



RISCOS



APLICAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SISTEMA HIDRALERTA EM SITUAÇÕES DE TEMPESTADE*

APPLICATION AND TESTING OF THE HIDRALERTA SYSTEM UNDER STORM CONDITIONS

145

Ana Catarina Zózimo

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC ((Portugal)

ORCID 0000-0001-5948-6824 aczozimo@lneac.pt

Liliana Pinheiro

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC ((Portugal)

ORCID 0000-0001-8604-5450 lpinheiro@lneac.pt

Maria Inês Santos

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC ((Portugal)

ORCID 0000-0002-9614-0846 misantos@lneac.pt

Conceição Juana Fortes

Laboratório Nacional de Engenharia Civil - LNEC ((Portugal)

ORCID 0000-0002-5503-7527 jfortes@lneac.pt

RESUMO

O HIDRALERTA é um sistema de avaliação, previsão e alerta do risco da ocorrência de situações de emergência associadas aos efeitos da agitação marítima (galgamento, inundação e navios amarrados) em zonas costeiras e portuárias. Sendo um sistema de alerta, é fundamental que funcione corretamente, quer em situações correntes (apenas emitindo alertas quando tal se justifique), quer em situações de tempestade. Neste trabalho são apresentados os desenvolvimentos efetuados até à data na validação do sistema em situações de tempestade, com a sua aplicação na simulação do furacão Lorenzo e das depressões Elsa e Fabien. Da análise efetuada pode concluir-se que os alertas emitidos pelo sistema estiveram em concordância com os danos/ocorrências reportadas localmente, o que contribui para reforçar a confiança no sistema que está a ser desenvolvido. A característica diferenciadora deste trabalho é que a avaliação do risco é efetuada com base nos parâmetros específicos do risco que se pretende prever, como caudais de galgamento ou as forças nas amarrações, e não apenas em parâmetros meteorológicos e oceanográficos.

Palavras-chave: HIDRALERTA, galgamentos, navios amarrados, furacão Lorenzo, depressões Elsa e Fabien.

ABSTRACT

HIDRALERTA is a forecast, early warning and risk assessment system for port and coastal areas that uses estimates of sea-waves and water levels to evaluate overtopping/flooding events and risks associated with mooring ships. As a warning system, it is especially important that it gives an appropriate response in mild (with no false alarms) and storm conditions alike. This work presents the developments made so far to validate the system under storm events, with its application in the simulation of hurricane Lorenzo and the storms Elsa and Fabien. It can be concluded from the qualitative analysis that was performed that the warnings emitted by the system were in agreement with the damage/occurrences reported at the site. These results serve to reinforce confidence in the HIDRALERTA system. The distinguishing feature of this work is that the risk assessment is based on specific parameters related to the actual risk being predicted, such as overtopping discharges, or ship's mooring loads, and not only in met-ocean parameters.

Keywords: HIDRALERTA, overtopping, moored ships, hurricane Lorenzo, Elsa and Fabien storms.

* O texto desta nota foi submetido em 18-01-2021, sujeito a revisão por pares a 11-02-2021 e aceite para publicação em 18-05-2021.

Esta nota é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 28 (II), 2021, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

Em zonas costeiras, os galgamentos e as inundações associadas, resultantes da ocorrência de tempestades marítimas, podem causar danos muito significativos em infraestruturas, edifícios e equipamentos, e alterações da morfologia costeira (erosão costeira), bem como colocar em perigo vidas humanas, animais, ou o ecossistema em geral. Por outro lado, em zonas portuárias estes fenómenos podem ainda ser responsáveis por danos nas estruturas portuárias e nos navios atracados e por problemas na operacionalidade portuária.

Devido à sua localização geográfica, a costa Portuguesa (e as suas zonas portuárias) é particularmente exposta a tempestades, cuja frequência e intensidade leva à ocorrência de vários episódios de galgamentos e inundações costeiras, com consequências gravosas ao nível económico, ambiental e humano.

Nesse sentido, é fundamental que as autoridades responsáveis estejam dotadas de ferramentas e metodologias que permitam antever a ocorrência destes fenómenos de modo a implementarem atempadamente medidas/procedimentos que evitem ou minimizem os danos causados por estes fenómenos. No fundo, pretende-se uma ferramenta de gestão dos riscos associados aos efeitos da agitação marítima em zonas costeiras e portuárias.

No entanto, existe apenas um número limitado de sistemas de alerta e previsão de galgamentos e inundações costeiras, sendo reduzido o número daqueles que são aplicados a zonas portuárias. Alguns exemplos são o TRITON (Lane *et al.*, 2008), o SWEEP-OWWL (Stokes *et al.*, 2021), o iCoast (Gracia *et al.*, 2014), o EW-Coast (<https://www.cima.ualg.pt/ew-coast/>) e o projeto RISC-KIT (van Dongeren *et al.*, 2018). A forma de estimar o risco é diferente de sistema para sistema. Por exemplo, o sistema SWEEP-OWWL (Stokes *et al.*, 2021) emite alertas para uma série de perfis em zonas costeiras no Reino Unido, em que os fenómenos de empolamento, rebentação, espraçamento e galgamento são estimados através de formulações empíricas. Trata-se de um sistema que consegue prever a existência ou não de galgamento e tem alguma capacidade em distinguir risco baixo ou elevado.

O sistema iCoast (Gracia *et al.*, 2014) fornece alertas para o galgamento e respetiva inundações, tanto para costas arenosas, como para zonas portuárias, no mar Mediterrâneo, através da utilização de modelos numéricos em tempo real. Os sistemas TRITON, RISC-KIT e EW-Coast utilizam uma abordagem mais eficiente em termos de tempo de cálculo, que é baseada em simulações previamente efetuadas. O sistema TRITON utiliza estimativas de galgamento efetuadas previamente com recurso a formulações semi-empíricas, a redes neuronais ou a modelos numéricos (dependendo

da complexidade da estrutura de proteção), para prever os riscos de galgamento na Escócia. Os sistemas RISC-KIT e EW-Coast consideram uma abordagem probabilística e redes Bayesianas, que são treinadas com resultados de modelos numéricos, para prevenir inundações costeiras a partir de uma série de condições fronteiriças em vários locais na Europa. No entanto, os sistemas baseados em simulações prévias, para além de envolverem uma incerteza adicional inerente ao método de interpolação utilizado, obrigam à repetição de todas as simulações sempre que alguma das condições iniciais se altere (por exemplo, a batimetria ou as características das estruturas). Essa repetição das simulações com os dados atualizados acarreta um custo muito elevado em termos de tempo computacional.

De todos os sistemas apresentados acima, apenas o iCoast é aplicado em zonas portuárias, e nenhum deles aborda os riscos relacionados com os navios amarrados.

O sistema HIDRALERTA (Poseiro, 2019, Fortes *et al.*, 2020, Pinheiro *et al.*, 2020) é um sistema de previsão, de alerta e de avaliação do risco, para zonas costeiras e portuárias, da ocorrência de situações de emergência associadas a riscos induzidos pelas ondas, nomeadamente o galgamento e respetiva inundações, e o risco para os navios amarrados. Fornece previsões com 72 horas de antecedência das características da agitação marítima, das suas consequências e dos níveis de risco associados. O primeiro protótipo do sistema, desenvolvido para o porto e baía da Praia da Vitória (Ilha Terceira, Açores), encontra-se operacional desde setembro de 2015. Estão atualmente em fase de testes e validação três novos sistemas desenvolvidos para os portos da Madalena do Pico e de São Roque do Pico (Ilha do Pico, Açores), e Ericeira (Portugal Continental). Outros três sistemas estão a ser desenvolvidos para o porto de Sines, o porto de Peniche e a zona costeira da Costa da Caparica.

Como exemplo da utilidade deste sistema, pode-se referir o apoio prestado às entidades locais antes e durante a passagem do furacão Alex sobre a Região Autónoma dos Açores, a 15 de janeiro de 2016 (fot. 1). 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 o furacão. A utilização das ferramentas disponibilizadas pelo sistema HIDRALERTA, aliada ao conhecimento e experiência das entidades locais, permitiu apoiar a tomada de decisão no que se refere a medidas de prevenção e minimização de risco, e obter dados preciosos e necessários à avaliação exaustiva e minuciosa dos “*outputs*” do sistema e à sua posterior calibração.

Por se tratar de um sistema de alerta, é fundamental que o mesmo funcione corretamente, quer em situações correntes para garantir que o sistema não emite alertas quando tal não se justifica, quer em situações de tempestade.



Fot. 1 - Porto da Praia da Vitória durante o furacão Alex (15 de janeiro de 2016 entre as 9h e as 12h) (Fotografia de António Araújo/Lusa).

Photo 1 - Praia da Vitória harbour during the passage of hurricane Alex (15 January 2016 between 9 a.m. and 12 a.m.) (Photography by António Araújo/Lusa).

Este trabalho apresenta os desenvolvimentos efetuados até à data na validação do sistema em situações de tempestade, que consistiram na aplicação dos protótipos desenvolvidos para os portos da Madalena do Pico, de São Roque do Pico e da Ericeira durante a passagem do furacão Lorenzo e das depressões Elsa e Fabien. São também apresentados os resultados de simulações efetuadas para o porto das Lajes das Flores, devido ao grande impacto do furacão Lorenzo nesse porto.

Nos capítulos seguintes apresentam-se o sistema HIDRALERTA, os testes efetuados em situações de eventos extremos e, finalmente, as principais conclusões retiradas do trabalho desenvolvido.

Sistema HIDRALERTA

Arquitetura geral do sistema

O sistema HIDRALERTA é constituído por quatro módulos (fig. 1): I - Caracterização da Agitação Marítima; II - Galgamento e Navegação; III - Avaliação do Risco e IV - Sistema de Alerta. Os três primeiros módulos estão implementados e funcionam no Nó Central de Computação Grid (NCG) da Infraestrutura Nacional de Computação Distribuída (INCD). O INCD é uma iniciativa conjunta da FCCN, unidade de Computação da Fundação para Ciência e Tecnologia (FCT), do LIP (Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas) e do LNEC (Laboratório Nacional de Engenharia Civil) e fornece serviços de computação à comunidade científica. O quarto módulo (Sistema de Alerta) encontra-se implementado num servidor *web* e funciona como *interface* entre os resultados do sistema e os seus utilizadores.

O sistema funciona diariamente e em cada dia emite previsões para as 72 horas seguintes, com intervalo de três horas. O intervalo das previsões e a sua atualização são limitados pelos dados de previsões disponibilizados pelo ECMWF.

Nos subcapítulos seguintes são descritos, de forma sucinta, os quatro módulos do sistema HIDRALERTA.

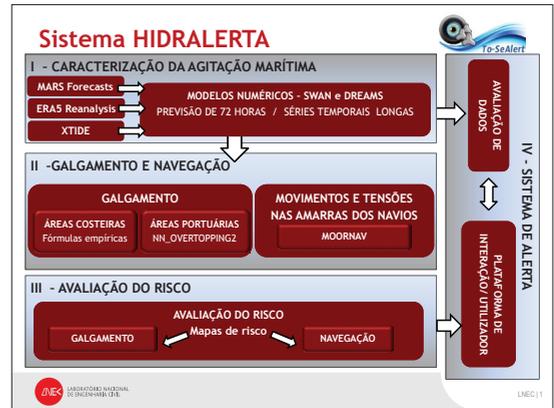


Fig. 1 - HIDRALERTA. Esquema modular do sistema.

Fig. 1 - HIDRALERTA. Modular scheme of the system.

Módulo I - Caracterização 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 (θ_m). Os dados são fornecidos ao largo da zona em estudo pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo, ou *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). A sobrelevação meteorológica é obtida através de uma estimativa com base na pressão atmosférica ao nível do mar. Os dados das previsões da agitação marítima fornecidos pelo ECMWF provêm do *Meteorological Archival and Retrieval System* (MARS) e os dados referentes às séries temporais de reanálise de agitação marítima provêm do catálogo ERA5. O nível da maré astronómica na mesma região é estimado com o modelo XTide (Flater, 1998), ao qual pode ser associada a sobrelevação de origem meteorológica. As características da agitação marítima ao largo são posteriormente transferidas para a zona costeira ou para a entrada do porto com modelos numéricos de propagação de ondas. Estes modelos reproduzem com diferentes graus de aproximação as transformações das características físicas das ondas ao longo da sua propagação. A definição e formulação teórica desses fenómenos de propagação e deformação da agitação marítima encontram-se detalhados no *Coastal Engineering Manual* (USACE, 2002).

O modelo numérico de geração e propagação de ondas SWAN (Booij *et al.*, 1999; SWAN Team, 2006), é um modelo não linear espectral, baseado na equação de conservação da ação da onda e capaz de simular quer a geração das ondas devido à ação do vento, quer a propagação de espectros de ondas irregulares em regiões costeiras de

dimensão intermédia. Quando se trata de uma zona abrigada ou portuária, de dimensão mais reduzida, utiliza-se o modelo DREAMS (Fortes, 2002), que permite transferir as características da agitação marítima da zona da entrada do porto para a zona abrigada ou para o interior do porto. O modelo DREAMS é um modelo linear de elementos finitos, baseado na equação de declive suave para simular a propagação de ondas regulares, a qual descreve os efeitos combinados da refração e da difração de ondas lineares harmónicas propagando-se em fundos de inclinação suave. Permite também considerar a reflexão parcial ou total nas suas fronteiras, sendo por isso adequado para zonas portuárias.

Embora os modelos numéricos utilizados no sistema HIDRALERTA possuam algumas limitações, nomeadamente a rebentação no modelo DREAMS é efetuada de modo simplificado e este modelo não contempla interações não lineares, a razão da sua inclusão prende-se principalmente com o facto de se pretender um sistema de previsão em tempo real eficiente, em termos de rapidez de resposta (tempo computacional) e robusto (estabilidade do modelo, ou seja, que forneça sempre uma resposta ao utilizador e não tenha “*blow-ups*” frequentes que exijam a intervenção da equipa de desenvolvimento). Os modelos que contemplam os fenómenos não lineares são tipicamente muito consumidores de tempo e dão origem a problemas de instabilidade numérica, pelo que a sua introdução no sistema HIDRALERTA terá de ser avaliada com bastante cautela.

Módulo II - Galgamentos e navegação

O módulo II efetua a estimativa: a) dos galgamentos/inundações em áreas costeiras e infraestruturas portuárias e b) dos movimentos dos navios, das tensões nas amarras e das forças nas defensas.

