



SISTEMA DE ALERTA PARA RISCOS PORTUÁRIOS. ANÁLISE DE EVENTOS EXTREMOS NOS PORTOS DOS AÇORES

Liliana Pinheiro¹, Ana Catarina Zózimo¹, Maria Inês Santos², Conceição Fortes¹, Teresa Reis¹, Eduardo Azevedo^{2,3}

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, LNEC

²Fundação Gaspar Frutuoso – Universidade dos Açores

³Observatório para o Ambiente dos Açores

lpinheiro@lnec.pt, aczozimo@lnec.pt, misantos@lnec.pt, <mailto:jfortes@lnec.pt>, treis@lnec.pt, eduardo.mv.azevedo@uac.pt

Resumo

A autoridade portuária do arquipélago dos Açores, Portos dos Açores, SA, identificou a necessidade de dispor de um sistema de alerta precoce para os riscos associados à agitação marítima, nomeadamente os relacionados com os galgamentos costeiros e com os navios amarrados. No âmbito do Projeto ECOMARPORT, associaram-se com a Universidade dos Açores e o LNEC para o desenvolvimento de três novos protótipos do sistema HIDRALERTA para os portos de S. Roque do Pico, Madalena do Pico e Praia da Vitória. Os novos protótipos têm, para além da previsão de eventos de galgamento das proteções portuárias, a capacidade de prever esforços e movimentos de navios amarrados. As situações de emergência podem ser previstas, permitindo que as autoridades portuárias possam tomar medidas de mitigação para evitar a perda de vidas e minimizar os danos.

Esta comunicação tem como objetivo analisar e validar as previsões do sistema HIDRALERTA para os dias em que se identificaram eventos extremos de agitação marítima e/ou problemas operacionais. Os resultados dos modelos numéricos de propagação de ondas são validados com dados de boias ondógrafo. Os eventos de galgamento e a segurança dos navios atracados são validados com dados recolhidos junto da autoridade portuária por meio de observação visual, fotos, vídeos e registos das webcams instaladas.

Introdução

Estudos recentes (Knutson *et al.*, 2020; Belmadani *et al.* 2021) indiciam uma alteração no clima das ondas no Oceano Atlântico Norte, em consequência das alterações climáticas, com o aparecimento de tempestades tropicais. Estas tempestades tropicais começam a deslocar-se cada vez mais para norte e, caso estes eventos se tornem mais fortes no futuro (NOAA, 2018; Cox *et al.*, 2019), é necessário considerar os seus efeitos de forma a prever e reduzir o seu impacto nas zonas costeiras (Takayabu *et al.*, 2015; Mori e Takemi, 2016).

Já existem registos de tempestades tropicais a atingir os Açores, como por exemplo, as tempestades Alex (janeiro de 2016) e Lorenzo (outubro de 2019). A tempestade Lorenzo resultou em danos devastadores nos portos dos Açores, quer nas estruturas portuárias devido à ação direta da forte agitação marítima, quer nos navios amarrados devido à penetração da agitação marítima no interior dos portos e ao vento.

As medidas de adaptação, principalmente as relacionadas com eventos extremos, requerem que se conheçam os seus impactos, para que se possam despoletar ações concretas para a minimização das suas consequências. Começa a ser evidente a necessidade de dispor de sistemas de previsão e alerta (*Early Warning Systems* ou EWS) assim como de implementação de medidas de mitigação para lidar com estes eventos extremos.



A disponibilidade de previsões de estados de vento e de agitação marítima, combinada com o uso de modelos numéricos adequados para a propagação dessa agitação, permite a produção de previsões diárias dos potenciais efeitos em áreas costeiras, estruturas portuárias, navios amarrados e atividades portuárias.

O sistema HIDRALERTA, (Fortes *et al.*, 2020; Poseiro, 2019; Pinheiro *et al.* 2020; Santos *et al.* 2020, Zózimo *et al.* 2021b), 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. O primeiro protótipo do sistema foi desenvolvido em 2015 para a baía da Praia da Vitória, Ilha Terceira, Açores, e previa o risco de galgamentos e inundações no porto e marginal de toda a baía. Atualmente já engloba três portos nos Açores e dois em Portugal continental, assim como uma região costeira de praia. Existem ainda quatro novos portos em desenvolvimento.

Nas secções seguintes apresenta-se a aplicação e validação do sistema HIDRALERTA aos portos dos Açores. Foram simulados dois cenários de eventos extremos passados e analisadas as respostas do sistema, nomeadamente os furacões Alex e Lorenzo.

Sistema HIDRALERTA

O sistema utiliza previsões de agitação marítima ao largo para a determinação da agitação marítima local, do caudal médio de galgamento e/ou de 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 a identificação de potenciais 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 socioeconómicas.

A metodologia do sistema HIDRALERTA encontra-se documentada e já foi aplicada a vários portos portugueses, como, por exemplo, ao porto da Ericeira (Zózimo *et al.* 2021a) e os portos da Praia da Vitória (Poseiro *et al.*, 2017) e de Ponta Delgada (Rodrigues *et al.*, 2017), ambos localizados nos Açores. A metodologia também foi aplicada a uma zona costeira, Costa da Caparica (Zózimo *et al.* 2021b).

O sistema fornece informações sobre o nível de risco com base nos efeitos reais das ondas nas estruturas e nos navios amarrados. Esta é uma mudança importante em relação a outros sistemas de previsão que se baseiam exclusivamente nas características da agitação marítima (alturas e períodos das ondas) pois a segurança de portos e navios depende de fenómenos complexos de interação onda-estrutura e a avaliação do risco nem sempre é direta.

Protótipos dos Portos dos Açores

Os portos da Madalena do Pico e de São Roque do Pico localizam-se na ilha do Pico, e o porto da Praia da Vitória na ilha Terceira, Figura 1.

Foram definidos 4 pontos (N, S, E e O), Figura 1, para a extração dos dados da onda e ventos do ECMWF (*European Center for Medium Range Weather forecast* ECMWF, Persson 2001).

Estes dados são o forçamento do modelo numérico SWAN (SWAN Team, 2006) que efetua a propagação de ondas desde o largo até à proximidade de cada porto, considerando diferentes malhas computacionais encaixadas. Os resultados do modelo SWAN são utilizados como condição de fronteira do modelo DREAMS (Fortes, 2002), que efetua a propagação da agitação para o interior do porto. Os resultados do modelo DREAMS são extraídos em diversos pontos no interior de cada ponto, para que possam ser utilizados como dados de entrada para o cálculo do galgamento (Figura 2a). A utilização da ferramenta NN_OVERTOPPING2 (Coeveld, 2005) e do modelo WAMIT (Korsemeier *et al.*, 1988), permite, respetivamente, o cálculo de volumes de galgamento e esforços e forças nas amarras e defensas (Figura 2b).



