

ARTIGO Nº 19057

PROJETO BSAFE4SEA - CONTROLO DA SEGURANÇA DE QUEBRAMARES ATRAVÉS DA ANÁLISE DE UM SISTEMA DE PREVISÃO E APOIO À DECISÃO - METODOLOGIA E RESULTADOS

Ana Mendonça^{1(*)}, C.J.E.M. Fortes¹, M.G. Neves¹, J.A. Santos², R. Capitão¹, L. Pinheiro¹, R. Lemos¹, U. Andriolo³, F. Soares⁴, M.J. Henriques¹, M.T. Reis¹

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC/DHA), Lisboa, Portugal

²IPL/ISEL) e IST/CENITEC), Lisboa, Portugal

³Universidade de Coimbra e Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Coimbra, Portugal

⁴Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL/DEGGE), Lisboa, Portugal

(*)Email: amendonca@lnec.pt

RESUMO

Neste trabalho apresenta-se o projeto BSafe4Sea - Controlo da Segurança de Quebra-mares através da Análise de um Sistema de Previsão e Apoio à Decisão, que tem como objetivos o desenvolvimento, a aplicação e o teste de metodologias de previsão do comportamento estrutural de quebra-mares de talude. Estas metodologias formarão a base de um sistema inovador de apoio à decisão para o planeamento e priorização de trabalhos de manutenção e reparação, aumentando, assim, a segurança, funcionalidade e resiliência destes quebra-mares. Apresentam-se as atividades do projeto – medições de campo, modelação física 2D e 3D dos quebra-mares de talude, modelação numérica da evolução do dano no manto de proteção e da resposta da superestrutura e desenvolvimento do sistema de previsão e apoio à decisão – a respetiva metodologia, os casos de estudo e os principais resultados obtidos até à data.

Palavras-chave: BSafe4Sea, quebra-mares de talude, dano, previsão, apoio à decisão.

INTRODUÇÃO

Os portos e respetivos quebra-mares de proteção são infraestruturas críticas para a economia global. A principal função de um quebra-mar é abrigar navios e outras embarcações atracados dentro de um porto, garantindo que a navegação e as operações de carga/descarga são realizadas em condições de segurança. A construção de um quebra-mar de talude (QMT) envolve um investimento de capital significativo e, uma vez que esta estrutura está constantemente a ser solicitada pela ação das ondas, a ocorrência de danos é bastante comum. A principal vantagem de um QMT sobre outras formas de proteção é que a sua falha é geralmente progressiva, o que permite programar atempadamente a realização de obras de manutenção/reparação se o dano não for excessivo. Assim, é essencial identificar o dano numa fase inicial, evitando que atrasos na sua previsão e deteção tenham consequências importantes na segurança estrutural e funcional do QMT.

Neste contexto, o desenvolvimento de um sistema de previsão dos danos em QMT e de apoio à decisão relativamente a obras de manutenção/reparação é muito pertinente, dadas as condições ambientais extremas a que os quebra-mares estão sujeitos, as quais poderão ainda agravar-se devido às alterações climáticas. A conservação destas estruturas, através da adoção de medidas mitigadoras atempadas em resultado de alertas precoces, reduzirá custos de manutenção e perdas económicas por interrupções portuárias.

O projeto de investigação BSafe4Sea - Controlo da Segurança de Quebra-mares através da Análise de um Sistema de Previsão e Apoio à Decisão, iniciado em janeiro de 2019, pretende estabelecer técnicas de medição de campo e procedimentos para prever o comportamento de QMT sob a ação das ondas, necessários para um sistema eficaz e robusto.

Nesta comunicação, descreve-se o projeto BSafe4Sea, apresentando-se os seus objetivos, as atividades e respetivas metodologias de trabalho, os casos de estudo e os principais desenvolvimentos efetuados até ao momento.

PROJETO BSafe4Sea

O projeto BSafe4Sea (<https://bsafe4sea.lnec.pt>) visa o desenvolvimento, a aplicação e o teste de metodologias de previsão do comportamento estrutural de QMT, que serão a base de um sistema WebSIG inovador de apoio à decisão para o planeamento e a priorização de trabalhos de manutenção e reparação, aumentando, assim, a segurança, funcionalidade e resiliência destas obras. Este sistema é urgente devido às condições extremas a que os quebra-mares estão sujeitos, incluindo os efeitos das alterações climáticas, e à sua relevância para as modernas redes de transporte de mercadorias e passageiros. O sistema pode ser usado pelas autoridades responsáveis pela monitorização, prevenção e gestão de situações de emergência (DGRM, Docapesca, APA, Proteção Civil, etc.).

O novo sistema baseia-se na utilização de fotografias aéreas obtidas com veículos aéreos não tripulados (VANT, ou vulgarmente designados por *drones*), de vídeo e de posicionamento via satélite (GNSS), juntamente com a avaliação probabilística do comportamento dos quebra-mares baseada em modelos físicos e numéricos, para identificar alterações no manto e na superestrutura dos quebra-mares (Figura 1). Analisa-se a aplicabilidade, tanto no protótipo, como em modelo físico, de diferentes técnicas recentemente desenvolvidas para determinar a combinação mais eficaz e económica para analisar o estado dos quebra-mares. O sistema de previsão e apoio à decisão (incluindo alertas precoces) foi por seu turno aplicado aos casos de estudo dos portos da Ericeira e de Peniche.



Fig. 1 – Metodologia do projeto: integração de dados de monitorização com resultados de modelação física e numérica.

O projeto contribui ainda para o conhecimento do comportamento hidráulico-estrutural de quebra-mares de talude, incluindo em cenários de alterações climáticas, tendo por base a integração de medições em protótipo e resultados de modelação física e numérica (Fig). Tal

permite o desenvolvimento e teste de novos modelos empíricos (e a comparação com existentes) de previsão: da erosão em mantos com blocos artificiais de betão; e das forças induzidas pelas ondas na superestrutura. Estes modelos serão implementados no novo sistema de previsão do comportamento de quebra-mares de talude e de apoio à decisão.

São sete as atividades do projeto. A Figura 2 indica a forma como essas atividades estão interligadas e as entidades envolvidas em cada uma delas. Como se pode verificar, foi reunida uma equipa multidisciplinar, com competências em cinco áreas:

- Monitorização de obras de engenharia;
- Utilização de fotogrametria e técnicas de vídeo;
- Controlo da segurança de quebra-mares de talude através de metodologias clássicas;
- Análise de situações de colapso de quebra-mares de talude;
- Desenvolvimento de sistemas de previsão e alerta (ex., sistema HIDRALERTA; Poseiro, 2019).