Relativamente à estimativa dos galgamentos, no presente trabalho é utilizada a ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 (Coeveld *et al.*, 2005), desenvolvida no âmbito do projeto europeu CLASH - *Crest Level Assessment of Coastal Structures by Full Scale Monitoring, Neural Network Prediction and Hazard Analysis on Permissible Wave Overtopping* (Van der Meer *et al.*, 2005; Van Gent *et al.*, 2005, 2007). Esta ferramenta processa os resultados produzidos por 700 redes neuronais artificiais num único modelo computacional (neuronal), fornecendo o valor médio do caudal de galgamento, q , e outros parâmetros estatísticos daquela amostra de resultados. A ferramenta NN_OVERTOPPING2 tem como base de dados cerca de 8400 combinações de pares dados-resultados provenientes de estudos de galgamento realizados em protótipo e/ou em modelo físico reduzido para diversas características da agitação/nível de maré e diversos tipos de estruturas (tais como quebra-mares de talude e

verticais, defesas costeiras). Os ensaios em modelo físico foram efetuados em diferentes laboratórios da Europa, América e Japão. Estão atualmente em desenvolvimento estudos para a utilização dos modelos SWASH (Zijlema *et al.*, 2011) e XBeach (Roelvink *et al.*, 2015) na estimativa dos galgamentos.

Os parâmetros de entrada da ferramenta neuronal NN_OVERTOPPING2 incluem informação sobre a agitação marítima, nível de maré e geometria da estrutura ou da secção em estudo.

Os resultados do NN_OVERTOPPING2 são: o valor médio de q ($m^3/s/m$ ou $l/s/m$), os intervalos de confiança (obtidos a partir de outros valores característicos de q , em que o intervalo de confiança de 95% é $[q_{2.5\%}; q_{97.5\%}]$, de 90% é $[q_{5\%}; q_{95\%}]$, etc.) e o valor de q esperado no protótipo, i.e., o valor de q corrigido para ter em linha de conta alguns efeitos de escala e de modelo.

Os valores do caudal médio de galgamento, q , são correspondentes a uma dada condição de agitação marítima e nível de maré verificada em cada secção transversal analisada das estruturas na zona de estudo.

No caso dos navios amarrados, o importante é avaliar os movimentos e as forças a que o navio está sujeito quando se encontra atracado a um cais no interior de um porto, e sujeito à agitação marítima, maré e ventos. Neste caso, a determinação dos movimentos e das forças no sistema de amarração de um navio acostado, sujeito à agitação e vento incidentes, é realizada utilizando o módulo de comportamento de navios amarrados MOORNAV (Santos, 1994).

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 difração da interação de um corpo flutuante livre (navio) com as ondas regulares 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, considerando 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).

A aplicação dos modelos WAMIT e BAS, cuja metodologia se encontra descrita em Pinheiro *et al.* (2015), exige a definição das características do navio e do sistema de amarração que se pretende monitorizar. O modelo WAMIT calcula os coeficientes hidrodinâmicos de um navio específico, tendo em conta a geometria do seu casco e a distribuição de massas (inércias). Por sua vez, o modelo BAS utiliza as relações constitutivas e as coordenadas

das extremidades das amarrações e pontos de contacto das defensas. Assim, o sistema MOORNAV fornece sempre resultados específicos de um determinado navio amarrado com uma amarração pré-definida. O navio considerado nos cálculos apresentados neste trabalho é um *ferry* com um comprimento da área flutuante de 37,4 m, uma boca de 10 m e um calado de 3,4 m. A forma do casco foi discretizada com 3464 painéis planos retangulares e triangulares. As relações constitutivas dos cabos de amarração variam de forma não linear entre 0 kN e 656 kN, correspondente à tensão máxima de rotura do cabo, e que corresponde a um alongamento de 16%. As defensas pneumáticas, que evitam o contacto do navio com o cais, têm um comportamento à compressão não linear com uma força de compressão máxima de 880 kN para uma deflexão de 0,4 m. É importante notar que, num determinado porto, atracam diferentes tipos de navios, com diferentes características e com distintos sistemas de amarração. Assim a aplicação do sistema MOORNAV e a sua integração no sistema HIDRALERTA terá de ser efetuada para cada navio/sistema de amarração para o qual se pretenda conhecer o nível de risco.

Os resultados da simulação numérica consistem em séries temporais de:

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

Módulo III - Avaliação do Risco

No módulo III é efetuada a avaliação do risco de galgamento e do risco para os navios amarrados. Essa avaliação é efetuada com base nos resultados obtidos no módulo II (fig. 2). É de notar que a avaliação do risco para os navios amarrados e para os galgamentos funcionam autonomamente, ou seja, os resultados do módulo de Galgamentos não são usados no módulo de Navegação. Os riscos definidos para a navegação dizem respeito a forças e movimentos induzidos pela agitação, vento e correntes. Existe uma atividade contemplada nos riscos de galgamento que diz respeito aos navios amarrados no tardo de uma estrutura galgável, que é o afundamento de navios, mas este risco é uma consequência direta do galgamento, e por isso encontra-se contemplado no módulo de galgamento.

Atualmente, a avaliação de *risco de galgamento* é efetuada, para áreas costeiras e áreas portuárias, recorrendo à definição de níveis de risco de 0 a 3, em que 0 corresponde à não existência de risco e 3 corresponde ao nível mais elevado de risco. Esta avaliação inicia-se pela divisão do local de estudo em subzonas, atendendo ao perfil transversal da estrutura e ao tipo de utilização da zona protegida pela estrutura e, conseqüentemente, à variabilidade do caudal médio admissível de galgamento. Seguidamente, são estabelecidos os caudais críticos

de galgamento associados a cada secção de estrutura analisada tendo em conta a natureza das atividades desenvolvidas na zona abrigada. Neste trabalho consideram-se as recomendações de Pullen *et al.* (2007) e em informação fornecida pelas autoridades locais como base para o estabelecimento dos caudais críticos. Por último, são definidos os níveis de risco, 0 a 3, para cada atividade desenvolvida, com base nos caudais críticos de galgamento associados. Estes níveis de risco devem ser definidos em conjunto com as autoridades locais. Os grupos de atividades consideradas contemplam a circulação de pessoas e veículos, embarcações, edifícios, equipamentos e estruturas portuárias. Cada atividade tem um símbolo associado, cuja cor se altera conforme o nível de alerta (TABELA I).



Fig. 2 - Esquema do fluxo de dados e resultados nos módulos I, II e III do sistema HIDRALERTA.

Fig. 2 - Scheme of the data flow of modules I, II and III of the HIDRALERTA system.

TABELA I - Código de cores convencionado no sistema HIDRALERTA para os graus de risco de galgamento de 0 a 3.

TABLE I - HIDRALERTA system colour code for the overtopping risk levels 0 to 3.

	Nível de Alerta			
	0	1	2	3
Símbolo				

A avaliação de *risco para os navios amarrados* é efetuada recorrendo à definição de níveis de risco de 0 a 3 para os limiares das condições meteorológicas e oceanográficas (altura de onda e velocidade do vento no interior do porto) e de 0 a 3 para os limiares de movimentos dos navios e de forças no sistema de amarração. Os alertas referentes às condições meteorológicas e oceanográficas, e aos movimentos dos navios adotam uma simbologia própria (TABELA II).

TABELA II - Código de cores convencionado no sistema HIDRALERTA para os graus de risco meteorológicos, oceanográficos e de movimentos dos navios.

TABLE II - HIDRALERTA system colour code for the met-ocean and ships' movements risks.

	Nível de Alerta		
	1	2	3
Altura de onda			
Velocidade do vento			
Movimentos de um navio ferry			

150

Os limites admissíveis para os movimentos dos navios são baseados nas recomendações existentes (Elzinga *et al.*, 1992; OCIMF, 1992; PIANC, 1995; e PIANC, 2012), que têm em consideração a natureza das atividades, as características do navio e a necessidade de assegurar a segurança de pessoas e de infraestruturas. As consequências da excedência desses limites ditam a natureza dos limites impostos: limites operacionais, acima dos quais a movimentação de carga fica condicionada ou impossibilitada, e limites de segurança, acima dos quais existe risco para pessoas, para bens, para o navio, ou para as estruturas de acostagem.

Módulo IV - Sistema de alerta

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

Este módulo cria e disponibiliza todos os resultados do sistema através de uma plataforma *web* (aurora.lnec.pt, de acesso restrito), nomeadamente, previsões a 3 dias e resultados obtidos nos módulos I, II e III. A plataforma *web* contém um conjunto de funcionalidades, das quais se destacam os mapas de alerta, que assinalam

os elementos/atividades que se podem encontrar em perigo e que são construídos com os resultados obtidos no módulo III.

As previsões emitidas automaticamente a cada 24 horas são analisadas, apoiando a elaboração de dois boletins diários (um respeitante aos galgamentos e um respeitante à navegação) onde se resumem os aspetos mais relevantes da previsão para as 72 horas seguintes. Esse boletim, independentemente da previsão, é enviado diariamente para as entidades com responsabilidades na gestão da zona costeira e portuária, de modo a permitir alertar, com 72 horas de antecedência, para a possibilidade de ocorrência de temporais com potencial para originarem galgamentos ou movimentos de navios com consequências nefastas. Permite também validar o sistema no que se refere à ocorrência e magnitude dos galgamentos e dos movimentos dos navios, através do feedback recebido das entidades locais.

Ferramenta de validação de resultados

Dada a complexidade da previsão de alguns dos fenómenos em estudo e do facto dos modelos numéricos terem um determinado grau de incerteza inerente, o seu ajuste com a realidade, ou calibração, deve ser efetuado com base em dados reais. Para tal, criou-se uma ferramenta de validação integrada na plataforma *web*. Esta ferramenta permite que a equipa de desenvolvimento possa ir fazendo os ajustes necessários ao sistema e que o utilizador tenha um grau de confiança adicional nas previsões. Esta validação disponibiliza, em tempo real, os dados da boia ondógrafo da Praia da Vitória (em colaboração com o projeto ESTRAMAR, Estratégia Marino-Marítima de I+D+i em 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. Nessa comparação são analisados três parâmetros: altura significativa (fig. 3), direção de onda e período de pico de onda. Esta ferramenta está, atualmente, apenas disponível para o protótipo do porto da Praia da Vitória.

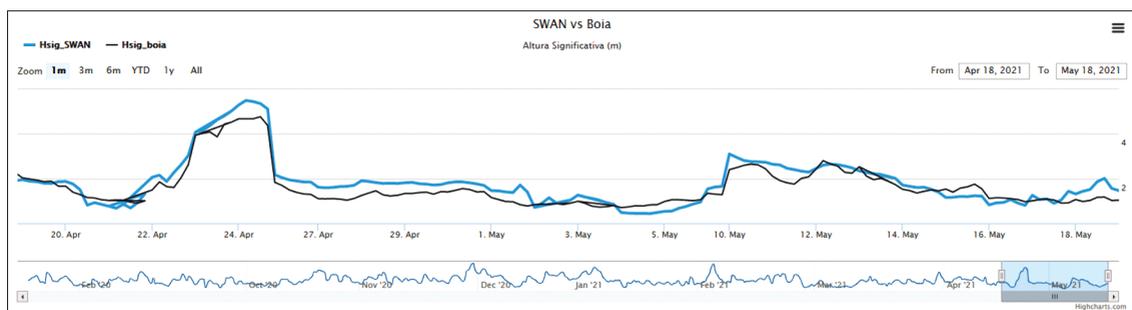


Fig. 3 - Validação em tempo real do modelo SWAN com os dados da boia ondógrafo da Praia da Vitória. Altura significativa da onda.
Fig. 3 - Validation, in real time, of the SWAN model results, with data from Praia da Vitória wave buoy. Significant wave height.

Teste do sistema HIDRALERTA em situações de eventos extremos

Por se tratar de um sistema de alerta, é fundamental que o mesmo funcione corretamente em situações de tempestade, pelo que foram até à data desenvolvidos diversos testes, nomeadamente para o furacão Lorenzo (outubro de 2019) e as depressões Elsa e Fabien (dezembro de 2019). Como não existem dados, quer dos galgamentos verificados, quer dos movimentos dos navios e das forças nas amarras, a validação possível é apenas qualitativa, pelo que foi adotada a seguinte metodologia:

1. Utilizar os dados de ondas ao largo respeitantes às datas de ocorrência dos eventos extremos;
2. Efetuar as simulações com o sistema HIDRALERTA;
3. Analisar os alertas emitidos pelo sistema e verificar se os mesmos estão em concordância com os danos reportados pelas autoridades.

Nos subcapítulos seguintes apresentam-se os testes efetuados para o furacão Lorenzo (portos da Madalena do Pico, de São Roque do Pico e das Lajes das Flores) e para as depressões Elsa e Fabien (portos da Madalena do Pico, de São Roque do Pico e da Ericeira).

Furacão Lorenzo

O furacão Lorenzo foi considerado a tempestade mais forte a atingir as ilhas dos Açores nos últimos 20 anos (como furacão de categoria entre 2 e 1), atingindo o recorde como a mais forte tempestade de nordeste de categoria 5 observada na bacia do Atlântico Norte.

De acordo com o *National Hurricane Center (NHC, NOAA)*, o furacão Lorenzo teve origem numa tempestade tropical, que se afastou da costa oeste de África a 22 de setembro, tendo aumentado a sua intensidade ao longo do seu percurso. A tempestade atingiu o seu pico inicial de intensidade no início do dia 27 de setembro com ventos máximos de 230 km/h e uma pressão central de 939 mbar. Mais tarde, a 29 de setembro, atingiu a categoria 5, tornando-se o furacão mais oriental de todos os registados na bacia do Atlântico com igual intensidade, excedendo os 35 furacões de categoria 5 que ocorreram desde os anos 1920 (Zelinsky, 2019). Com uma rota dirigida para noroeste, o furacão Lorenzo atingiu o grupo Ocidental dos Açores a 2 de outubro, passando a oeste da Ilha das Flores entre as 4h00 e as 4h30, com ventos fortes de cerca de 163 km/h e ondas que atingiram alturas significativas de 15 m (predominantemente de sudoeste). Mais de 171 incidentes foram registados em todas as ilhas, tendo os danos totalizado cerca de 330 milhões de euros. Os incidentes referiram-se principalmente a queda de árvores, inundações, destruição de estradas, cortes de eletricidade e inundações costeiras. Os danos mais graves ocorreram no porto das Lajes das Flores, o único porto

comercial da ilha das Flores, incluindo a destruição da parede do muro cortina, de blocos de betão, de cais e de edifícios (fot. 2).



