Madalena do Pico. Zona de embarcação para navios Ro/Ro no terminal em 2015 e em 2018, com mudança dos cabeços de amarração para 50 ton

### 2.1.2.4 *Marina / Zona de bares e restaurantes*

Logo após o terminal de passageiros existe uma zona onde atracam pequenas embarcações, Figura 2.18, mas que primariamente serve como acesso a uma zona onde se situam alguns bares e esplanadas.



Figura 2.18 – Porto da Madalena do Pico. Zona de laser/marina

### 2.1.2.5 *Quebra-mar oeste*

O quebra-mar oeste teve obras em 2012/2013 com o objetivo de reforçar a proteção à agitação marítima proveniente de sudoeste. A Figura 2.19 resume o tipo de materiais utilizados no manto principal do quebra-mar oeste.

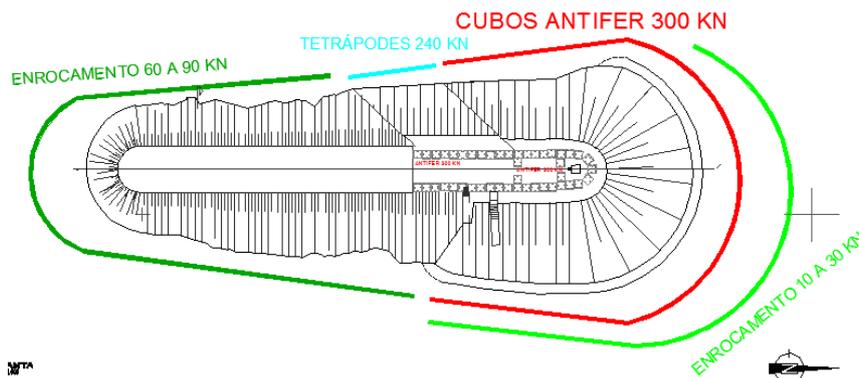


Figura 2.19 – Porto da Madalena do Pico. Resumo do material do manto principal do quebra-mar oeste (adaptado de Portos dos Açores, S.A.)

A Figura 2.20 mostra o perfil transversal tipo do quebra-mar oeste, onde é possível ver que os taludes de cubos Antifer de 300 kN têm uma inclinação 2:3 (v:h), assentes num talude de enrocamento de 10-30 kN, sob um fundo natural rochoso. O coroamento do quebra-mar situa-se à cota +5.5 m (ZH).

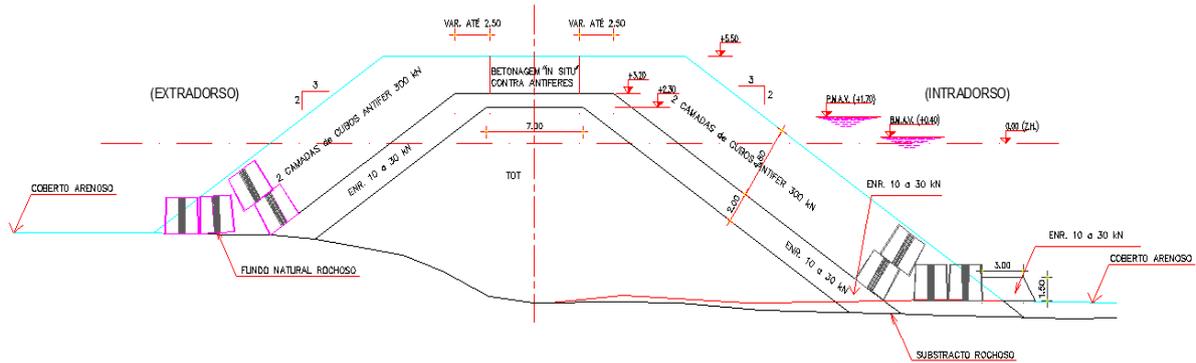


Figura 2.20 – Porto da Madalena do Pico. Perfil transversal tipo do quebra-mar oeste (Portos dos Açores, S.A.)

No trecho em que os cubos Antifer são substituídos por tetrápodes de 240 kN, como mostrado na Figura 2.19, o talude apresenta o mesmo declive de 2:3.

Na cabeça do molhe, foi implementada uma proteção extra de cubos Antifer, ao longo de 50 m, de modo a reforçar a minimização do galgamento na estrutura.

### 2.1.3 Situações de temporal

São vários os episódios de temporal no porto da Madalena do Pico. Neste relatório apenas se refere o temporal que levou à destruição do quebra-mar principal do porto, e um dos mais recentes, nomeadamente os temporais de 6 e 7 de janeiro de 2014 e o de 27 e 28 de fevereiro de 2017. Os registos na boia do Faial da altura de onda máxima, da altura de onda significativa, do período de pico e do período médio estão ilustrados na Figura 2.21 e na Figura 2.22. Na Figura 2.23 e na Figura 2.24 mostram-se algumas imagens dos estragos verificados após os temporais.

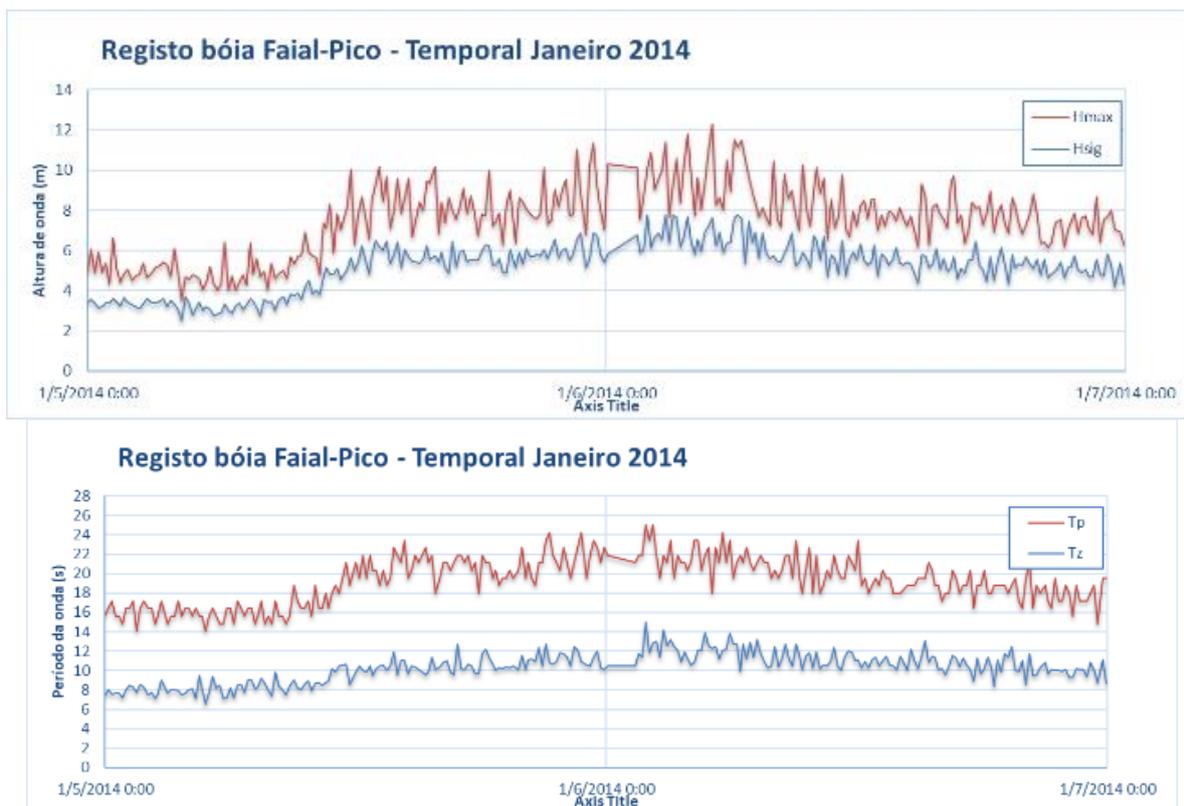


Figura 2.21 – Porto da Madalena do Pico. Alturas máxima e significativa, e períodos de pico e médio nos dias 6 e 7 de janeiro de 2014

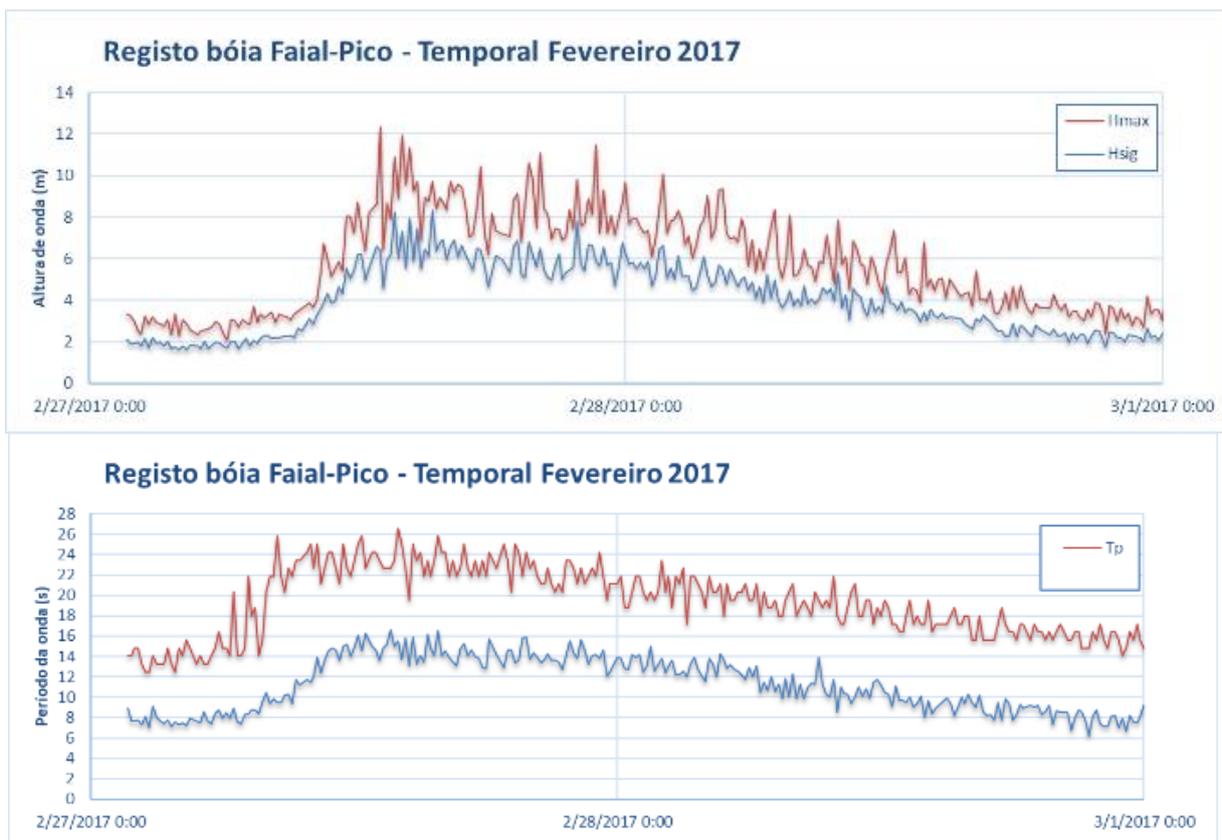


Figura 2.22 – Porto da Madalena do Pico. Alturas máxima e significativa, e períodos de pico e médio nos dias 27 e 28 de fevereiro de 2017



Figura 2.23 – Porto da Madalena do Pico. Fotos dos estragos provocados pelo temporal de 6 e 7 de janeiro de 2014

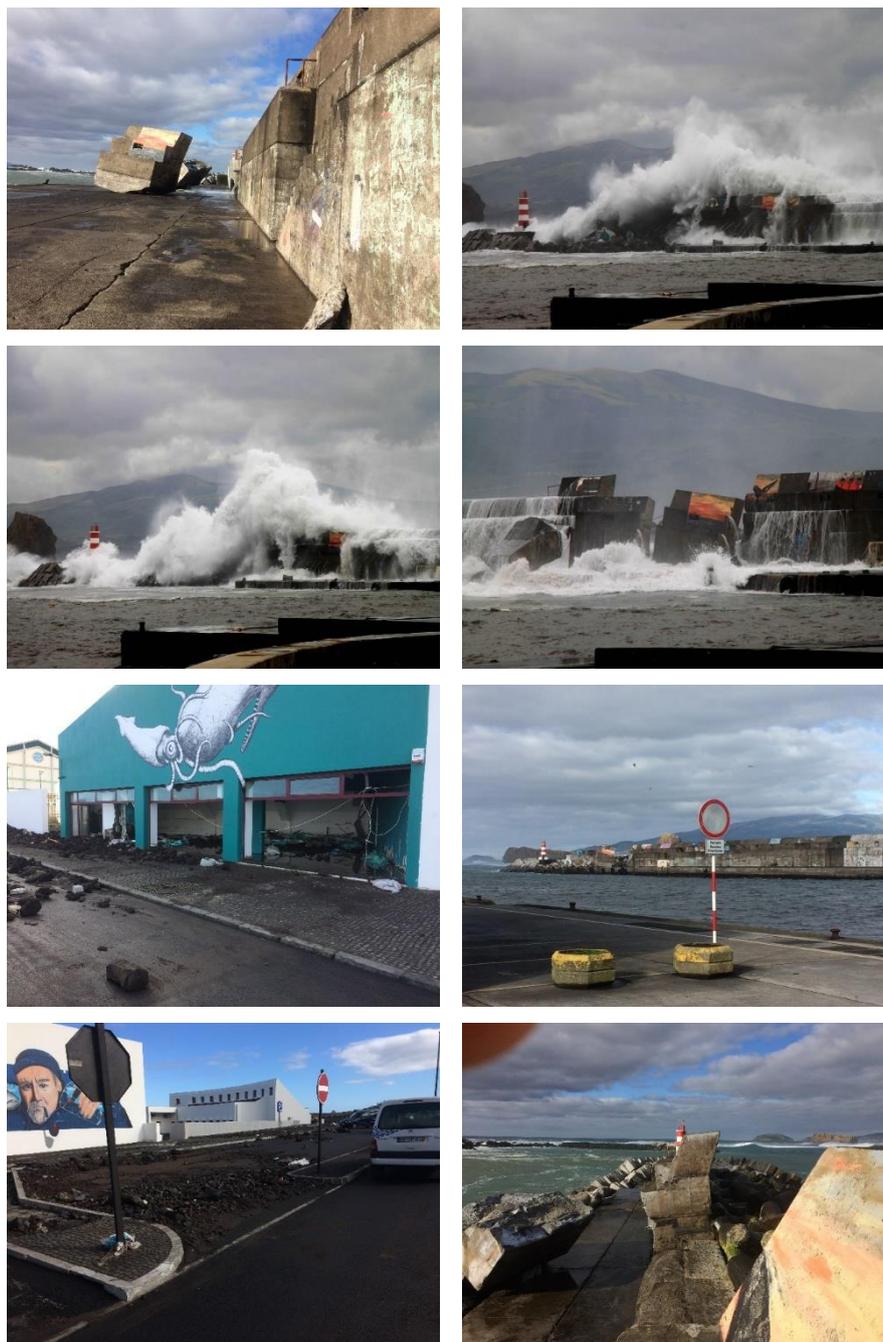


Figura 2.24 – Porto da Madalena do Pico. Fotos dos estragos provocados pelo temporal de 27 e 28 de fevereiro de 2017

Note-se que em casos de temporal, são várias as situações reportadas de dificuldades na travessia Faial-Pico (Madalena do Pico ou São Roque do Pico), verificando-se mesmo a interrupção das travessias dos navios de passageiros ou alterações do local de atracação desses navios, que passam a utilizar o cais antigo do porto da Madalena. Recentemente, o LNEC foi informado de cancelamentos nas travessias de 14 e 15 de setembro de 2018 devido à passagem da tempestade tropical Helene.

Em 6 de novembro de 2018, verificaram-se galgamentos muito significativos do molhe principal de proteção do porto de Madalena do Pico (Figura 2.25).



Figura 2.25 – Porto da Madalena do Pico. Foto dos estragos provocados pelo temporal de 6 de novembro de 2018

## 2.2 Porto de São Roque do Pico

O porto de São Roque do Pico situa-se na costa Norte da Ilha do Pico, do Arquipélago dos Açores (Figura 2.26), costa esta caracterizada por taludes rochosos que atingem profundidades elevadas muito próximo da linha de costa. A zona portuária é protegida por um quebra-mar com um comprimento aproximado de 400 m, composto por dois troços retos de 200 m cada, Figura 2.27. Em 2005, houve, obras de reparação deste quebra-mar, especialmente na sua cabeça. Recentemente, foi construída uma rampa Ro/Ro para atracação de ferries que fazem transporte de passageiros e viaturas entre as ilhas.



Figura 2.26 – Porto de São Roque do Pico. Zona de estudo (Google Earth© 2012)

O porto é constituído por uma zona de estacionamento de navios de carga e navios do tipo ferry (Gilberto Mariano e Mestre Simão), uma rampa Ro-Ro, Figura 2.28, e uma zona de abrigo dos barcos de pesca. Na Figura 2.29 apresentam-se as várias zonas do porto.



Figura 2.27 – Porto de São Roque do Pico. Imagens aéreas



Figura 2.28 – Porto de São Roque do Pico. Vista geral e do cais interior

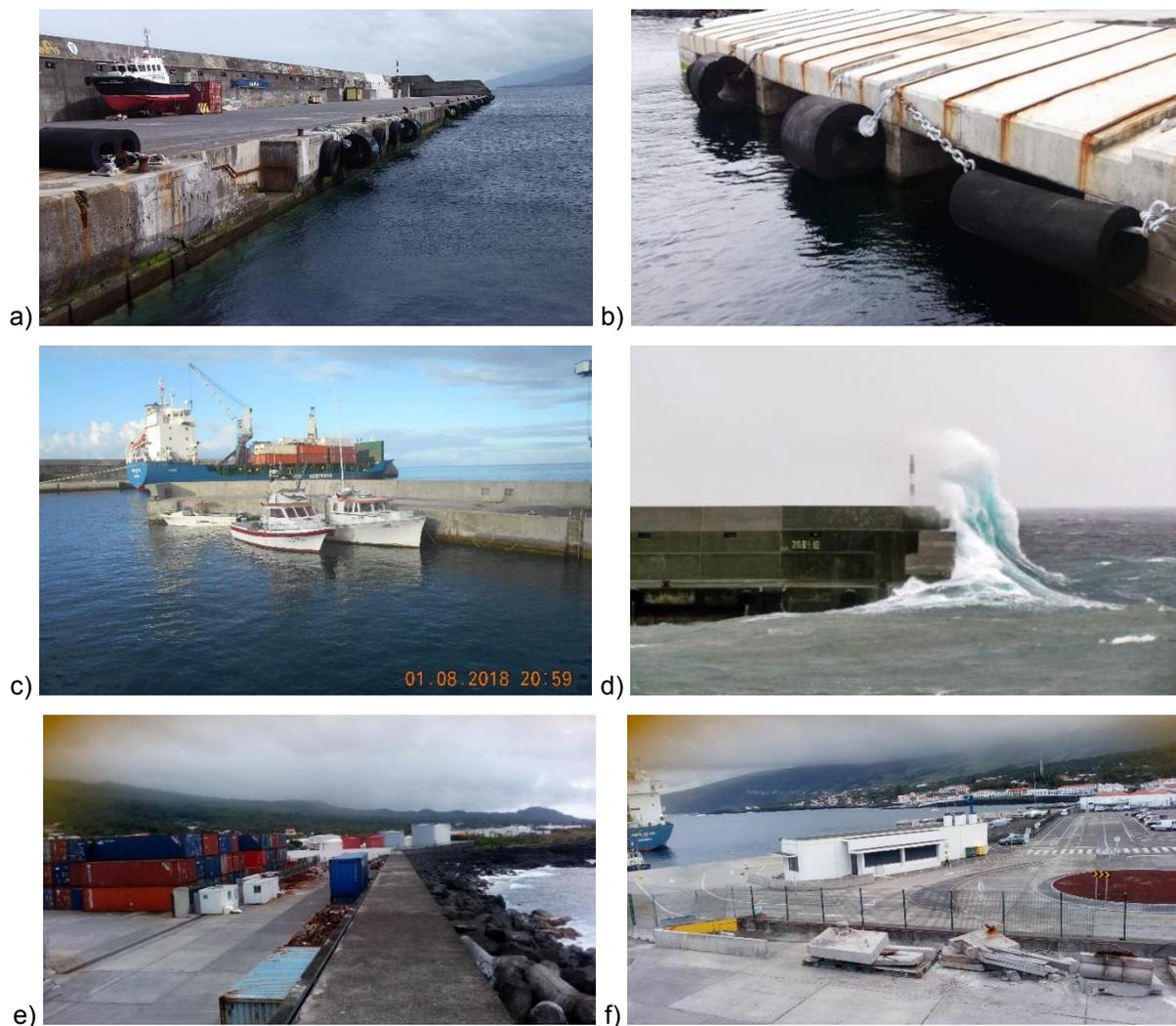


Figura 2.29 – Porto de São Roque do Pico. Fotografias das zonas do porto: a) cais principal; b) rampa Ro/Ro; c) porto de pesca; d) cabeça do molhe; e) armazenamento dos contentores; f) instalações portuárias

Na Figura 2.30 apresenta-se uma fotografia da zona do cais onde foram substituídos, em 2017, todos os cabeços de amarração na zona de atracação dos navios por novos cabeços com capacidade de carga de 50 toneladas.