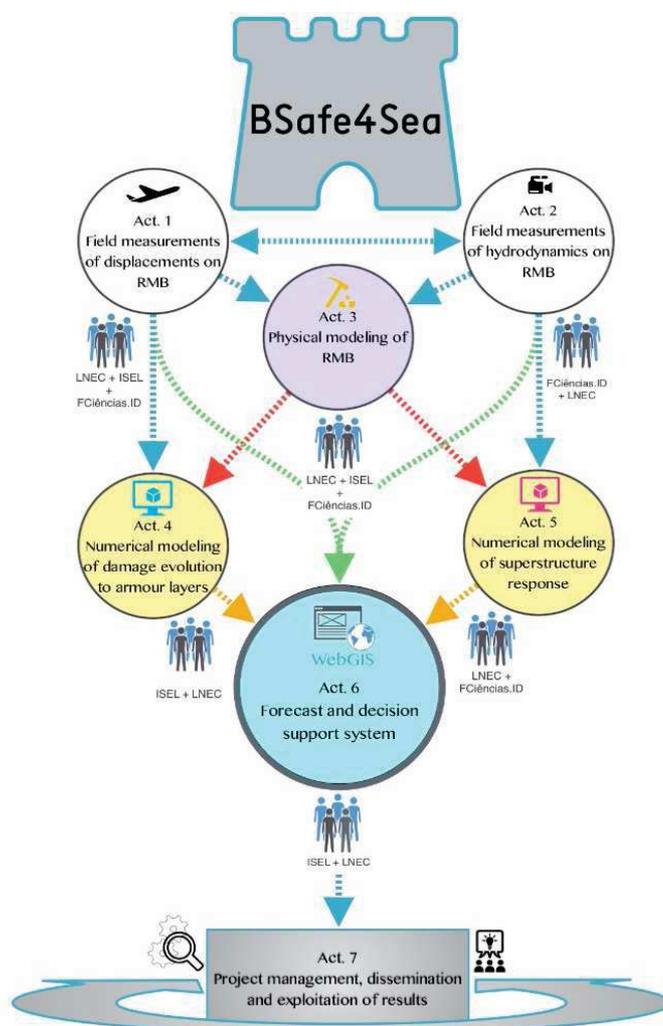


Fig. 2 – Esquema do projeto: atividades, interligação entre elas e entidades envolvidas no seu desenvolvimento.

A inovação deste projeto resulta essencialmente dos seguintes aspetos:

- Aplicação de métodos de monitorização de alta precisão a QMT, permitindo uma avaliação quantitativa do estado da estrutura. A prática comum em Portugal baseia-se na observação visual, originando apenas uma caracterização qualitativa do estado do QMT;

- Avaliação dos métodos de monitorização para definir os mais adequados, quer *in situ* (protótipo), quer em laboratório (modelo);
- Novos modelos para a evolução do dano no talude de quebra-mares com blocos de betão artificiais (tetrápodos e cubos Antifer);
- Validação de um modelo numérico RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), Losada *et al.* (2008), quer na modelação física das forças dinâmicas em superestruturas devido à ação da onda, quer na modelação em protótipo;
- Desenvolvimento de dois protótipos do sistema de previsão e apoio à decisão, testados e implementados nos portos da Ericeira e de Peniche.

CASOS DE ESTUDO

Os casos de estudo do sistema são o quebra-mar do porto da Ericeira (Figura 3) e o quebra-mar oeste do porto de Peniche (Figura 4), obras marítimas constituídas por distintas superestruturas e diferentes tipos de blocos do manto (combinação de tetrápodos/cubos Antifer e tetrápodos, respetivamente). Estes portos apresentam um enquadramento socioeconómico diferenciado, sendo o porto da Ericeira um pequeno porto de pesca inserido numa zona de grandes interesses piscatório e turístico (devido ao fenómeno do surf), enquanto o porto de Peniche, o mais ocidental da Europa continental, é um grande porto de pesca, dos maiores a nível nacional.

O porto da Ericeira situa-se entre o cabo da Roca e o cabo Carvoeiro e tem como objetivo principal o abrigo a uma pequena frota de pesca artesanal. Com reduzidas dimensões, é constituído por um único quebra-mar, que também funciona como cais de acostagem, e por uma rampa varadouro, Figura 3. Este quebra-mar tem tido uma existência atribulada, dadas as frequentes necessidades de reabilitação, destacando-se a reconstrução em 2011 e as mais recentes obras de reabilitação na zona da cabeça em 2018 e 2019.



Fig. 3 – Quebra-mar do porto da Ericeira.

O porto de Peniche teve a sua origem, nos finais do século XIX, numa bacia abrigada por uma obra artificial, então designada por Portinho do Revés. Ao longo de mais de um século, este porto foi evoluindo até chegar à forma atual, Figura 4, resultante, nomeadamente, da construção de dois quebra-mares, o quebra-mar este (ou sul) e o quebra-mar oeste (ou norte). Este último, será considerado como caso de estudo neste trabalho.

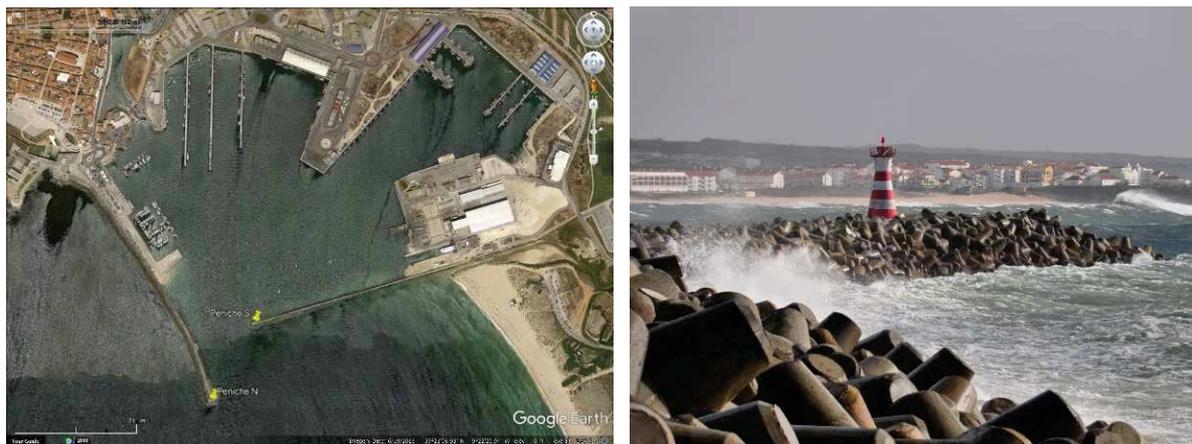


Fig. 4 – Quebra-mar oeste do porto de Peniche.