Fot. 2 - Impacte do Furacão Lorenzo nos Açores. Porto das Lajes das Flores no dia 2 de outubro de 2019 (Fotografia de: a) Frederico Fournier; b) André Palma).

Photo 2 - Impact of hurricane Lorenzo in the Azores. Port of Lajes das Flores on 2 October 2019 (Photography by: a) Frederico Fournier; b) André Palma).

Porto da Madalena do Pico

A vila da Madalena do Pico localiza-se na zona oeste da Ilha do Pico, nos Açores. A vila 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 proteção do porto da Madalena do Pico é efetuada por intermédio de duas estruturas principais: o molhe norte e o quebra-mar oeste.

O momento mais crítico do furacão Lorenzo na Madalena do Pico ocorreu às 9h do dia 2 de outubro de 2019. A intensidade do furacão é visível nos resultados dos modelos WAM e SWAN para esse instante (fig. 4 e 5).

Foi efetuada a validação dos resultados obtidos pelos modelos WAM e SWAN com os dados da boia BOND5 (CLIMAAT) (Azevedo *et al.*, 2008), localizada na ilha da Graciosa (fig. 6). Infelizmente, a boia mais próxima da área de estudo, BOND4 (localizada no Faial), não se encontrava operacional durante esse período.

Os resultados dos modelos WAM e SWAN foram comparados com os dados registados na boia BOND5, em termos dos seguintes parâmetros de agitação marítima (fig. 7): BOND5 - altura significativa de onda, H_s , período máximo da onda, T_{max} , e direção média da onda, θ_m ; WAM e SWAN - altura de onda espectral, H_{m0} , período de pico da onda, T_p , e direção média da onda, θ_m , para a localização da boia.

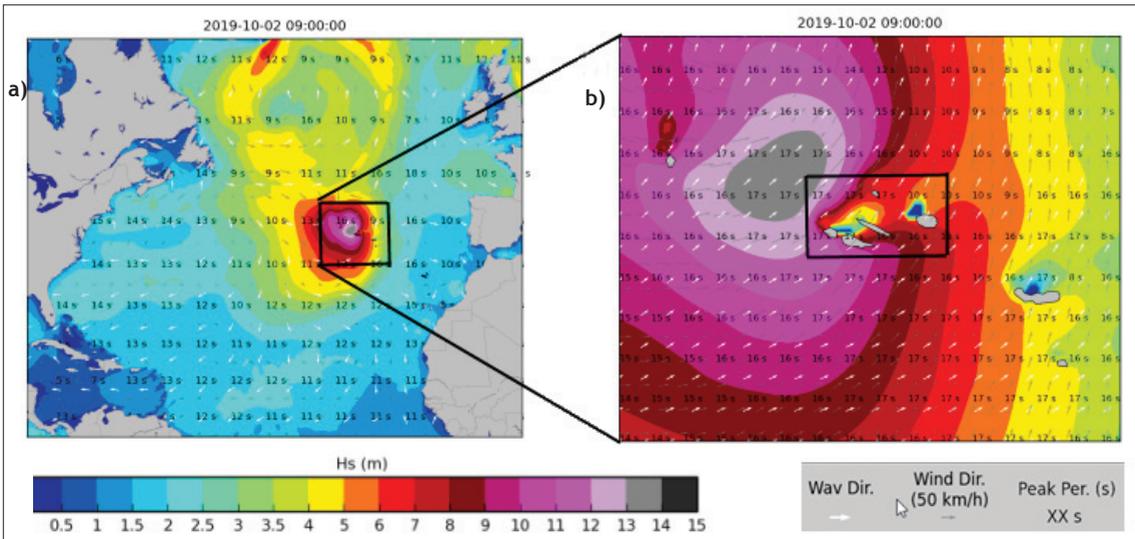


Fig. 4 - Resultados do modelo WAM (altura de onda significativa, período de pico, direção média da onda, direção do vento) para o dia 2 de outubro de 2019 às 9h. a) Atlântico Norte, b) Arquipélago dos Açores.

Fig. 4 - WAM model results (significant wave height, peak period, mean wave direction, wind direction) for 2 October 2019, 9 a.m. a) North Atlantic, b) Azores Archipelago.

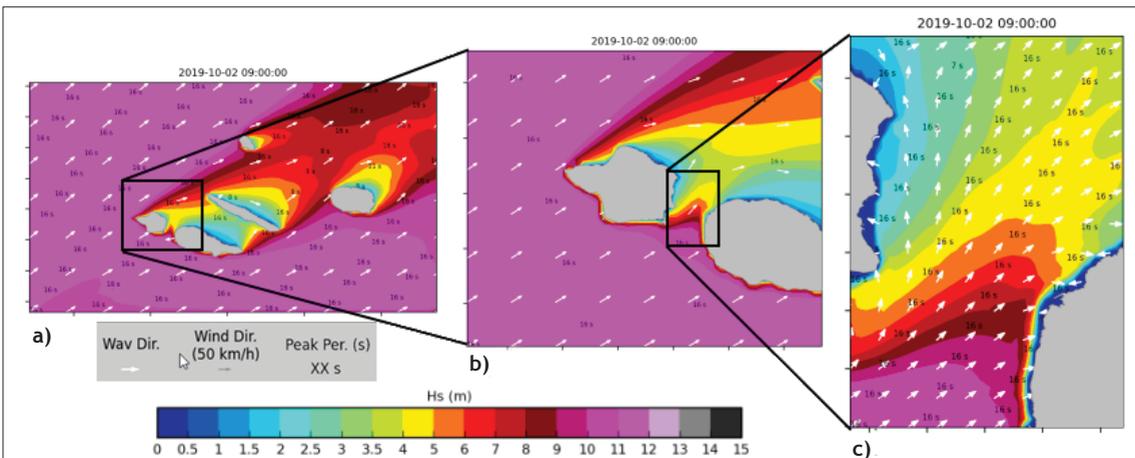


Fig. 5 - Resultados (altura de onda significativa, período de pico, direção média da onda) do modelo SWAN para 2 de outubro de 2019 às 9h. a) Grupo Central do Arquipélago dos Açores, b) Ilhas do Faial e do Pico, c) Canal do Faial

Fig. 5 - SWAN model results (significant wave height, peak period and mean wave direction) for 2 October 2019, 9 a.m. a) Azores Archipelago, central Group, b) Faial and Pico islands, c) Faial Channel.



Fig. 6 - Localização da boia BOND5, coordenadas 39° 05.24' N e 27° 57.52' W.

Fig. 6 - Location of BOND5 wave buoy, coordinates 39° 05' 24" N and 27° 7' 52" W.

A 2 de outubro de 2019 as medições da boia variaram nas gamas de $1,5 \text{ m} < H_s < 3,5 \text{ m}$, $10 \text{ s} < T_p < 21 \text{ s}$ e $150^\circ < \theta_m < 340^\circ$. O pico da tempestade ocorreu aproximadamente às 9h, com $H_s = 3,5 \text{ m}$, $T_p = 21 \text{ s}$ e $\theta_m = 340^\circ$. Para todos os parâmetros de onda, o modelo SWAN teve um andamento similar ao da BOND5 ao longo do dia, ao contrário do que aconteceu com o modelo WAM. A altura significativa de onda foi o único parâmetro claramente sobrestimado pelo modelo WAM (em 4,5 m às 9h). O modelo SWAN sobrestimou ligeiramente a altura significativa da onda (em 0,5 m às 9h). O período de pico das ondas foi geralmente sobrestimado pelo modelo WAM, embora tenha havido subestimação entre as 7h e as 17h (4 s às 9h). Tal como a boia BOND5, o modelo SWAN previu uma rotação da direção média da onda de

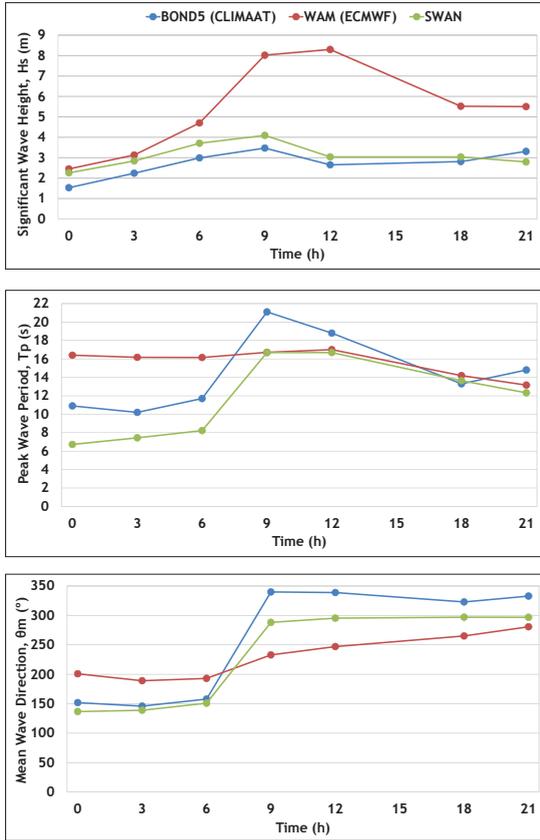


Fig. 7 - Comparação dos dados da boia BOND5 com os resultados dos modelos WAM e SWAN para o dia 2 de outubro de 2019.

Fig. 7 - Comparison between the data from BOND5 wave buoy and the results from the models WAM and SWAN on 2 October 2019.

cerca de 150° para 300° às 6h (com $\theta_m = 290^\circ$ às 9h), contrastando com o modelo WAM, que previu direções médias situadas sempre entre cerca de 190° e 280° (com $\theta_m = 230^\circ$ às 9h). A análise estatística da correlação entre os parâmetros de agitação marítima, medidos e estimados, confirma a análise anterior (TABELA III). Foram usadas diversas medidas estatísticas de erro: Erro Quadrático Médio Normalizado (*NRMSE*, Eq. 1), Diferença Simples Normalizada do Erro (*NBIAS*, Eq. 2) e Coeficiente de Correlação (*r*, Eq. 3).

$$NRMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{S_i - O_i}{O_i} \right)^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$NBIAS = \sum_{i=1}^N \frac{O_i - S_i}{O_i} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N [(O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2}} \quad (\text{Eq. 3})$$

em que *N* é o número de pares de resultados, *S_i* são os valores estimados numericamente, *O_i* são os valores medidos e \bar{S} e \bar{O} são, respetivamente, a média dos valores estimados e dos valores medidos.

Os resultados destacam a vantagem de usar o modelo SWAN para propagar o clima de ondas desde o largo até à localização da boia, ao invés de adotar diretamente as características de onda fornecidas pelo modelo WAM.

Os resultados do modelo DREAMS (fig. 8) mostram que as ondas chegam ao porto com uma direção predominante de noroeste. As maiores alturas de onda ocorreram no quebra-mar norte, aumentando desde o tronco do quebra-mar até à cabeça (aproximadamente 5 m < *H_{mo}* < 9 m). No quebra-mar oeste, as alturas de onda variaram entre 4 m e 6 m, afetando tanto o tronco como a cabeça do molhe. Em algumas áreas no interior do porto, a altura de onda significativa estimada foi superior a 1,5 m, impossibilitando as operações de atracação. Isto está de acordo com o que foi observado no local (fot. 3).

As estimativas do galgamento foram obtidas usando a ferramenta NN_OVERTOPPING2 e são apresentadas sob a forma gráfica (fig. 9), na qual são representados círculos vermelhos com diferentes diâmetros para as 50 seções transversais estudadas. Quanto maior o círculo, maior o caudal médio de galgamento estimado. Se não houver galgamento numa determinada secção, o símbolo correspondente será um ponto cinzento. A imagem também indica o máximo caudal médio estimado. Para o quebra-mar norte, às 9h, *q* aumentou em direção à

TABELA III - Análise estatística, para o dia 2 de outubro de 2019, da relação entre os valores medidos pela boia BOND5 e os valores estimados pelos modelos WAM e SWAN.

TABLE III - Statistical analysis for 2 October 2019 of the relation between the values measured by the wave buoy and the values estimated by WAM and SWAN models.

	H_s/H_{m0}		T_{max}/T_p		θ_m	
	Boia/WAM	Boia/SWAN	Boia/WAM	Boia/SWAN	Boia/WAM	Boia/SWAN
<i>NRMSE</i>	1,131	0,205	0,268	0,208	0,247	0,116
<i>NBIAS</i>	-0,980	-0,146	-0,089	0,189	0,101	0,104
<i>r</i>	0,705	0,762	0,211	0,928	0,894	0,996

cabeça, variando entre 0,17 l/s/m e 165 l/s/m. Para o quebra-mar oeste, o valor máximo previsto de q , para a secção imediatamente antes da cabeça do quebra-mar, foi de 1,9 l/s/m. Não foram previstos galgamentos assinaláveis dentro do porto.

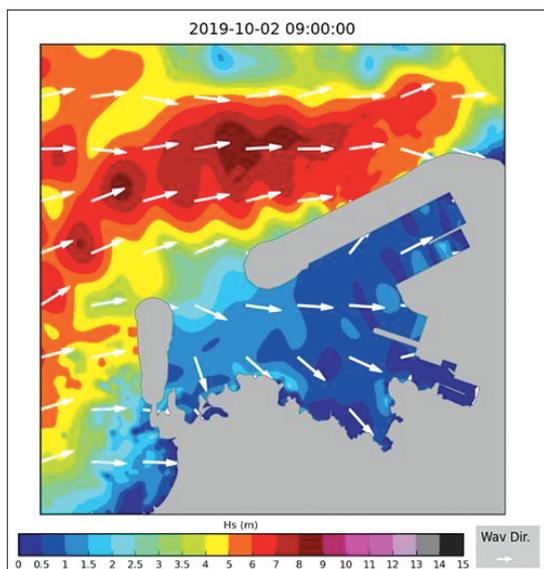


Fig. 8 - Resultados (altura de onda significativa, direção de onda) do modelo DREAMS para o Porto da Madalena do Pico, para o dia 2 de outubro de 2019 às 9h.

Fig. 8 - DREAMS results (significant wave height, wave direction) for Madalena do Pico Port on 2 October 2019 at 9 a.m.



Fot. 3 - Agitação no interior do porto da Madalena do Pico durante o furacão Lorenzo, 2 de outubro de 2019 (Fotografia de AFP/Getty Images).

Photo 3 - Waves inside Madalena do Pico port during hurricane Lorenzo, 2 October 2019 (Photography by AFP/Getty Images).