Figura 2.30 – Porto de São Roque do Pico. Zona do cais e cabeços de amarração

## 2.2.1 Batimetria e ondas

A batimetria da zona em estudo, Figura 2.31, foi fornecido pela Portos dos Açores sob diversas formas, nomeadamente, cartas náuticas e levantamento hidrográfico em formato DWG:

- Carta Náutica. Arquipélago dos Açores – Grupo Central. Canal de São Jorge (Ilhas de São Jorge e Pico). Escala 1:75000. Maio de 2000. Instituto Hidrográfico;
- Ilha do Pico. Porto de São Roque do Pico. 47501A/15ST. Jun - Jul 2015 - Escala 1: 2500. Instituto Hidrográfico.

No Anexo II encontram-se os dados relativos a plantas do porto de São Roque do Pico, batimetrias e zonas delimitadas, assim como os desenhos técnicos dos perfis das obras portuárias, fornecidos pela Portos dos Açores, S.A..

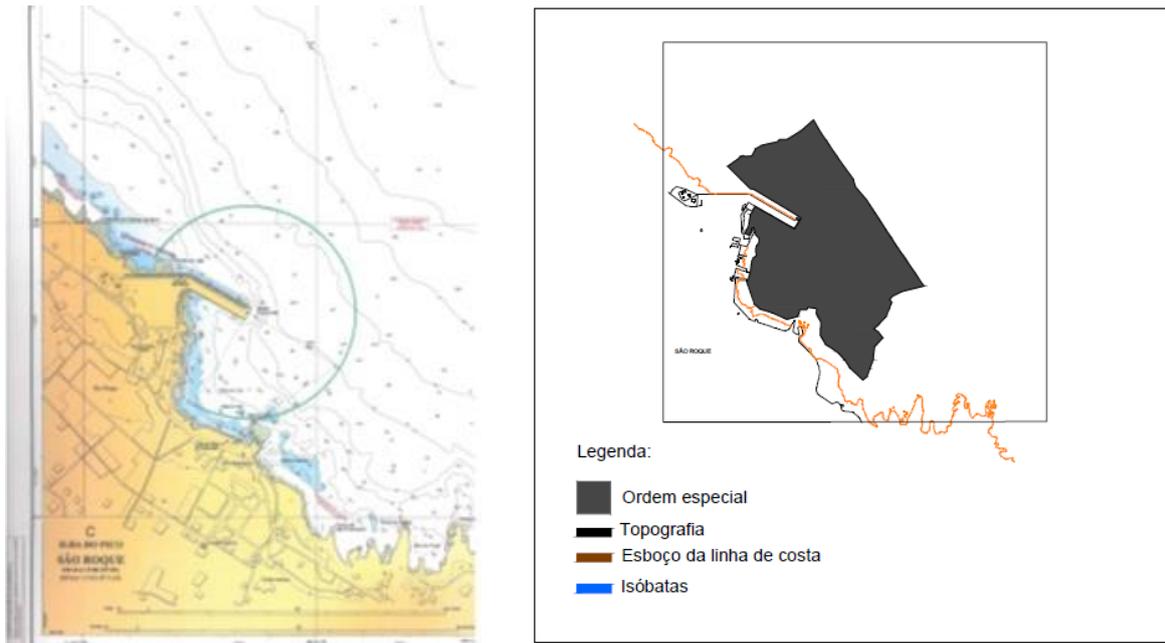


Figura 2.31 – Porto de São Roque do Pico. Carta Náutica. Zona marítima. Levantamento hidrográfico (junho/julho 2015)

Quanto à agitação marítima, tal como no Porto da Madalena, os dados são retirados da boia Faial/Pico, Figura 2.6, e são utilizados igualmente para verificação das previsões dos modelos numéricos e posterior calibração, com vista a otimizar o sistema para as especificidades do local.

## 2.2.2 Caracterização das estruturas marítimas

### 2.2.2.1 Molhe do porto comercial

O molhe do porto comercial de São Roque do Pico tem cerca de 400 m de comprimento, separando-se em dois alinhamentos retos que se estendem por 200 m. O tramo mais recuado tem a função de abrigar os terraplenos do porto. O tramo mais destacado, onde se desenvolve o cais, tem um comprimento de 180 m, em que os últimos 40 m têm fundos à cota -4.5 m (ZH). Os primeiros 140 m têm cota de fundo de -7.5 m (ZH).

O quebra-mar é constituído por um muro cortina com estrutura defletora e por um manto de proteção com um declive de 3:4, composto por tetrápodes de 250 kN. Em 2012, este manto sofreu intervenções de reperfilamento, Figura 2.32..

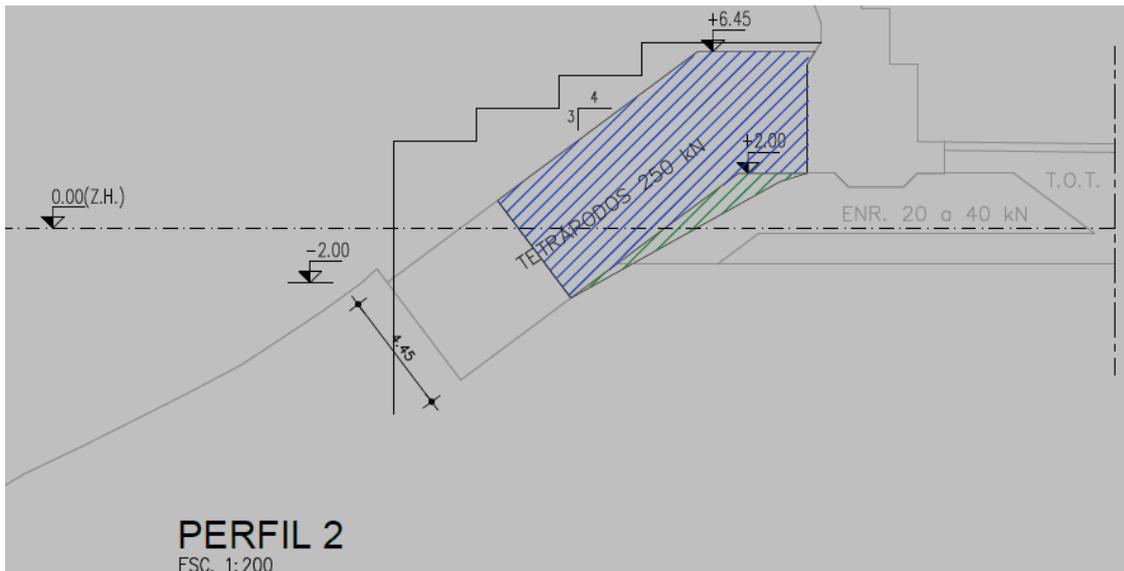


Figura 2.32 – Porto de São Roque do Pico. Perfil do molhe do porto comercial. Retirado de “Projeto de execução do reperfilamento do manto de proteção do molhe-cais do porto de São Roque do Pico” (Consulmar, 2012)

A cabeça sofreu obras de reforço em 2011, sendo constituída por caixotões de betão armado, assentes num prisma de enrocamento, fundado à cota -50 m (ZH). Este tem a função de acostagem no paramento interior, tendo uma largura útil de aproximadamente 20 m, Figura 2.33 e Figura 2.34.

A costa é rochosa e o fundo tem um declive tal que a batimétrica dos -50 m (ZH) dista 250 m da linha costeira.

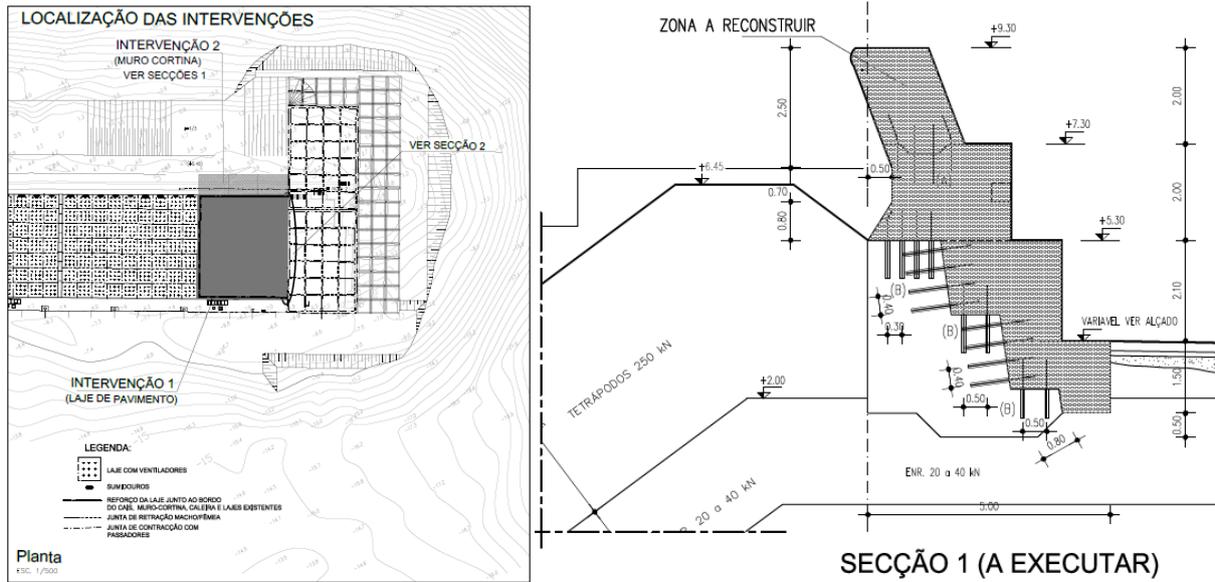


Figura 2.33 – Porto de São Roque do Pico. Perfil da cabeça do molhe do porto comercial. Retirado de “Projeto de execução do reforço da cabeça do molhe do porto comercial de São Roque do Pico” (Consulmar, 2011)



Figura 2.34 – Porto de São Roque do Pico. Fotos do molhe do porto comercial

### 2.2.2.2 Cais

O cais acostável no intradorso do molhe tem uma extensão de cerca de 180 m e uma largura de serviço de cerca de 20 m, Figura 2.35.



Figura 2.35 – Porto de São Roque do Pico. Fotos do cais do porto comercial (2015, em cima; 2018, em baixo)

### 2.2.2.3 Rampa Ro/Ro

A rampa Ro/Ro permite a acostagem de navios do tipo ferry e Ro/Ro e desenvolve-se numa extensão de 22 m, tem uma largura de 4 m com inclinação de 12.5% e de mais 1 m com inclinação de 16.5%, Figura 2.36, Figura 2.37 e Figura 2.38.

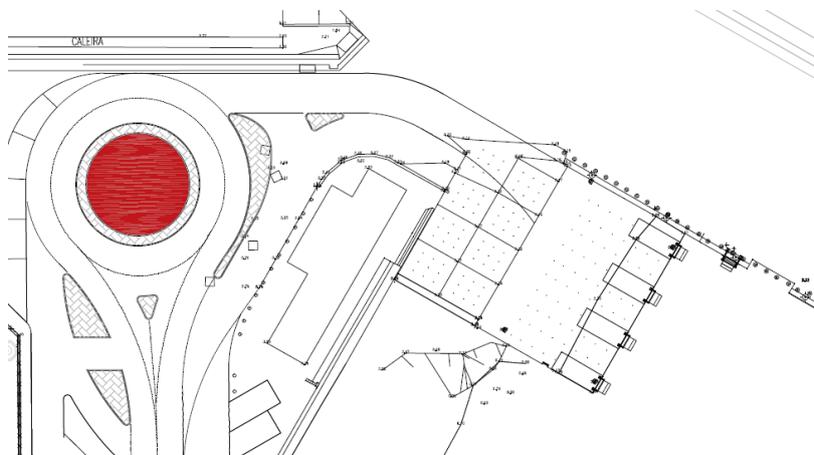


Figura 2.36 – Porto de São Roque do Pico. Planta da rampa Ro/Ro. Retirado de “Projeto de execução da empreitada de construção de rampa para navios Ro/Ro e ferry, e obras complementares, no porto de São Roque do Pico” (WW, 2014)

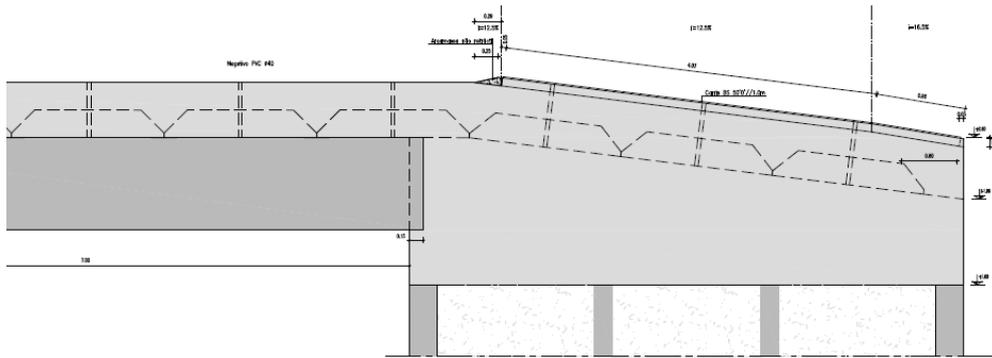


Figura 2.37 – Porto de São Roque do Pico. Perfil da rampa Ro/Ro. Retirado de “Projeto de execução da empreitada de construção de rampa para navios Ro/Ro e ferry, e obras complementares, no porto de São Roque” (WW, 2014)



Figura 2.38 – Porto de São Roque do Pico. Foto da rampa Ro/Ro e cais ferry do porto comercial: a) 2015; b) e c) 2018

#### 2.2.2.4 Porto de recreio náutico

O porto de recreio náutico é protegido por uma estrutura de caixotões, situando-se no intradorso cerca de 50 m de cais acostável, Figura 2.39 e Figura 2.40.

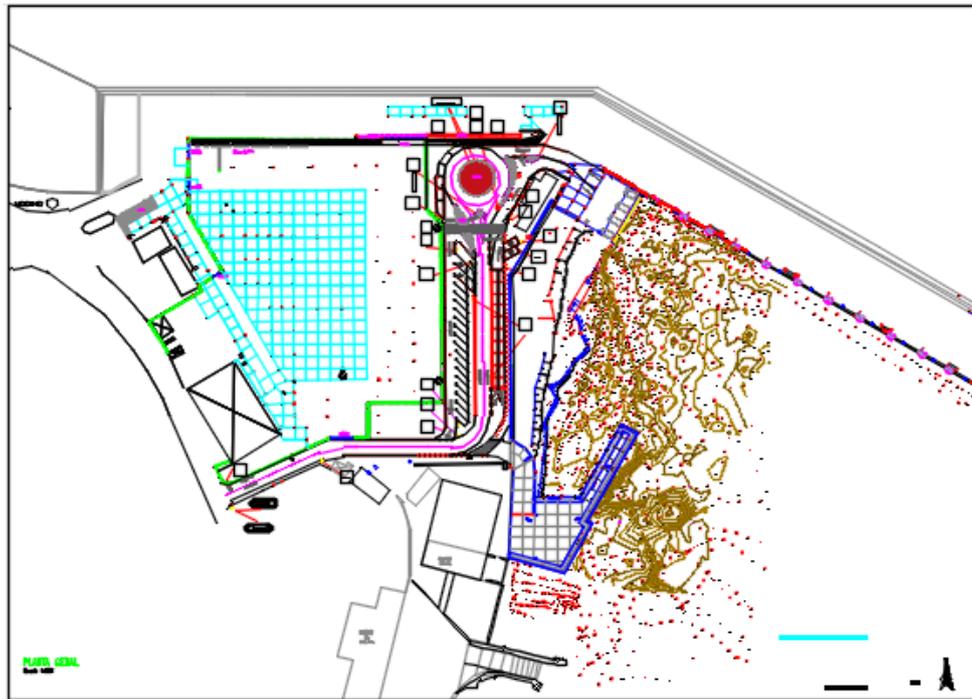


Figura 2.39 – Porto de São Roque do Pico. Planta do porto de recreio náutico (azul)



Figura 2.40 – Fotos do cais do porto de recreio náutico de São Roque do Pico

### 2.2.3 Situação de temporal

São vários os episódios de temporal no porto de São Roque do Pico. A zona mais frequentemente afetada pelos galgamentos é o enraizamento do molhe principal, que protege o terraplino portuário, levando a perturbações pontuais na operacionalidade deste terraplino.

Os temporais mais energéticos, por seu lado, levam a ocorrências de galgamentos um pouco por toda a extensão do porto. Refira-se, por exemplo, o temporal de 8 de março de 2013, cujos estragos se estenderam desde a zona portuária até á avenida marginal da vila e que se ilustram na Figura 2.41 e na Figura 2.42.



Figura 2.41 – Porto de São Roque do Pico. Galgamentos em diversas zonas durante o temporal de 8 de março de 2013 (Foto: Luís Rodrigues)

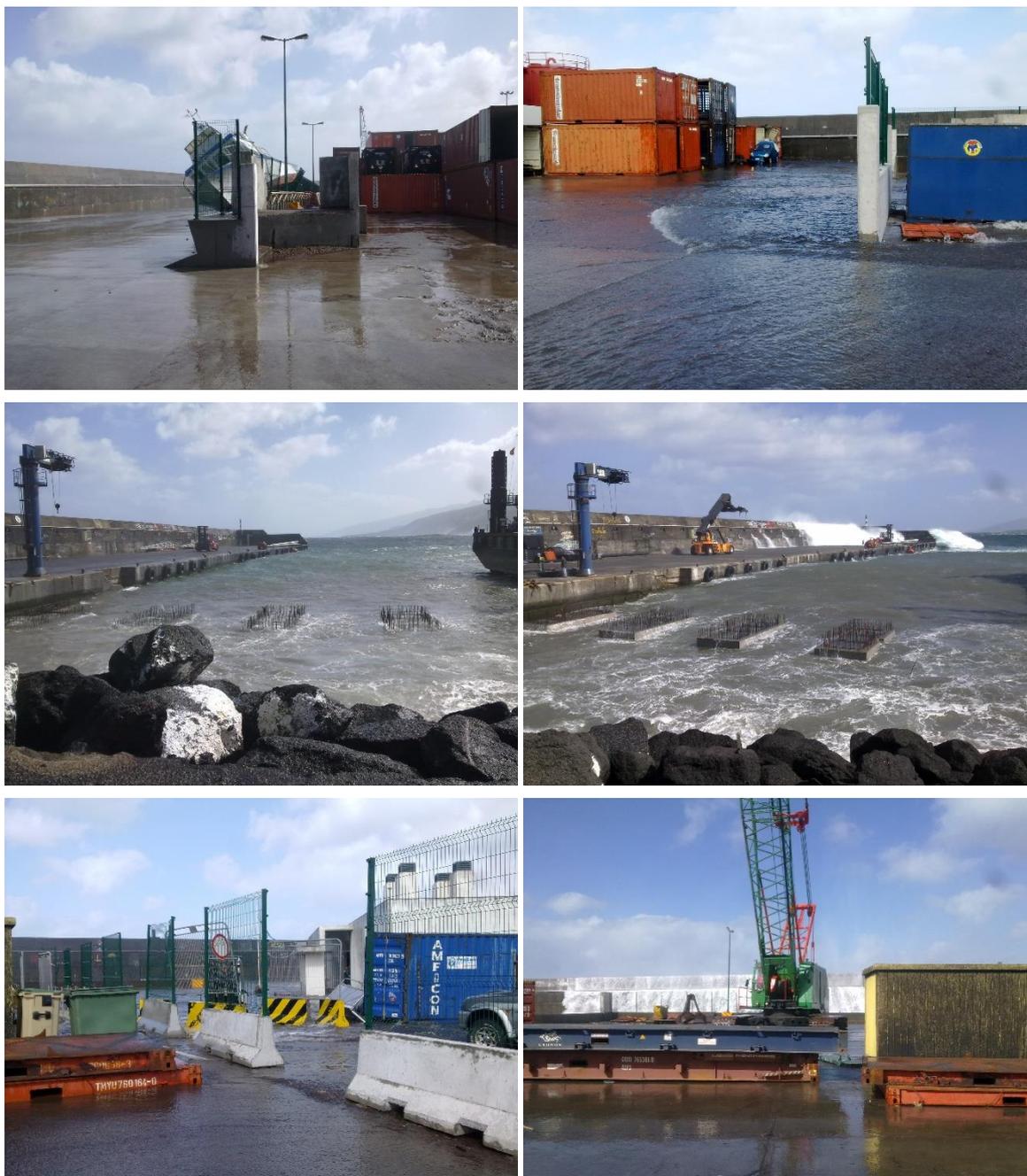


Figura 2.42 – Porto de São Roque do Pico. Fotos dos estragos provocados pelo temporal de 8 de março de 2013

Em novembro de 2014, na sequência de condições de agitação marítima adversas, ocorreu a cedência de um cabeço de amarração da rampa Ro/Ro deste porto. O cabeço de amarração, situado conforme indicado na Figura 2.43, foi projetado para o interior do navio Gilberto Mariano, vindo a provocar uma vítima mortal.