Figura 1. Arquipélago dos Açores; Grupo central, localização dos portos da Madalena do Pico, de São Roque do Pico e da Praia da Vitória.

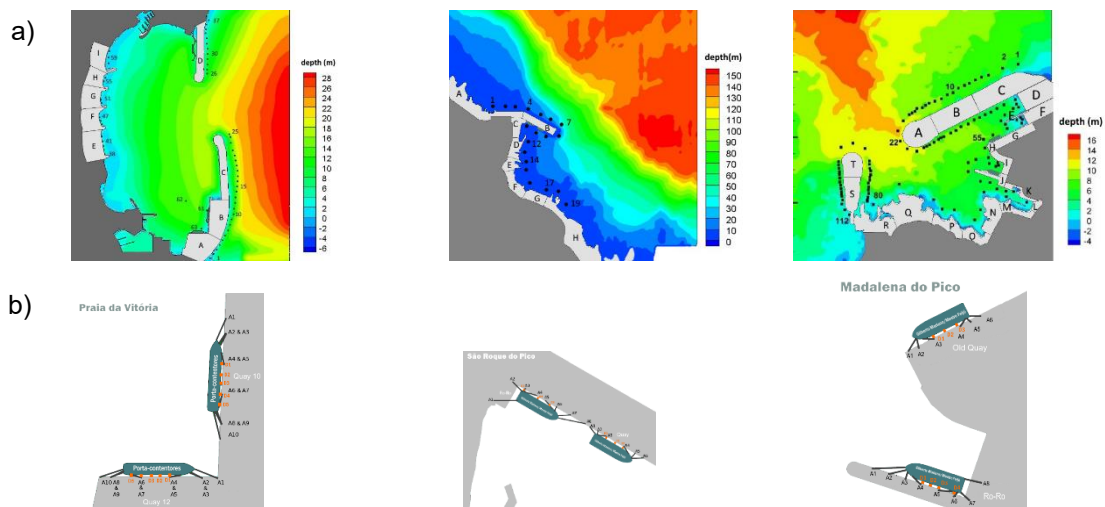


Figura 2. Portos da Praia da Vitória, de São Roque do Pico e da Madalena do Pico. a) Localização dos pontos de galgamento e zonas de risco; b) Amarração dos navios.

Características dos eventos extremos

Furacão Alex – janeiro de 2016

De acordo com o *National Hurricane Center* (NHC), o Furacão Alex é o primeiro a ocorrer no mês de janeiro desde o furacão Alice, em 1955, e a quarta tempestade a formar-se nesse mês desde que se iniciaram os registos em 1851. Alex foi o quarto furacão a atingir os Açores no século XXI, apesar do fenómeno ser considerado raro na região.

O furacão teve origem como ciclone extratropical perto das Bahamas a 7 de janeiro de 2016. A 13 de janeiro, imediatamente a sul dos Açores (Figura 3), transitou para um ciclone subtropical e, um dia depois, já como ciclone tropical, atingiu o seu auge na Categoria 1 da Escala de furacões de Saffir-Simpson, com um vento máximo sustentado de 140 km/h, e pressão atmosférica de 981 milibares. Seguiu-se uma ligeira redução da sua intensidade, e no dia seguinte Alex fez “*landfall*” na Ilha Terceira, transitando novamente para ciclone extratropical.

O Instituto Português do Mar e da Atmosfera emitiu um alerta vermelho para os Açores, levando ao encerramento de escolas e vários estabelecimentos. As previsões indicavam que no grupo central do arquipélago as rajadas de vento pudessem atingir os 170 km/h e que a altura das ondas estivesse na ordem dos 14 m, podendo atingir os 18 m. Verificaram-se rajadas de vento e chuva forte, mas com poucos estragos ao longo do arquipélago e resultados finais menos graves que os inicialmente esperados. Às 8 horas locais do dia 15 de janeiro, o furacão Alex encontrava-se a 210 km a sul da ilha Terceira, prevendo-se que esta ilha, em conjunto com as ilhas da Graciosa e de São Jorge, fossem as mais atingidas. O furacão passou a cerca de 20 km da Ilha Terceira pelas 12:30 horas locais, tendo a proteção civil registado um total de 19 ocorrências.

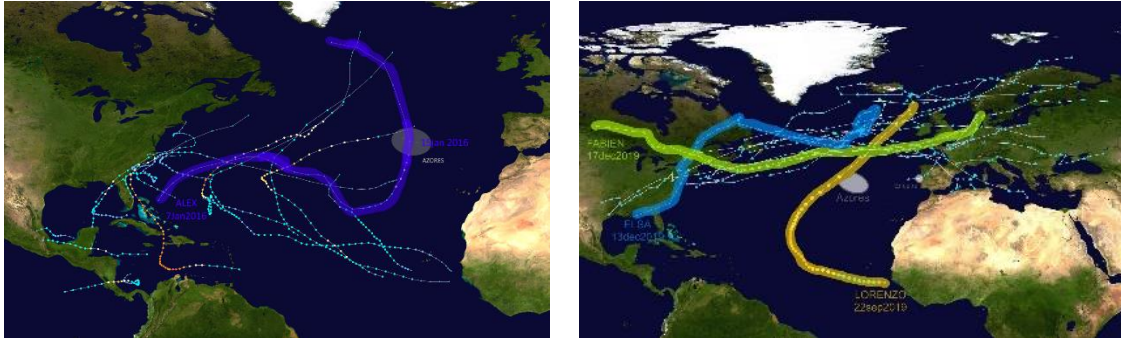


Figura 3. Trajetórias dos Furacões Alex (2016) e Lorenzo (2019).

O porto mais fustigado pela passagem do furacão, em termos de agitação marítima, foi o porto de Praia da Vitória (Figura 4), com ondas de alturas significativas (H_s) de 8 m no dia 17 de janeiro e direções de nordeste. O porto da Madalena foi atingido por ondas com cerca de 4 m de altura significativa e direções de norte no dia 13 de janeiro de 2016, e no porto de São Roque as ondas atingiram cerca de 3 m de altura significativa e direções de este no dia 15 de janeiro.

Os períodos de pico das ondas oscilaram entre 8 s e 18 s, junto ao porto de Praia da Vitória, e entre 4 s e 14 s nos portos de São Roque do Pico e Madalena do Pico.