O valor máximo do caudal médio de galgamento previsto, para cada instante e em cada seção transversal das estruturas, é comparado com os limites pré-estabelecidos de q . Esses limites foram definidos em estreita colaboração com as autoridades locais da Madalena do Pico e baseiam-se nas recomendações de Pullen *et al.* (2007).

Notar que o porto foi dividido em várias zonas com características semelhantes (materiais, geometria, elementos fisiográficos e utilização) (fig. 10 a). Foram analisados os alertas emitidos pelo sistema HIDRALERTA para os galgamentos para as 9h do dia 2 de outubro de

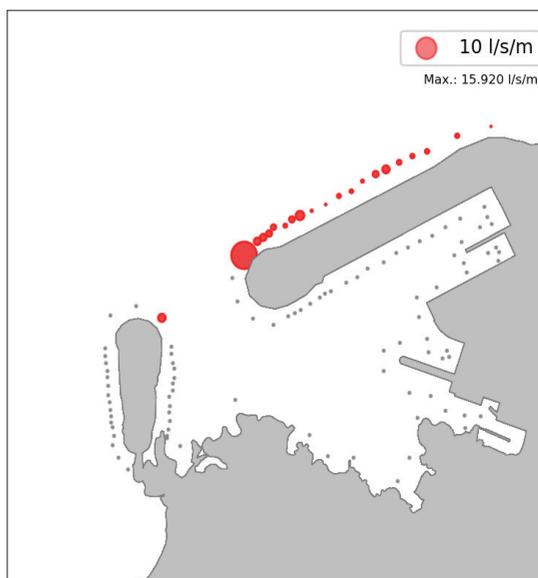


Fig. 9 - Representação gráfica do caudal médio galgado estimado com o modelo NN_Overtopping2, para o Porto da Madalena do Pico, a 2 de outubro de 2019 às 9h.

Fig. 9 - Graphical representation of the estimated mean overtopping discharge with NN_OVERTOPPING2 for Madalena do Pico Port on 2 October 2019, 9 a.m.

2019, para cada uma das zonas estudadas (fig. 10 b). A indicação das atividades em perigo refere-se a cada uma das zonas do porto.

Foi emitido um aviso vermelho para a zona da cabeça do quebra-mar norte e avisos laranja para os troncos dos quebra-mares norte e oeste.

É de notar que estes são apenas avisos preliminares, uma vez que o módulo IV do sistema HIDRALERTA ainda está a ser calibrado com as tempestades anteriores para a Madalena do Pico.

O furacão Lorenzo teria um grande impacto no *ferry* caso este estivesse atracado no porto da Madalena do Pico, tendo sido previsto pelo sistema que atingiriam o navio amarrado ondas com cerca de 1,5 m a 2,5 m de altura significativa e com períodos elevados, em conjugação com ventos fortes desfavoráveis às amarrações. Os maiores esforços nas amarrações verificar-se-iam às 6h do dia 2 de outubro (fig. 11). Tal conduziu à emissão pelo sistema de um alerta máximo (nível 3) no Cais Novo. Caso o sistema já estivesse em funcionamento à data da tempestade, este alerta teria sido uma indicação para que se optasse pela atracação do navio noutro cais mais abrigado ou eventualmente noutro porto, o que conduziria a menores esforços nas amarrações. Uma outra opção em caso de emissão deste nível de alerta seria o reforço dos cabos de amarração identificados como estando em alto risco com cabos adicionais, duplicando a sua resistência, de forma a evitar uma potencial rotura dos mesmos (fig. 12).

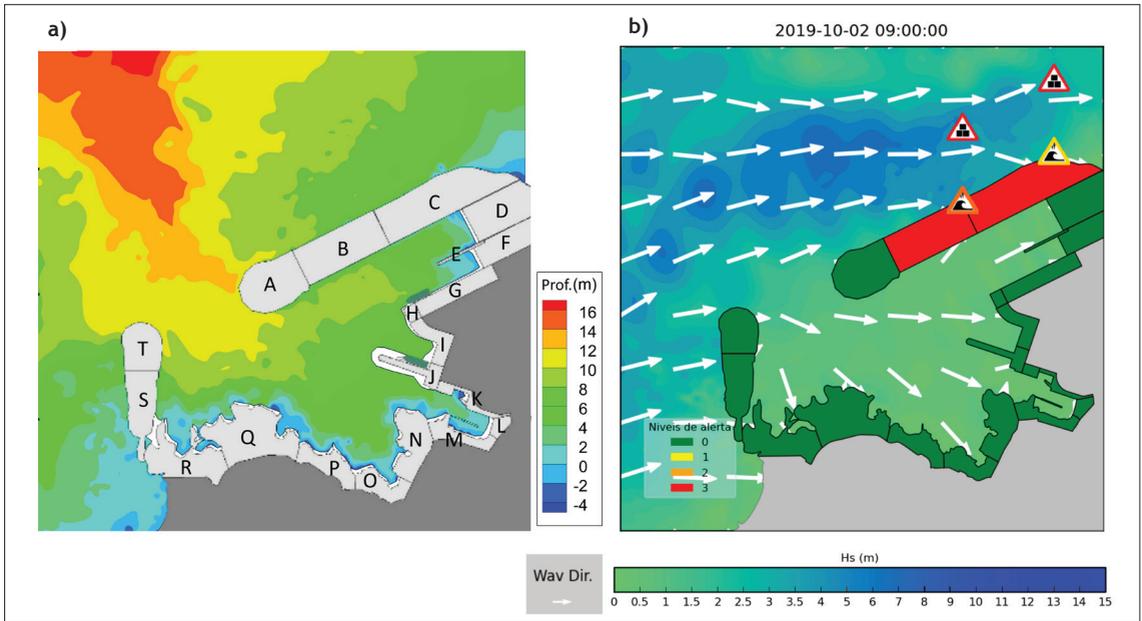


Fig. 10 - Divisão do porto em zonas com características semelhantes a);
Galgamentos - alertas gerado pelo sistema para o Porto da Madalena do Pico, a 2 de outubro de 2019, 9h b).

Fig. 10 - Division of the port in zones with similar characteristics a);
Overtopping - alerts provided by the system for Madalena do Pico Port on 2 October 2019, 9 a.m. b).

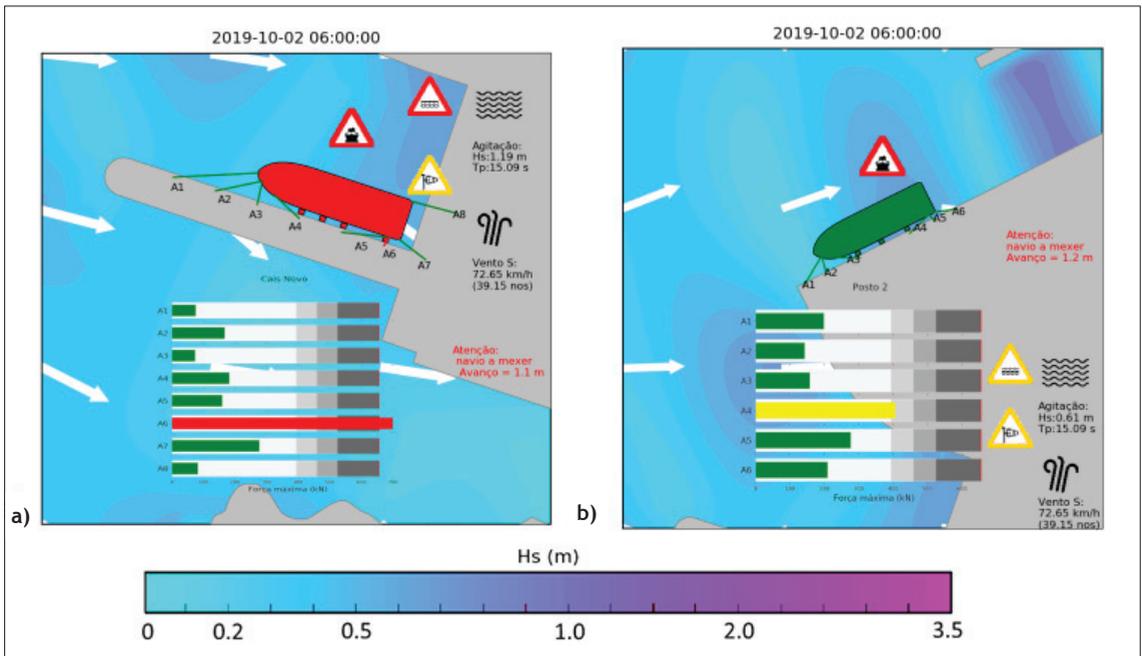


Fig. 11 - Navios amarrados. Agitação marítima, forças nas amarras e alertas gerados pelo sistema para o Porto da Madalena do Pico, 2 de outubro de 2019 às 6h. a) Cais Novo, b) Posto 2.

Fig. 11 - Moored ships. Wave conditions, forces on the mooring lines and alerts provided by the system for Madalena do Pico Port on 2 October 2019 at 6 a.m. a) Cais Novo, b) Posto 2.

Porto de São Roque do Pico

O porto de S. Roque do Pico situa-se na costa Norte da Ilha do Pico, na Região Autónoma dos Açores, 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 treços retos de 200 m cada.

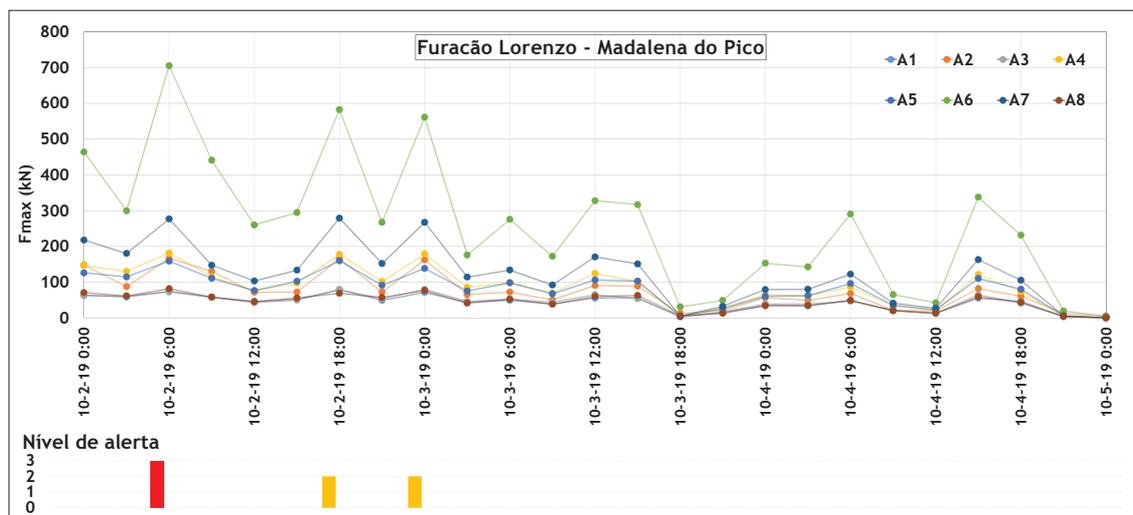


Fig. 12 - Cais Novo. Forças nos cabos de amarração durante o furacão Lorenzo para o porto da Madalena do Pico.

Fig. 12 - Cais Novo. Mooring lines forces during hurricane Lorenzo for Madalena do Pico port.

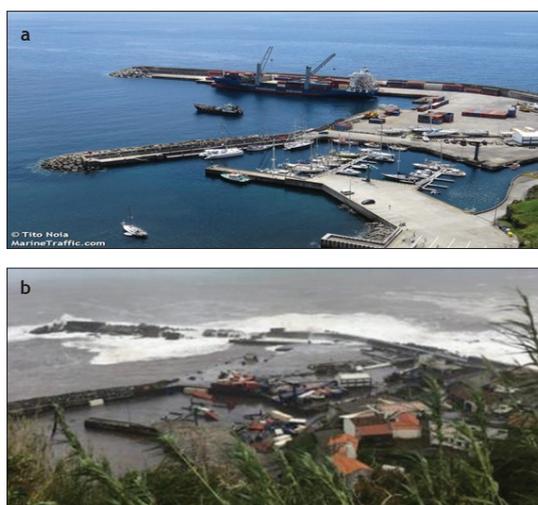
Os efeitos do furacão Lorenzo no porto de São Roque do Pico foram analisados com o sistema HIDRALERTA para os movimentos dos navios amarrados e forças no sistema de amarração. Os alertas gerados pelo sistema no dia 2 de outubro de 2019 às 6h e às 9h (fig. 13) demonstraram que o porto de São Roque do Pico, por se encontrar protegido naturalmente da agitação proveniente de sul e de oeste, e por se ter verificado um decréscimo dos períodos de onda até à entrada do porto, não teria tantos problemas relativamente aos movimentos do navio amarrado. Adicionalmente, os ventos de sul e de sudoeste que se fizeram sentir contribuiriam para que o navio permanecesse junto ao cais, minimizando as tensões nas amarras. Em consequência, foi emitido pelo sistema apenas um aviso elevado (nível 3) para a agitação marítima, para as 6h do dia 2 de outubro, em que a mesma se fez sentir com alguma intensidade ($H_s=1,05$ m) e foi emitido um aviso vermelho para o movimento do navio. Este aviso é particularmente importante para a segurança no embarque e desembarque de passageiros e veículos. O limite de segurança imposto para navios *ferry* de passageiros é de 0,6 m na amplitude de movimentos do navio. Nos restantes instantes de previsão o aviso foi moderado e apenas para o movimento do navio. Também foram emitidos avisos amarelos ou laranja para a intensidade do vento. Para as forças nas amarras, não se previram esforços excessivos (fig. 13 e 14). Em suma, conclui-se que o *ferry* estaria seguro neste porto, embora não fosse recomendável que realizasse qualquer operação nesse dia.

Porto das Lajes das Flores

O porto das Lajes das Flores situa-se na costa sudeste da ilha das Flores e está protegido por dois quebra-mares, o quebra-mar principal que protege a totalidade do porto

e o cais comercial, e um segundo, denominado “cais de abrigo”, no interior do porto, de proteção principalmente aos setores de pesca e recreação (fot. 4).

O quebra-mar principal representa a principal estrutura de proteção portuária contra a agitação marítima, apresentando uma orientação SO-NE. Com um comprimento total de aproximadamente 300 m, os taludes do tronco 2(V):3(H) e 1(V):2(H) na cabeça são protegidos por tetrápodos e cubos Antifer, respetivamente.