Figura 2.43 – Aspeto da atracação do ferry Gilberto Mariano ao cabeço de amarração, antes do acidente de 14 de novembro de 2014 (esq.). Aspeto da zona onde estava inserido o cabeço de amarração, após o acidente (dir.)

Note-se que, em situação de temporal, são várias as situações reportadas de dificuldades de atracação no porto no que diz respeito aos navios de passageiros. Recentemente, o LNEC foi informado de cancelamentos no dia 8 de outubro de 2018, devido à passagem de uma tempestade.

## 2.3 Porto da Praia da Vitória

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 (Figura 2.44). Este porto é a segunda maior infraestrutura portuária dos Açores, sendo apenas suplantada pelo porto de Ponta Delgada, no que se refere ao movimento de navios e de mercadorias. A proteção da baía é realizada por intermédio de duas estruturas principais: o quebra-mar norte e o quebra-mar sul.



Figura 2.44 – Localização e imagem aérea da Praia da Vitória, Ilha Terceira, Açores

O chamado quebra-mar sul, com cerca de 1300 m de comprimento e um traçado curvo, encontra-se enraizado no lado sul da baía, e abriga o Cais 12 e as instalações portuárias dos setores comercial e das pescas do porto da Praia da Vitória. Ao longo do Cais 12 existe um muro deflector com cota de coroamento de +11 m (ZH). Nas restantes secções do quebra-mar não existe muro e a cota de coroamento atinge +7.1 m (ZH), Figura 2.45.

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. Esta estrutura tem uma cota de coroamento que varia entre +6.3 m (ZH) e +7.1 m (ZH).

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.

Enraizado na Ponta da Má Merenda e com a direção norte-sul, encontra-se o quebra-mar norte, com 560 m de comprimento, destinado a dar abrigo às instalações portuárias de apoio à Base Aérea das Lajes. Este quebra-mar tem uma cota de coroamento que varia entre +7.7 m (ZH) (perto do cabo) e +10.2 m (ZH) (perto da ponta).

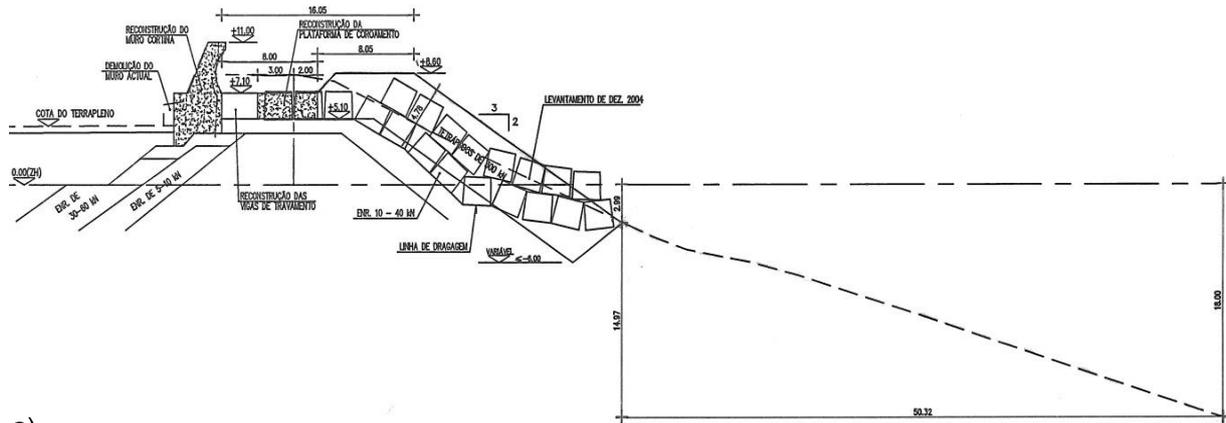


Figura 2.45 – Porto da Praia da Vitória. Principais estruturas marítimas

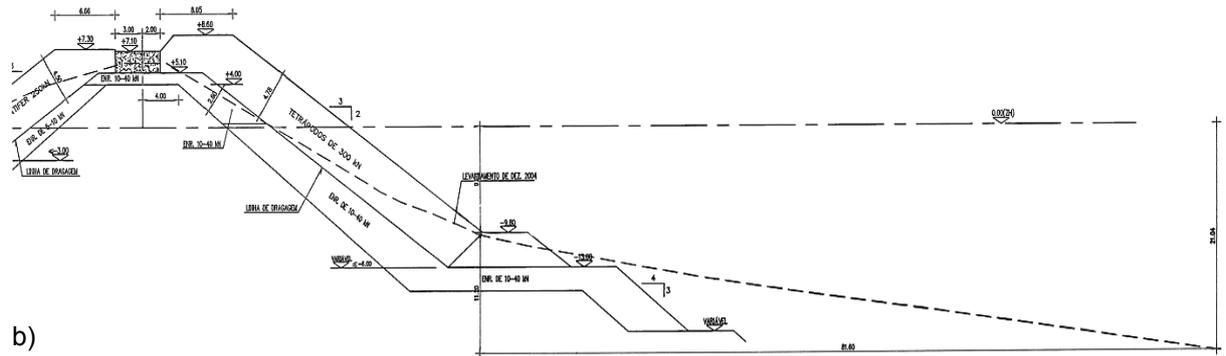
### 2.3.1 Caracterização das estruturas marítimas

No quebra-mar sul, existem dois trechos de secções diferentes (Figura 2.46): um em frente ao Cais 12 (perfil D3) e outro entre o Cais 12 e a cabeça do quebra-mar (perfil D8). O trecho do quebra-mar que protege o Cais 12 tem o manto protetor constituído por tetrápodes e um muro-cortina com 3.9 m de altura (Figura 2.46a). No trecho entre o Cais 12 e a cabeça do quebra-mar sul não existe muro-cortina e o manto protetor é constituído por blocos Antifer (Figura 2.46b).

O quebra-mar norte é caracterizado por um perfil-tipo, D9, protegido por um manto de Accropodes (Figura 2.47). Ao longo da defesa frontal (perfis D1, D2 e D4 a D7), os perfis das estruturas são de dois tipos (Figura 2.48): o perfil D1, junto ao esporão 3 (Figura 2.48a) e os perfis D2 e D4 a D7, entre esporões (Figura 2.48b).



a)



b)

Figura 2.46 – Porto da Praia da Vitória. Perfis do quebra-mar sul: a) Perfil D3 - perfil junto ao Cais 12; b) Perfil D8 – perfil entre o Cais 12 e a cabeça do quebra-mar

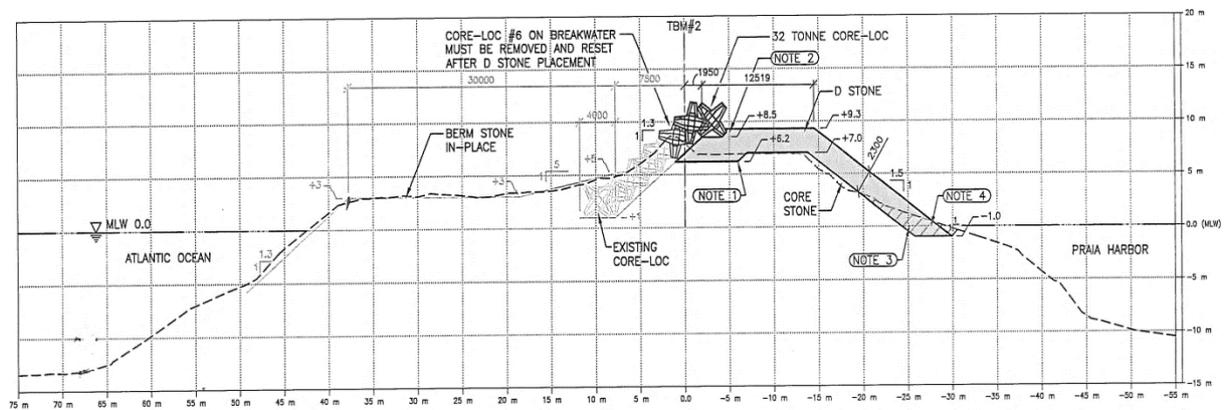


Figura 2.47 – Porto da Praia da Vitória. Perfil do quebra-mar norte

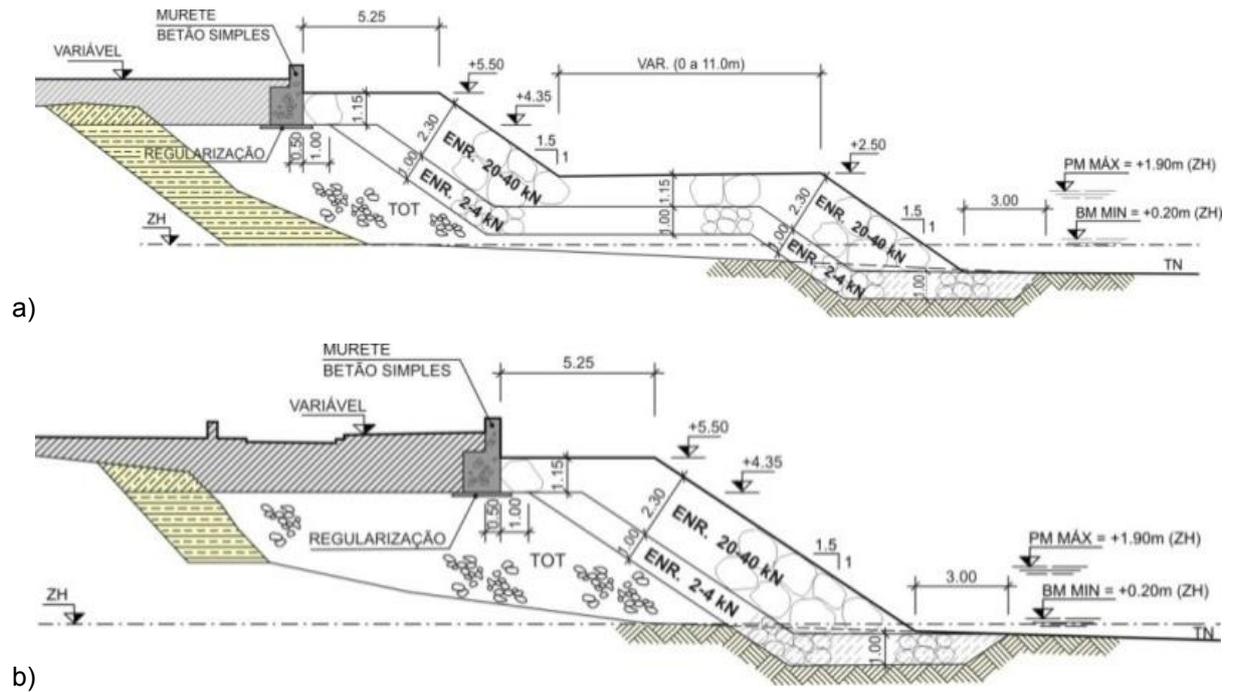


Figura 2.48 – Porto da Praia da Vitória. Perfis ao longo da defesa frontal: a) perfil junto ao esporão 3 (D1); b) perfil entre esporões (D2 e D4 a D7)

A descrição detalhada da zona de estudo, das suas estruturas marítimas e das situações de temporal pode ser consultada em Neves *et al.* (2012), Fortes *et al.* (2013, 2014, 2015), Poseiro *et al.* (2013a,b), Lourenço *et al.* (2015), Poseiro *et al.* (2017) e Poseiro (2018).

## 3 | Sistema HIDRALERTA

### 3.1 Arquitetura geral do sistema

O sistema HIDRALERTA (Fortes *et al.*, 2013, 2014, 2015; Poseiro *et al.*, 2014a,b, 2015, 2017; Garcia *et al.*, 2016; Lopes *et al.*, 2016; Rodrigues *et al.*, 2017b; Sabino *et al.*, 2018; Poseiro, 2018) é um sistema de previsão e alerta de situações de emergência e de avaliação de riscos associados à agitação marítima, nomeadamente risco de galgamento/inundação em zonas costeiras e portuárias e risco para navios amarrados. Encontra-se operacional o protótipo do sistema desenvolvido para o galgamento/inundação no porto e na baía da Praia da Vitória, Terceira, Açores.

O sistema utiliza previsões de agitação marítima ao largo para a determinação da agitação marítima local, do caudal médio de galgamento e/ou cotas de inundação em áreas específicas, e de movimentos de navios/forças em amarras, recorrendo a modelos numéricos, redes neuronais artificiais e fórmulas empíricas. A comparação destes valores com valores máximos admissíveis pré-estabelecidos permite:

- i) a identificação, em tempo real, de situações de emergência e a emissão de alertas às entidades competentes sempre que se preveja estar em causa a segurança de pessoas, bens, infraestruturas ou atividades desenvolvidas;
- ii) a construção de mapas de risco, considerando longas séries temporais de previsões de agitação marítima ou cenários pré-definidos associados a alterações climáticas e/ou a eventos extremos.

Para este efeito, a metodologia do HIDRALERTA consiste basicamente em:

- Definir o regime de agitação marítima incidente nas estruturas costeiras ou portuárias recorrendo a dados obtidos *in situ* e/ou a resultados de modelos numéricos de propagação de ondas, tais como WAM (WAMDI Group, 1988), SWAN (Booij *et al.*, 1996) e/ou DREAMS (Fortes, 2002);
- Calcular a resposta da estrutura em termos de caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura, com a utilização da ferramenta baseada em resultados da aplicação de redes neuronais artificiais (“ferramenta neuronal”) NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005), desenvolvida no âmbito do Projeto Europeu CLASH, e/ou de fórmulas empíricas;
- Calcular os movimentos dos navios e os esforços nas amarras e defensas com a utilização dos modelos numéricos da ferramenta SWAMS\_ALERT, Pinheiro *et al.* (2017),;
- Calcular o grau de risco associado à ocorrência de galgamentos acima de um determinado caudal médio pré-definido para cada estrutura, em função do tipo de estrutura galgada e das atividades e bens por ela protegidos.

A aplicação desta metodologia já foi efetuada a vários portos portugueses, como é o exemplo do porto de Sines (Neves *et al.*, 2010) e dos portos da Praia da Vitória (Poseiro *et al.*, 2013a) e de Ponta Delgada (Rodrigues *et al.*, 2017a), ambos localizados nos Açores.

O sistema encontra-se implementado numa plataforma *Web* e é constituído por quatro módulos: I – Características da Agitação Marítima; II – Galgamento e Navegação; III – Avaliação do Risco; e IV - Sistema de Alerta (Figura 3.1).

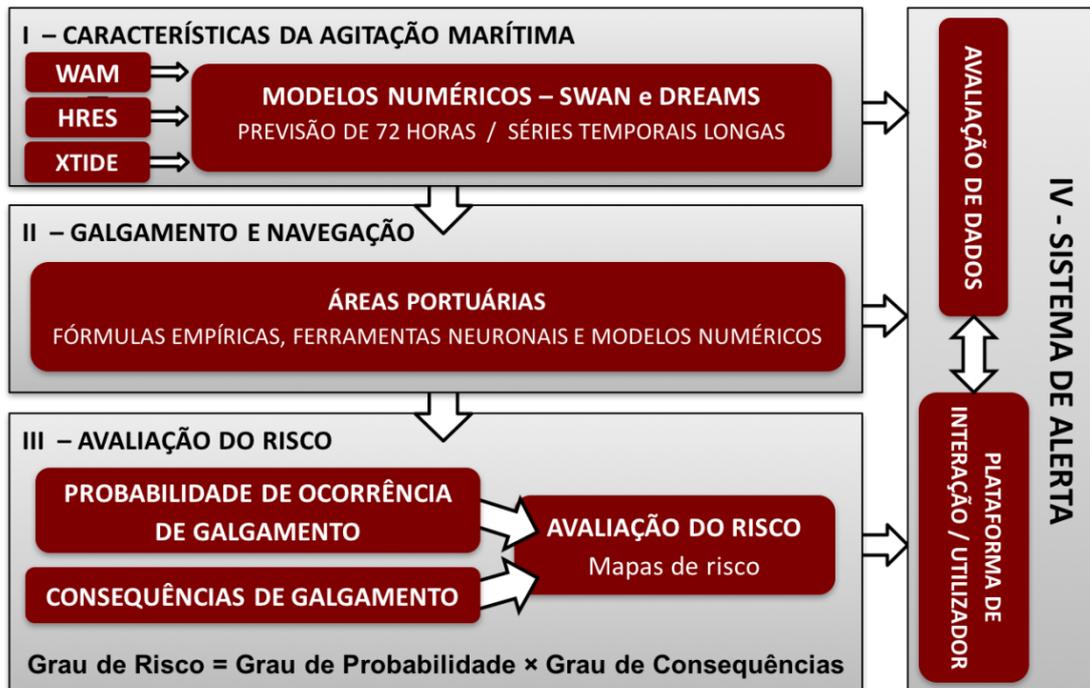


Figura 3.1 – HIDRALERTA. Esquema do sistema

### 3.2 Modulo I - Caraterização da agitação marítima

O objetivo deste módulo é a determinação das características da agitação marítima na zona em estudo (zonas portuárias ou costeiras) em termos de altura de onda significativa ( $H_s$ ), período de onda (médio,  $T_m$ , ou de pico,  $T_p$ ) e direção média ( $Dir$ ). Estas características podem ser obtidas com base em longas séries temporais fornecidas ao largo da zona em estudo pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF, Persson, 2001), que utiliza modelos numéricos de previsão da agitação marítima à escala regional, como é o caso do modelo WAM (WAMDI Group, 1988). Com base nestas estimativas da agitação marítima são aplicados outros modelos numéricos para a propagação da agitação marítima desde o largo até junto à costa ou até ao interior de uma zona abrigada ou portuária.

Mais concretamente, a caraterização da agitação marítima local é feita com base nas características da agitação marítima ao largo e em dados de vento na região de interesse descarregados do *Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center*. O nível da maré astronómica na mesma região é estimado com o modelo XTide (Flater, 1998) associado à sobrelevação de origem meteorológica e as características da agitação marítima são transferidas do largo para a zona de entrada do porto com o

modelo SWAN (Booij *et al.*, 1996). Como se trata de uma zona abrigada, utiliza-se o modelo DREAMS (Fortes, 2002) para transferir as características da agitação marítima da zona da entrada do porto para o seu interior.

### 3.3 Modulo II - Galgamentos e navegação

#### 3.3.1 Galgamentos

O módulo II efetua a estimação dos galgamentos/inundações em áreas costeiras e infraestruturas portuárias. Mais concretamente, determina os valores do caudal médio galgado ou da cota de inundação correspondentes a uma dada condição de agitação marítima/nível de maré verificada em cada secção das estruturas analisadas na zona de estudo. Neste projeto, para estimar o galgamento de estruturas marítimas utilizou-se a ferramenta neuronal NN\_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005), desenvolvida no âmbito do projeto europeu CLASH (Van der Meer *et al.*, 2005; Van Gent *et al.*, 2005, 2007). Esta ferramenta processa os resultados produzidos por 700 redes neuronais artificiais, cujos parâmetros de entrada incluem informação sobre a agitação marítima/nível de maré e a geometria da estrutura.