DESENVOLVIMENTOS RECENTES

O projeto Bsafe4Sea está dividido em seis atividades técnicas, para além da última atividade, de gestão do projeto e disseminação/exploração dos resultados. Descrevem-se, em seguida, os principais resultados obtidos até à data em cada uma destas atividades.

Atividade 1 – Medições no protótipo de deslocamentos em QMT - Destinam-se a detetar alterações: a) no talude e na superestrutura, usando técnicas fotogramétricas (Henriques *et al.*, 2019); b) num bloco de betão da superestrutura, por métodos topográficos (nivelamento trigonométrico).

Para obter dados para o primeiro método (técnicas fotogramétricas) foram realizados levantamentos aéreos com drone no quebra-mar de Peniche em 2019 e 2020, precedidos da marcação e coordenação de pontos de apoio. O processamento dos dados resultou na geração de nuvens de pontos, Figura 5a, de modelos numéricos de superfície, Figura 5b, e do ortomosaico. Relativamente ao segundo método (nivelamento trigonométrico), foram determinadas altitudes dos pontos nivelados num dos blocos de betão da superestrutura, Figura 6. A comparação destes produtos permitiu avaliar as diferenças no talude e superestrutura entre os dois anos de observações (2019-2020). Mais concretamente, a comparação entre modelos numéricos de superfície permitiu detetar os movimentos dos blocos do talude, Figura 5b, enquanto que a comparação entre resultados de nivelamento trigonométrico de pontos situados num bloco da superestrutura permitiu medir assentamentos, Figura 6.

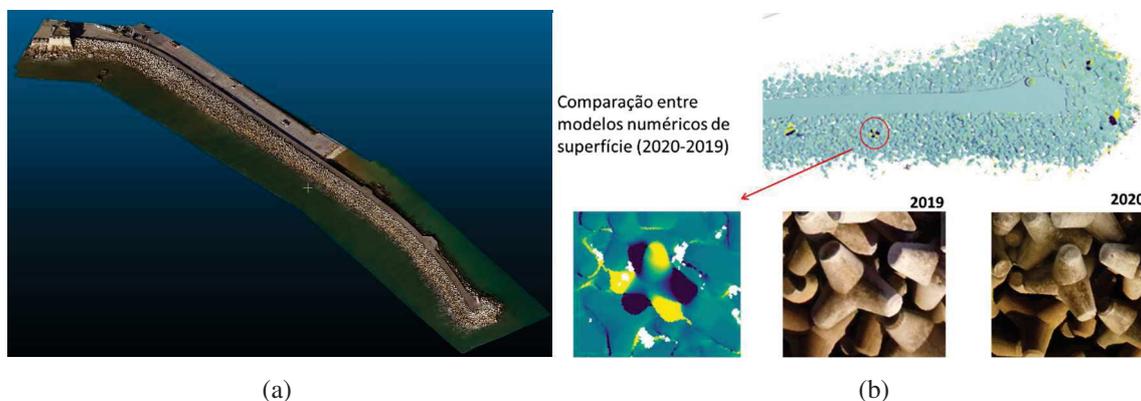


Fig. 5 – Quebra-mar de Peniche: (a) Nuvem de pontos; (b) Comparação dos modelos numéricos de superfície (2019 e 2020).

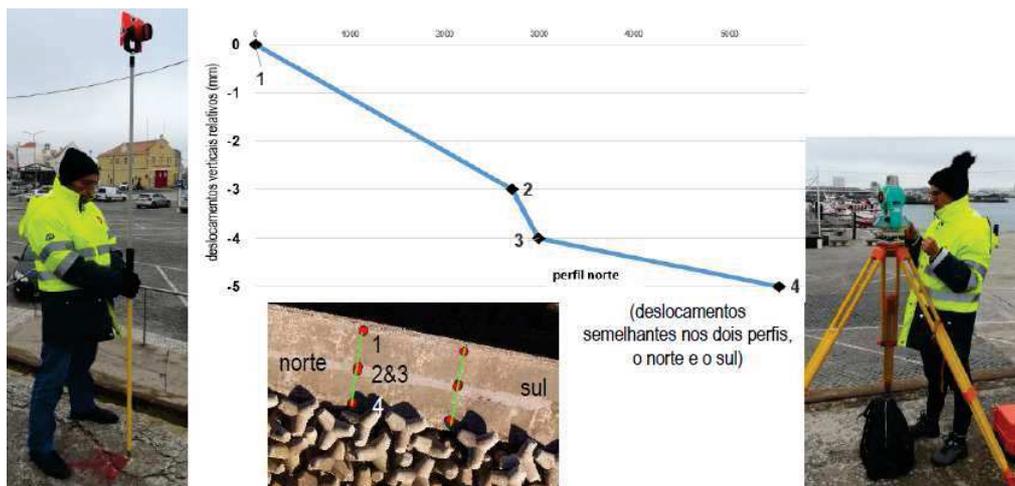


Fig. 6 – Quebra-mar de Peniche. Realização do nivelamento trigonométrico de pontos situados num bloco da superestrutura e resultados obtidos (assentamentos).

Atividade 2 – Medições no protótipo da hidrodinâmica em QMT - São efetuadas com recurso à aplicação de técnicas de vídeo para monitorização e medição da celeridade da onda e do espreamento, o que permite a obtenção de dados em tempo real e a construção de longas séries de dados para apoiar a calibração e a validação de modelos numéricos e fórmulas empíricas.