O porto da Madalena do Pico foi atingido por ventos com menores velocidades que os portos de São Roque do Pico e Praia da Vitória. Tal deve-se à orientação do porto da Madalena, que lhe conferiu maior proteção face às direções do vento durante o furacão Alex.



Figura 4. Furacão Alex. Galgamentos no porto da Praia da Vitória no dia 15/01/2016.

Furacão Lorenzo – outubro de 2019

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 NHC, 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 (Figura 3), 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, em que a destruição foi quase total, desde a parede do muro cortina, dos blocos de betão, do cais, de edifícios e tudo o que se encontrava no interior do porto, como navios, contentores, maquinaria, entre outros.

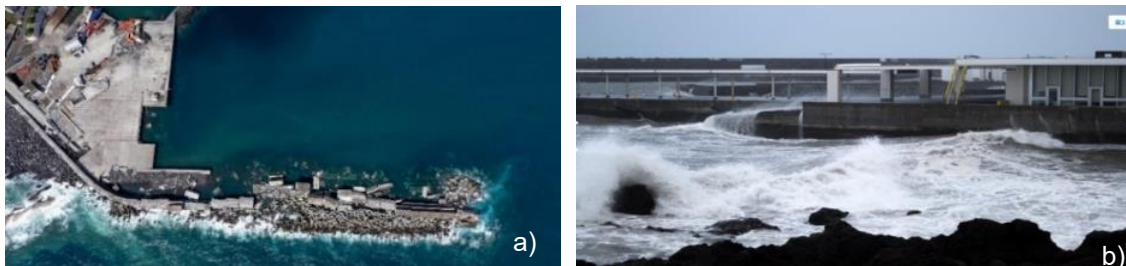


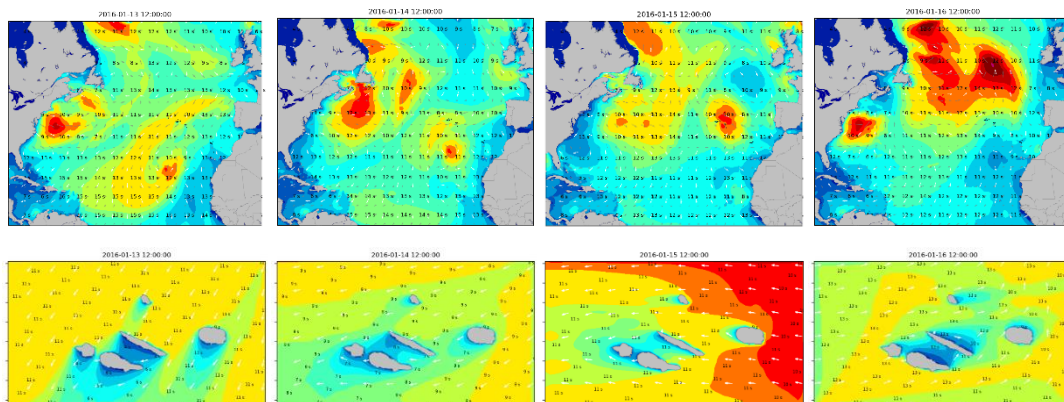
Figura 5. Furacão Lorenzo. Impacto, 02/10/2019. Porto da ilha das Flores, fotografia de Frederico Fournier (a), porto da Madalena do Pico, fotografia de AFP/Getty Images (b).

Resultados

Furacão Alex

No dia 12 de janeiro de 2016, de acordo com as previsões do sistema HIDRALERTA, a agitação marítima apresentava alturas significativas na ordem dos 4 m, períodos de pico de 8 s e direções de 90°N (este), rodando no dia 13 de janeiro para o quadrante norte e aumentando os períodos de pico para cerca de 12 s (Figura 6). No dia 15 de janeiro a agitação marítima atingiu o seu pico no arquipélago dos Açores, com alturas significativas de onda de 6 m, períodos de pico de 12 s e direções dos quadrantes este e sudoeste (Figura 7).

Na Figura 8 apresenta-se a comparação entre os valores de H_s obtidos no sistema HIDRALERTA e os obtidos na boia Faial/Pico, durante o ano de 2016. Nesse ano a boia esteve inoperacional durante toda a primeira metade do ano. No entanto os registos existentes, na segunda metade do ano mostram que o modelo numérico tem uma boa concordância com os registos da boia (Hs_B), quer na malha principal (Hs_M) como na malha encaixada (Hs_N).



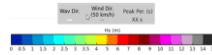


Figura 6. Furacão Alex. Características da agitação marítima e vento previstos pelo ECMWF no Atlântico Norte e no grupo central dos Açores, entre 13 e 16 de janeiro de 2016.

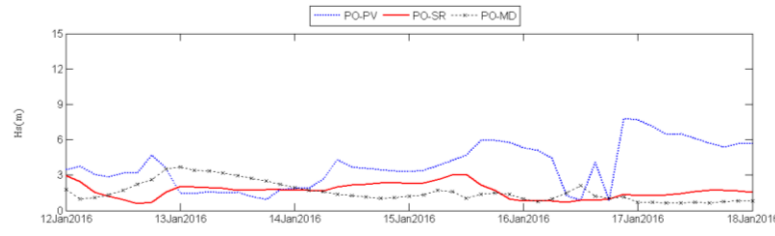


Figura 7. Furacão Alex. Características da agitação marítima previstas pelo HIDRALERTA nos pontos junto aos portos (PO-PV, PO-SR e PO-MD), entre os dias 12 e 18 de janeiro de 2016.

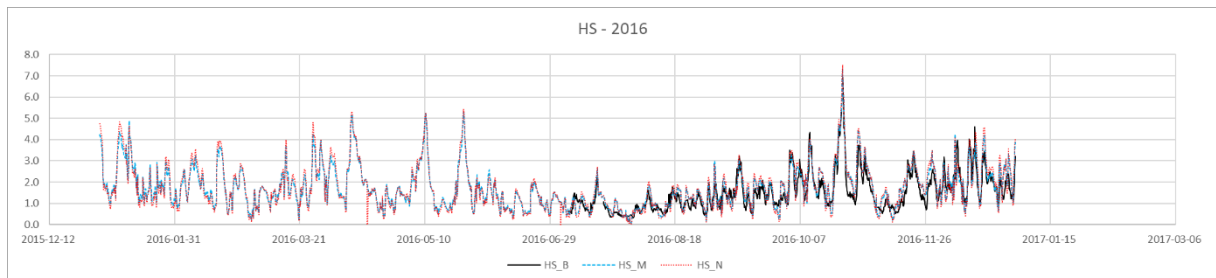


Figura 8. Boia Faial-Pico. Valores tri-horários de alturas significativas no ano de 2016. Registos na boia Faial-Pico (linha cheia); calculados pelo modelo numérico SWAN, na malha principal (linha tracejada azul) e na malha encaixada (linha tracejada laranja)

Para uma comparação mais quantitativa dos resultados numéricos com as medições na boia, foram considerados três parâmetros estatísticos: o índice de concordância, ic , o erro quadrático médio ($rmse$) e o erro médio absoluto ($bias$):

$$ic = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2}; \quad rmse = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}}; \quad bias = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n}$$

onde x_i são os valores medidos (referência), y_i são os valores dos modelos numéricos, \bar{x} é a média do valor medido e n é o número de medições.