Fot. 4 - Porto das Lajes das Flores, antes e depois do Furacão Lorenzo: a) Tito Noia, julho de 2016, b) Portos dos Açores, outubro de 2019.

Photo 4 - Lajes das Flores Port before and after the passage of hurricane Lorenzo: a) Tito Noia, July 2016, b) Portos dos Açores, October 2019.

De acordo com as autoridades locais, durante o furacão Lorenzo, vários eventos de galgamento ocorreram desde cerca das 3h da manhã, especialmente no quebra-mar

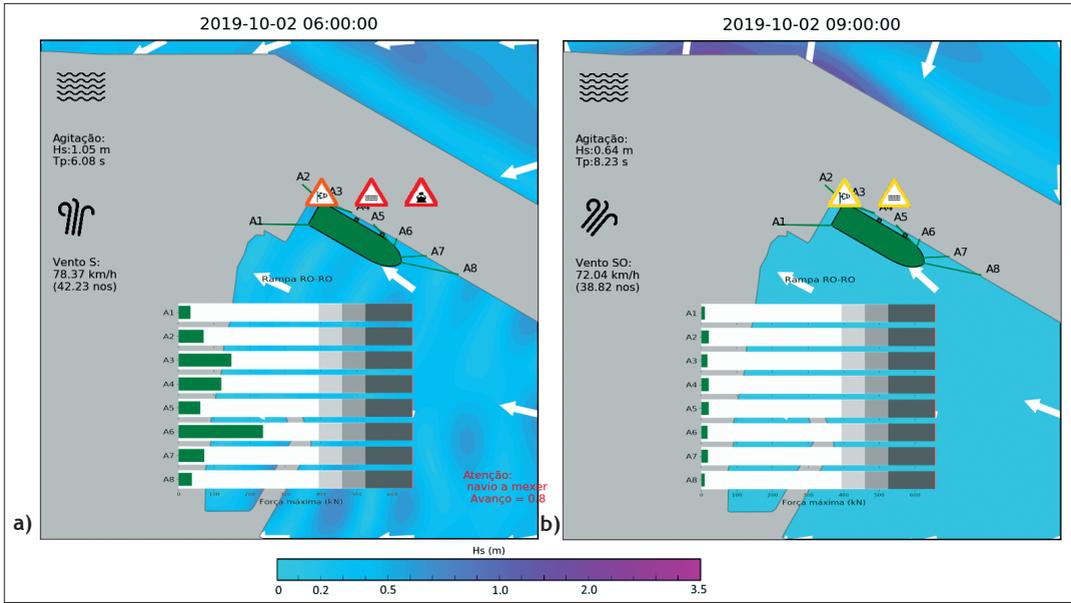


Fig. 13 - Navios amarrados. Agitação marítima, forças nas amarras e alertas gerado pelo sistema para o Porto de São Roque do Pico, a 2 de outubro de 2019, a) 6h, b) 9h.

Fig. 13 - Moored ships. Wave conditions, forces on the mooring lines and alerts provided by the system for São Roque do Pico Port on 2 October 2019, a) 6 a.m., b) 9 a.m.

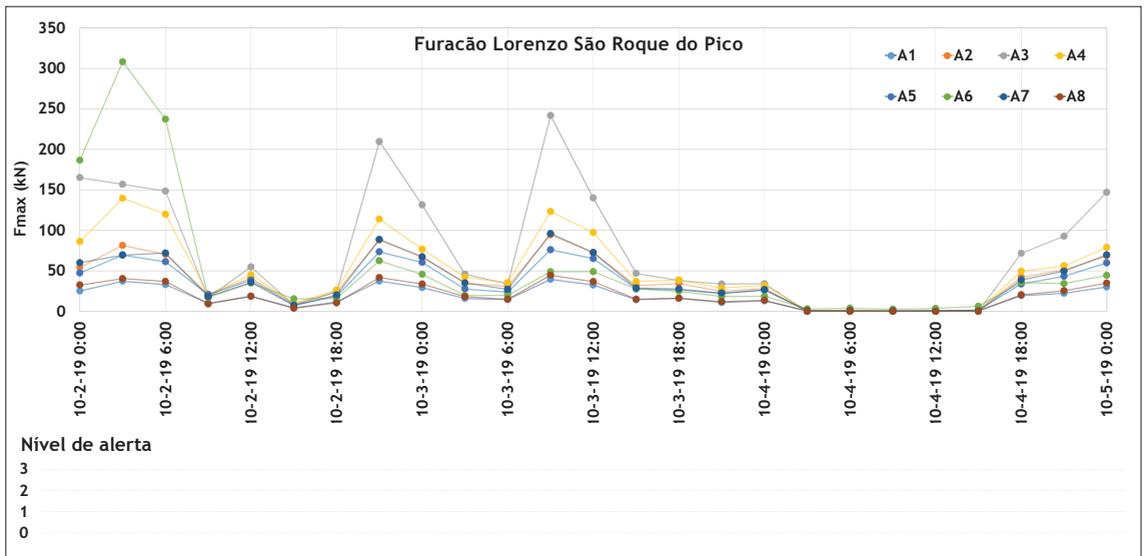


Fig. 14 - Forças nos cabos de amarração durante o furacão Lorenzo para o porto de São Roque do Pico.

Fig. 14 - Mooring lines forces during hurricane Lorenzo for São Roque do Pico port.

principal, inicialmente apenas no seu enraizamento e posteriormente abrangendo todo o tronco e a cabeça. Foi também observada forte agitação no interior do porto,

que causou graves danos, incluindo a destruição da parede do muro cortina, de parte do cais e da doca, de edifícios, de navios e barcos de pesca, e de contentores (fot. 5).



Fot. 5 - Impacto do furacão Lorenzo no Porto das Lajes das Flores, outubro de 2019 a) e b) André Palma, c) Diário de notícias.

Photo 5 - Impact of hurricane Lorenzo on Lajes das Flores Port, October 2019 a) and b) André Palma, c) Diário de Notícias.

Analisaram-se os resultados dos modelos WAM, SWAN e DREAMS para as 6h do dia 2 de outubro de 2019 (fig. 15 e 16), o momento mais crítico do furacão no porto das Lajes das Flores. Às 6h, quando o furacão Lorenzo passou a sul da Ilha das Flores, os modelos WAM e SWAN previram que, perto do porto de Lajes das Flores, as ondas teriam uma direção predominante de sudoeste, com uma altura espectral, H_{m0} , a variar entre 10 e 14 m e um período máximo de onda, T_{max} , de cerca de 15 s. As ondas aproximaram-se da entrada do porto com um rumo sul (fig. 16). As maiores alturas de onda ocorreram no quebra-mar principal, aumentando desde o enraizamento do quebra-mar até à sua cabeça, atingindo uma H_{m0} de cerca de 15 m. A altura significativa das ondas dentro do porto foi estimada como sendo sempre superior a 1,5 m em algumas áreas, o que está de acordo com as observações *in situ* relatadas.

O quebra-mar principal foi a estrutura mais afetada do porto de Lajes das Flores. Às 6h da manhã, o valor do caudal médio galgado aumentou em direção à cabeça, atingindo o seu máximo na secção P11, pouco antes da cabeça do quebra-mar (fig. 17). Os valores do caudal médio de galgamento variaram entre 22 l/s/m e 720 l/s/m no quebra-mar principal. Para além de galgar a estrutura de proteção principal do porto, as ondas, devido à sua altura, acabaram por rebentar sobre a estrutura, sendo este fenómeno o causador de grande parte da destruição verificada.

O sistema HIDRALERTA, para as 6h (fig. 18), emitiu alertas vermelhos para todas as três zonas consideradas: cais comercial e a área antes do quebra-mar principal,

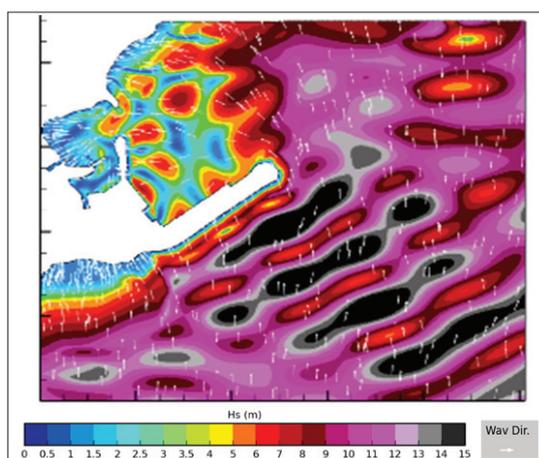


Fig. 16 - Porto das Lajes das Flores. Resultados do modelo DREAMS a 2 de outubro de 2019 às 6h.

Fig. 16 - PPorto das Lajes das Flores. Results for the model DREAMS, on 2 October 2019, 6 a.m.

tronco e cabeça do quebra-mar principal. Mais uma vez, as previsões estão de acordo com as observações *in situ*.

Depressões Elsa e Fabien

A depressão Elsa formou-se no Golfo do México a 13 de dezembro de 2019 e foi-se movendo gradualmente para nordeste ao longo da costa do Canadá a 16 de dezembro. A depressão Elsa começou depois a acelerar para este à frente da depressão Fabien. O sistema que se tornaria na depressão Fabien formou-se a 17 de dezembro e emergiu

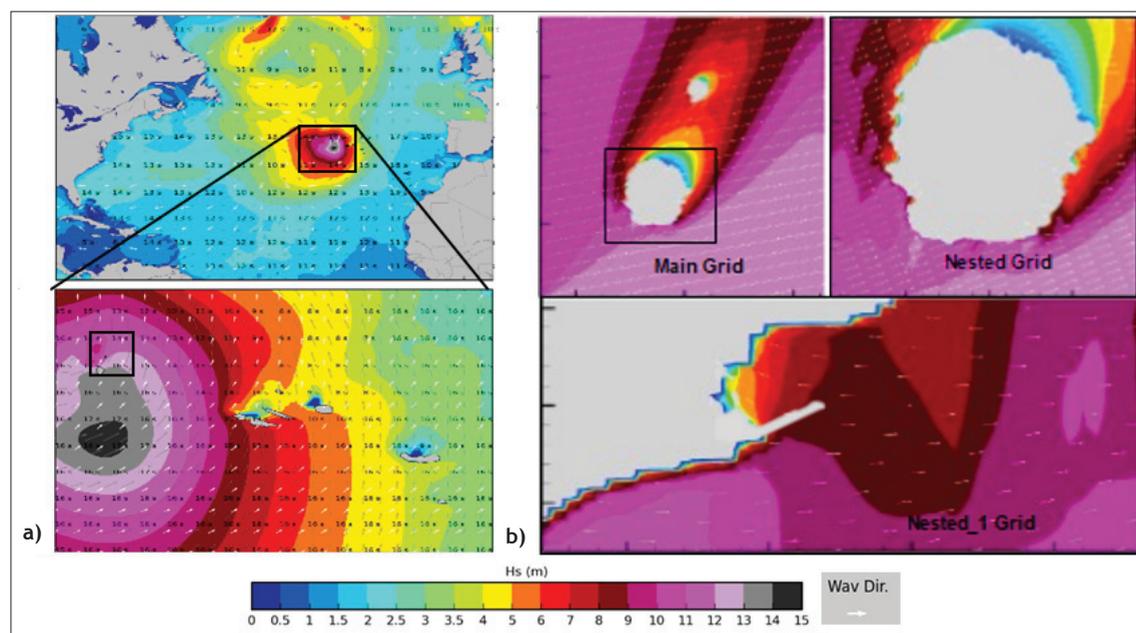


Fig. 15 - Porto das Lajes das Flores. Resultados (altura de onda significativa, período de pico, direção média da onda, direção do vento) dos modelos a) WAM e b) SWAN a 2 de outubro de 2019 às 6h.

Fig. 15 - Porto das Lajes das Flores. Results (significant wave height, peak period, mean wave direction and wind wave) for the models a) WAM and b) SWAN on 2 October 2019, 6 a.m.

no Oceano Atlântico no dia 19. A depressão Fabien foi-se intensificando durante a sua travessia pelo Atlântico, mas foi ligeiramente retardada pela depressão Elsa, que estava estacionada sobre o Atlântico Norte há alguns dias. Posteriormente, a depressão Fabien acelerou para sul em relação à depressão Elsa. As depressões Elsa e Fabien passaram por Portugal Continental, entre dia 18 e 22 de dezembro de 2019 e foram classificadas como depressões tropicais. No arquipélago dos Açores o pico da depressão Elsa foi sentido mais cedo (a partir do dia 14 de dezembro) (fig. 19).

No arquipélago dos Açores, a agitação marítima foi caracterizada por ondas de altura significativa até 10 m, velocidades do vento de cerca de 75 km/h e rajadas

acima de 90 km/h. Mais de 37 incidentes foram relatados em todas as ilhas, causando alguns danos de custos menores. O grupo central foi atingido por ondas com rumo noroeste com alturas significativas de cerca de 8 a 9 m, tendo afetado ambos os portos da ilha do Pico.

Em Portugal Continental, desde o final da tarde de dia 18 de dezembro de 2019, a tempestade Elsa provocou inúmeras ocorrências, na sua maioria quedas de árvores, movimentos de terras, inundações e quedas de estruturas. Dezenas de estradas ficaram cortadas, habitações danificadas e os rios galgaram algumas localidades. Logo após a depressão Elsa, a depressão Fabien fez-se sentir principalmente na zona Norte e Centro de Portugal Continental, com ventos fortes de sudoeste (fig. 19).

Porto da Ericeira

O porto da Ericeira está localizado na costa oeste de Portugal continental, a cerca de 30 km a norte de Lisboa e tem como objetivo principal o abrigo a uma pequena frota de pesca artesanal. É um porto de reduzidas dimensões constituído por um molhe, que também funciona como cais de acostagem, e por uma rampa de varadouro. Para a validação dos resultados do modelo SWAN para as depressões Elsa e Fabien (dias 17 a 22 de dezembro de 2019) foram utilizados os dados de uma boia situada ao largo da Nazaré e para a validação das previsões do sistema de cálculo do grau de risco foram considerados os danos reportados. A boia costeira encontra-se à profundidade de 90 m (fig. 20) e é operada e mantida pelo Instituto Hidrográfico (fig. 20).

Para o período das depressões Elsa e Fabien foram efetuadas simulações com o intervalo de 1 h, obtendo-se um total de 143 pares de resultados SWAN/dados da boia.