Com esse propósito, foram instaladas na Ericeira e em Peniche câmaras IP (*Internet Protocol*) que se encontram a adquirir imagens desde, respetivamente, outubro de 2021 e outubro de 2020. As imagens adquiridas permitem a validação do sistema de previsão e apoio à decisão, incluindo os alertas. O acesso remoto aos sistemas de vídeo-monitorização foi instalado inicialmente em Peniche e só mais recentemente na Ericeira. Este acesso é possível através de equipamento de comunicação 4G e respetivo acesso sem fios ao computador a que está ligada a câmara de vídeo (Figura 7). Foram também intensificadas as visitas ao porto da Ericeira, durante eventos identificados pelo sistema HIDRALERTA (Poseiro, 2019) como causadores de galgamentos. Presentemente, os dados recolhidos têm sido utilizados para a validação qualitativa, não sistemática, dos alertas do sistema para este local de estudo.

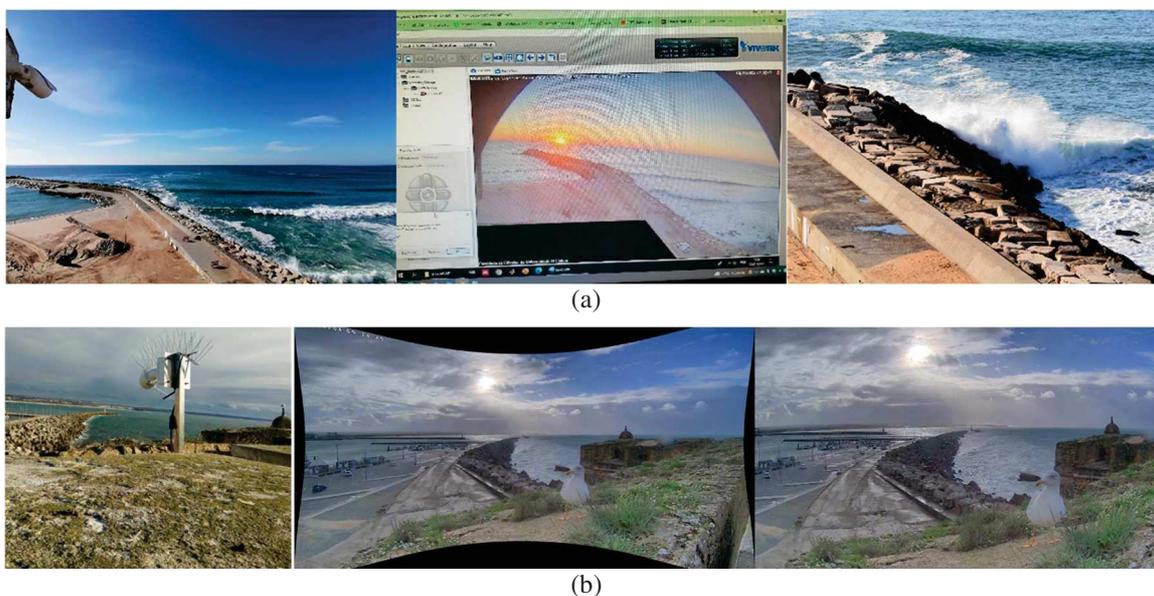


Fig. 7 – Sistema de vídeo-monitorização de acesso remoto: a) no porto da Ericeira; b) no porto de Peniche.

O tratamento de imagens de Peniche permitiu a produção de imagens georretificadas (Figura 8), para as quais é possível obter medições de parâmetros de onda com precisão. Das séries temporais de imagens georretificadas, foram produzidas as imagens Timestacks (Andriolo, 2019), que são imagens tempo-espaço que permitem medir o espraioamento na estrutura (Figura 9, esquerda) e estimar a celeridade das ondas (Figura 9, direita).



Fig. 8 – Porto de Peniche. Imagens não distorcidas (esq.) e georretificadas (dir.) para estudos hidrodinâmicos quantitativos.

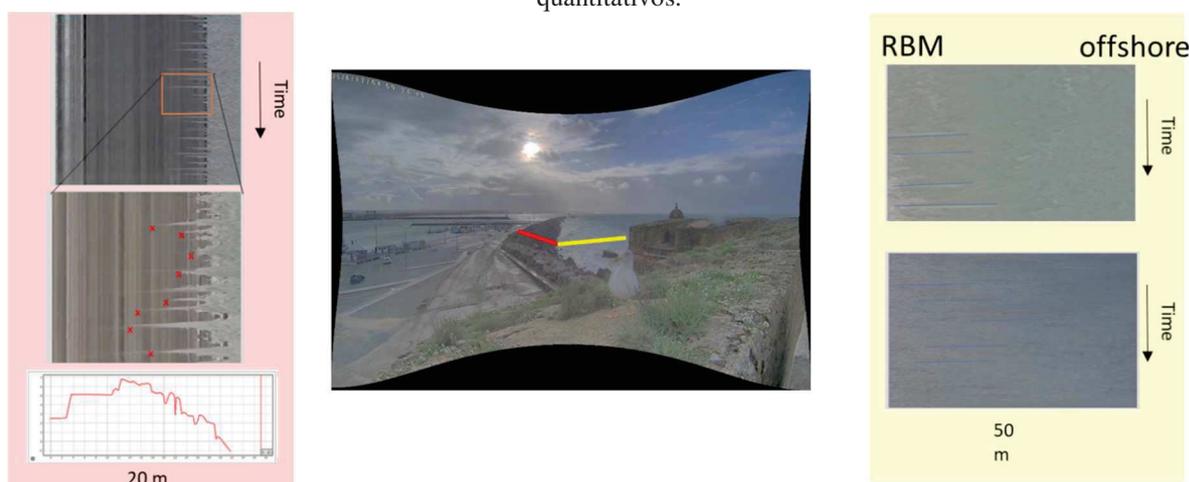


Fig. 9 – Porto de Peniche. Imagens Timestacks para o estudo do espraioamento no QMT (esq.) e para o estudo da celeridade das ondas (dir.). A imagem central indica os perfis utilizados na produção das imagens Timestacks: a linha vermelha à esquerda, identifica o perfil para o estudo do espraioamento e a linha amarela à direita o perfil para o cálculo da celeridade das ondas.

Atividade 3 - Modelação Física de QMT - A realização de ensaios em modelo físico reduzido pretende determinar a resposta de secções típicas dos QMT a um conjunto de estados de agitação, incluindo cenários de alterações climáticas.

Assim, foram realizados ensaios bidimensionais (2D) de agitação, de estabilidade dos mantos de proteção, de espraioamento, de galgamento e de pressões na superestrutura para uma secção transversal de cada quebra-mar em estudo, Ericeira e Peniche, Santos *et al.* (2021) e Mendonça *et al.* (2021).