O índice de concordância varia entre zero e um, sendo que quanto maior é o valor, maior é a concordância dos valores numéricos com as medições. O erro quadrático médio fornece uma perspetiva global sobre a magnitude do erro. O erro médio absoluto permite inferir sobre o sentido do desvio, ou seja, se o modelo numérico subestima ou sobrestima os resultados.

Na Tabela 1 apresentam-se os índices de concordância, erros médios quadráticos e erros médios absolutos anuais para as variáveis H_s e T_z , para a malha principal (Main) e para a malha encaixada (Nested).

Tabela 1 – Boia Faial-Pico. Análise estatística da comparação dos registos da boia com o modelo numérico SWAN

	<i>ic</i>				<i>rmse</i>				<i>bias</i>			
	Boia-Main		Boia-Nested		Boia-Main		Boia-Nested		Boia-Main		Boia-Nested	
	H_s	T_z	H_s	T_z	H_s	T_z	H_s	T_z	H_s	T_z	H_s	T_z
2016	0,94	0,73	0,93	0,74	0,44	1,89	0,51	1,90	0,16	-1,49	0,20	-1,41
2007-2020	0,92	0,67	0,91	0,67	0,52	2,19	0,57	2,21	0,06	-1,74	0,07	-1,67

Com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que o modelo numérico SWAN se encontra razoavelmente bem calibrado e permite obter estimativas bastante rigorosas das alturas significativas (H_s), com índices de concordância médios de 0,92 (92%). Relativamente aos períodos médios (T_z), a concordância não foi tão boa, tendo sido obtido o valor de 0,74.

Porto de Praia da Vitória

Segundo os registos existentes, o furacão Alex passou próximo do porto da Praia da Vitória, com alturas significativas de 6 m, tendo sido verificados grandes eventos de galgamento nos quebra-mares do porto durante o dia de 15 de janeiro de 2016. Foram também reportados pequenos e médios galgamentos pelos observadores locais na defesa frontal da baía.

Segundo as previsões do sistema HIDRALERTA, a ondulação junto à entrada do porto atingiu os 6 m de altura significativa no dia 15 de janeiro, mas sofrendo amplificações no seu interior resultantes dos períodos elevados.

O sistema HIDRALERTA previu, para os dias 15 e 16 de janeiro (Figura 9a), galgamentos de mais de 100 e 180 l/s/m, nos molhes norte (zona D) e sul (zona C), respetivamente. Foram também previstos alguns galgamentos médios da avenida marginal da praia nos dias 15, 16 e 17 de janeiro. Foram emitidos alertas vermelhos e amarelos para as zonas A, B e C (com variações ao longo dos dias 15, 16 e 17 de janeiro), Figura 9b. Para a zona da avenida marginal também foram emitidos alguns alertas amarelos e laranja, no dia 15 de janeiro. Estes valores de galgamento são bastante elevados e estão em concordância com os registos de grandes eventos de galgamento nos quebra-mares do porto durante o dia de 15 de janeiro e de pequenos e médios galgamentos na baía.

Na Figura 10a pode verificar-se que o sistema previu forças superiores a 1000 kN nos dias 16 e 17 de janeiro de 2016, nos navios amarrados nos cais 10 e 12 do terminal de contentores, o que resultou na emissão de alertas amarelos e laranja para algumas das amarrações do porta-contentores, Figura 10b. Esta previsão deve-se às amplificações previstas para a agitação no interior do porto em resultado dos elevados períodos de pico das ondas.

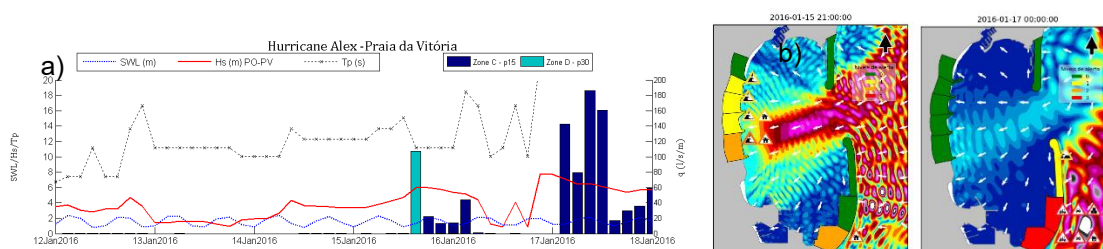


Figura 9. Furacão Alex. Porto de Praia da Vitória. Galgamentos previstos nas zonas C (molhe sul) e D (molhe norte) entre os dias 12 e 18 de janeiro de 2016 (a) e alertas emitidos pelo HIDRALERTA para o dia 17 de janeiro às 0h (b).

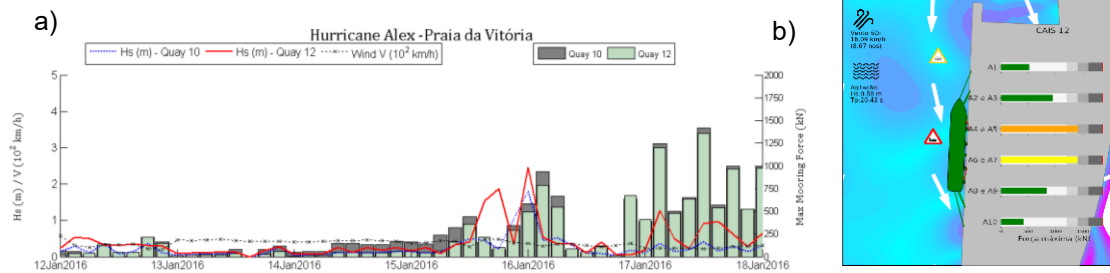


Figura 10. Furacão Alex. Porto de Praia da Vitória. Forças máximas nas amarras dos navios entre 12 e 18 de janeiro de 2016 (a) e alertas emitidos pelo HIDRALERTA para o Cais 12 para 17 de janeiro às 12h (b).