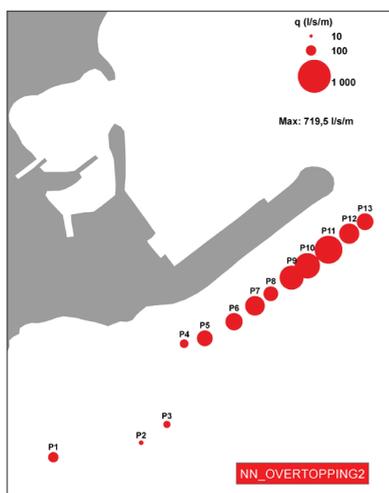


Fig. 17 - Representação gráfica do caudal médio galgado estimado com o modelo NN_OVERTOPPING2, para o Porto das Lajes das Flores, a 2 de outubro de 2019 às 6h.

Fig. 17 - Graphical representation of the estimated mean overtopping discharge with NN_OVERTOPPING2 for Lajes das Flores Port on 2 October 2019, 6 a.m.

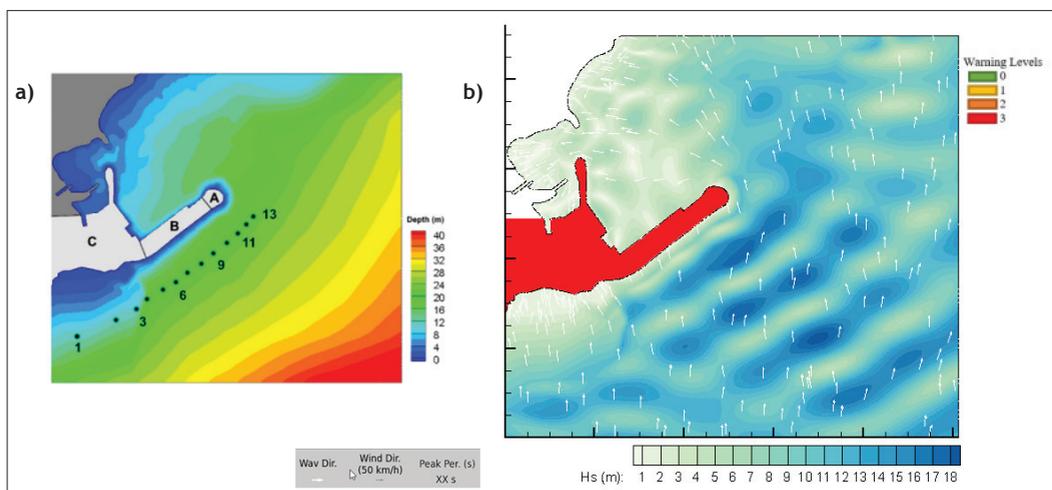


Fig. 18 - Divisão do porto em zonas com características semelhantes a); Galgamentos - alertas emitidos pelo sistema para o Porto das Lajes das Flores, a 2 de outubro de 2019 às 6h b).

Fig. 18 - Division of the port in zones with similar characteristics a); Overtopping - alerts provided by the system for Lajes das Flores Port on 2 October 2019, 6 a.m. b).

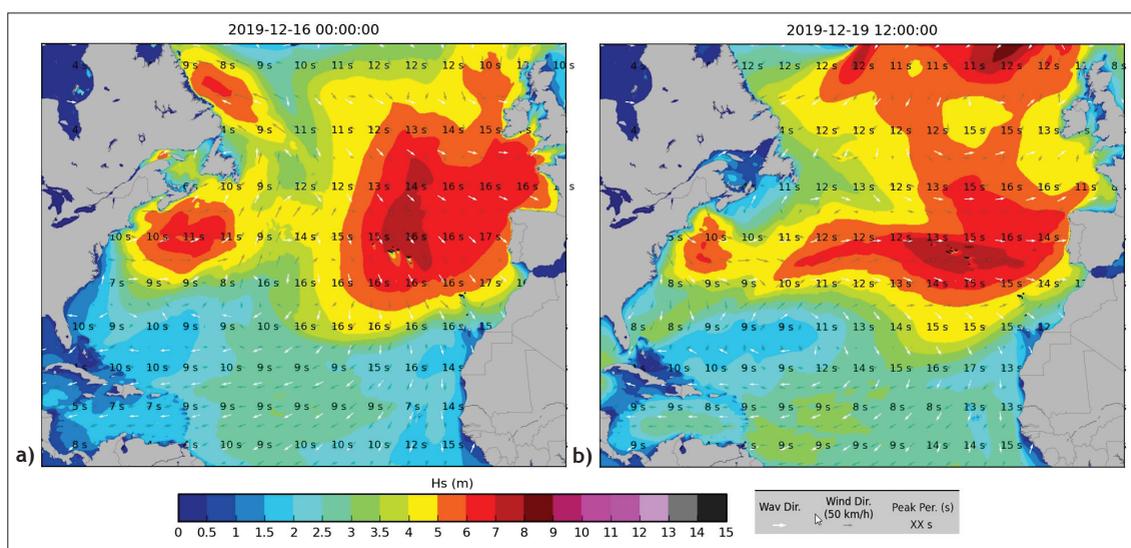


Fig. 19 - Resultados (altura de onda significativa, período de pico, direção de onda média, direção do vento) do modelo WAM: a) dia 16 de dezembro de 2019 às 0h, b) dia 19 de dezembro de 2019 às 12h.

Fig. 19 - WAM model results (significant wave height, peak period, mean wave direction, wind direction): a) 16 December 2019 at 0 a.m., b) 19 December 2019 at 12 a.m.

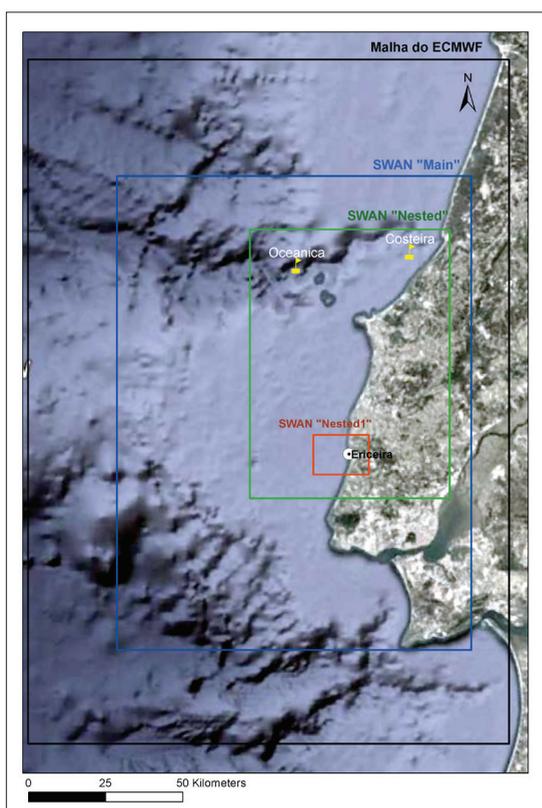


Fig. 20 - Localização das boias Oceanica e Costeira ao largo da Nazaré. Malha do ECMWF e domínios computacionais do SWAN.

Fig. 20 - Location of the wave buoys off the coast at Nazaré. ECMWF grid and SWAN computational domains.

Foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos para a comparação entre os resultados do modelo SWAN e os dados da boia costeira: média, desvio padrão, *NRM*-

SE, *NBIAS* e coeficiente de correlação (*r*). Para a altura significativa de onda (H_s) e o período de pico (T_p) foram utilizadas as formulações apresentadas acima nas Eq. 1, 2 e 3 para a simulação do furacão Lorenzo no porto da Madalena do Pico.

Para as direções médias (θ_m), a média de cada amostra foi calculada através da média circular:

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \bar{\theta}}{\cos \bar{\theta}} \right) \quad (\text{Eq. 4})$$

O coeficiente de correlação circular foi dado por:

$$r_c = \frac{\sum_{i=1}^n \sin(O_i - \bar{O}) \sin(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\sin(O_i - \bar{O}))^2 \sum_{i=1}^n (\sin(S_i - \bar{S}))^2}} \quad (\text{Eq. 5})$$

A análise dos valores dos parâmetros estatísticos para a comparação efetuada para o período entre 17 e 22 de dezembro de 2019 (TABELA IV), demonstrou uma boa concordância entre os dados das boias e os resultados do modelo SWAN, tendo-se verificado que o modelo reproduziu melhor θ_m e H_s do que T_p . Verificou-se ainda que o modelo subestimou a altura de onda significativa durante a situação de tempestade, o que poderá conduzir à não emissão de alertas pelo sistema em eventos em que os mesmos deveriam ser emitidos. Consequentemente, serão necessários melhoramentos a este nível.

Notar que o porto foi dividido em quatro zonas com características semelhantes (materiais, geometria, elementos fisiográficos e utilização) (fig. 21 a): A - Enraizamento, B - Troço inicial do tronco, C - Tronco final do tronco, D - Cabeça.

TABELA IV - Valores da Média, Desvio padrão, *NRMSE*, *NBIAS* e *r* para a comparação dos resultados do modelo SWAN com os dados da boia Costeira para o período entre 17 e 22 de dezembro de 2019.

TABLE IV - Average, standard deviation, *NRMSE*, *NBIAS* and *r* for the comparison of the SWAN results with the data from the coastal wave buoy for the period between 17 and 22 December 2019.

	H_s		T_p		θ_m	
	boia	SWAN	boia	SWAN	boia	SWAN
Média	4,134	4,633	13,684	13,607	273,536	274,421
Desvio padrão	1,258	1,027	2,280	1,703	16,628	19,997
<i>NRMSE</i>	0,207		0,103		1,307	
<i>NBIAS</i>	0,121		-0,006		0,003	
<i>r</i>	0,807		0,781		0,934	

Foram obtidos os valores do caudal médio de galgamento em diversos perfis, denominados P8, P9, P10_2, P3_2, P11_1, P12 e P4 (fig. 21 b) do molhe do porto da Ericeira, para o período de 15/12/2020 a 23/12/2020. Para cada um dos perfis, foi também determinado o valor máximo de q obtido para os dias analisados, assim como o dia em que esse valor de q foi obtido (fig. 21 b). Foram obtidos, para os perfis P3_2 (fig. 22a), P11_1 (fig. 22b), P12 (fig. 22c) e P4 (fig. 22d), os valores de q para cada simulação horária efetuada, os valores de SWL e ainda os valores de H_s e de T_p obtidos com o modelo DREAMS no pé de talude do respetivo perfil.

Verificou-se que os valores de q foram aumentando com a proximidade à cabeça do molhe. Foram

atingidos valores de q , principalmente a partir do perfil P3_2 que estão acima do intervalo limite (50-200 l/s/m) definido por Pullen *et al.* (2007) a partir do qual poderão existir danos na estrutura mesmo que os seus coroamento e tardoz estejam bem protegidos. O maior impacte das depressões não foi igual em todos os perfis (fig. 22 a, b, c, d). Enquanto nos perfis P3_2, P11_1 e P4 os maiores valores de q ocorreram durante o dia 22 (tempestade Fabien), no perfil P12 foi durante a tempestade Elsa (19/12/2020) que se verificaram os maiores valores de q .

Efetivamente, o farolim do molhe ficou bastante danificado e houve também danos na cabeça do molhe, com o deslocamento de cubos Antifer do manto (fot. 6).

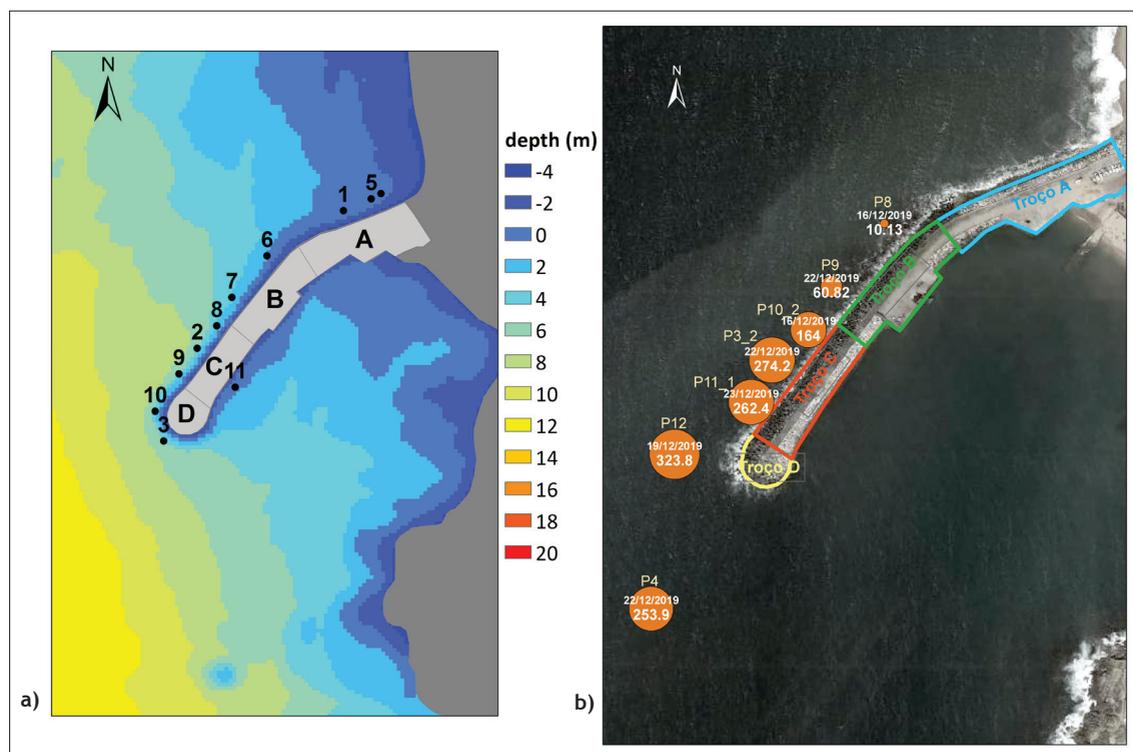


Fig. 21 - Divisão do porto em zonas de características semelhantes a); Valores máximos de q nos dias 15-23 de dezembro de 2019 b).

Fig. 21 - Division of the port in zones with similar characteristics a); Maximum values of q in the period 15-23 December 2019 b).