Para a secção em estudo de cada quebra-mar e para várias condições extremas de agitação marítima, incluindo cenários de alterações climáticas, os objetivos dos ensaios foram:

- i) Obtenção de medições das características da agitação marítima ao longo do canal de ensaios e no pé da obra;
- ii) Determinação do espraioamento e do galgamento;

- iii) Avaliação das pressões na superestrutura;
- iv) Avaliação da evolução do dano no manto resistente;
- v) Avaliação do desempenho de várias técnicas de medição (espraiamento, galgamento, deslocamento de blocos).

Os dados obtidos de elevação da superfície livre, espraiamento, galgamento e pressões são utilizados para a calibração e a validação de modelos numéricos e fórmulas empíricas (Atividades 4 e 5).

Os ensaios em modelo físico 2D de ambos os quebra-mares foram realizados num canal de ondas irregulares do LNEC (Figura 10a), tendo sido implementado um perfil da secção do cais acostável do quebra-mar do porto da Ericeira (Figura 10b e Figura 10d) e um perfil de uma secção do tronco do quebra-mar do porto de Peniche (Figura 10c e Figura 10e).

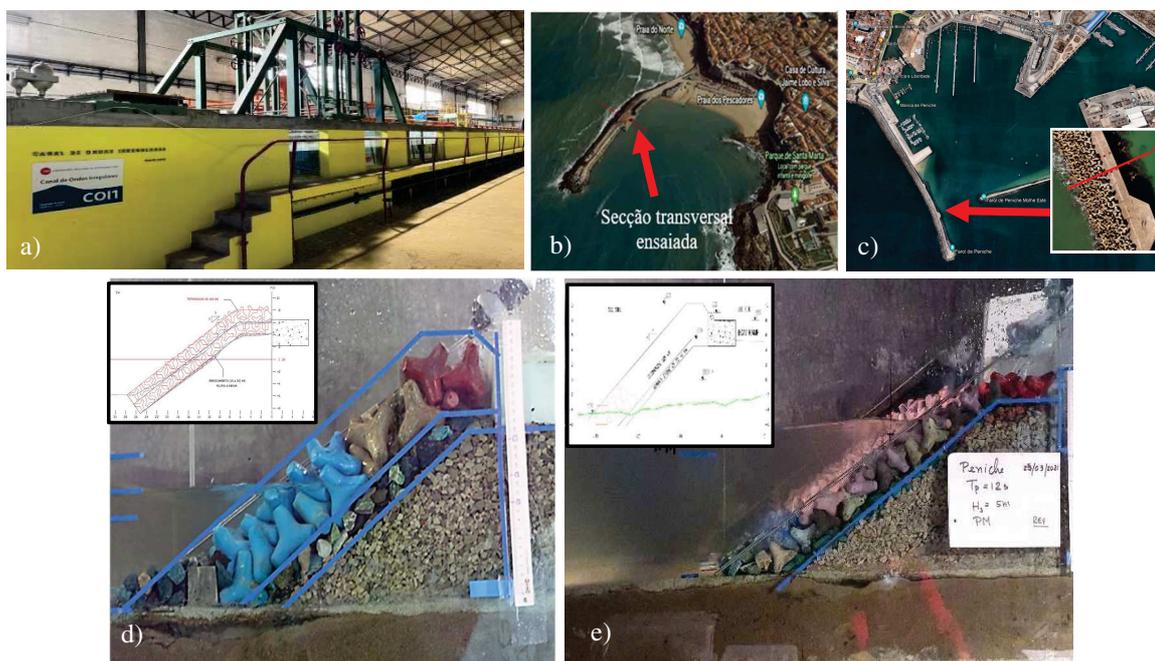


Fig.10 – a) Canal de ensaios em modelo físico; b e c) localização das secções ensaiadas, correspondentes aos cais acostáveis do QMT da Ericeira (b) e ao tronco do QMT de Peniche (c); d e e) perfis transversais ensaiados das secções dos QMT da Ericeira (d) e de Peniche (e).

Os modelos físicos foram construídos e explorados de acordo com a lei de semelhança de Froude, à escala geométrica de 1:50. Os ensaios foram realizados com períodos de pico da agitação (T_p) de 12 s, 14 s e 16 s (este último só para o QMT da Ericeira), associados a diferentes alturas de onda significativa (H_s) e a três níveis de maré (Figura 10e): preia-mar (PM), baixa-mar (BM) e nível médio (NM).

Foram efetuadas medições da elevação da superfície livre para determinação da agitação marítima gerada (sondas B1 e B2) e da sua propagação ao longo do canal (sondas S1 a S5, Figura 11a). Para a medição do espraiamento, utilizou-se uma sonda (S7, Figura 11b) e uma câmara de filmar. Fez-se a comparação de resultados de ambas as metodologias para avaliar o seu desempenho e verificou-se que o uso de técnicas de vídeo é uma alternativa bastante eficaz, desde que o vídeo seja efetuado em boas condições de luz artificial.

Quanto ao galgamento, foram identificadas as respetivas ocorrências (sonda S8, Figura 11b) e foram efetuadas medições através de duas técnicas (para permitir a confirmação dos resultados obtidos): a pesagem da água galgada (com uma balança digital) e a medição através de uma

sonda (sonda S6, Figura 11c) do nível de água dentro do reservatório para recolha da água proveniente dos galgamentos. Neste caso, os dois métodos são concordantes quando os galgamentos são pequenos, i.e., não exigem descargas intermédias da água galgada e acumulada no reservatório. O mesmo já não se passa no caso de galgamentos significativos, com descargas intermédias do reservatório, para os quais a sonda origina um sinal com ruído considerável.

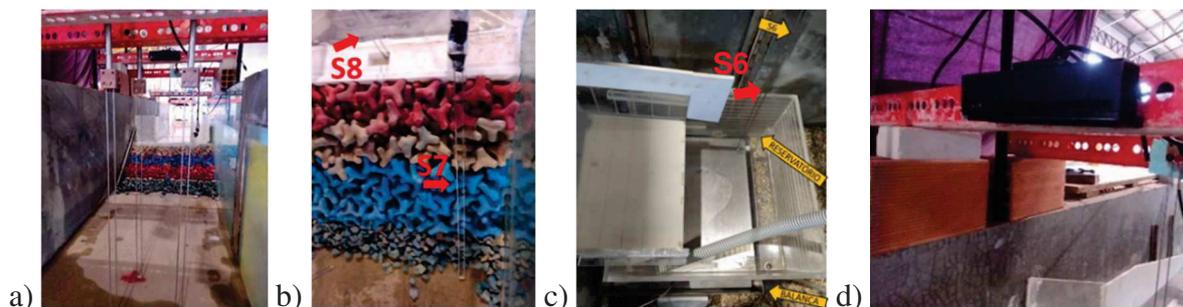


Fig. 11 – a) Sondas de medição da superfície livre (S3 a S5); b) Sondas de espraio (S7) e de galgamento (S8); c) Descarregador, reservatório para galgamentos e sonda para medir o nível de água no reservatório (S6); d) Sensor de posição Kinect.