Porto de São Roque do Pico

No porto de São Roque do Pico foram registados alguns eventos de galgamento durante os dias 14 e 15 de janeiro de 2016, principalmente no molhe (zona B). Foram reportados diversos estragos em São Roque do Pico, nas zonas E e H (marginal da vila).

O sistema HIDRALERTA previu que a ondulação junto à entrada do porto de São Roque do Pico teria 3 m de altura significativa, mantendo-se esta altura no interior do porto devido aos períodos elevados e à falta de abrigo face à direção predominante das ondas (este). Para o dia 15 de janeiro, foram previstos pelo sistema HIDRALERTA galgamentos de mais de 60 l/s/m, nas zonas B e C (Figura 11a) e foram emitidos alertas vermelhos no molhe e na zona da rampa, assim como alertas laranja junto à estrada marginal da vila, Figura 11b. Estas previsões estão em concordância com o que foi verificado no local.

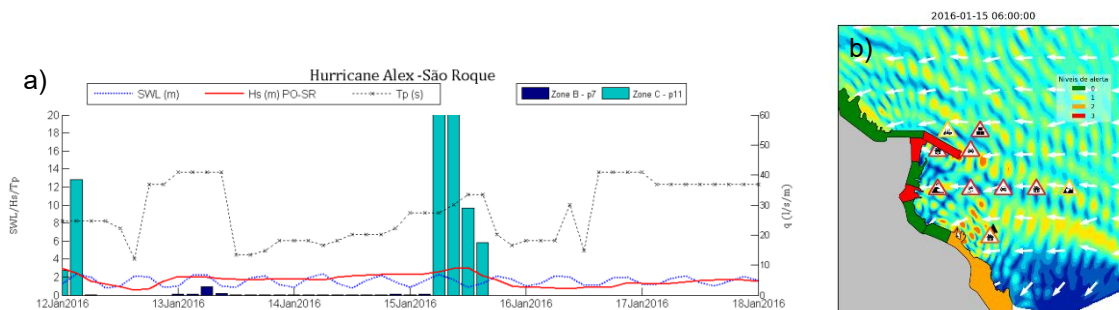


Figura 11. Furacão Alex. Galgamentos previstos nas zonas B (Cais) e C (rampa Ro-Ro) do porto de São Roque do Pico, entre os dias 12 e 18 de janeiro de 2016 (a) e alertas emitidos pelo HIDRALERTA para o dia 15 de janeiro às 6h (b).

A agitação que foi prevista para o interior do porto, juntamente com as previsões de vento, conduziram à previsão de movimentos e forças excessivos nos navios amarrados na rampa Ro Ro e no cais, tendo sido previstas forças superiores a 1500 kN nos dias 13, 14 e 15 de janeiro de 2016 (Figura 12a). Nestas condições o navio que estivesse amarrado na rampa ro-ro não estaria em segurança, uma vez que foram emitidos diversos alertas vermelhos, Figura 12b.

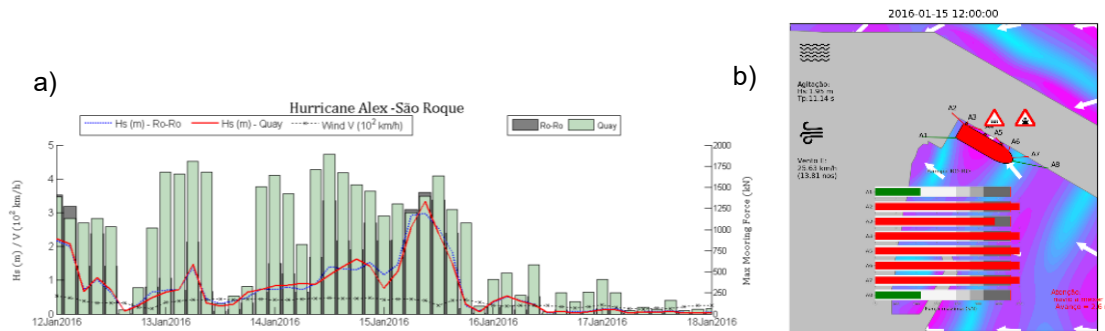


Figura 12. Furacão Alex. Porto de São Roque do Pico. Forças máximas nas amarras dos navios entre 12 e 18 de janeiro de 2016 (a) e alertas emitidos pelo HIDRALERTA na rampa Ro-Ro para 15 de janeiro às 12h (b).

Furacão Lorenzo

A análise dos dados do ECMWF fornece uma visão sobre as principais características do vento e das ondas, assim como da trajetória do furacão (Figura 13). Das previsões do ECMWF (Figura 14a) para os pontos N, S, E e W (Figura 1) e Sf (ao largo das Flores), verificou-se que o ponto W foi o que registou o valor mais elevado de altura de onda significativa, 13,43 m. Isto é consistente com observações reais e relatórios emitidos posteriormente que indicaram a ocorrência de ondas com altura máxima (H_{max}) de 25 m (em que H_{max} pode ir até cerca de $1.83 \times H_s$). O período de pico chegou aos 18 s e a direção média das ondas foi de 270° (oeste) antes e depois do furacão. Quando o centro do furacão passou pelas ilhas entre os grupos central e oeste, a direção média das ondas rodou para cerca de 200° (de SSE). Os portos da Madalena do Pico e de São Roque do Pico, beneficiaram do abrigo da ilha do Faial e da própria ilha do Pico.

Devido à direção das ondas, na altura da passagem do furacão Lorenzo (madrugada de 2 de outubro de 2019), a agitação marítima chegou à entrada do porto da Madalena do Pico (PO_MD) com quase 6 m de H_s , conforme se pode observar na Figura 14b, enquanto os portos de São Roque do Pico (PO_SR) e de Praia da Vitória (PO_PV) foram protegidos das ondas mais altas. Devido à difração das ondas, a altura significativa das ondas na entrada dos dois últimos portos era inferior a 3 m. A altura das ondas em frente à Praia da Vitória rondou os 3 m, apenas por um breve período de tempo (das 0:00h às 6:00h), caindo abaixo de 1 m logo após a passagem da tempestade. A Figura 15 ilustra o efeito de sombra das ilhas nas costas norte e leste.

O porto das Flores (ponto PO-FL, Figura 14b) foi o mais fustigado pelo Furacão Lorenzo, tendo sido previstas alturas significativas de onda de cerca de 12 m no dia 2 de outubro de 2019.