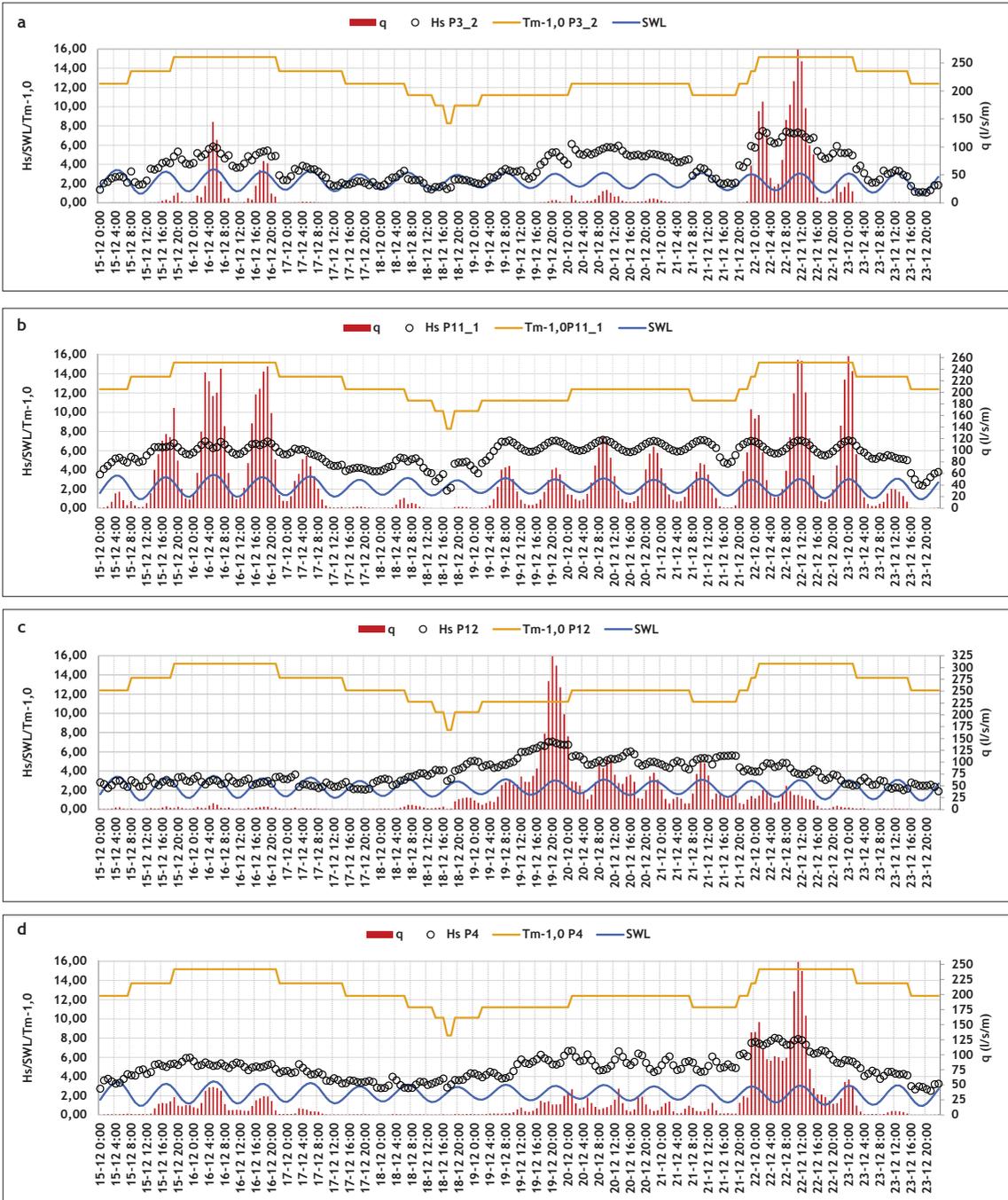


Fig. 22 - Valores do caudal q obtidos para cada simulação horária efetuada, valores de SWL e valores de Hs e de Tp obtidos com o modelo DREAMS no pé de talude dos perfis P3_2 (a), P11_1 (b), P12 (c) e P4 (d).

Fig. 22 - Discharge values for each simulation, SWL, and Hs and Tp values obtained by DREAMS model at the toe of the profiles P3_2 (a), P11_1 (b), P12 (c) and P4 (d).

Porto de São Roque do Pico

Foram analisados os resultados do sistema em termos do comportamento de um navio de passageiros *ferry* atracado no porto de São Roque do Pico aquando da passagem da depressão Elsa em duas localizações: rampa Ro-Ro e Posto 2. Observaram-se alturas de onda elevadas no interior do porto. Da análise dos alertas emitidos pelo

sistema para os navios amarrados (fig. 23) e da estimativa das forças nos cabos de amarração para o período da depressão Elsa (fig. 24), pode verificar-se que foram emitidos alertas máximos para a maioria das simulações, para os dois locais de amarração do navio de passageiros *ferry*. Esses avisos vermelhos estenderam-se desde o dia 14 até ao dia 16 de dezembro, voltando a verificar-se um agravamento da situação no dia 18. Para o dia 21



Fot. 6 - Cabeça do molhe do porto da Ericeira. Danos no farol e na cabeça (13/01/2020) (Fotografia de L. Silva).

Photo 6 - Head of breakwater at Port of Ericeira. Damage to the light and to the head (13/01/2020) (Photography by L. Silva).

de dezembro, data da depressão Fabien, também foram emitidos alertas vermelhos. Neste cenário, a segurança do navio amarrado estaria muito comprometida, mesmo com reforço de amarração, e o mais sensato seria optar por atracar o navio noutro porto mais protegido, por exemplo no porto da Horta, que se encontra abrigado para as ondas de noroeste.

Porto da Madalena do Pico

Foram analisados os resultados do sistema em termos do comportamento de um navio de passageiros ferry atracado no porto da Madalena do Pico aquando da passagem das depressões Elsa e Fabien. Da análise dos

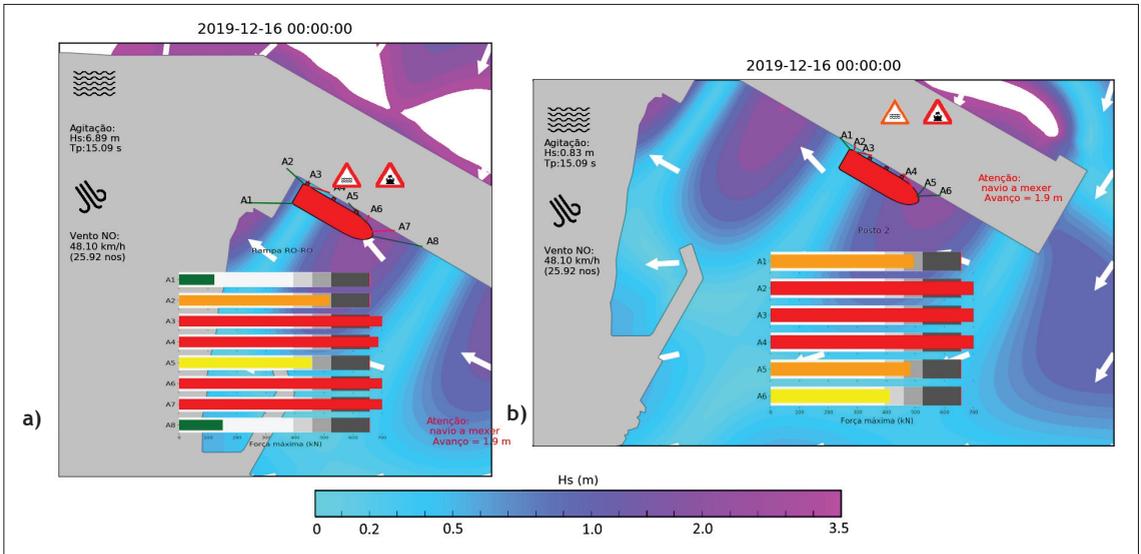


Fig. 23 - Navios amarrados. Agitação marítima, forças nas amarras e alertas gerado pelo sistema para o Porto de São Roque do Pico no dia 16 de dezembro de 2019 às 0h. a) Rampa RO-RO, b) Posto 2.

Fig. 23 - Moored ships. Wave conditions, forces on the mooring lines and alerts provided by the system for São Roque do Pico Port on 16 December 2019 at 0 a.m., a) RO-RO ramp, b) Posto 2.

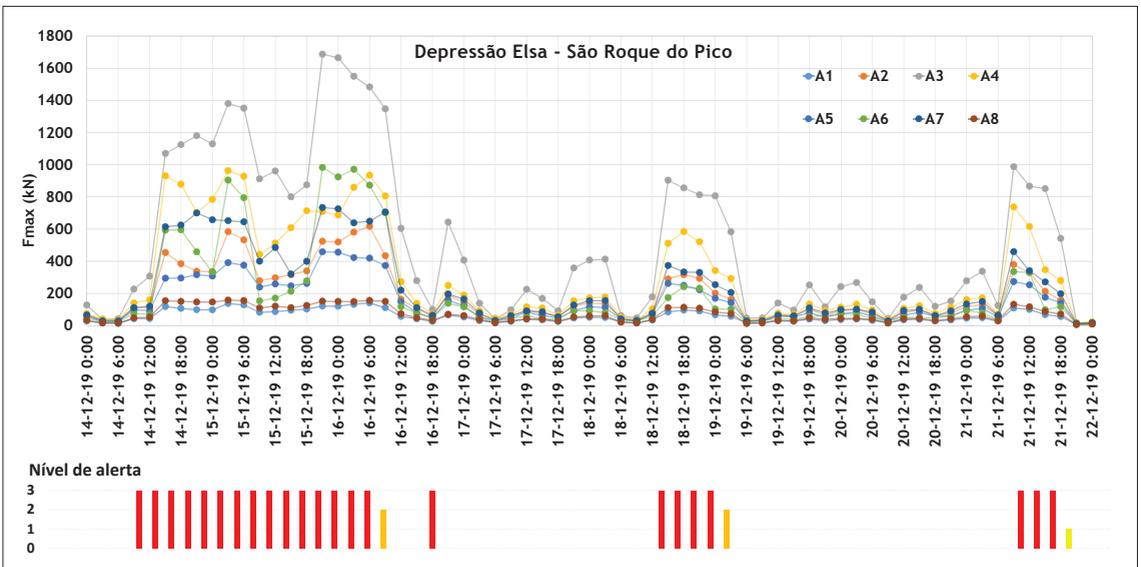


Fig. 24 - Forças nos cabos de amarração durante as depressões Elsa e Fabien para o porto de São Roque do Pico.

Fig. 24 - Mooring lines forces during Elsa and Fabien storm for São Roque do Pico port.

resultados obtidos com o modelo DREAMS para as 0 horas do dia 16 de dezembro de 2019 (fig. 25) e da estimativa das forças nos cabos de amarração para o período das depressões Elsa e Fabien (fig. 26), verificou-se que a tempestade Elsa teria um forte impacto no ferry atracado no Porto da Madalena do Pico, com ondas de altura significativa estimada de 1,5 m a 2,5 m a incidirem no navio, em conjugação com períodos elevados e ventos fortes desfavoráveis às amarrações. Consequentemente, foram emitidos pelo sistema alertas

máximos (nível 3) desde o dia 14 de dezembro até ao início do dia 17 e novamente durante dos dias 18 e 19 de dezembro. Durante a tempestade Fabien foram também emitidos avisos vermelhos (fig. 26). Neste cenário, o navio também não poderia ficar amarrado no porto da Madalena do Pico, sendo o local mais seguro efetivamente aquele onde o navio acabou por ficar, o porto da Horta, que se encontra abrigado das ondas dos quadrantes norte, oeste e sul.

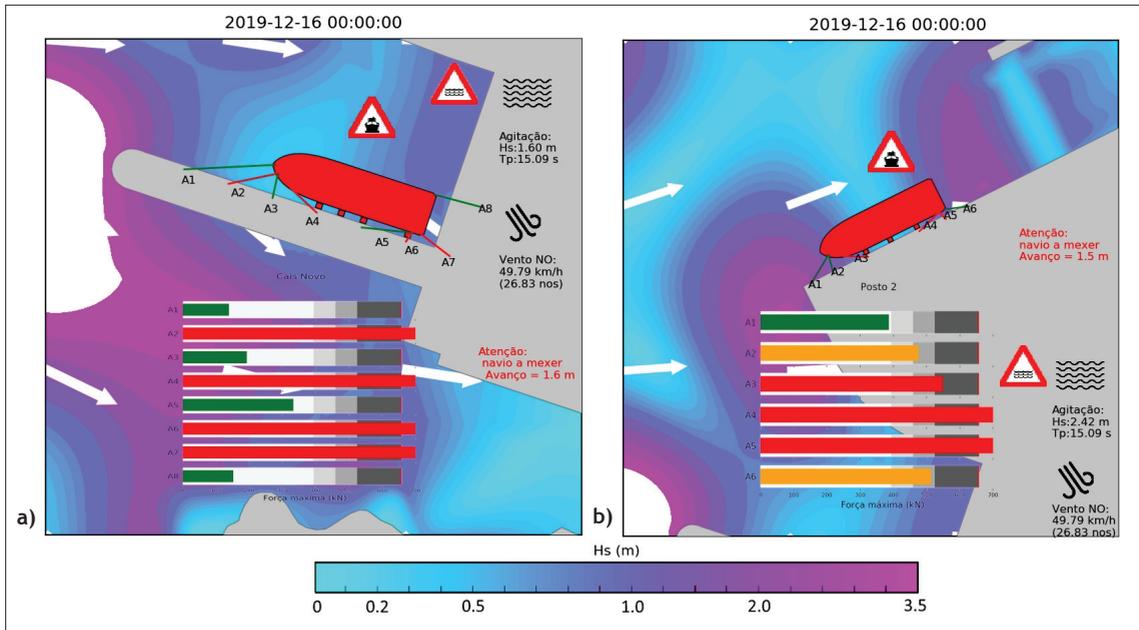


Fig. 25 - Moored ships. Wave conditions, forces on the mooring lines and alerts provided by the system for Madalena do Pico port on 16 December 2019 at 0 a.m. a) Cais Novo, b) Posto 2.