Na Figura 12 apresentam-se alguns resultados do espraio, galgamento e pressões obtidos durante os ensaios de ambos os casos de estudo (Fortes et al., 2021; Mendonça et al., 2021; Santos et al., 2021).

No caso do quebra-mar da Ericeira, Figura 12a) apresenta $Ru_{2\%}$ (valor de espraio excedido apenas por 2% das ondas que atingem a estrutura) para o nível de preia-mar em função do número de Iribarren ($\xi_{m0} = \tan(\alpha)/(H_{m0}/L_{m0})^{1/2}$, em que α é a inclinação do talude do quebra-mar relativamente à horizontal, H_{m0} é a altura de onda significativa espectral ($H_{m0} \sim H_s$) e L_{m0} é o comprimento de onda, sendo $L_{m0} = g(T_m)^2/(2\pi)$, g a aceleração da gravidade e T_m o período médio). Esta figura confirma que, para o mesmo valor do período de pico do estado de agitação (T_p), ocorre um aumento do valor de $Ru_{2\%}$ com o aumento de H_{m0} incidente no quebra-mar. Verifica-se ainda que a um aumento do valor de T_p corresponde também um aumento do valor característico do espraio, sendo também claro que tal aumento está limitado ao desnível entre o coroamento da estrutura e o nível de repouso, ou seja, ao bordo livre ($R_c = 0.12$ m).

Na Figura 12b) apresenta-se o caudal relativo, q , em função de $(g(H_{m0})^3)^{0.5}$ para o nível de preia-mar. Verifica-se que os resultados para $T_p = 12$ s são muito pequenos em comparação com os resultados para $T_p = 14$ s e $T_p = 16$ s, não se apresentando, assim, na mesma curva exponencial. Como seria expectável, para o mesmo nível de água, q aumenta com o aumento de H_{m0} e de T_p . Apesar da existência de galgamento, observa-se que os valores de $Ru_{2\%}$ não atingem a cota correspondente ao bordo livre, Figura 12a. Este facto deve-se a que apenas as ondas correspondentes ao espraio máximo, R_{max} , atingem o coroamento e eventualmente originam galgamento.

Na Figura 12e, para $H_s = 5$ m, $T_p = 12$ s e nível de preia-mar, verifica-se que as pressões na parede frontal da superestrutura da Ericeira são superiores às pressões na base da superestrutura, com máximos de pressão de 0.20 mca na parede frontal e de 0.15 mca na base, onde P_{max} corresponde à pressão máxima (positiva) e $P_{1/x}$ corresponde à média dos $1/x \cdot n$ valores mais altos do registo de pressões, sendo n o número total de valores do registo.

Relativamente ao quebra-mar do porto de Peniche, pode-se concluir da Figura 12c) que os valores de $Ru_{2\%}$ para o nível médio também crescem com o aumento de H_{m0} , não se notando uma

diferença significativa nos valores de $Ru2\%$ correspondentes a $Tp=12$ s e $Tp=14$ s, embora estes últimos sejam ligeiramente superiores. Os valores de $Ru2\%$ são sempre inferiores ao bordo livre, Rc . Neste caso, a existência de galgamento deve-se ao facto de R_{max} ser da ordem de grandeza de Rc (cerca de 6 m).

Quanto aos galgamentos para o nível médio (Figura 12d), verifica-se que os valores de volume galgado crescem com o aumento da altura de onda. Não há uma diferença muito significativa nos valores dos volumes galgados correspondentes a $Tp=12$ s e $Tp=14$ s.