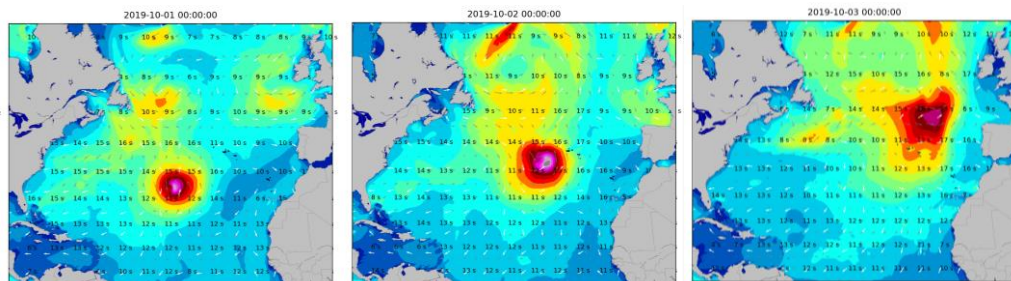


Figura 13. Furacão Lorenzo. Características da agitação marítima e vento previstos pelo ECMWF no Atlântico Norte e no grupo central dos Açores, entre os dias 1 e 3 de outubro de 2019

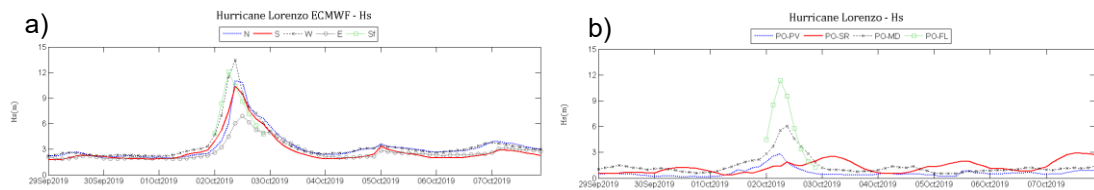


Figura 14. Furacão Lorenzo. Características da agitação marítima nos pontos ao largo (N, S, W, E e Sf) (a) e junto à entrada dos portos (PO-PV, PO-SR, PO-MD e PO-FL) (b), entre os dias 30 de setembro e 5 de outubro de 2019.

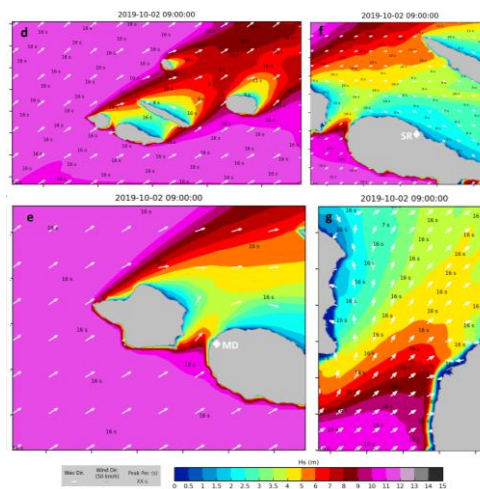


Figura 15. Furacão Lorenzo. Resultados do modelo SWAN, dia 2 de outubro de 2019, 9h.

Na Figura 8 apresenta-se a comparação entre os valores de H_s obtidos no sistema HIDRALERTA e os obtidos na boia Faial/Pico, durante o ano de 2019. Nesse ano a boia esteve inoperacional entre setembro e novembro. Mais uma vez, a boia encontrava-se inoperacional durante a passagem do furacão. No entanto os registos existentes apanharam outra grande tempestade em dezembro (a depressão Elsa) e mostram que o modelo numérico teve uma boa concordância com os registos da boia (H_{s_B}), quer na malha principal (H_{s_M}) como na malha encaixada (H_{s_N}).

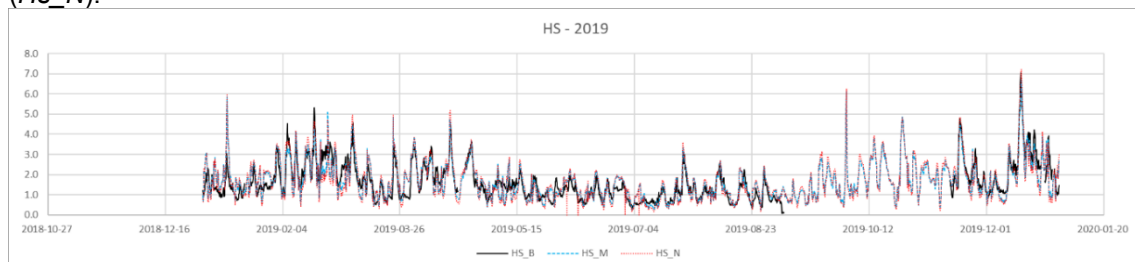


Figura 16 – Boia Faial-Pico. Valores tri-horários de alturas significativas no ano de 2019. Registos na boia Faial-Pico (linha cheia); calculados pelo modelo numérico SWAN, na malha Main (linha tracejada azul) e na malha encaixada (Nested) (linha tracejada laranja)

Na Tabela 2 apresentam-se os índices de concordância, erros médios quadráticos e erros médios absolutos anuais para as variáveis H_s e T_z , medidos na boia Faial-Pico e calculados pelo modelo numérico SWAN, par a malha principal (Main) e para a malha encaixada (Nested).



Tabela 2 – Boia Faial-Pico. Análise estatística da comparação dos registos da boia com o modelo numérico SWAN

	<i>ic</i>				<i>rmse</i>				<i>bias</i>			
	Boia-Main		Boia-Nested		Boia-Main		Boia-Nested		Boia-Main		Boia-Nested	
	H_s	T_z	H_s	T_z	H_s	T_z	H_s	T_z	H_s	T_z	H_s	T_z
2019	0,92	0,65	0,90	0,64	0,50	2,24	0,57	2,30	0,05	-1,86	0,04	-1,81
2007-2020	0,92	0,67	0,91	0,67	0,52	2,19	0,57	2,21	0,06	-1,74	0,07	-1,67

Com base nos resultados apresentados e nas comparações efetuadas utilizando medidas de erro estatísticas, é possível afirmar que o modelo numérico SWAN se encontra razoavelmente bem calibrado e permite obter estimativas bastante rigorosas das alturas significativas (H_s), com índices de concordância médios de 0,92 (92%). Relativamente aos períodos médios (T_z), a concordância não foi tão boa, tendo sido obtido o valor de cerca de 0,66.