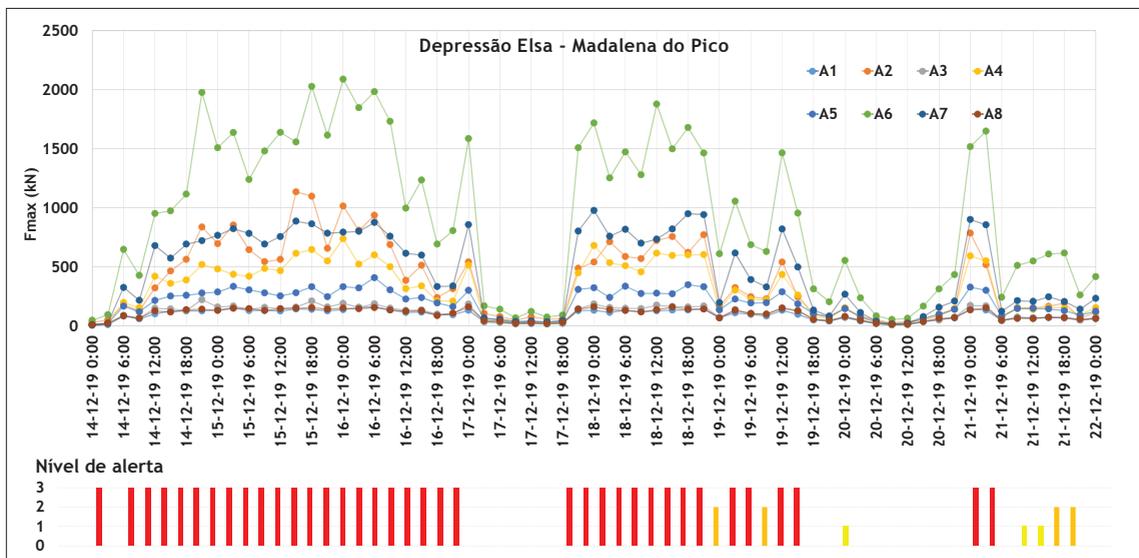


Fig. 26 - Mooring lines forces during Elsa and Fabien storms for Madalena do Pico port.

Conclusões

Devido à grande frequência e intensidade de tempestades na costa portuguesa que põem em perigo populações e infraestruturas portuárias/costeiras, é fundamental que as autoridades responsáveis estejam dotadas de ferramentas para a gestão dos perigos e riscos associados a estes fenómenos. Essas tempestades são responsáveis pela ocorrência de galgamentos e de movimentos excessivos dos navios atracados em zonas portuárias.

O sistema HIDRALERTA (Poseiro, 2019, Fortes *et al.*, 2020, Pinheiro *et al.*, 2020) efetua a previsão, o alerta e a avaliação do risco, com 72 horas de antecedência, relativos à ocorrência de situações de emergência associadas ao galgamento e respetiva inundação, e à segurança de navios amarrados. É aplicável tanto em zonas costeiras, como em zonas portuárias. Desde setembro de 2015 que se encontra operacional o primeiro protótipo do sistema (porto e baía da Praia da Vitória, na Ilha Terceira, Açores), estando em fase de testes e validação os protótipos dos portos da Madalena do Pico e de São Roque do Pico (Ilha do Pico, Açores) e da Ericeira (Portugal Continental). Atualmente, estão em fase de desenvolvimento os protótipos do sistema para os portos de Sines e de Peniche, e para a zona costeira da Costa da Caparica.

Por se tratar de um sistema de alerta, é fundamental que forneça informações coerentes e fiáveis, quer em situações correntes (para garantir que o sistema não emite alertas quando tal não se justifique), quer em situações de tempestade.

Este trabalho apresenta os desenvolvimentos efetuados até à data na validação do sistema em situações de tempestade, que consistiram na aplicação dos protótipos desenvolvidos para os portos da Madalena do Pico, de São Roque do Pico e da Ericeira para a simulação do furacão Lorenzo e das depressões Elsa e Fabien. Foram também apresentados resultados de simulações efetuadas para o porto das Lajes das Flores para o furacão Lorenzo.

Da análise qualitativa efetuada, pode-se concluir que os alertas emitidos pelo sistema estiveram em concordância com os danos/ocorrências reportadas localmente, o que contribui para reforçar a confiança no sistema que está a ser desenvolvido. Estes testes servem também para realçar a importância do sistema, nomeadamente ao nível da segurança para os navios amarrados no grupo central do Arquipélago dos Açores, pois permite a gestão das operações (cuidados especiais no embarque e desembarque de passageiros e veículos ou cancelamento de viagens), do local de atracação do navio, conforme o porto que se afigura mais protegido para um determinado evento, e até da necessidade de reforço de amarrações.

O melhoramento contínuo é inerente ao processo de desenvolvimento de qualquer ferramenta, pelo que existem já diversas melhorias a serem implementadas no sistema. No curto prazo, as melhorias que se pretendem implementar são no sentido de tornar o sistema mais robusto e fiável. A robustez é conseguida através da revisão detalhada do código para evitar falhas no sistema e prever a implementação de metodologias alternativas, p. ex. no caso de ausência de previsões de um dos fornecedores de dados meteorológicos, recorrer a outros fornecedores alternativos (p. ex. o *Copernicus Marine Service*, o centro americano NOAA, ou outros servidores nacionais ou europeus). Para garantir a fiabilidade do sistema, é imperativo efetuar uma validação mais aprofundada de todos os tipos de resultados do sistema e estabelecer uma metodologia que permita uma validação em contínuo. Neste âmbito refira-se: a) validação mais exaustiva dos resultados do modelo SWAN com dados de boias; b) a pertinência e adequação dos alertas gerados, do ponto de vista das autoridades portuárias locais ou outras entidades responsáveis pela segurança das pessoas e bens na orla costeira e portuária; b) a utilização de mais dados históricos, para além dos registos das boias, como, por exemplo, registos de galgamentos, estragos, acidentes, interrupções de operações portuárias ou outros eventos, devidos à agitação marítima, que poderiam ter sido previstos pelo sistema; d) a utilização de dados de vídeo-monitorização de forma a validar os alertas emitidos, pelo menos, em termos de existência ou não de galgamento e de qual a sua magnitude.

A médio prazo serão implementadas novas ferramentas para a estimativa dos galgamentos, tanto em estruturas portuárias, como em zonas costeiras, com o recurso a modelos numéricos, e proceder-se-á à implementação de avaliação de risco de forma mais quantitativa com recurso, por exemplo, a análises multicritério. A longo prazo, serão estudados novos modelos para a definição da agitação no interior das zonas portuárias e que incluam fenómenos não contemplados pelo modelo DREAMS. No entanto, quaisquer alterações neste âmbito terão sempre de ser bastante ponderadas, pois não podem comprometer a capacidade de o sistema correr em tempo real.

O objetivo último do sistema HIDRALERTA é tornar-se uma ferramenta de apoio à decisão útil e fiável na gestão da segurança, que venha a ser utilizada diariamente pelas entidades locais e portuárias. Caso seja atingido esse objetivo, o HIDRALERTA será uma mais valia para as populações e para as atividades económicas que dependem da operacionalidade dos portos e das estruturas de defesa costeira, dando dessa forma um maior retorno ao investimento público feito em Ciência, concretamente através dos diversos financiamentos concedidos desde o início do seu desenvolvimento.

Agradecimentos

O sistema HIDRALERTA tem-se desenvolvido no âmbito de diversos projetos de investigação: o projeto To-SEAlert - Wave overtopping and flooding in coastal and port areas: Tools for an early warning, emergency planning and risk management system (Ref. PTDC/EAM-OCE/31207/2017), o projeto ECOMARPORT (ref: PO INTERREG MAC 2014-2020), o projeto BLUESAFEPOR - Sistema de Segurança para Navios em Manobra e Amarrados em Portos (ref: FA_04_2017_016) e o projeto BSAFE4SEA - Breakwaters SAFETY control through a FORecast and decision support SystEm Analysis, (Ref. PTDC/ECI-EGC/31090/2017). Os autores agradecem a todos os elementos da equipa dos diferentes projetos que contribuem para o desenvolvimento do sistema HIDRALERTA. Agradece-se ainda o financiamento de entidades públicas nacionais como a Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. e o Fundo Azul da Direção Geral das Políticas do Mar da República Portuguesa, e internacionais, como a Comissão Europeia. Os autores agradecem também a colaboração da Portos dos Açores, SA, a disponibilização dos dados das boias pelo Instituto Hidrográfico e o acesso à infraestrutura digital de suporte à investigação pelo INCD (Infraestrutura Nacional de Computação Distribuída).

Referências bibliográficas

- Azevedo, E. B., Mendes, P., Gonçalo, V. (2008). Projectos CLIMAAT e CLIMARCOST Clima e Meteorologia dos Arquipélagos Atlânticos, Clima Marítimo e Costeiro. *In Workshop Internacional sobre Clima e Recursos Naturais nos Países de Língua Portuguesa -WSCRA08*.
- Booij, N., Ris, R. C., Holthuijsen, L. H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *J. Geog. Res.*, C4, 104, 7649-7666.
- Coeveld, E. M., van Gent, M. R. A., Pozueta, B. (2005). *Neural Network: Manual NN_OVERTOPPING2, CLASH WP8 - Report BV*.
- Elzinga, T., Iribarren, J. R., Jensen O. J. (1992). Movements of moored ships in harbors. *In Proceedings of 23rd International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, 3216-3229.
- Flater, D. (1998). *XTide Manual: Harmonic Tide Clock and Tide Predictor*. Technical Report, USA.
URL: <https://flaterco.com/xtide>
- Fortes, C. J. E. M., Reis, M. T., Pinheiro, L., Poseiro, P., Serrazina, V., Mendonça, A., Smithers, N., Santos, M. I., Barateiro, J., Azevedo, E. B., Salvador, M., Reis, F. V. (2020). The HIDRALERTA system: Application to the ports of Madalena do Pico and S. Roque do Pico, Azores. *Journal of Aquatic Ecosystem Health & Management*.
DOI: <https://doi.org/10.1080/14634988.2020.1807295>
- Fortes, C. J. E. M. (2002). *Transformações Não Lineares de Ondas em Zonas Portuárias. Análise pelo Método dos Elementos Finitos (Doctoral Dissertation)*. IST-UL.
- Gracia, V., García-León, M., Sánchez-Arcilla, A., Gault, J., Oller, P., Fernández, J., Sairouni, A., Cristofori, E., Toldrà, R. (2014). A new generation of early warning systems for coastal risk. The iCoast project. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(34), 18.
DOI: <https://doi.org/10.9753/icce.v34.management.18>
- Korsemeier F. T., Lee C. H., Newman J. N., Sclavounos P. D. (1988). The analysis of wave effects on tension-leg platforms. *In proceedings of 7th International Conf. Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Houston, Texas, 1-14.
- Lane, A., Hu, K., Hedges, T., Reis, M.T. (2008). New north east of England tidal flood forecasting system. *FLOODrisk 2008, Flood Risk Management: Research and Practice*, 1377-1387.
- Mynett, A. E., Keunig, P. J., Vis, F. C. (1985). The dynamic behaviour of moored vessels inside a harbour configuration. *In proceedings of Int. Conf. on Numerical Modelling of Ports and Harbours*, Birmingham, England: 23-25 April, Cranfield: BHRA, The Fluid Engineering Centre.
- OCIMF - OIL COMPANIES INTERNATIONAL MARINE (1992). *Mooring equipment guidelines*. Witherby e Co. Ltd.
- Persson, A. (2001). *User Guide to ECMWF Forecast Products. Meteorological Bulletin M3.2*. ECMWF, August, 115p.
- PIANC - PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF NAVIGATION CONGRESSES (1995). *Criteria for movements of moored ships in harbors*. Technical report Permanent International Association of Navigation Congresses, PIANC Supp.to bulletin no. 88.
- PIANC - PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF NAVIGATION CONGRESSES (2012). *Guidelines for berthing structures related to thrusters*. PIANC, Brussels, Belgium.
- Pinheiro, L. V., Fortes, C. J. E. M., Abecasis Jalles, B. M, Santos, J. A. (2015). Simulation of wave action on a moored container carrier inside Sines' Harbour. *Maritime Technology and Engineering*, Guedes Soares and Santos (Eds) Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02727-5.
- Pinheiro, L., Fortes, C., Reis, M. T., Santos, J., Soares, C. G. (2020). Risk forecast system for moored ships, *In proceedings of vICCE (virtual International Conference on Coastal Engineering)*, 6 a 9 de outubro.
- Poseiro, P. (2019). *Forecast and Early Warning System for Wave Overtopping and Flooding in Coastal and Port*

- Areas: Development of a Model and Risk Assessment (Doctoral Dissertation)*. IST-UL.
- Pullen, T., Allsop, N. W. H., Bruce, T., Kortenhuis, A., Schuttrumpf, H., Van Der Meer, J. (2007). *EurOtop: Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment manual*. Kuste.
- Roelvink, D., Dongeren, A., van, McCall, R., Hoonhout, B., van Rooijen, A., van Geer, P. de Vet, L., Nederhoff, K. (2015). *XBeach Manual*. Deltares, UNESCO-IHE, Delft University of Technology.
- Santos, J. A. (1994). *MOORNAV - Numerical model for the behaviour of moored ships*. Final report, Lisbon: Report 3/94-B, Proj NATO PO-Waves.
- Stokes, K., Poate, T., Masselink, G., King, E., Saulter, A., Ely, N. (2021). Forecasting coastal overtopping at engineered and naturally defended coastlines. *Coastal Engineering*, 164, 103827.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2020.103827>
- SWAN TEAM (2006). *Swan User Manual version 40.51*. Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft university of Technology, Delft, The Netherlands, 111 p.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE (2002), Coastal Engineering Manual (CEM), Engineer Manual 1110-2-1100, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, D.C. (6 volumes).
- Van der Meer, J. W., Van Gent, M. R. A., Pozueta, B., Verhaeghe, H., Steendam, G.J., Medina, Jr. (2005). Applications of a neural network to predict wave overtopping at coastal structures. *In proceedings of ICE Coasts, Structures & Breakwaters'05*, Thomas Telford, London, 259-268.
- van Dongeren, A., Ciavola, P., Martinez, G., Viavattene, C., Bogaard, T., Ferreira, O., Higgins, R., McCall, R. (2018). Introduction to RISC-KIT: Resilience-increasing strategies for coasts. *Coastal Engineering*, 134, 2-9.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.10.007>
- Van Gent, M. R. A., Pozueta, B., Van Den Boogaard, H. F. P., Medina, Jr. (2005). *D42 Final Report on Generic Prediction Method*. CLASH WP8 Report, Delft, Holanda, 33 p.
- 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. *J. Physical Oceanography*, 18, 1775-1810.
- Zelinsky D. A. (2019). *National Hurricane Center Tropical Cyclone Report: Hurricane Lorenzo (AL132019)*. NOAA/NWS, 22 p.
URL: www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL132016_Lorenzo.pdf
- Zijlema, M. Stelling, G., Smit, P. (2011). SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. *Coastal Engineering*, 58(10), 992-1012.
DOI: <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2011.05.015>