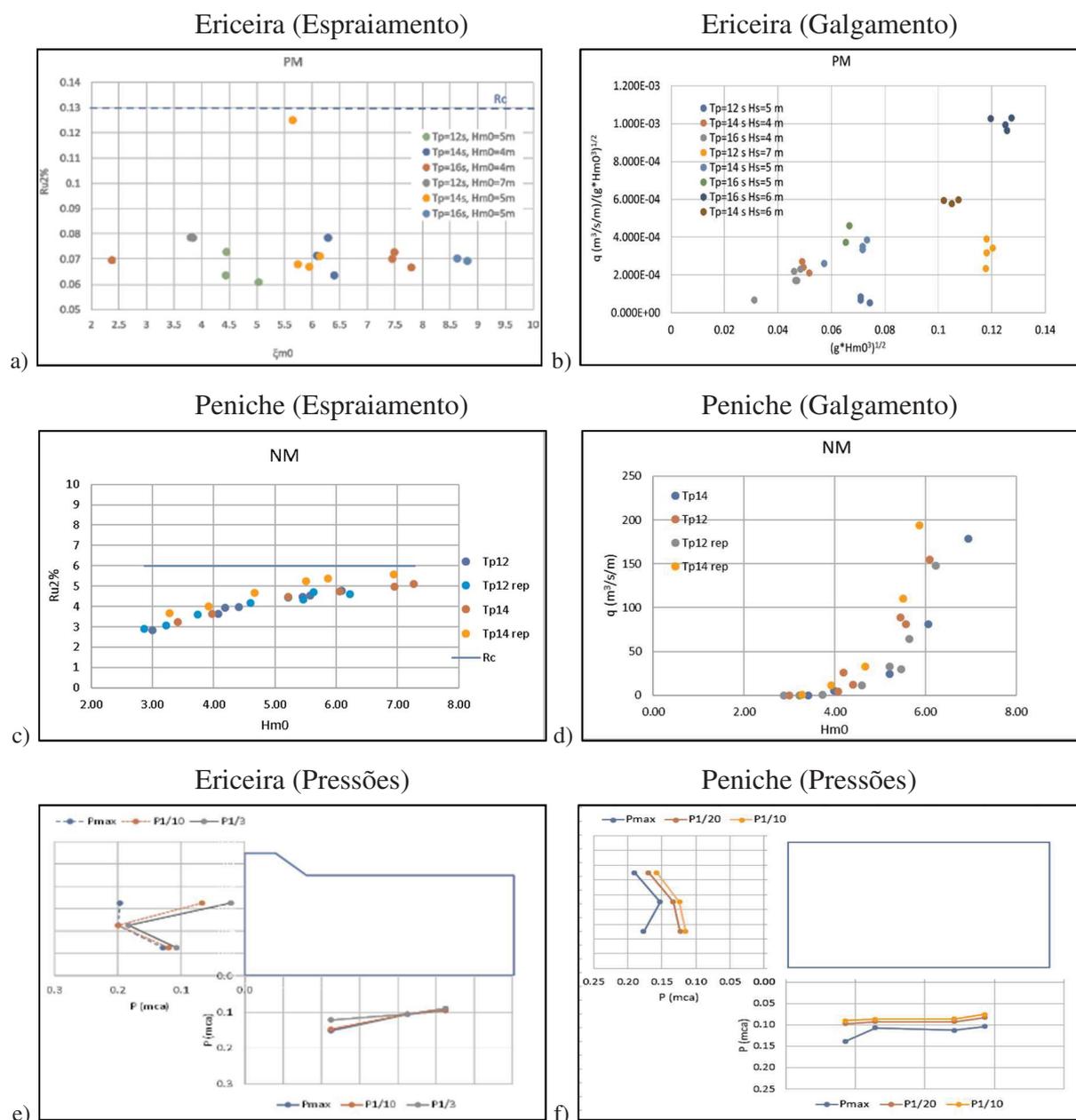


Fig. 12 – Resultados de ensaios. Ericeira: a) Espraiamento e b) Galgamento ($Tp=12$ s, 14 s e 16 s, PM); Peniche: c) Espraiamento e d) Galgamento ($Tp=12$ s e 14 s, NM); Pressões ($Hs=5$ m, $Tp=12$ s, PM): e) Ericeira e f) Peniche.

As pressões na parede frontal da superestrutura do quebra-mar de Peniche para $Hs=5$ m, $Tp=12$ s e nível de preia-mar, tal como no quebra-mar da Ericeira, são superiores às pressões na base da superestrutura, com máximos de pressão semelhantes aos da Ericeira, Figura 12f.

A avaliação do dano nos mantos resistentes dos quebra-mares foi feita a partir do volume erodido, o qual foi obtido através de levantamentos tridimensionais da envolvente do manto, recorrendo ao sensor de posição Kinect (Figura 11d). Foram realizados levantamentos no início das séries de ensaios, antes da atuação das condições de agitação e após a atuação de cada altura de onda. Na Figura 13 apresentam-se, para ambos os casos de estudo, os levantamentos efetuados com o sensor Kinect no início e no final da série de ensaios com $H_s=8.5$ m, $T_p=14$ s e preia-mar, bem como o mapa de diferenças respetivo entre as duas nuvens de pontos, Lemos *et al.* (2021, 2022).

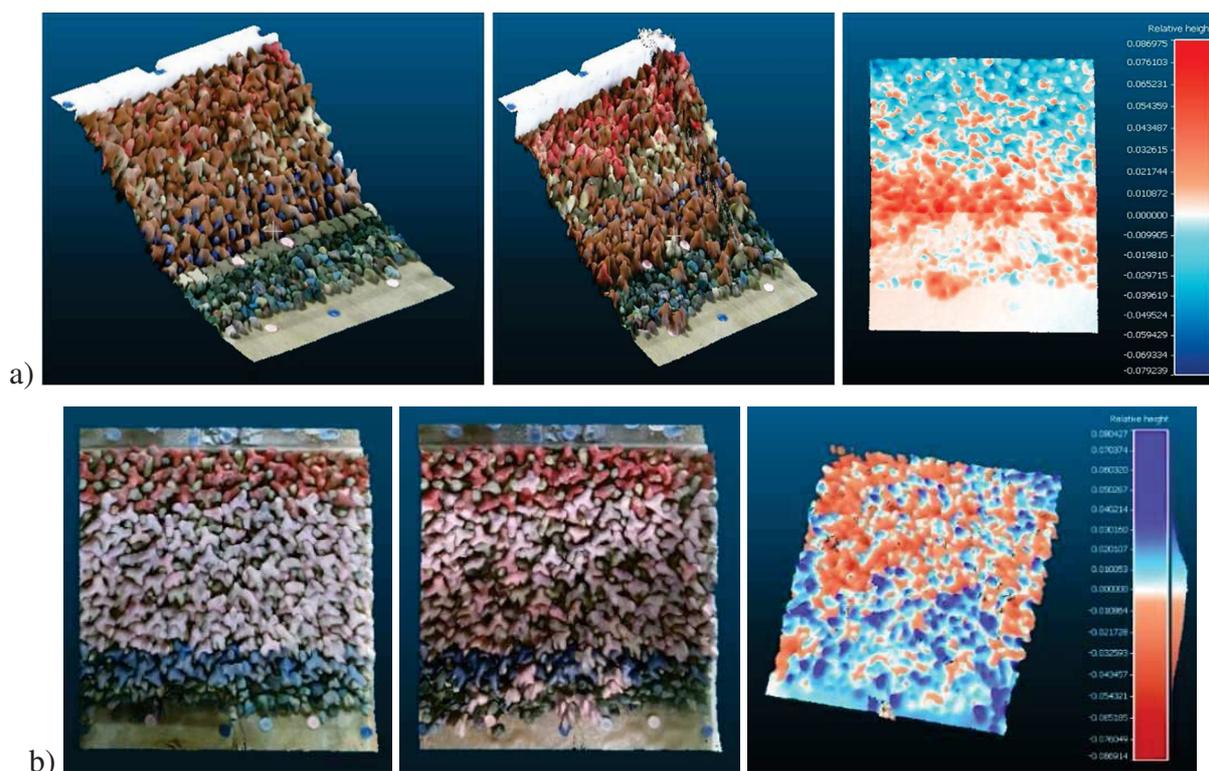


Fig. 13 – Aspeto de levantamentos realizados com o sensor Kinect no início e no final da série de ensaio com $H_s=8.5$ m, $T_p=14$ s e nível de preia-mar e mapa de diferenças (valores negativos: erosão; valores positivos: depósito): a) Ericeira; b) Peniche.