Porto de São Roque do Pico

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 muitos 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 apenas emitido um aviso vermelho para o movimento do navio para a mesma hora. Também foram emitidos avisos amarelos ou laranja para a intensidade do vento. Como, para que seja garantida a segurança no embarque e desembarque de passageiros e veículos, o limite imposto para navios ferry de passageiros é de 0,6 m na amplitude de movimentos do navio, conclui-se que o ferry estaria seguro neste porto, mas que não era recomendável que realizasse qualquer operação nesse dia.

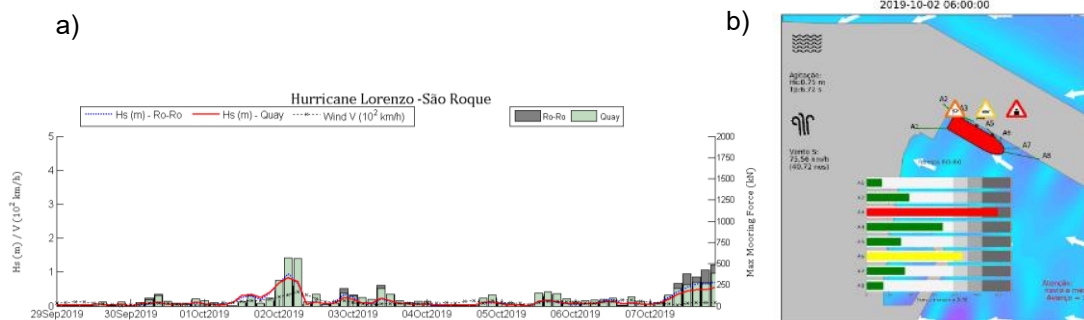


Figura 17. Furacão Lorenzo. Porto de São Roque do Pico. Forças máximas nas amarras dos navios entre 29 de setembro e 7 de outubro de 2019 (a) e alertas emitidos pelo HIDRALERTA na rampa Ro-Ro para 2 de outubro às 6h (b).

Porto da Madalena do Pico

Segundo as previsões do sistema HIDRALERTA, o momento mais crítico do furacão Lorenzo no porto da Madalena do Pico ocorreu às 9h do dia 2 de outubro de 2019, com ondas com altura significativa de cerca de 6 m e direção predominante de noroeste. As maiores alturas de onda ocorreram no quebra-mar norte, aumentando desde o enraizamento do quebra-mar até à cabeça, com valores entre os 5 m e os 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 da onda foi superior a 1,5 m, impossibilitando as operações de atracação, o que está de acordo com registos efetuados no local.

Os caudais médios de galgamento não foram significativos, tendo estado associados essencialmente à maré cheia, e às alturas de onda e períodos de pico mais elevados (cerca de 15 s). Para o quebra-mar norte, o caudal de galgamento mais elevado foi previsto para as às 9 h do dia 2, com 15 l/s/m na zona da cabeça do quebra-mar. Para o quebra-mar oeste, o valor máximo previsto de caudal de galgamento foi de 1,9 l/s/m para a secção imediatamente antes da cabeça. Dentro do porto, não foram previstos galgamentos assinaláveis.

O furacão Lorenzo causaria danos severos no ferry caso este estivesse atracado no Cais novo do porto da Madalena do Pico. O sistema previu ondas com cerca de 1,2 m de altura significativa e com períodos elevados, em conjugação com ventos fortes no cais, condições muito desfavoráveis às amarrações. Os maiores esforços nas amarrações verificar-se-iam às 6h do dia 2 de outubro, tendo sido emitido pelo sistema 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 no cais do Posto 2, o que conduziria a menores esforços nas amarrações, ou eventualmente noutro porto. 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.

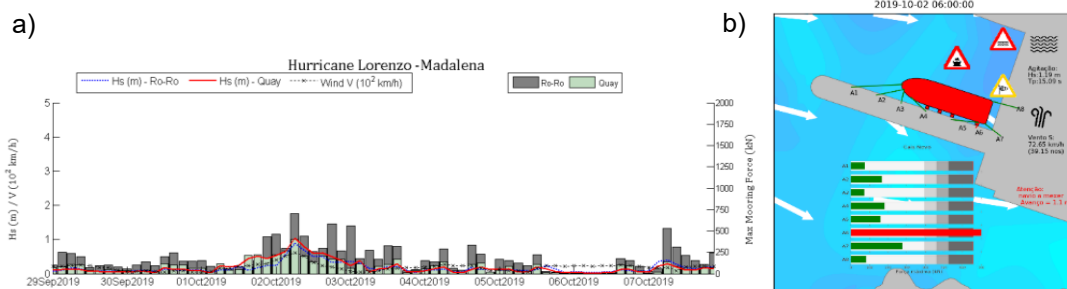


Figura 18. Porto de Madalena do Pico. Forças máximas nas amarras dos navios entre 29 de setembro e 7 de outubro de 2019 (a) e alertas emitidos pelo HIDRALERTA no Cais novo para 2 de outubro às 6h (b).

Considerações finais

O sistema HIDRALERTA está a operar e a fornecer previsões diárias para as 72 horas seguintes em três portos nas ilhas dos Açores, porto da Praia da Vitória, porto de São Roque do Pico e porto da Madalena do Pico. Essas previsões são disponibilizadas diariamente numa aplicação Web de fácil utilização.

As validações efetuadas com as tempestades Alex e Lorenzo serviram de afinação dos alertas do sistema e demonstraram a sua enorme potencialidade para ajudar as autoridades responsáveis a planear com antecedência medidas de mitigação das consequências de eventos extremos.

A aplicação do sistema ao furacão Lorenzo realçou a importância de os alertas do sistema serem baseados nos efeitos da agitação nas estruturas e nos navios amarrados, e não exclusivamente nas características da agitação marítima (alturas, períodos das ondas e direções) previstas pelos modelos globais, cujas malhas têm resoluções muito grosseiras e não simulam corretamente a propagação das ondas até às proximidades das estruturas portuárias, nem mesmo para o interior dos portos. Tendo em conta as características do furacão Lorenzo, foram emitidos, pelos institutos de meteorologia que monitorizam o atlântico Norte, alertas de vento e agitação marítima para todas as ilhas do grupo central. No entanto, devido à orientação da agitação incidente e da



sua propagação junto às ilhas, o grupo ocidental foi muito mais fustigado pela ação violenta das ondas e os efeitos nos portos das ilhas do grupo central foram muito diversos. Devido à trajetória do furacão e consequente desenvolvimento das ondas, o porto de Praia da Vitória acabou por beneficiar da proteção das restantes ilhas e não foi grandemente afetado pela passagem do furacão. Em contrapartida, o furacão Lorenzo acabou por destruir completamente o porto das Lajes das Flores, na ilha das Flores, que foi fortemente atingida por ondas de 25 m. Os portos de São Roque e Madalena do Pico sofreram episódios de galgamentos e agitação intensa no interior das bacias portuárias. Este fenómeno foi corretamente previsto pelo sistema HIDRALERTA, com a previsão de eventos graves de galgamento, assim como risco de rutura de amarrações nos portos da Madalena do Pico e de São Roque do Pico. Este grau de detalhe nas previsões e nos alertas gerados é o que permite uma gestão mais eficaz, por exemplo, das atracagens dos navios.