São considerados quinze parâmetros de entrada. Três parâmetros descrevem a agitação marítima incidente na estrutura: a altura de onda significativa espectral no pé da estrutura ( $H_{m0,loc}$ ), o período médio de onda espectral no pé da estrutura ( $T_{m-1,0,loc}$ ) e a direção de incidência da onda ( $\beta$ ). Para descrever a forma geométrica do perfil da estrutura são considerados 12 parâmetros (Figura 3.2): a profundidade em frente à estrutura ( $h$ ), a profundidade na banquetta do pé do talude da estrutura ( $h_t$ ), a largura da banquetta do pé do talude ( $B_t$ ), a rugosidade/permeabilidade do manto ( $\gamma_f$ ), o declive da estrutura abaixo da berma ( $\cot \alpha_d$ ), o declive da estrutura acima da berma ( $\cot \alpha_u$ ), a largura da berma ( $B$ ), a profundidade da água na berma ( $h_b$ ), o declive da berma ( $\tan \alpha_b$ ), o bordo livre da parte impermeável do coroamento da estrutura ( $R_c$ ), o bordo livre do manto permeável da estrutura ( $A_c$ ) e a largura do coroamento da estrutura ( $G_c$ ).

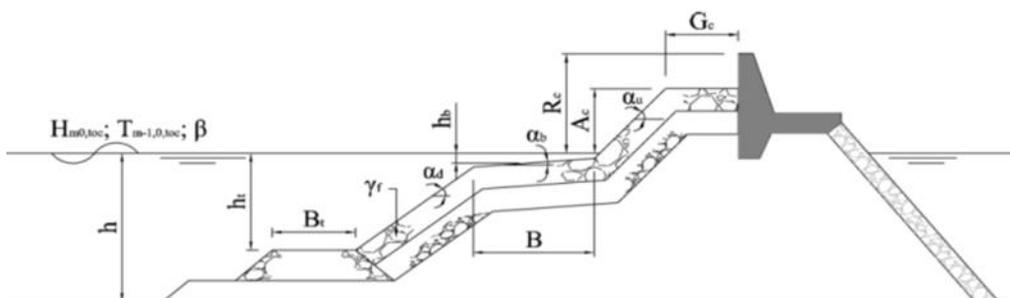


Figura 3.2 – Parâmetros de entrada das ferramentas NN\_OVERTOPPING2

Os resultados são o valor do caudal médio galgado por unidade de comprimento do coroamento da estrutura,  $q$ , bem como outros valores característicos desta grandeza obtidos a partir da amostra gerada pelo conjunto de redes neuronais.

Importa também referir que, apesar da sofisticada técnica de modelação de redes neuronais artificiais usada no desenvolvimento desta ferramenta, esta tem como base um conjunto alargado de ensaios de galgamento realizados em modelo físico reduzido e em protótipo.

### 3.3.2 Navegação

Os movimentos excessivos dos navios amarrados induzidos pela agitação marítima podem perturbar as atividades de carga e descarga dos navios bem como causar problemas graves, nomeadamente a rotura de amarras e a colisão dos navios com o cais. Daí a importância de uma caracterização correta da resposta de navios amarrados aos estados de mar neles incidentes.

A determinação do movimento do navio amarrado num posto de acostagem sujeito à agitação incidente é realizada utilizando o pacote numérico SWAMS *Simulation of Wave Action on Moored Ships*, Pinheiro *et al.* (2017), que é uma ferramenta integrada para modelação numérica da propagação de ondas bem como do comportamento de navios amarrados no interior de bacias portuárias e que permite a caracterização da resposta de navios livres e amarrados sujeitos à ação de ondas, ventos e correntes. São dois os módulos constituintes deste pacote: WAVEPROP, para a geração e propagação de ondas; e MOORNAV para o movimento e forças nos navios. Este sistema tem como característica inovadora o acoplamento de um modelo do tipo Boussinesq para a propagação não linear das ondas – o modelo BOUSS-WMH (*BOUSSinesq Wave Model for Harbours*, Pinheiro *et al.*, 2011) - com o modelo WAMIT para a interação navio-ondas. Os efeitos não lineares no interior dos portos são simulados, quer na propagação das ondas, quer na resposta dos navios amarrados. Para além destes, os fenómenos da reflexão e dissipação de energia por fricção de fundo e por rebentação são também tidos em conta.

Com base no pacote SWAMS, foi desenvolvido um sistema de previsão, alerta e avaliação de risco de eventos perigosos associados à navegação em áreas portuárias e ao comportamento dos navios atracados denominado SWAMS\_ALERTA.

O módulo de propagação de ondas WAVEPROP inclui 3 modelos numéricos para a propagação de ondas e um gerador de malhas de elementos finitos:

- SWAN é um modelo não linear espectral, Booij *et al.* (1996), baseado na equação de conservação da acção da onda e capaz de simular a propagação de espectros de ondas irregulares;
- DREAMS é um modelo linear de elementos finitos, Fortes (2002), baseado na equação de declive suave para simular a propagação de ondas regulares;
- BOUSS-WMH é um modelo não linear de elementos finitos, Pinheiro *et al.* (2011), baseado nas equações de Boussinesq estendidas deduzidas por Nwogu (1993), sendo capaz de simular a propagação de ondas regulares e irregulares;
- GMALHA é um gerador de malhas de elementos finitos triangulares, Pinheiro *et al.* (2008), especialmente definidas para serem utilizadas pelos modelos DREAMS e BOUSS-WMH, sendo a densidade de nós das malhas variável de acordo com o comprimento de onda local e a sua construção otimizada de forma a reduzir recursos computacionais.

O módulo de comportamento de navios amarrados MOORNAV inclui 2 modelos numéricos, (Santos, 1994):

- WAMIT (Korsemeier *et al.*, 1988) que resolve, no domínio da frequência, os problemas de radiação e de difracção da interacção de um corpo flutuante livre com as ondas nele incidentes;
- BAS (Mynett *et al.*, 1985) que monta e resolve, no domínio do tempo, as equações de movimento de um navio amarrado no posto de acostagem levando em conta as séries temporais das forças devidas às ondas incidentes no navio, as funções de resposta a impulso do navio e as relações constitutivas dos elementos do sistema de amarração (cabos de amarração e defensas).

O pacote SWAMS está a ser integrado no sistema HIDRALERTA (sistema de previsão e alerta de situações de emergência e de avaliação de risco associado a galgamentos), que é um sistema de previsão e alerta de situações de emergência e de avaliação de risco associado à navegação em zonas portuárias, Figura 3.3.

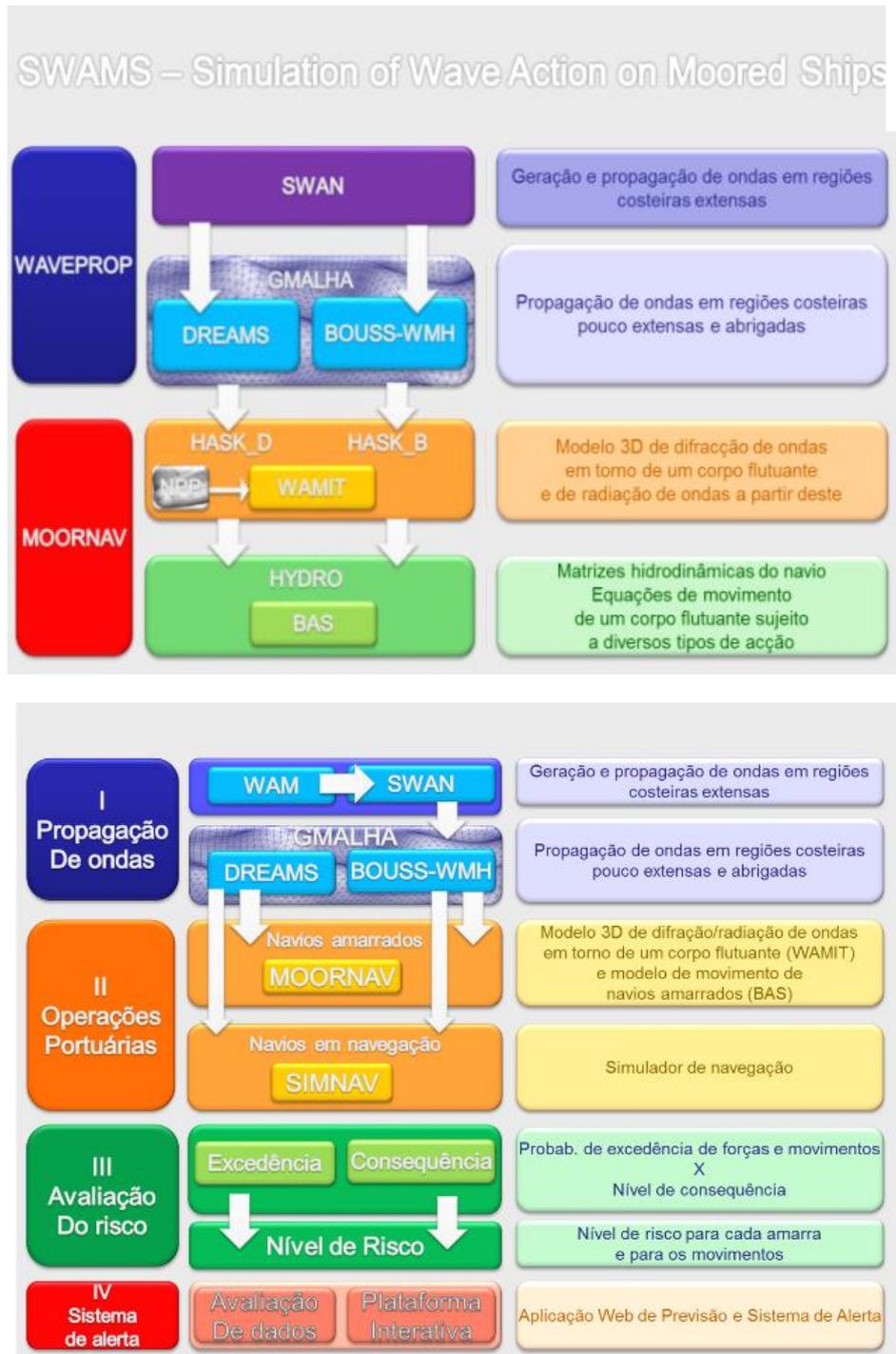


Figura 3.3 – Estrutura do pacote numérico SWAMS e da sua introdução no sistema HIDRALERTA

A abordagem utilizada para este problema consiste em começar por resolver no domínio da frequência a interação do navio livre com as ondas incidentes. Para tal determinam-se as forças exercidas por ondas regulares incidentes no navio imobilizado segundo cada um dos seis graus de liberdade do navio (o chamado problema de difracção) bem como as forças em fase com a aceleração e com a velocidade segundo cada um dos seis graus de liberdade do navio - respetivamente, os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento - exercidas no navio quando este oscila com

movimentos sinusoidais segundo um daqueles graus de liberdade em águas de outro modo paradas (o chamado problema de radiação).

Na resolução dos problemas de difração e de radiação utiliza-se o modelo numérico WAMIT que se baseia num método de elementos de fronteira para modelar a interação com ondas regulares de um corpo flutuante livre. O modelo determina a intensidade de uma distribuição uniforme de fontes em cada um dos painéis com que se discretiza a fronteira molhada dos corpos, flutuantes ou não, envolvidos no problema. A forma do casco deve ser discretizada com painéis planos retangulares e triangulares, Figura 3.4.

Com aquela distribuição de fontes obtém-se em qualquer ponto do fluido, incluindo a sua fronteira, o potencial do escoamento associado ao problema de difração ou a cada um dos problemas de radiação.

Para simplificar a utilização do modelo WAMIT, evitando a distribuição de painéis para modelar o fundo da zona de amarração do navio, considera-se que o navio está colocado numa zona de fundo horizontal.

Com base nos resultados do problema de radiação determinam-se as forças exercidas no navio ao longo do tempo depois de uma variação impulsiva segundo uma componente da sua velocidade - as funções resposta a impulso ou funções de atraso, Cummins (1962) - e as forças associadas à aceleração do escoamento na vizinhança do casco do navio - as massas adicionadas para frequência infinita.

Utilizando as matrizes correspondentes a estas grandezas, bem como as matrizes de massa e de restituição hidrostática do navio, em conjunto com as forças exercidas pelo estado de agitação incidente no navio e pelo sistema de amarração - o que implica a definição das relações constitutivas das amarras e das defensas - montam-se as equações de movimento, no domínio do tempo, do navio amarrado. Da resolução destas equações obtém-se as séries temporais dos movimentos do centro de gravidade do navio e dos esforços no sistema de amarração.

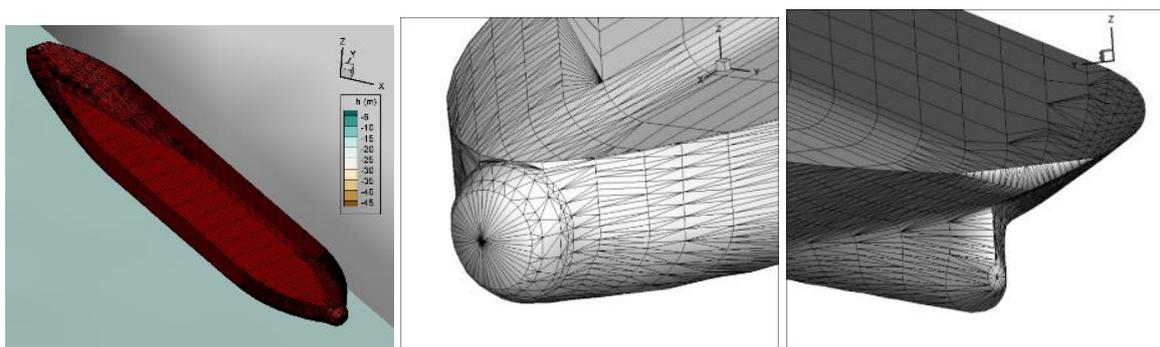


Figura 3.4 – Exemplo dos painéis do casco de um navio

Define-se a configuração na qual o navio está amarrado ao cais pelas suas amarras (podem ser lançantes, traveses ou regeiras) e defensas, que impedem o contacto entre o navio e o cais, Figura 3.5. Despreza-se o efeito do peso próprio das amarras, isto é, apenas quando as amarras estão

esticadas podem exercer força no navio. Devem ser definidas as relações constitutivas das amarras (força-alongamento) e das defensas (compressão–deflexão).

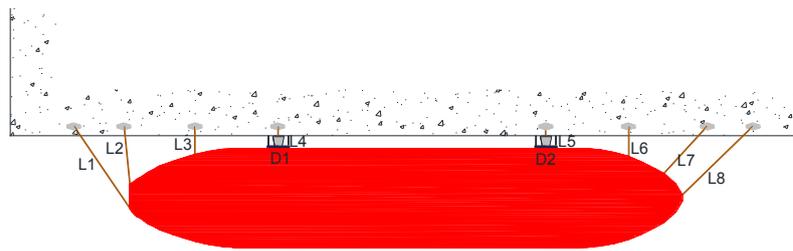


Figura 3.5 – Exemplo do esquema de amarração de um navio

O resultado da simulação numérica consiste em séries temporais de:

- Movimentos e rotações do centro de gravidade do navio;
- Forças nas amarras e defensas.

Na Figura 3.6 apresenta-se um exemplo da série temporal das forças numa amarra, a densidade espectral para essa série temporal e a curva de probabilidade de excedência dos limiares estabelecidos. As linhas tracejadas horizontais representam os limites previamente definidos.

A mesma análise é feita para os movimentos e as velocidades.

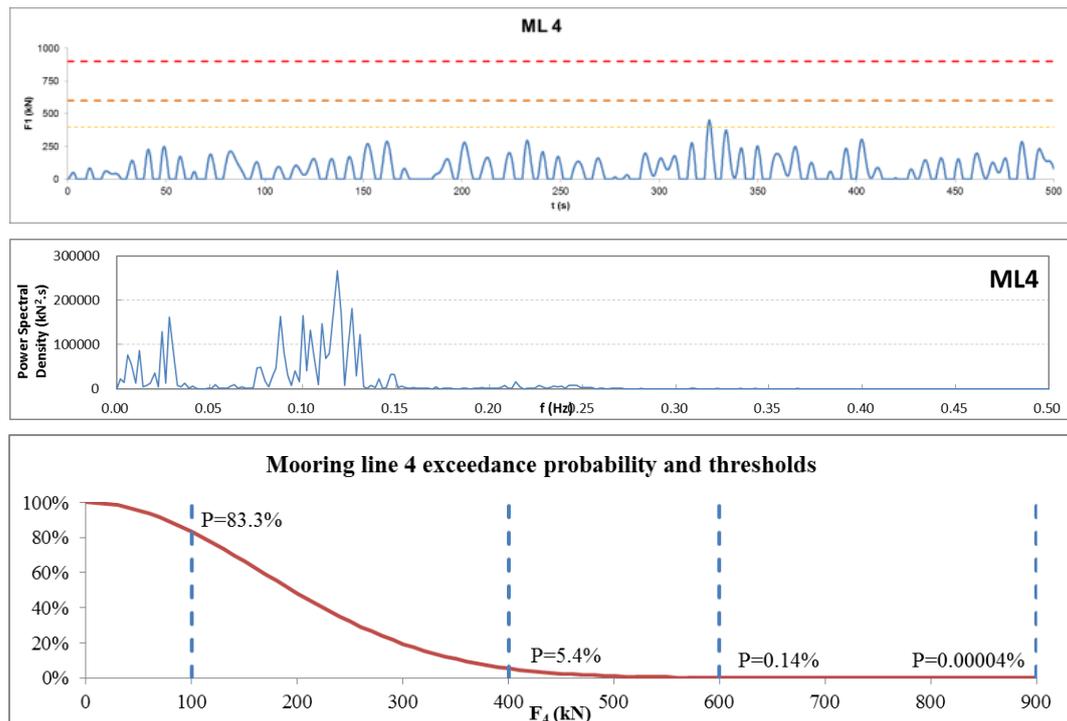


Figura 3.6 – Série temporal de forças numa amarra, densidade espectral e curva de probabilidade de excedência

### 3.4 Módulo III – Avaliação do risco

O grau de risco é definido por: Grau de Risco = Grau de Probabilidade × Grau de Consequências. Para definir esses graus, o Quadro 3.1 é usado como guia de orientação. Note-se que os limites

correspondentes aos graus nas tabelas de probabilidade e de consequências, bem como o próprio número de graus, devem refletir as características do problema em análise. Por simplificação, atribui-se à probabilidade de ocorrência uma escala de graus de probabilidade em vez da probabilidade da ocorrência do acontecimento perigoso e um grau de consequências em vez do prejuízo associado a este acontecimento.

**Quadro 3.1 – Avaliação do grau de risco e da sua aceitabilidade para os galgamentos**

GRAU DE RISCO		Consequências					Grau	Descrição	Controlo de Risco (Guia de Orientação)
		1	2	5	10	25			
Probabilidade de Ocorrência	1	1	2	5	10	25	1-3	Insignificante	Risco desprezável; não é preciso levar a cabo medidas de controlo de risco.
	2	2	4	10	20	50	4-10	Reduzido	Risco que pode ser considerado aceitável/tolerável caso se seleccione um conjunto de medidas para o seu controlo, possíveis danos materiais de pequena dimensão.
	3	3	6	15	30	75			
	4	4	8	20	40	100	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.
	5	5	10	25	50	125			
							40-125	Inaceitável	Risco intolerável; tem que 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.).

**Quadro 3.2 – Avaliação do grau de risco e da sua aceitabilidade para a navegação**

Grau de risco		Consequências					Grau	Descrição	Aviso	orientações
		Ins.	Leve	Grave	Muito grave	Crítica				
Probabilidade de ocorrência	1	1	2	5	10	25	1 a 4	Insignificante	-	Não existe perigo
	2	2	4	10	20	50	5 a 10	reduzido	Aviso de risco moderado	Operações de carga e descarga condicionadas
	3	3	6	15	30	75				
	4	4	8	20	40	100	15 a 30	indesejável	Aviso de risco elevado	Operações de carga e descarga suspensas
	5	5	10	25	50	125				
							40 a 50	inaceitável	Alerta grave	Operações de carga e descarga suspensas. Possibilidade de rotura dos elementos do sistema de amarração
							75 a 125	crítico	Alerta máximo	Possibilidade de rotura dos elementos do sistema de amarração. Operações de carga e descarga suspensas. As infraestruturas podem ser seriamente danificadas

### 3.4.1 Galgamentos

A avaliação do risco ao galgamento de uma dada zona de estudo é baseada na combinação entre os valores de probabilidade de ocorrência de galgamentos superiores a um determinado limiar de caudal médio galgado e os valores de consequências relativos à superação desse limiar.

O processo de avaliação qualitativa do risco de galgamentos de uma estrutura marítima é efetuado da seguinte forma:

- Divisão do local de estudo em subzonas, atendendo ao perfil transversal da estrutura e ao tipo de utilização da zona protegida pela estrutura e, conseqüente, à variabilidade do caudal médio admissível de galgamento;
- Estabelecimento dos caudais críticos de galgamento associados a cada secção de estrutura analisada tendo em conta a natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada. Estes

limiares são estabelecidos com base nas recomendações de Pullen *et al.* (2007) e em informação local fornecida pelas autoridades;

- Cálculo da probabilidade de ocorrência de galgamentos não admissíveis, com base na resposta da estrutura à agitação incidente e nos limites admissíveis para cada tipo de estrutura. A classificação dessa probabilidade é efetuada tendo em conta os graus definidos no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Grau de probabilidade associado à ocorrência de acontecimento perigoso

Descrição	Probabilidade de Ocorrência (Guia de Orientação)	Grau
Improvável	0 – 1%	<b>1</b>
Raro	1 – 10%	<b>2</b>
Ocasional	10 – 25%	<b>3</b>
Provável	25 – 50%	<b>4</b>
Frequente	> 50%	<b>5</b>

- Avaliação do grau de consequências de ocorrência de um caudal acima dos limites definidos para cada secção de estrutura. A avaliação deste grau 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);
- Obtenção do grau de risco para cada subzona através do produto entre o grau da probabilidade de ocorrência e o grau de consequências de ocorrência de galgamentos não admissíveis, Quadro 3.1.

### 3.4.2 Navegação

A avaliação de risco dos navios amarrados é efetuada da seguinte forma:

- Avalia-se a natureza das atividades que têm lugar no local onde o navio está amarrado e o impacto dos seus movimentos na operacionalidade do terminal e na segurança do navio, da infraestrutura e das pessoas;
- Estabelecem-se os limites aos movimentos e às forças na amarração para cada tipo de navio e atividade, com base nos níveis de consequências estabelecidos para cada um;
- Determina-se a probabilidade de excedência desses limites e determina-se o nível de risco;
- Avalia-se o grau de consequências de ocorrência de uma força, movimento ou velocidade acima dos limites definidos;
- Obtém-se o grau de risco para cada parâmetro (força, movimento ou velocidade) através do produto entre o grau da probabilidade de ocorrência e o grau de consequências de ocorrência.

Os limites para os movimentos e forças são definidos com base nas recomendações existentes, tendo em conta a natureza das atividades, definido pelo navio e uma necessidade de garantir a segurança das pessoas e infraestruturas. As consequências de exceder os limites foram calculadas

usando uma metodologia que permite uma simples avaliação qualitativa do nível de consequência associado com eventos perigosos.

Os valores adotados neste trabalho baseiam-se nas recomendações da PIANC, The World Association for Waterborne Transport Infrastructure (1995) mas podem ser definidos caso a caso de acordo com critérios e normas internas de cada administração portuária.

Os limites aos movimentos horizontais, verticais ou de rotação dependem das consequências associadas. Existem limites operacionais, a partir dos quais a movimentação de carga fica condicionada ou mesmo impossibilitada e limites de segurança, a partir dos quais existe risco para as pessoas, os bens ou as estruturas.

Quanto aos limites dos esforços nos elementos de amarração, a OCIMF, Oil Companies International Marine Forum, por exemplo, recomenda que os esforços sejam distribuídos de forma uniforme pelas amarras e que estes não excedam 55% do esforço máximo de rotura.

A PIANC, através de grupos de trabalho, elabora com regularidade relatórios com recomendações de limites às alturas de onda, às amplitudes, às velocidades dos movimentos dos navios e aos esforços nos elementos de amarração de navios amarrados, assim como outras organizações ligadas à atividade marítimo-portuária (OCIMF, 1992; PIANC 1995).

Recentemente, um grupo de trabalho da PIANC atualizou as diretrizes para os movimentos máximos de porta-contentores amarrados que garantem uma operação de descarga eficiente (PIANC, 2012). Nesse relatório conclui-se que para grandes navios porta-contentores, a limitação do movimento de avanço é fundamental, uma vez que, hoje em dia, os guindastes não conseguem acompanhar esse movimento de forma eficiente. O mesmo relatório afirma que, quando os movimentos de avanço são mantidos dentro dos limites prescritos, os restantes movimentos acabam por ficar também eles dentro de limites aceitáveis.

Para determinar a probabilidade de excedência desses limites, é efetuada uma análise às séries temporais dos movimentos e velocidades do navio e das forças nas amarras e defensas. Cada série sofre uma transformação de Fourier sendo obtido um espectro de densidade em frequência. A partir deste espectro retira-se a informação estatística que permite obter a função de densidade de probabilidade (PDF):

$$\text{PDF} = \frac{x}{\sigma^2} e^{(-x^2/2\sigma^2)}, \text{ onde } \sigma = \frac{\bar{H}}{\sqrt{\frac{\pi}{2}}} \quad (1)$$

A probabilidade de excedência é dada por:

$$P(H > x) = e^{(-x^2/2\sigma^2)} \quad (2)$$

Esta é classificada como rara ( $P < 0.001\%$ ), improvável ( $P < 0,1\%$ ), possível ( $0.1\% < P < 10\%$ ) e provável ( $P > 10\%$ ). O resultado da multiplicação do nível de consequência pelo nível de excedência leva a uma tabela de nível de risco para cada movimento, velocidade e forças. Os níveis de risco são dados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Níveis de risco

Excedência Níveis de probabilidade		Níveis de consequência			
		Ins.	Leve	Grave	Crítica
		0	1	2	3
Raro	$P < 0,001\%$	0	0	0	0
Improvável	$P < 0,1\%$	1	0	1	2
Possível	$0,1\% < P < 10\%$	2	0	2	4
Provável	$P > 10\%$	3	0	3	6

Com base nos níveis de risco obtidos para a navegação, serão emitidos avisos. Propõem-se cinco níveis de aviso definidos da seguinte forma:

- Nível de risco de 0 ou 1 – Sem alerta. Não existe perigo.
- Nível de risco de 2 – Alerta de risco baixo. Operações de carga e descarga condicionadas.
- Nível de risco de 3 ou 4 – Alerta de risco moderado. Operações de carga e descarga suspensas.
- Nível de risco de 6 – Alerta de risco elevado. Operações de carga e descarga suspensas. Possibilidade de rotura dos elementos do sistema de amarração.
- Nível de risco de 9 - Alerta máximo. Operações de carga e descarga suspensas. Possibilidade de rotura dos elementos do sistema de amarração. As infraestruturas podem ser seriamente danificadas.

Estes níveis deverão refletir as preocupações dos agentes portuários e serão alvo de discussão futura, pelo que nesta fase são meramente indicativos.

### 3.5 Módulo IV - Sistema de alerta

O sistema de alerta permite a previsão, em tempo real, das situações de emergência para uma determinada área de interesse e o envio automático de mensagens de alerta para as autoridades responsáveis.

O sistema de alerta (Rodrigues *et al.*, 2017b; Poseiro *et al.*, 2017; Sabino *et al.*, 2018; Poseiro, 2018) é constituído por duas componentes: a componente de avaliação de dados e a componente de interação com o utilizador.

Na componente de avaliação de dados, o sistema parte do princípio que o nível de alerta associado à área de interesse é determinado de acordo com os limiares de galgamento/inundação alcançados em cada secção das estruturas analisadas. Desta forma, é atribuído um nível de alerta a cada secção considerada homogénea. Para o funcionamento do sistema de alerta têm de estar definidos, com base no estudo de avaliação do risco realizado no módulo III do sistema, os limites para os caudais admissíveis, ou os limites para os movimentos do navio admissíveis e/ou os esforços nas amarras e defensas. Esses limites já têm em conta as consequências dos acontecimentos perigosos de galgamento/inundação em cada zona ou as consequências para os navios amarrados, pelo que, em caso de estes limites serem excedidos, é acionado o sinal de alerta, bem como a sua localização num mapa. Torna-se, portanto, particularmente relevante conseguir a melhor caracterização possível de

cada secção, tendo em conta as suas características e as atividades que nela acontecem, bem como uma análise profunda de galgamentos/inundações e de problemas na atracação dos navios registados anteriormente. Os resultados gerados pelo componente de avaliação assumem diversas formas, nomeadamente, gráficos, mapas e relatórios. Estes são depois transmitidos à componente de interação com o utilizador para permitir a avaliação da situação pelo mesmo.

A componente de interação com o utilizador está materializada numa aplicação *web*, na qual todo o sistema de alerta é parametrizado. A aplicação está desenhada para reagir a *browsers* tradicionais e móveis, adequando a informação às características do dispositivo do cliente (Figura 3.7). As operações de parametrização permitidas são a definição de áreas de interesse e a caracterização de pontos críticos. Além destas operações, o sistema também permite a análise de dados históricos. Esta análise é realizada através de tabelas, gráficos e mapas. Os mapas permitem a visualização espacial dos riscos e consequências associados à área de interesse. Cada mapa contém a identificação de pontos e áreas consideradas relevantes.

Existem também vários perfis de utilização do sistema. Estes são o público em geral, os técnicos responsáveis pela manutenção do sistema e as autoridades responsáveis por uma determinada área de interesse. O público em geral deverá poder aceder a um resumo (i.e., nível de alerta, descrição rápida e mapa de risco/consequências) do estado de alerta de uma determinada área de interesse, assim como aos alertas publicados pela conta de *Twitter* associada ao projeto (@hidralerta). Os técnicos deverão poder aceder às funcionalidades de parametrização e à análise de informação. As autoridades responsáveis serão recetoras de mensagens de alerta enviadas pelo sistema, sempre que um novo alerta é criado. As condições de envio e o conteúdo destas mensagens são definidas por protocolos estabelecidos com as autoridades.

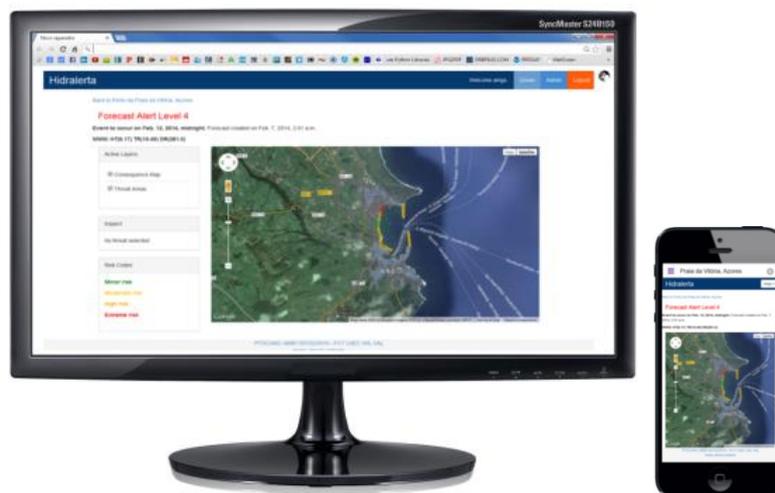


Figura 3.7 – Mapa de previsão de emissão de alerta. Exemplo da adequação de conteúdo da interface web, de acordo com as características do browser cliente

Note-se que o modelo de dados relaciona os elementos de informação recebidos (agitação marítima, nível de maré, ventos, perfis de praia e das estruturas, cota de inundações e caudal médio galgado, movimentos do navio, forças nas amarras e nas defensas), os valores projetados para os pontos

críticos e a informação espacial com os vários tipos de mapas e eventos de alerta associados à área de interesse.

O sistema de alerta está a ser construído na linguagem de programação *Python*, através de um conjunto de *scripts* que acoplam todos os modelos e automatizam todos os procedimentos para o funcionamento do sistema. A parte *web* está a ser concebida com recurso a ferramentas de domínio público: a plataforma de desenvolvimento *web Django (Python)*, para o desenvolvimento do componente de interação; e o sistema de gestão de base de dados *PostgreSQL* (com a extensão espacial *PostGIS*).

### 3.5.1 Plataforma web

A plataforma Web foi criada com o intuito de permitir a visualização e a análise de resultados através de funcionalidades *user-friendly*, de tal forma que os resultados sejam facilmente legíveis pelo utilizador comum. Esta plataforma contém um conjunto de funcionalidades que passam pela visualização das previsões obtidas pelo sistema para cada um dos modelos numéricos utilizados, bem como, e principalmente, dos mapas de alerta, que destacam o conjunto de atividades que se podem encontrar em perigo.

De modo a melhorar a exatidão geográfica das previsões, especialmente nos alertas, as zonas críticas dos portos são divididas em secções, sendo o critério para a divisão destas secções a homogeneidade da geometria da estrutura galgada e as atividades realizadas na secção por ela protegida.

Os limites para o acionamento dos diferentes níveis de alerta e sinais de perigo para cada atividade são definidos com base nas recomendações de Pullen *et al.* (2007) e têm vindo a ser ajustados à medida que o sistema corre em situações de temporal e de acordo com as ferramentas de validação disponíveis: registos históricos e observação *in situ*.

Tal como se apresenta na Figura 3.8 e na Figura 3.9 para o Porto de Praia da Vitória, os mapas de alerta destacam as secções em perigo, sendo identificadas as atividades que podem ser afetadas dentro de cada secção. Nestes alertas é ainda possível observar a agitação marítima dentro do porto, através dos parâmetros altura significativa de onda e direção de onda.

Os resultados gerados pelos diferentes modelos numéricos são apresentados em vários formatos. Todos os resultados relevantes são apresentados sobre forma estática através de imagens, para serem facilmente e rapidamente legíveis, mesmo quando o utilizador tenha um acesso à rede limitado ou deficiente.

Note-se que para o caso dos resultados associados à amarração dos navios, os layouts encontram-se ainda em desenvolvimento.

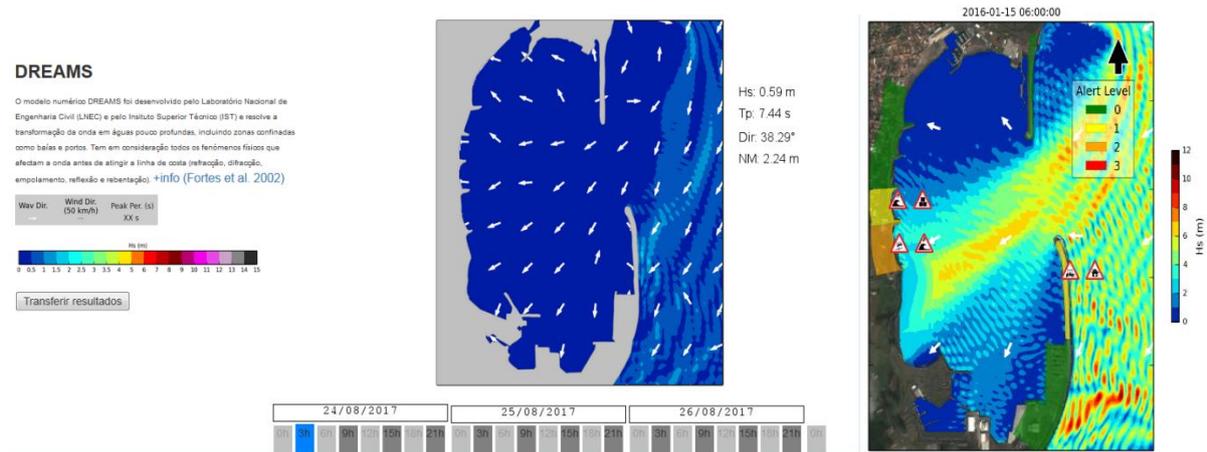


Figura 3.8 – Layouts do mapa de agitação marítima gerado pelo DREAMS e do mapa de alerta gerado pelo sistema para dois instantes de previsão

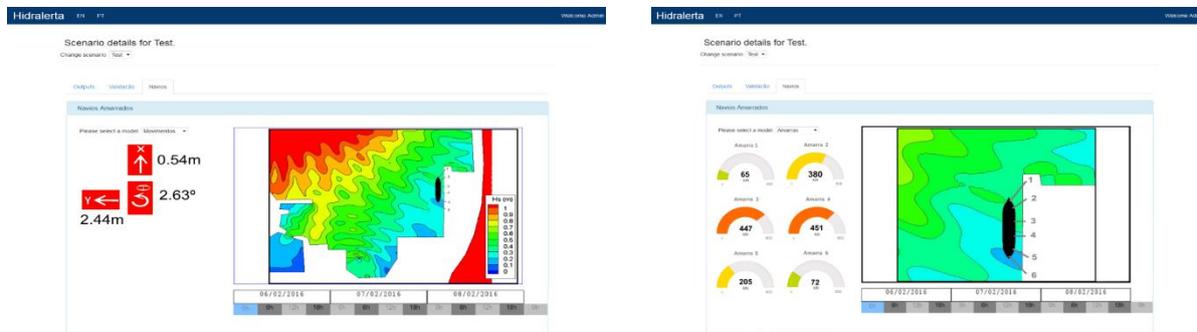


Figura 3.9 – Layouts do mapa dos esforços nas amarras e dos movimentos gerados pelo sistema para dois instantes de previsão

### 3.5.2 Boletim diário do sistema HIDRALERTA

O sistema HIDRALERTA encontra-se em fase de teste desde setembro de 2015 para o caso do Porto de Praia da Vitória. Durante todo este período, a equipa que o desenvolve monitoriza diariamente o estado do mar no Atlântico Norte e analisa a resposta do sistema no que toca à geração de agitação marítima, modelo WAM, à sua propagação até à Ilha Terceira, modelo SWAN, à transformação em águas pouco profundas e no interior da baía da Praia da Vitória, modelo DREAMS e, finalmente, a ocorrência de galgamentos, ferramenta neuronal NN\_OVERTOPPING2. As previsões emitidas automaticamente cada 24 horas são então analisadas, apoiando seguidamente a elaboração de um boletim onde se resumem os aspetos mais relevantes da previsão para as 72 horas seguintes (Figura 3.10). Para o caso do risco associado aos navios amarrados ainda não se construíram os boletins respetivos.