O sistema HIDRALERTA é totalmente personalizável às necessidades de cada porto e navio e pode ser continuamente otimizado. Cada evento passado serve como uma aprendizagem e os dados registados poderão ser no futuro usados para melhorar os modelos de previsão e ainda para fornecer informações sobre as causas, evolução e frequência de eventos climáticos extremos. Os dados de campo são essenciais para a validação contínua do sistema, pelo é necessário investir e desenvolver ferramentas que permitam a comunicação automática de registos observados no local, por exemplo com a instalação de câmaras de vídeo nos locais de interesse.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Portos dos Açores, SA, ao Governo Regional dos Açores, aos projetos ECOMARPORT (ref: PO INTERREG MAC 2014-2020), BLUESAFEPOR (ref: FA_04_2017_016), To-SEAlert (Ref. PTDC/EAM-OCE/31207/2017) e EW-Coast (Ref. ALG-LISBOA-01-145-FEDER-028657). Agradecem também à Infraestrutura Nacional de Computação Distribuída (INCD) pelo acesso à infraestrutura digital de suporte à investigação.

Referências Bibliográficas

- Belmadani, A.; Dalphinnet, A.; Chauvin, F.; Pilon, R.; Palany, P., 2021 – Projected future changes in tropical cyclone-related wave climate in the North Atlantic, in *Climate Dynamics*. 10.1007/s00382-021-05664-5.
- Coeveld, E.M.; Van Gent, M.R.A.; Pozueta, B., 2005 – Neural Network: Manual NN_OVERTOPPING2. CLASH WP8 – Report.
- Cox, D.; Arikawa, T.; Barbosa, A.; Guannel, G.; Inazu, D.; Kennedy, A.; Li, Y.; Mori, N.; Perry, K.; Prevatt, D.; Roueche, D.; Shimozone, T.; Simpson, C.; Shimakawa, E.; Shimura, T.; Slocum, R., 2019 – Hurricanes Irma and Maria post-event survey in US Virgin Islands, in *Coastal Engineering Journal*, 61:2, 121-134, doi: 10.1080/21664250.2018.1558920.
- 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.; 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 São Roque Do Pico, Azores, *Journal Of Aquatic Ecosystem Health & Management*, Doi: 10.1080/14634988.2020.1807295.
- Knutson, T.R.; McBride, J. L.; Chan, J.; Emanuel, K.; Holland, G.; Landsea, C.; Held, I.; Kossin, J. P.; Srivastava, A. K.; Sugi, M., 2010 – Tropical Cyclones And Climate Change, In *Nature Geoscience*. Doi:10.1038/Ngeo779.
- Korsemeier, F.T.; Lee, C.-H.; Newman, J.N.; Sclavounos, P.D., 1988 – The Analysis Of Wave Effects On Tension-Leg Platforms. Proc. 7th International Conference On Offshore Mechanics And Arctic Engineering, Houston, Texas, Pp. 1-14pp.
- Mori, N.; T. Takemi., 2016 – Impact Assessment Of Coastal Hazards Due To Future Changes Of



- Tropical Cyclones In The North Pacific Ocean, In Weather And Climate Extremes 11: 53–69. Doi:10.1016/J.Wace.2015.09.002.
- Noaa., 2018 – Global Warming And Hurricanes. Accessed October 2018. <https://www.gfdl.noaa.gov/global-warming-and-hurricanes/>.
- Persson, A., 2001 – User Guide To Ecmwf Forecast Products. Meteorological Bulletin M3.2, Ecmwf, August, 115p.
- Pinheiro, L.; Fortes, C.J.E.M.; Reis, M.T.; Santos, J.; Soares, C.G., 2020 – Risk Forecast System For Moored Ships. *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 Harbour Areas: Development of a Model and Risk Assessment.” Dissertação submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, IST-UNL.
- 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, and Ocean Engineering*.
- Rodrigues, J.; Fortes, C.J.E.M.; Reis, M.T.; Poseiro, P.; Taveira-Pinto, F., 2017 – O Porto de Ponta Delgada, S. Miguel, Açores: Avaliação das consequências de galgamento pelo método AHP. *Revista Territorium* 24 (abril), pp. 127-139. DOI: https://doi.org/10.14195/1647-7723_24_9.
- Santos, M.I.; Pinheiro, L.; Fortes, C.J.E.M.; Reis, M.T.; Serrazina, V.; E.B.; Salvador, M.; Reis, F.V.; Salvador, M., 2020 – Simulation of hurricane Lorenzo at the port of Madalena do Pico, Azores, by using the HIDRALERTA system. *MARTECH 2020 5th International Conference on Maritime Technology and Engineering*. Lisbon 16-19 novembro.
- Swan Team, 2006 – Swan User Manual version 40.51, Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft university of Technology, Delft, The Netherlands, 111 pp.
- Takayabu, I.; Hibino, K.; Sasaki, H.; Shiogama, H.; Mori, N.; Shibutani, Y.; Takemi, T., 2015 – Climate Change Effects on the Worst-Case Storm Surge: A Case Study of Typhoon Haiyan, in *Environmental Research Letters* 10 (6): 064011. doi:10.1088/1748-326/10/6/064011.
- Zelinsky D. A., 2019 – National Hurricane Center Tropical Cyclone Report: Hurricane Lorenzo (AL132019). NOAA/NWS, 22 pp., www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL132016_Lorenzo.pdf.
- Zózimo, A.C.; Fortes, C.J.E.M.; Pinheiro, L.; Smithers, N.; Serrazina, V.; Reis, M.T. 2021a. Protótipo do To-Sealert para o Porto da Ericeira, in *Revista Recursos Hídricos*, Volume 41, Nº 2, dezembro/março, 21-36pp (2021). DOI:10.5894/rh41n2-cti2. ISSN 0870-1741. Editora: APRH
- Zózimo, A.C.; Ferreira, A.M.; Pinheiro, L.V.; Fortes, C.J.E.M.; Baliko, M., 2021b – Implementação do sistema HIDRALERTA para a zona costeira da Costa da Caparica. *X Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Rio de Janeiro, Brasil.