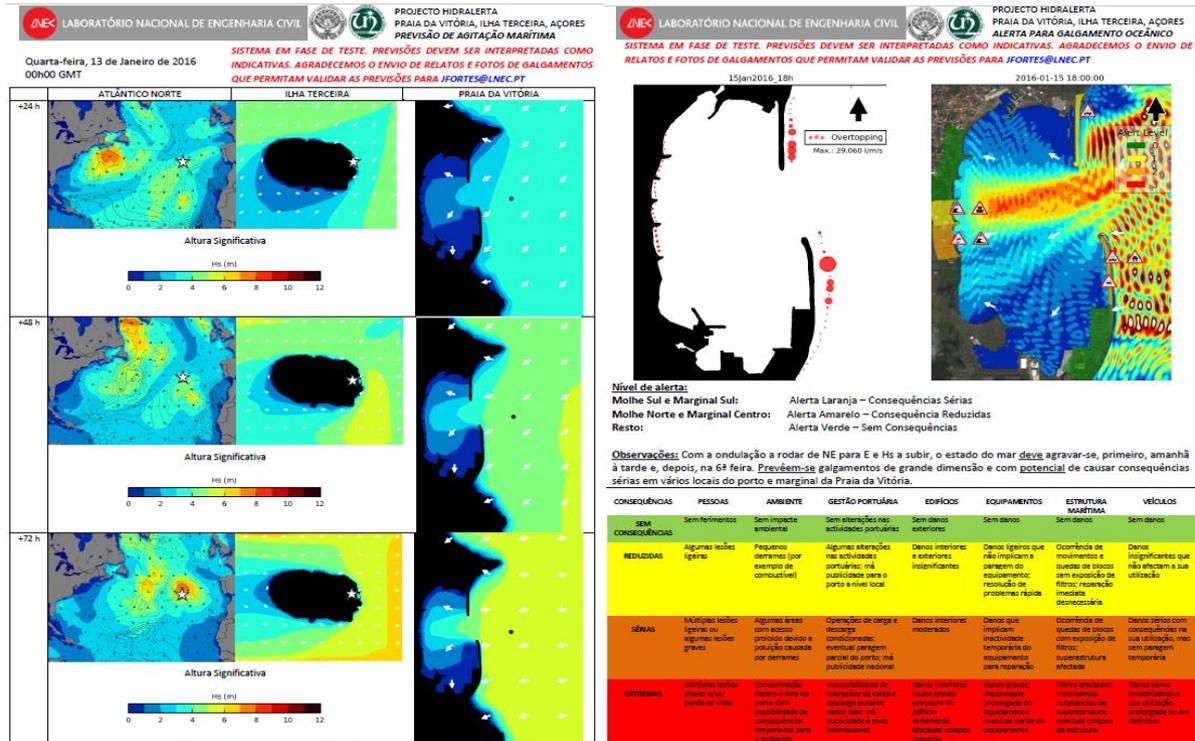


Figura 3.10 – Exemplo de boletim diário do HIDRALERTA na Praia da Vitória, com previsão de agitação marítima e de ocorrência de galgamentos oceânicos para 72 horas

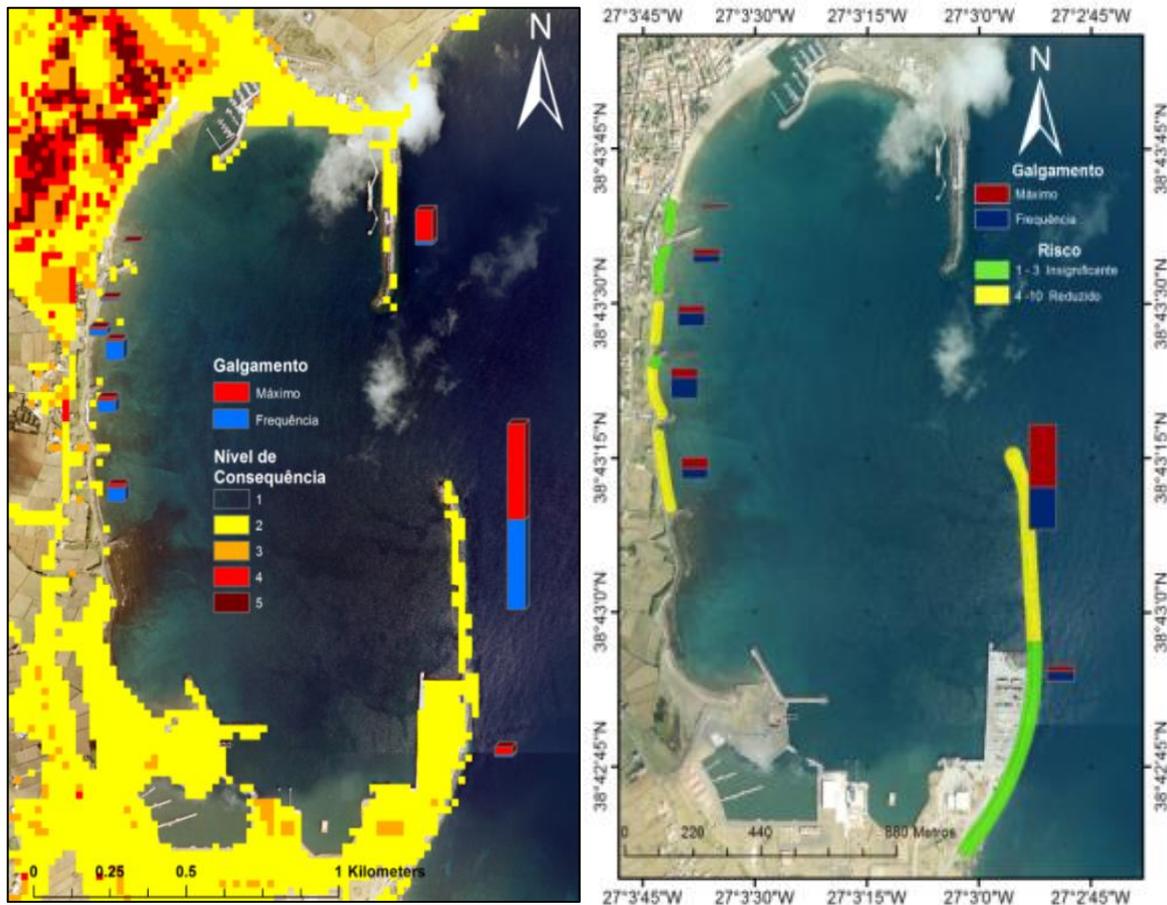


Figura 3.11 – Praia da Vitória. Mapa de consequências e Mapa de Risco

Os boletins, independentemente da previsão, são enviados diariamente para as entidades com responsabilidades na gestão da zona costeira e portuária. Esta iniciativa permite, simultaneamente:

- Alertar, com 72 horas de antecedência, para a possibilidade de ocorrência de temporais com potencial para originarem galgamentos com consequências;
- Identificar falhas computacionais do sistema que atrasem ou inviabilizem a disponibilização diária de previsões;
- Validar o sistema no que se refere à ocorrência e magnitude dos galgamentos, através do *feedback* recebido das entidades locais;
- Desenvolver canais de comunicação e estabelecer uma ponte ativa entre Ciência, Governação e Sociedade.

Refere-se, a título exemplificativo, o apoio prestado às entidades locais antes e durante a passagem do furacão Alex sobre o arquipélago Açoriano, a 15 de janeiro de 2016 (Figura 3.12). O HIDRALERTA identificou, no dia 7 de janeiro de 2016, o sistema de baixas pressões atmosféricas a partir do qual, no dia 14 de janeiro de 2016, se formou aquele fenómeno. A ponte criada entre o HIDRALERTA e as entidades locais, permitiu, por um lado, apoiar a tomada de decisão no que se refere a medidas de prevenção e minimização de risco e, por outro, a obtenção da documentação necessária à avaliação exhaustiva e minuciosa do acerto do sistema.



Figura 3.12 – Fotografia da Praia da Vitória durante o furacão Alex (15 de janeiro de 2016)

A equipa do HIDRALERTA visa, desta forma, contribuir para o desenvolvimento de um produto final útil e fiável, que venha a ser utilizado diariamente pelas entidades locais, dando dessa forma um maior retorno ao investimento público feito em Ciência.

Para além do envio diário de boletins, nos casos mais gravosos em que as previsões antevêm risco para atividades, pessoas ou estruturas na zona em estudo, é acionado um sistema de envio de alerta para as principais entidades de gestão da zona costeira e portuária do porto.

O sistema foi implementado de forma a enviar alertas de forma automática, o mais rapidamente possível após o processamento dos resultados de previsão, dando assim às entidades competentes uma maior janela temporal para a preparação de estratégias que conduzam à mitigação ou à minoração de consequências.

### **3.6 Ferramenta de validação de resultados**

Dada a complexidade da previsão de alguns dos fenómenos em estudo e do facto de que os modelos numéricos não oferecem certezas relativamente ao ajuste entre resultados dos modelos e a realidade, criou-se uma ferramenta de validação integrada na plataforma. Esta ferramenta permite ao utilizador, após a consulta das previsões através da visualização dos *layouts* ou do WebGIS, ter um grau de confiança adicional nessas mesmas previsões.

Esta validação disponibiliza em tempo real os dados da boia ondógrafo da Praia da Vitória (em colaboração com o projeto ESTRAMAR, *Estrategia Marino-Marítima de I+D+i en la Macaronesia* financiado pelo programa MAC 2007-2013 de Cooperação Transnacional Madeira-Açores-Canárias-Cabo Verde e compara-os diretamente com os resultados do sistema HIDRALERTA para a localização da boia, sendo possível visualizar todo o histórico de comparação através de um gráfico dinâmico. Nesta comparação são analisados três parâmetros: altura significativa, direção de onda e período de pico de onda (Figura 3.13).



Figura 3.13 – Validação dos modelos numéricos com os dados da boia ondógrafo em tempo real

## 4 | Atividades em curso e previstas

Os objetivos do trabalho a efetuar para a Portos dos Açores, S.A. são:

- Desenvolvimento, implementação, validação e operação de um protótipo do sistema HIDRALERTA ao porto da Madalena do Pico, na Ilha do Pico, Açores;
- Desenvolvimento, implementação, validação e operação de um protótipo do sistema HIDRALERTA, ao porto de São Roque do Pico, na Ilha do Pico, Açores;
- Validação e operação do protótipo do sistema HIDRALERTA atualmente em funcionamento no porto da Praia da Vitória, na Ilha Terceira.

Para atingir os objetivos mencionados serão efetuadas (ou encontram-se em curso) as seguintes atividades, para os portos da Madalena do Pico e de São Roque do Pico:

- 1) Recolha de informação sobre os portos. Esta informação inclui:
  - a) Levantamentos topo-batimétricos dos portos, o mais atualizados possível;
  - b) Plantas dos portos (em formato dwg);
  - c) Planta e perfis-tipo das obras principais de proteção dos portos (em formato dwg);
  - d) Dados do marégrafo da Horta;
  - e) Dados de agitação da boia Faial/Pico;
  - f) Descrição detalhada das zonas portuárias e das suas atividades, no que diz respeito aos edifícios, equipamentos, navios, rotas de navegação, veículos e outros elementos relevantes;
  - g) Dados sobre os navios que operam regularmente nos portos e sobre os equipamentos nos cais;
  - h) Descrição pormenorizada das zonas terrestres próximas dos portos (população, edificado, vias de comunicação, ocupação geral, etc.), nomeadamente:
    - Plano diretor municipal (PDM) da cidade (em formato *Shapefile*);
    - Modelo digital de superfície (DSM).
  - i) Dados históricos de eventos de galgamentos/inundação e de dificuldades de navegação/inoperacionalidade dos portos, incluindo ocorrências como rotura de amarras, rotura de cabeços de amarração, colisões, danos em navios ou na carga transportada, devidas a agitação marítima.
- 2) Adaptação dos modelos numéricos de caracterização da agitação marítima do sistema HIDRALERTA (módulo I) ao porto em estudo, para obtenção das previsões (a 72 horas) das características da agitação marítima no exterior e interior dos mesmos, o que inclui:
  - a) Adaptação do procedimento de cálculo das características da agitação marítima ao largo do porto em questão;
  - b) Adaptação do procedimento de cálculo das características da agitação marítima no porto em questão;
  - c) Testes.

- 3) Adaptação das ferramentas e modelos do sistema HIDRALERTA (módulo II) para o cálculo dos galgamentos, inundação e outros efeitos da agitação marítima nos portos (incluindo em navios), o que contempla:
  - a) Adaptação do procedimento de cálculo dos galgamentos ao porto em questão;
  - b) Adaptação do procedimento de cálculo da inundação ao porto em questão;
  - c) Adaptação do procedimento de cálculo dos movimentos dos navios amarrados ao porto em questão;
  - d) Testes.
- 4) Adaptação/desenvolvimento do módulo de avaliação do risco (módulo III) do sistema HIDRALERTA aos portos em estudo, o que inclui:
  - a) Definição, em colaboração com a Portos dos Açores, S.A., dos limites operacionais e de segurança em termos de agitação marítima, galgamento, inundação, entre outros, nas diferentes zonas dos portos;
  - b) Adaptação das metodologias de risco aos portos, que inclui o estabelecimento de mapas de consequências e risco para as zonas em estudo;
  - c) Testes.
- 5) Desenvolvimento do módulo de alerta (módulo IV) do sistema HIDRALERTA, o que inclui:
  - a) Adaptação e melhoramento da plataforma online existente para o sistema HIDRALERTA para disponibilização, através de um WebGIS, da informação histórica, de previsão e de alerta, que incluiu: a agitação marítima a nível regional e local, identificação das zonas galgadas e estabelecimento dos diferentes níveis de alerta;
  - b) Envio de alertas automáticos às autoridades responsáveis, com base nos limites pré-estabelecidos para o sistema em relação à agitação marítima e galgamentos;
  - c) Estabelecimento do protocolo a seguir na divulgação de mensagens de alerta.
- 6) Testes e validação do sistema com dados históricos e com dados obtidos *in situ* no decorrer do projeto (p. ex.: com câmaras de vídeo vigilância).

Para o caso do Porto da Praia da Vitória, será dada continuidade ao trabalho efetuado desde 2014, de forma a garantir a operacionalidade do sistema HIDRALERTA, permitir adicionar novas funcionalidades e melhorar o seu desempenho, tanto a nível computacional, como da qualidade das suas previsões. Assim, as principais tarefas serão:

- 7) Garantir a operacionalidade do sistema HIDRALERTA;
- 8) Adicionar novas funcionalidades;
- 9) Melhorar o desempenho, tanto a nível computacional, como da qualidade das suas previsões.

No decorrer dos trabalhos, serão produzidos os seguintes relatórios:

- Relatório inicial, ou relatório 1, com a arquitetura e principais características do sistema (presente relatório);
- Relatório 2 - descrevendo as atividades realizadas e metodologias empregues ao fim de 12 meses;

- Relatório 3 - descrevendo as atividades realizadas e metodologias empregues ao fim de 18 meses;
- Relatório final ou relatório 4, com a descrição de todo o trabalho efetuado.

Para os portos da Madalena do Pico e de São Roque do Pico, estão em curso as seguintes atividades:

1. Implementação no sistema da informação relativa a levantamentos topo-batimétricos dos portos;
2. Implementação no sistema da informação relevante e que caracterize os portos em estudo;
3. Adaptação dos modelos numéricos de caracterização da agitação marítima do sistema HIDRALERTA (módulo I) aos portos em estudo, para obtenção das previsões (a 72 horas) das características da agitação marítima no exterior e interior dos mesmos;
4. Adaptação das ferramentas e modelos do sistema HIDRALERTA (módulo II) relacionados com os galgamentos e a navegação para os portos em estudo.

É de salientar que, no dia 31 de julho de 2018, realizou-se uma reunião com a Portos dos Açores, S.A., e a Universidade dos Açores, a fim de acertar detalhes sobre a informação a ser disponibilizada ao LNEC e outros assuntos relacionados com o arranque dos trabalhos. Nos dias 1 e 2 de agosto, realizou-se uma visita de dois técnicos do LNEC às áreas a modelar, a fim de efetuar um levantamento no local de informação relativa às fronteiras físicas dos domínios de cálculo dos portos de Madalena do Pico e São Roque do Pico.

## 5 | Considerações finais

Este relatório, desenvolvido no âmbito do projeto ECOMARPORT, é o primeiro de quatro e contempla a arquitetura e principais características do sistema HIDRALERTA, para previsão e alerta de situações de emergência relacionadas com agitação marítima, galgamentos, inundações e navegação.

Este novo sistema baseia-se no sistema homónimo presentemente em funcionamento para o porto e baía da Praia da Vitória, Ilha Terceira, Açores, no que diz respeito ao galgamento/inundação, que será estendido para ter em conta os riscos relacionados com a amarração de navios. Foi já testada uma versão preliminar para um porta-contentores amarrado no porto e baía da Praia da Vitória, Ilha Terceira, Açores.

É objetivo deste trabalho construir protótipos do HIDRALERTA para os portos da Madalena do Pico e de São Roque do Pico, ambos na Ilha do Pico, Açores. A garantia da operacionalidade e a validação do sistema para o porto da Praia da Vitória, Ilha Terceira, Açores, será objeto também deste trabalho. As características dos portos referidos e as linhas gerais para a implementação destes sistemas nos mesmos foi detalhada neste relatório.

Lisboa, LNEC, dezembro de 2018

VISTO

A Diretora do Departamento de Hidráulica e  
Ambiente



Helena Alegre

AUTORIA



Liliana Pinheiro

Bolseira de Pós-doutoramento



Conceição Fortes

Investigadora Principal

Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas  
Marítimas



Maria Teresa Reis

Investigadora Auxiliar



Pedro Poseiro

Estagiário de Acolhimento

## Referências bibliográficas

- BOUIJ, N.R.; HOLTHUIJSEN, L.H.; RIS, R.C., 1996 – **The SWAN wave model for shallow water**. ICCE'96, Orlando, 668-676pp.
- Censos, INE, 2011 – [http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos2011\\_apresentacao](http://censos.ine.pt/xportal/xmain?xpid=CENSOS&xpgid=censos2011_apresentacao)
- COEVELD, E.M.; VAN GENT, M.R.A.; POZUETA, B., 2005 – **Neural Network: Manual NN\_OVERTOPPING2**. CLASH WP8 – Report.
- CONSULMAR, 2011 – **Projeto de execução do reforço da cabeça do molhe do porto comercial de São Roque do Pico**. Consulmar - Projectistas e Consultores Lda.
- CONSULMAR, 2012 – **Projeto de execução do reperfilamento do manto de proteção do molhe-cais do porto de São Roque do Pico**. Consulmar - Projectistas e Consultores Lda.
- CUMMINS W.E., 1962 – **Impulse response function and ship motions**. Schiffstechnik, 9, 101-109.
- FLATER, D., 1998 – **XTide: harmonic tide clock and tide predictor**. <http://www.flaterco.com/xtide/> (acedido a 30 de maio de 2016).
- FORTES, C.J.E.M., 2002 – **Transformações não lineares de ondas em portos. Análise pelo método dos elementos finitos**. Tese de doutoramento. Lisboa: IST/DEM.
- FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T.; POSEIRO, P.; CAPITÃO, R.; SANTOS, J.A.; PINHEIRO, L.P.; RODRIGUES, A.; SABINO, A.; RODRIGUES, M.C.; RAPOSEIRO, P.; FERREIRA, J.C.; SILVA, C.; SIMÕES, A.; AZEVEDO, E.B., 2013 – **O Projeto HIDRALERTA. Sistema de Previsão e Alerta de Inundações em Zonas Costeiras e Portuárias**. In Atas das 8<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. LNEC, Lisboa, Portugal.
- FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T.; POSEIRO, P.; SANTOS, J.A.; CAPITÃO, R.; PINHEIRO, L.; SABINO, A.; RODRIGUES, A.; FERREIRA, J.C.; MARTINHO, S.; RAPOSEIRO, P.; SILVA, C.; SIMÕES, A.; AZEVEDO, E.B.; RODRIGUES, M.C., 2014 – **Desenvolvimentos recentes do HIDRALERTA. Sistema de previsão e alerta de inundações em zonas costeiras e portuárias**. In Atas das 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica, Instituto Hidrográfico, 24 a 26 de junho. Lisboa, Portugal. ISSN - 978-989-705-073-2.
- FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T.; POSEIRO, P.; SANTOS, J.A.; GARCIA, T.; CAPITÃO, R.; PINHEIRO, L.; REIS, R.; CRAVEIRA, J.; LOURENÇO, I.; LOPES, P.; RODRIGUES, A.; SABINO, A.; ARAÚJO, J.P.; FERREIRA, J.C.; SILVA, S.F.; RAPOSEIRO, P.; SIMÕES, A.; AZEVEDO, E.B.; REIS, F.V.; SILVA, M.C.; SILVA, C.P., 2015 – **Ferramenta de Apoio à Gestão Costeira e Portuária: o Sistema HIDRALERTA**. In Atas do VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, Aveiro, outubro 2015.
- GARCIA, T.; REIS, M.T., POSEIRO, P.; FORTES, C.J.E.M.; LOPES, P.; LOURENÇO, I.; AZEVEDO, E.; RODRIGUES, M.C., 2016 – **Previsão e validação de galgamentos**

- oceânicos no sistema HIDRALERTA.** 13.º Congresso da Água, 7 - 9 março, LNEC, Lisboa. ISBN 978-989-8509-15-4.
- KORSEMEYER, F.T.; LEE, C.-H.; NEWMAN, J.N.; SCLAVOUNOS, P.D., 1988 – **The analysis of wave effects on tension-leg platforms.** 7<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Houston, Texas, 1-14pp.
- LOPES, P.; POSEIRO, P.; FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T.; GARCIA, T.; AZEVEDO, E.; RODRIGUES, M.C.; RODRIGUES, A.; SABINO, A., 2016 – **Otimização da Arquitetura Computacional do Sistema HIDRALERTA.** 13º Congresso da Água, 7 - 9 março, LNEC, Lisboa, Portugal, 1–13pp. ISBN 978-989-8509-15-4.
- LOURENÇO, I.; SANTOS, J.A.; FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T.; GARCIA, T.; POSEIRO, P.; CRAVEIRO, J., 2015 – **Evaluation of wave overtopping consequences for risk assessment. The case study of Praia da Vitória Harbour (Azores, Portugal).** SCACR 2015 - International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, 28 de setembro de 2015 - 1 de outubro de 2015. Florença, Itália.
- MYNETT, A.E.; KEUNIG, P.J.; VIS, F.C., 1985 – **The dynamic behaviour of moored vessels inside a harbour configuration.** Int. Conf. on Numerical Modelling of Ports and Harbours, Birmingham, England: 23-25 April 1985. Cranfield: BHRA. The Fluid Engineering Centre.
- NEVES, D.R.; FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T.; SANTOS, J.A.; RODRIGUES, S.; RAPOSEIRO, P.D., 2010 – **Avaliação do risco para a navegação em zonas portuárias utilizando o sistema de informação geográfica GUIOMAR. O caso de Sines.** Proc. Conferência Ibérica ESIG 2010, Oeiras, 10 a 12 de fevereiro.
- 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), 291-312pp.
- NWOGU, O.G., 1993 – **Alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation.** Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, vol. 119, no.6, 618-638pp.
- OCIMF, 1992 – **Mooring Equipment Guidelines.** Witherby e Co. Ltd.
- PERSSON, A., 2001 – **User Guide to ECMWF Forecast Products.** Meteorological Bulletin M3.2, ECMWF, August, 115pp.
- PIANC, 1995 – **Criteria for movements of moored ships in harbors. Technical report Permanent.** International Association of Navigation Congresses (PIANC) Supplement to bulletin no. 88.
- PIANC, 2012 – **Guidelines for berthing structures related to thrusters.** PIANC, Brussels, Belgium.
- 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 (RIMNI). Volume 24, número 4, 4 dezembro.

- PINHEIRO, L.; FORTES, C.J.E.M.; SANTOS, J.A.; FERNANDES, L.; WALKLEY, M., 2011 – **Boussinesq-type numerical model for wave propagation near shore and wave penetration in harbours**. MARTECH 2011 1<sup>st</sup> International Conference on Maritime Technology and Engineering. Lisbon 10 - 12 may.
- PINHEIRO, L.; LOPES, P.; POSEIRO, P.; FORTES, C.J.E.M.; SANTOS J.A., 2017 – **SWAMS ALERT – Sistema de previsão, alerta e avaliação do risco associados à navegação em áreas portuárias. Novos desenvolvimentos**. 13<sup>o</sup> Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa. 13 a 15 de setembro, Porto.
- 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, 6<sup>th</sup> 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<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária. LNEC, Lisboa, Portugal.
- POSEIRO, P.; FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T.; SANTOS, J.A., 2014a – **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, Rio Grande, Brasil.
- POSEIRO, P.; SABINO, A.; FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T.; RODRIGUES, A., 2014b – **Aplicação do sistema HIDRALERTA de previsão e alerta de inundações: caso de estudo da Praia da Vitória**. 12<sup>o</sup> Congresso da Água, Lisboa, 5 a 8 de março de 2014. Centro de Congressos de Lisboa.
- POSEIRO, P.; SANTOS, J.A.; FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T., 2015 – **Avaliação do impacto económico dos galgamentos e inundações no porto da Praia da Vitória**. In Atas do VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa. Aveiro, Portugal.
- POSEIRO, P.; GONÇALVES, A.B.; REIS, M.T.; FORTES, C.J.E.M., 2017 – **Early warning systems for coastal risk assessment associated with wave overtopping and flooding**. Journal of Waterway, Port, Coastal & Ocean Engineering.
- POSEIRO, P., 2018 – **Forecast and Early Warning System for Wave Overtopping and Flooding in Coastal and Port Areas: Development of a Model and Risk Assessment**. Dissertação submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, IST-UNL.
- PULLEN, T.; ALLSOP, N.W.H.; BRUCE, T.; KORTENHAUS, A.; SCHUTTRUMPF, H.; VAN DER MEER, J., 2007 – **EurOtop: Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual**. Kuste.
- RODRIGUES, J.; FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T.; POSEIRO, P.; TAVEIRA-PINTO, F., 2017a – **O Porto de Ponta Delgada, S. Miguel, Açores: Avaliação das consequências de galgamento pelo método AHP**. Revista Territorium 24, 2017, abril, 127-139pp. DOI: [https://doi.org/10.14195/1647-7723\\_24\\_9](https://doi.org/10.14195/1647-7723_24_9).

- RODRIGUES, A.; SABINO, A.; POSEIRO, P.; FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T., 2017b – **HIDRALERTA: A coastal and port risk forecast and warning platform**. Revista Hydro-International, 21(2–March/April), 22-25, on-line 25-01-2017 (<https://www.hydro-international.com/content/article/coastal-and-port-risk-forecast-and-warning-platform>).
- SABINO, A.; POSEIRO, P.; RODRIGUES, A.; REIS, M.T.; FORTES, C.J.; REIS, R.; ARAÚJO, J., 2018 – **Coastal Risk Forecast System**. Journal of Geographical Systems, 20(2), 159-184. (<https://doi.org/10.1007/s10109-018-0266-5>).
- SANTOS, J.A., 1994 – **MOORNAV – Numerical model for the behaviour of moored ships**. Final report. Lisbon: Report 3/94-B, Projecto NATO PO-Waves.
- 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 ICE Coasts, Struc. & Breakwaters'05, Thomas Telford, London, 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**, 33 p., CLASH WP8 Report, Delft, Holanda.
- VAN GENT, M.R.A.; VAN DEN 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.
- WW, 2014 – **Projeto de execução da empreitada de construção de rampa para navios Ro/Ro e ferry, e obras complementares, no porto de São Roque do Pico**. WW – Consultores de Hidráulica e Obras Marítimas, S.A.

## Anexos

---



## ANEXO I

### Plantas dos portos da Madalena do Pico e de São Roque do Pico



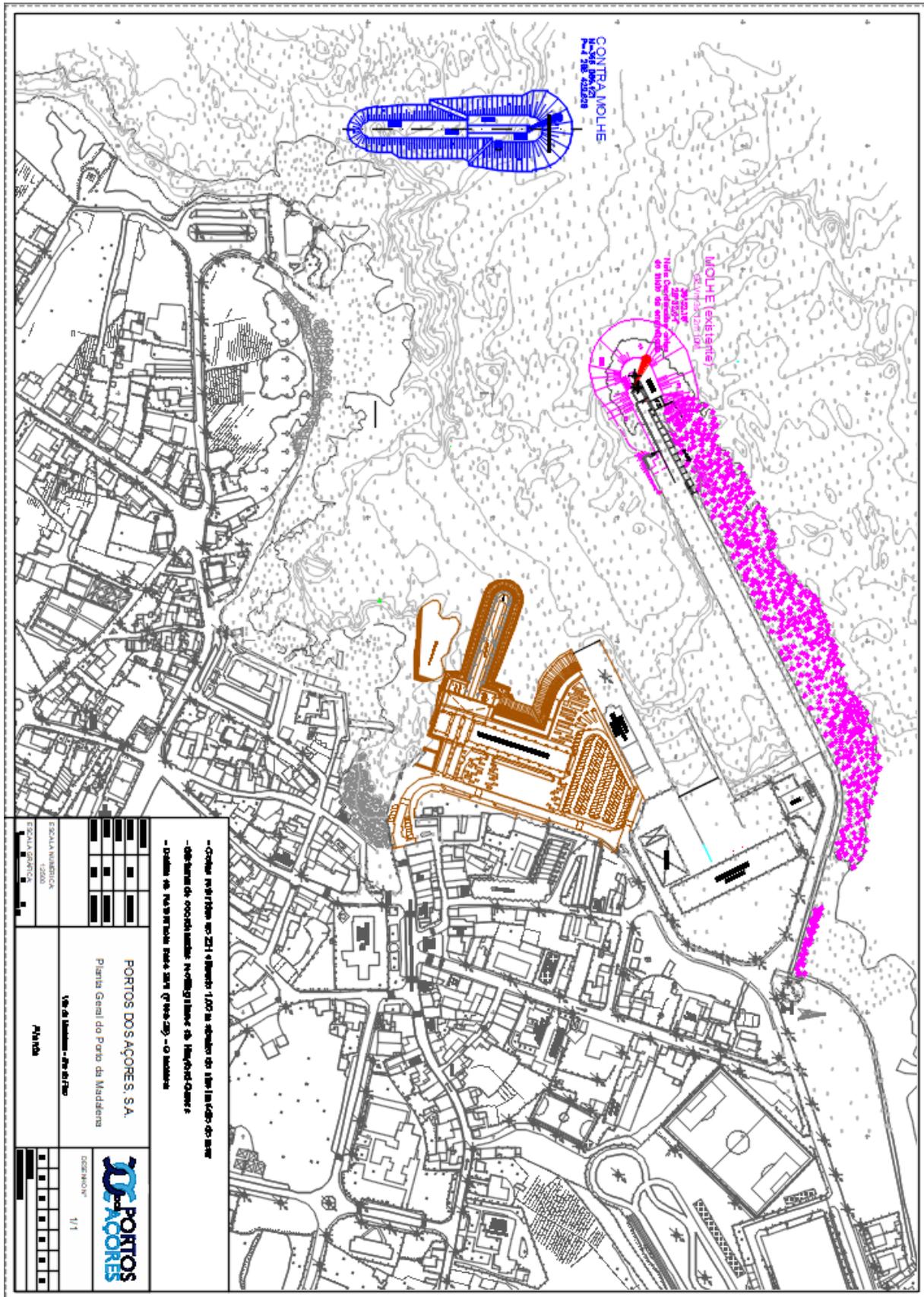


Figura I.1 – Planta do Porto de Madalena do Pico

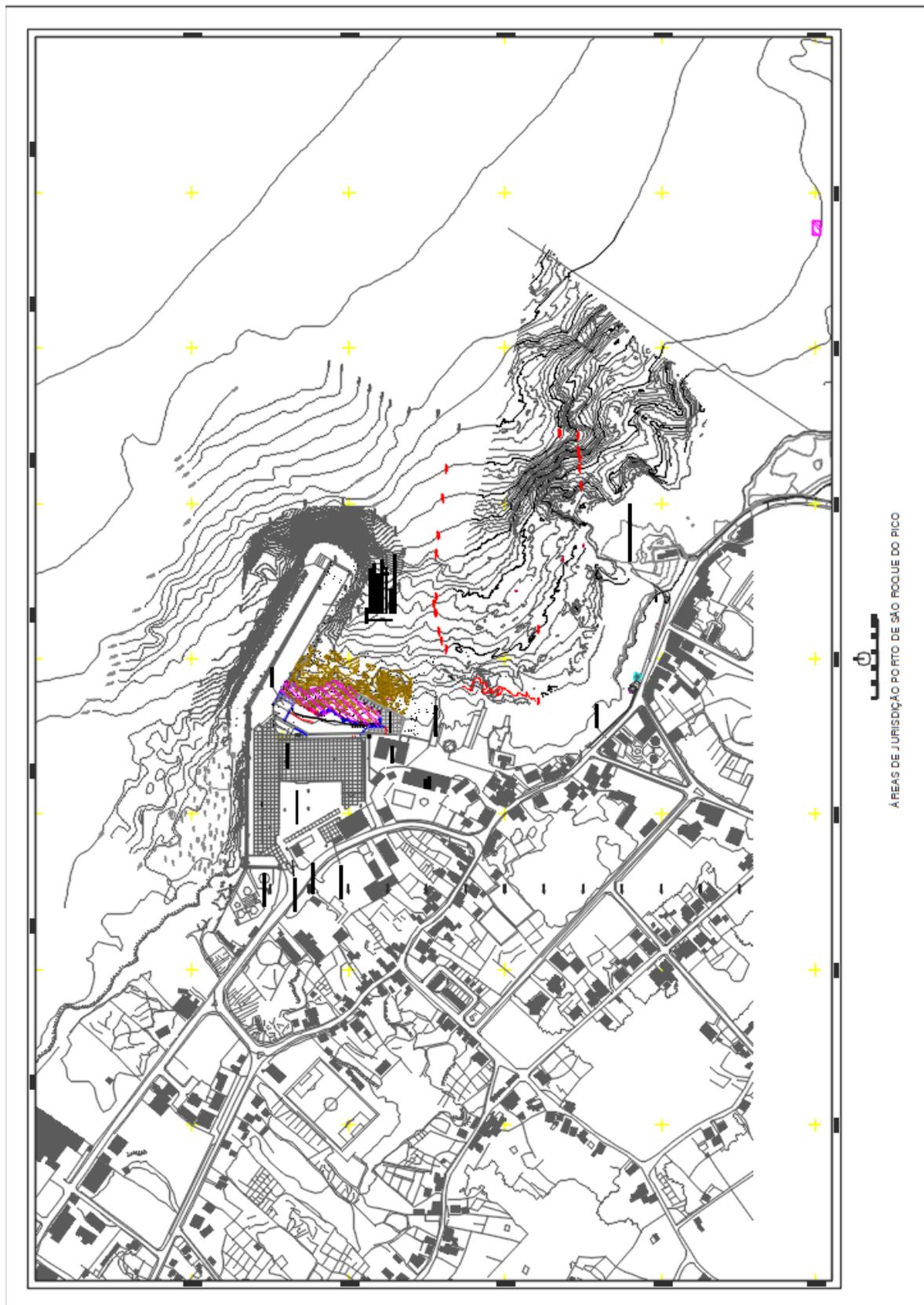


Figura I.2 – Planta do Porto de São Roque do Pico

## ANEXO II

Plantas e perfis das obras de proteção dos portos da Madalena do Pico e de São Roque do Pico





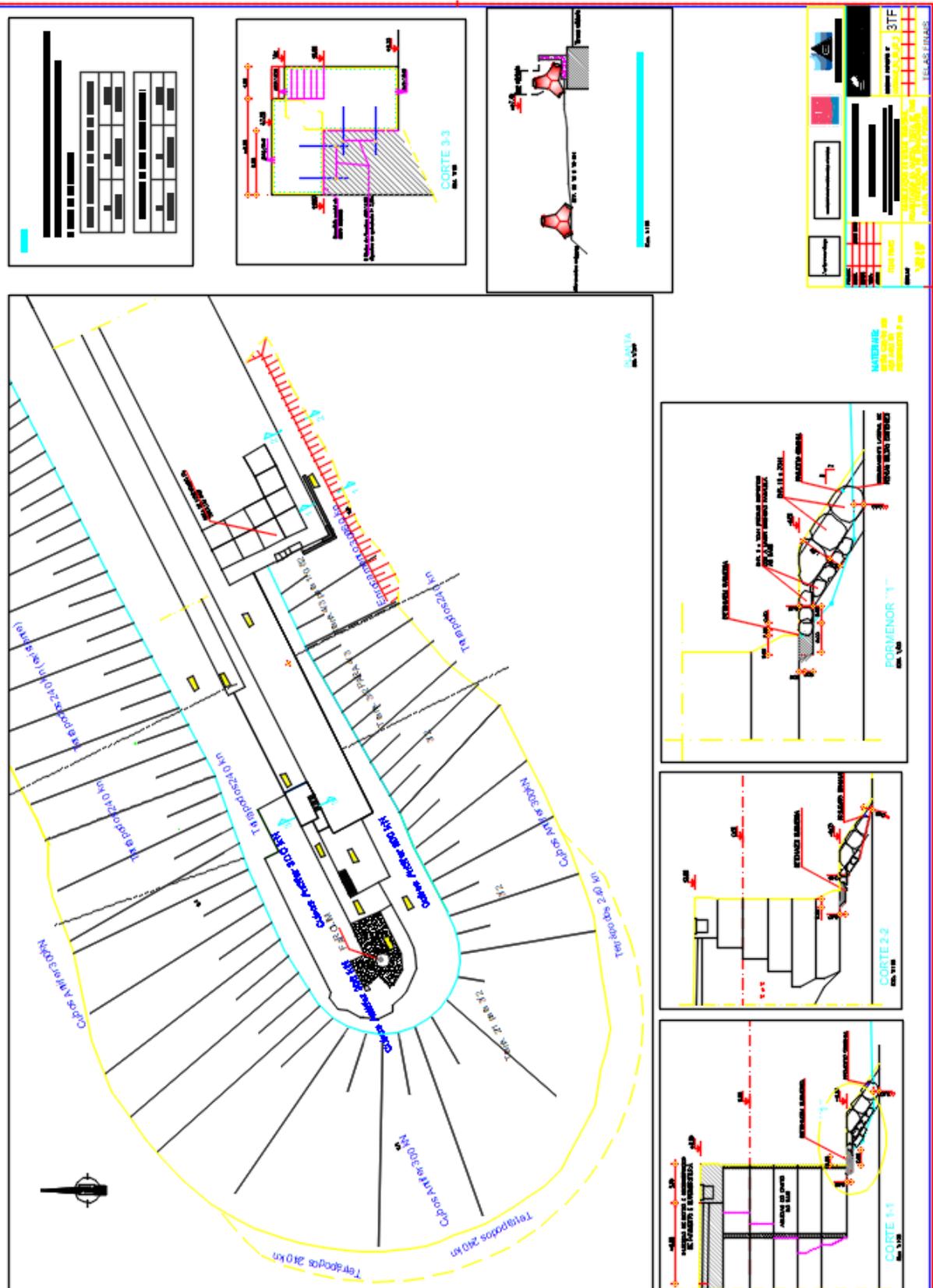


Figura II.2 – Planta e perfis da cabeça do molhe do Porto da Madalena do Pico



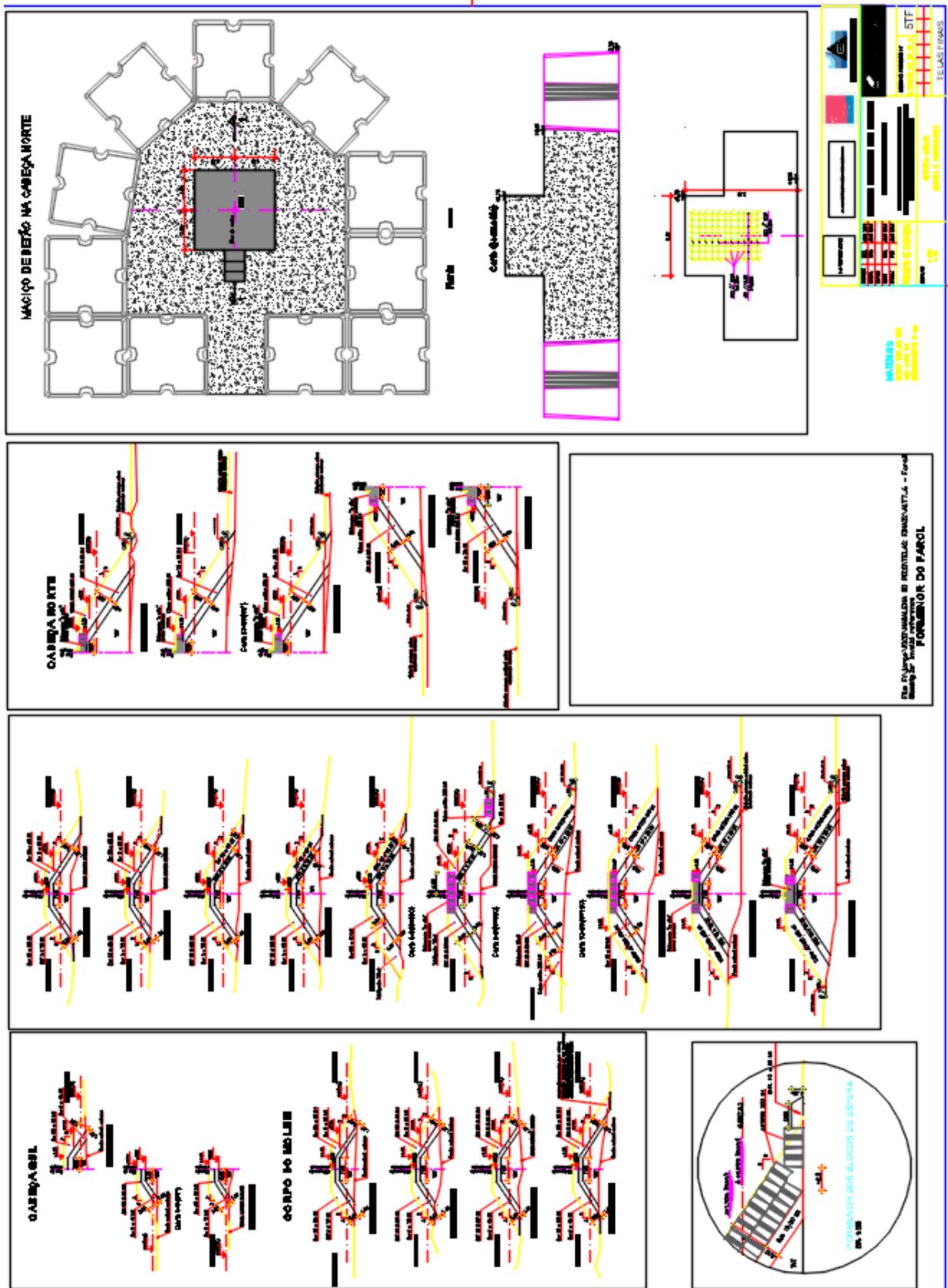


Figura II.4 – Perfis das obras do Porto de São Roque do Pico

## ANEXO III

### Modelos numéricos



## O modelo SWAN

O modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999; SWAN Team, 2006) acrónimo de *Simulating WAves Nearshore* é um modelo numérico para geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da ação de onda. Trata-se de um modelo de domínio público (*freeware*), em constante desenvolvimento pela *Delft University of Technology*, da Holanda, que possui como uma das maiores vantagens a manutenção da estrutura dos ficheiros de dados e de resultados, o que permite a fácil atualização de versões mais robustas e completas do modelo sempre que necessário. Este modelo propaga a agitação marítima desde o largo até próximo da costa considerando os processos físicos de refração e empolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por ação dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitcapping*), dissipação de energia devido ao atrito de fundo, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos.

O campo de ondas na zona é caracterizado pelo espectro bidimensional de densidade espectral da ação de onda. A propagação da agitação, nos modos estacionário ou não estacionário, nos espaços geográfico e espectral, é realizada utilizando esquemas numéricos implícitos. A zona em estudo pode ser descrita com coordenadas cartesianas ou esféricas.

Os dados necessários para a execução do SWAN são a malha batimétrica da zona a modelar e as condições de agitação na fronteira de entrada do domínio, para além de um conjunto de outros parâmetros de cálculo. De entre os vários resultados obtidos pelo SWAN destacam-se a altura significativa, os períodos de pico e médio, as direções de pico e média, a dispersão direcional, o parâmetro de largura de banda e nível de água em qualquer parte do domínio computacional. Para a preparação dos dados, execução e visualização dos resultados do modelo SWAN também se utiliza a ferramenta SOPRO, Pinheiro *et al.* (2007).

## O modelo DREAMS

DREAMS é um modelo matemático de elementos finitos para o cálculo da propagação e deformação de ondas regulares em zonas costeiras, Fortes (1993). O modelo pode ser aplicado no estudo, quer da penetração num porto da agitação marítima de período curto, quer da ressonância de uma bacia portuária excitada por ondas de longo período nela incidentes. É baseado na equação elíptica de declive suave, Berkhoff (1972), que descreve os efeitos combinados da refração e difração de ondas monocromáticas propagando-se em fundos de inclinação suave, como os que ocorrem geralmente em portos, baías e zonas costeiras. O método numérico utilizado para a resolução da equação de declive suave é o Método dos Elementos Finitos (MEF). O modelo não tem em conta os efeitos da rebentação das ondas, da presença de correntes, nem de eventuais galgamentos das obras de abrigo.

As condições de fronteira podem ser de três tipos: condições de radiação, que permitem a saída de perturbações geradas no domínio no sentido de propagação para o infinito; condições de geração e radiação combinadas, como as relativas a fronteiras abertas, e condições de reflexão (total ou parcial), referentes aos contornos sólidos da zona em estudo (praias, falésias, molhes, cais, etc.).

Os dados a fornecer ao modelo DREAMS são: as características da agitação incidente (período e direção da onda), os coeficientes de reflexão em cada troço da fronteira do domínio de cálculo, a batimetria e as características da malha de elementos finitos com que foi discretizado o domínio em estudo.

O modelo calcula índices de agitação  $H/H_0$ , relação entre a altura de onda no ponto do domínio de cálculo,  $H$ , e a altura de onda à entrada do domínio de cálculo,  $H_0$ , ou coeficientes de amplificação (em estudos de ressonância portuária) e direções de propagação da onda. O campo de velocidades horizontais na superfície livre e as cristas das ondas (linhas de igual fase) constituem resultados opcionais.

A validação do modelo matemático, Fortes (1993), foi feita com casos de teste clássicos da bibliografia, tais como o fundo plano inclinado, o baixio circular, os molhes semi-infinitos e a bacia retangular de Mei, e com casos de teste reais. O modelo foi também validado com base nos estudos de ressonância e agitação no porto de Saint Quay-Portrieux, Fortes (1993) e no porto da Baleeira, Fortes *et al.* (1997), tendo sido comparados, para este caso de teste, os resultados de DREAMS com resultados de outros modelos matemáticos e/ou de modelos físicos.

Como limitações do modelo DREAMS, salientam-se:

- Não tem em conta os efeitos da dissipação de energia por atrito de fundo, os efeitos das correntes na propagação das ondas ou os galgamentos sobre estruturas;
- Não tem em conta efeitos não-lineares (modelo linear), tais como a interação de ondas e correntes, a interação de ondas devido à topografia do fundo, a transferência de energia entre componentes de onda, a geração de componentes de baixa frequência induzidas por grupos de ondas curtas e o efeito da dispersão por amplitude da onda (o efeito da amplitude da onda na celeridade);
- A sua aplicação está condicionada a fundos de declive suave, até 1:3.

## O modelo WAMIT

O WAMIT® – *WaveAnalysisMIT* (Korsemeier *et al.*, 1988; MIT, 1990) é um modelo desenvolvido no Departamento de Engenharia Oceânica do *Massachusetts Institute of Technology* e que utiliza um método de painel para resolver, no domínio da frequência, os problemas de radiação e de difração de um corpo flutuante livre. Este modelo baseia-se na segunda igualdade de Green para determinar a intensidade das distribuições de fontes e dipolos nos painéis utilizados na discretização da superfície molhada do casco do navio, com as quais é possível gerar os potenciais harmónicos dos escoamentos associados aos problemas de radiação e de difração de um navio livre colocado numa zona de profundidade constante, mas não limitada horizontalmente, Figura III.1.

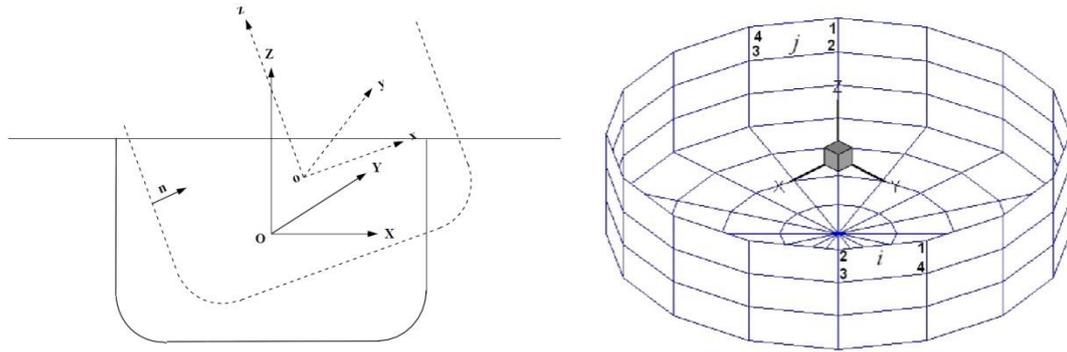


Figura III.1 – Sistema de coordenadas baricêntrico. Convenção para numeração dos painéis e seus vértices.  
Retirado do manual do WAMIT® (MIT, 1990)

O WAMIT® é um programa de radiação/difração desenvolvido para a análise da interação das ondas de superfície com estruturas *offshore*. O WAMIT® baseia-se num método painel tridimensional. O programa principal é formado por dois sub-programas *poten* e *force* que avaliam os potenciais de velocidade e parâmetros hidrodinâmicos, respetivamente. A profundidade da água pode ser infinita ou finita, e um ou vários corpos que interagem podem ser analisados. Os corpos podem estar na superfície livre, submersos, ou assentes no fundo do mar.

Uma variedade de opções permite a análise dinâmica de corpos que flutuam livremente, restringidos ou fixos. A condição da superfície livre é linear. As forças de segunda ordem estão incluídas nesta análise, uma vez que podem ser calculadas a partir da solução linear. Os potenciais de velocidade de radiação e de difração na superfície molhada do corpo são determinados utilizando o teorema de Green. A forma geométrica da superfície submersa do corpo é definida por elementos quadrilaterais planos. Os potenciais de velocidade são constantes em cada painel.

O potencial de velocidade é representado por uma equação integral válida na superfície do casco e na intersecção do casco com a superfície livre, obtida pela aplicação da segunda identidade de Green. A solução numérica é obtida representando o casco por um número finito de painéis, e assumindo a densidade das fontes (ou o potencial) constante em cada painel.

A utilização do teorema de Green permite transformar em equações integrais as equações diferenciais que controlam os potenciais associados aos problemas de radiação e de difração. Em vez de se ter um conjunto de equações válidas em todo o domínio, obtém-se um conjunto de equações a satisfazer apenas nas fronteiras desse domínio, a região mais relevante para a determinação das forças induzidas pelo escoamento.

As equações integrais dos potenciais  $\varphi_j$  associados ao problema da radiação, são dadas por:

$$2\pi\varphi_j(x') + \int_S \varphi_j(x) \frac{\partial G(x', x)}{\partial n} dS = \int_S G(x', x) \frac{\partial \varphi_j(x)}{\partial n} \quad (1)$$

enquanto para o potencial de difração  $\varphi_D$ , resultante da sobreposição dos potenciais da onda incidente,  $\varphi_0$ , e da onda difratada pelo corpo,  $\varphi_7$ , se tem a seguinte equação integral:

$$2\pi\varphi_D(x') + \int_S \varphi_D(x) \frac{\partial G(x', x)}{\partial n} dS = 4\pi\varphi_0(x') \quad (2)$$

A função Green,  $G(x', x)$ , é o potencial de velocidade num ponto  $x$  devido a uma fonte de intensidade  $-4\pi$  colocada em  $x'$  e que satisfaz não só a condição de fronteira da superfície livre como a condição de radiação.

Aproximando a posição média da superfície molhada do corpo flutuante por um conjunto de painéis, triangulares ou quadrangulares, em cada um dos quais se assume um valor constante do potencial de velocidades, as equações integrais reduzem-se a um sistema de equações lineares para os valores do potencial de velocidade em cada um dos painéis. Para os potenciais de radiação vem:

$$2\pi\varphi_j(x_i) + \sum_{k=1}^N D_{ik}\varphi_j(x_k) = \sum_{k=1}^N S_{ik} \frac{\partial \varphi_j(x_k)}{\partial n} \quad (3)$$

em que  $i=1, \dots, N$ , sendo  $N$  o número de painéis. Para o potencial de difração, o sistema de equações é dado por:

$$2\pi\varphi_D(x_i) + \sum_{k=1}^N D_{ik}\varphi_D(x_k) = 4\pi\varphi_0(x_i) \quad (4)$$

As matrizes  $D_{ik}$  e  $S_{ik}$  são definidas por:

$$D_{ik} = \int_{S_k} \frac{\partial G(x_i, \xi)}{\partial n} d\xi \quad (5)$$

$$S_{ik} = \int_{S_k} G(x_i, \xi) d\xi \quad (6)$$

em que  $S_k$  representa a superfície do painel  $k$ ,  $n$  a normal a essa superfície e  $\xi$  uma variável de posição na mesma superfície. Embora os pontos onde são escritas as equações integrais estejam localizados no centroide de cada um dos painéis,  $x_i$  e  $x_k$ , os integrais das equações (5) e (6) a realizar em cada um dos painéis  $k$  são obtidos utilizando uma fórmula de quadratura de Gauss com quatro pontos seleccionados no painel  $k$ . A mesma fórmula de quadratura é utilizada pelo modelo WAMIT® para calcular as forças de difração através das relações de Haskind.

## O modelo BAS

O modelo numérico BAS simula o comportamento dinâmico de navios amarrados sob a influência de condições ambientais, incluindo ondas, ventos e correntes. BAS é uma sigla holandesa para "*Bewegingen van Afgemeerde Systemen*" que significa "movimentos de sistemas amarrados". BAS resolve as equações de movimento de um navio amarrado e fornece, sob forma de série temporal, movimentos do centro de gravidade do navio segundo seis graus de liberdade, forças de tração nos cabos de amarração e forças de compressão nas defensas.

As propriedades hidrodinâmicas do navio (massa adicionada para frequência infinita, as funções de resposta a impulso segundo cada um dos graus de liberdade do navio, bem como funções de

transferência da força induzida pelas ondas no navio) têm que ser fornecidas ao sistema de programas. Estas propriedades já foram calculadas anteriormente nos programas WAMIT® e transformadas para o domínio do tempo pelo programa HYDRO.

A partir desses resultados, as condições ambientais limite para a realização de operações de movimentação de carga podem ser determinadas. Além disso, pode calcular-se o tempo de inatividade potencial de determinado posto de acostagem, estabelecendo-se também as condições de sobrevivência do navio no mesmo posto. O modelo BAS pode utilizar-se como uma ferramenta de projeto ou de melhoria das condições de amarração de um navio avaliando-se o efeito de alterações, quer nas características materiais dos elementos do sistema de amarração, quer na própria disposição desses elementos.

O pacote HYDRO, (Mynett *et al.*, 1985; DH, 1991), desenvolvido no *Delft Hydraulics*, prepara os dados para o pacote BAS e é composto pelos programas HYDRO1 e HYDRO2.

O programa HYDRO1 calcula as funções de resposta a impulso e o programa HYDRO2 prepara os ficheiros com aqueles dados e os de restituição hidrostática para utilização pelo pacote BAS. HYDRO1 começa por determinar os valores dos coeficientes de amortecimento num conjunto de frequências igualmente espaçadas, utilizando uma interpolação por "splines" sobre os valores calculados pelo WAMIT® nas frequências prescritas. Dada a simetria da matriz dos coeficientes de amortecimento, é apenas necessário fornecer, por cada frequência, 21 conjuntos de coeficientes de amortecimento (o triângulo superior ou inferior) com os valores nas diversas frequências em que cada coeficiente foi calculado.

Segue-se a preparação, no programa HYDRO2, das matrizes de massa adicionada e de restituição hidrostática, bem como das funções de resposta em frequência das forças devidas ao problema de difração, por forma a serem utilizadas pelo pacote de programas BAS.

O modelo numérico BAS faz parte desse pacote composto por quatro programas: WAFOR, BAS, PRIBAS e PLOBAS. Os dois últimos referem-se à produção de saídas de resultados do programa BAS, listagens ou gráficos dos movimentos do navio e das forças nas defensas e amarras. O programa WAFOR prepara as séries temporais das forças de excitação considerando não só as forças do problema linearizado, mas também as forças de deriva de variação lenta e média. O programa WAFOR utiliza as funções resposta em frequência do problema de difração para determinar as séries temporais das forças de excitação no navio devidas àquele problema.

Considera-se que as ondas incidentes são de cristas longas e possuem o mesmo rumo no infinito. Quando as ondas incidentes no navio não são regulares, o estado de agitação pode ser caracterizado por um espectro arbitrário ou pelos espectros Pierson-Moskowitz ou JONSWAP, ver Anexo A, sendo os parâmetros destes espectros dados a fornecer ao programa. Existe ainda a opção de fornecer uma série temporal de elevação da superfície livre.

As fases para cada uma das frequências  $f_i$  são uma sequência de números aleatórios com distribuição uniforme no intervalo  $[0, 2\pi]$ .

Além da força de excitação do problema linearizado, e caso assim seja pretendido, o programa WAFOR sobrepõe àquelas forças as forças de deriva de variação lenta, necessitando para tal das funções de transferência quadráticas. Embora o programa WAFOR possa gerar as séries temporais das componentes daquelas forças segundo todas as coordenadas generalizadas, requer os correspondentes coeficientes. Estes coeficientes podem ser obtidos do modelo WAMIT®.

Contudo, o método empregue pelo pacote WAMIT® na determinação da força de deriva média, conservação da quantidade de movimento do fluido num dado volume, limita aquele cálculo às componentes horizontais e ao momento em torno de  $z$ , pelo que a informação requerida não pode ser fornecida completamente. As forças de deriva de variação lenta são calculadas para todas as diferenças de frequências em que o espectro foi discretizado.

Definidas as séries temporais das forças que atuam no navio, o modelo numérico BAS monta e resolve as equações de movimento do navio amarrado. Para definir estas séries, o programa BAS necessita de dados sobre os elementos de amarração, cabos e defensas.

Devem ser fornecidas as coordenadas das extremidades de cada cabo de amarração, no instante inicial, a força aplicada no cabo também no instante inicial e a relação força/extensão. Esta pode ser definida por uma constante de rigidez, uma tabela ou por um polinómio da forma:

$$F_{ml} = A \left( \frac{\Delta L}{L_0} \right)^B \quad (7)$$

em que os coeficientes  $A$  e  $B$  são fornecidos pelo utilizador.

Quando a relação força/extensão é definida por uma tabela, a força no cabo é calculada por interpolação linear dos valores na tabela, utilizando-se também uma relação linear no cálculo dos valores correspondentes a extensões superiores à última contida na tabela. O versor da direção da força no cabo é determinado a partir das coordenadas das extremidades do mesmo. Neste cálculo, é levado em conta o movimento do navio.

As forças devidas às defensas são decompostas nas seguintes parcelas:

- Força de deflexão;
- Força de amortecimento (proporcional à velocidade de deformação da defesa);
- Força de atrito.

Cada defesa é caracterizada pelas coordenadas, em relação ao centro de gravidade do navio, do ponto de contato da defesa com o casco do navio, que irá admitir-se ser independente dos movimentos do navio, e pela coordenada do ponto de contato no início da deformação. Ao admitir-se a constância da posição relativa do ponto de contato da defesa com o navio procura-se, desta forma, evitar a definição da superfície do casco do navio e a tarefa de averiguar qual o ponto do casco em contato com a defesa. Com base no afastamento do ponto de contato em relação à posição não deformada, e na componente segundo  $y$  da velocidade do navio naquele ponto, obtêm-se as forças de deflexão e de amortecimento (normais ao eixo longitudinal do navio).

Quando o navio se desloca libertando a defesa, é possível que a força calculada seja oposta ao sentido de deformação da defesa, devido à componente de amortecimento. Significa isso que a defesa já não está a exercer força sobre o navio. Nessa situação o programa coloca a força a zero.

As forças devidas ao atrito da força exercida pela defesa são dadas por:

$$F_{fx} = - |F_{fy}| C_{fx} \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} \quad (8)$$

$$F_{fz} = - |F_{fy}| C_{fz} \frac{\dot{z}}{|\dot{z}|} \quad (9)$$

em que  $C_{fx}$  e  $C_{fz}$  são os coeficientes de atrito nas direções  $x$  e  $z$ , respetivamente, e  $\frac{\dot{x}}{|\dot{x}|}$  e  $\frac{\dot{z}}{|\dot{z}|}$  são os sinais das velocidades segundo  $x$  e  $z$ .

Existe uma opção para introdução de forma gradual das forças das ondas, amarras e defensas, o chamado *slow start*, para evitar os problemas numéricos devidos à incorreta caracterização da situação inicial do navio, i.e., parte-se de uma situação de repouso que, provavelmente não corresponde ao equilíbrio das forças atuantes no navio. Caso se pretenda utilizar aquela opção, deverá indicar-se a duração do intervalo de tempo inicial,  $T_{slow}$ , durante o qual as forças serão multiplicadas por um fator:

$$f_{slow} = 1 - \frac{1}{\cosh(5.3 \frac{T}{T_{slow}})} \quad (10)$$

o que faz com que no fim de  $T_{slow}$  a força aplicada seja 99% do valor real.

O modelo numérico BAS utiliza o método  $\theta$ , Pina (1990), com  $\theta = 0.55$  na resolução do sistema de equações diferenciais de segunda ordem que traduz as equações de movimento do navio amarrado. Como aquele é um método para equações diferenciais de primeira ordem, a posição no fim do passo de cálculo,  $\mathbf{X}^{n+1}$ , é escrita em termos da velocidade no fim do passo de cálculo,  $\dot{\mathbf{X}}^{n+1}$ , através do algoritmo do método  $\theta$ :

$$\mathbf{X}^{n+1} = \mathbf{X}^n + (1-\theta)\Delta t \dot{\mathbf{X}}^n + \theta \Delta t \dot{\mathbf{X}}^{n+1} \quad (11)$$

em que  $\Delta t$  designa o passo de cálculo e  $\mathbf{X}^n$  e  $\dot{\mathbf{X}}^n$  designam, respetivamente, as coordenadas e as componentes da velocidade no início do passo de cálculo, tudo quantidades conhecidas.

Assim, a aplicação do método  $\theta$  ao sistema de equações que rege o movimento do navio amarrado pode escrever-se da forma seguinte:

$$\frac{\dot{\mathbf{X}}^{n+1} - \dot{\mathbf{X}}^n}{\Delta t} = \theta H(\dot{\mathbf{X}}^{n+1}, t^{n+1}) + (1-\theta)H(\dot{\mathbf{X}}^n, t^n) \quad (12)$$

em que  $H(\dot{\mathbf{X}}^{n+1}, t^{n+1})$  representa a parcela das equações de movimento do navio que fica dependente da velocidade do navio no fim do passo de cálculo,  $\mathbf{X}^{n+1}$ . Rearranjando a expressão anterior fica:

$$\dot{\mathbf{X}}^{n+1} - \theta \Delta t H(\dot{\mathbf{X}}^{n+1}, t^{n+1}) = \dot{\mathbf{X}}^n + (1 - \theta) \Delta t H(\dot{\mathbf{X}}^n, t^n) \quad (13)$$

ou ainda

$$F(\dot{\mathbf{X}}^{n+1}) - G = 0 \quad (14)$$

O sistema de equações algébricas não lineares acima é resolvido pelo método de Newton-Raphson. A primeira estimativa da velocidade no instante  $n+1$  para aplicação daquele método é fornecida, partindo da definição da aceleração, pelo método de Adams-Bashforth de 2ª ordem, isto é, determinam-se as componentes da velocidade a partir da aceleração no início do passo corrente,  $\ddot{\mathbf{X}}^n$ , e do anterior,  $\ddot{\mathbf{X}}^{n-1}$ .