No que diz respeito à estabilidade do manto resistente do porto da Ericeira, no final da série de ensaios foi calculado um volume erodido de, aproximadamente, 0.005 m^3 , enquanto no caso do porto de Peniche, este valor foi de 0.0037 m^3 .

Para a avaliação de diferentes técnicas de medição do espriamento, iniciou-se o tratamento das imagens vídeo dos ensaios para análise do espriamento de forma automática.

Durante os ensaios relativos ao quebra-mar do porto de Peniche, iniciou-se o tratamento das imagens vídeo para análise do espriamento. Foi utilizada uma câmara de vídeo comercial (Samsung Digital Camcorder HMX Q10BP) que filmou a sequência de imagens durante o ensaio com uma frequência de 50 frames/s. Foi considerado o ensaio correspondente ao nível de baixa-mar, $H_s=8$ m e $T_p=12$ s.

Com a ajuda do programa MATLAB de Andriolo *et al.* (2016), é possível transformar os valores de pixels para centímetros e obter os valores de espriamento.

Com base nessa série temporal, foi depois efetuado o cálculo de R_{max} , R_{min} (linha tracejada rosa), $R_{u2\%}$ (linha tracejada preta) e R_{med} (linha tracejada verde), além do nível do próprio

perfil (linha tracejada azul), Figura 14a. Os valores do espraioamento em centímetros ao longo da sonda colocada no talude foi, portanto, projetada no perfil da estrutura, Figura 14b, Fortes *et al.* (2022).

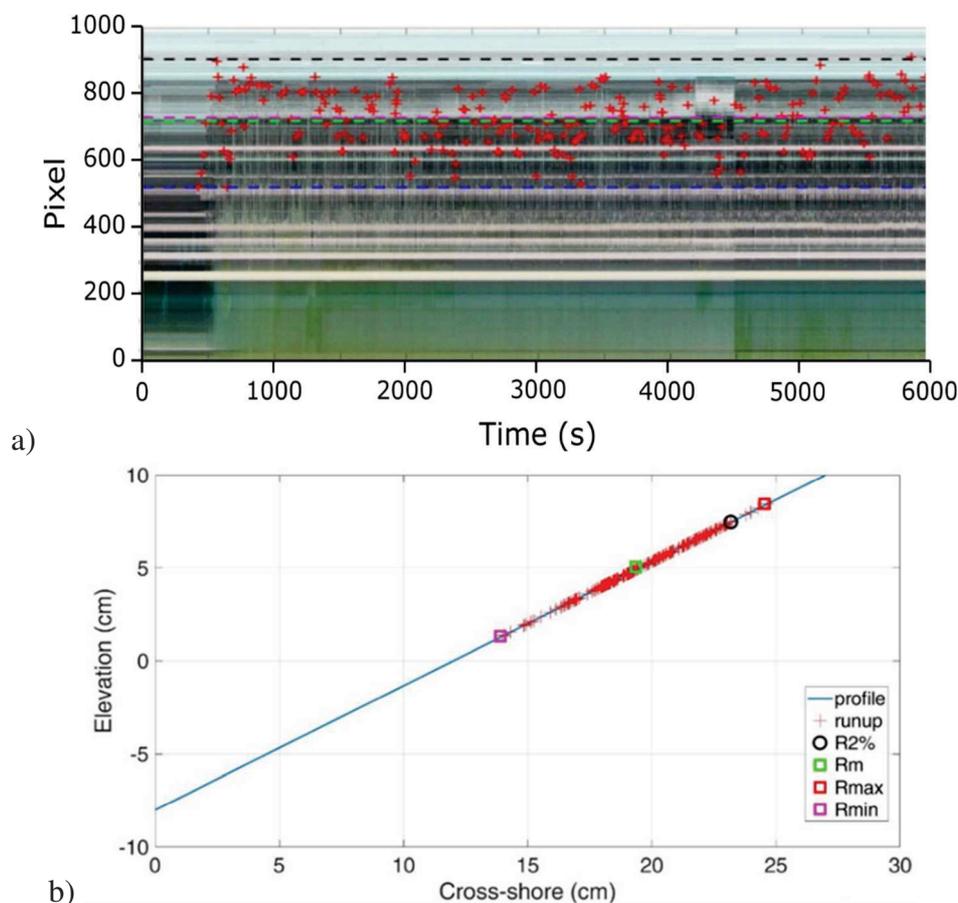
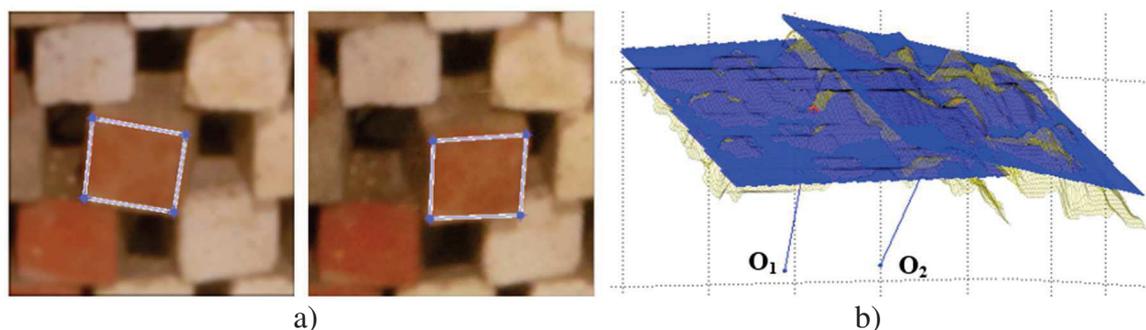


Fig. 14 – Porto de Peniche. Resultados correspondentes ao nível de baixa-mar, $H_s=8$ m e $T_p=12$ s: a) Identificação dos pontos relativos aos valores de espraioamento (cruzes vermelhas), R_{min} (linha tracejada rosa), $R_{u2\%}$ (linha tracejada preta) e R_{med} (linha tracejada verde); b) Identificação dos pontos no talude relativos a R_{max} , R_{min} , $R_{u2\%}$ e R_{med} .

Nos ensaios de estabilidade dos blocos, um dos objetivos é a determinação dos seus deslocamentos por ação das ondas incidentes. As séries temporais de nuvens de pontos 3D são a ferramenta de eleição usada para detetar as regiões da superfície do modelo onde ocorrem os movimentos. No entanto, o movimento efetivo de um bloco, dado pelo deslocamento do seu centro geométrico, dificilmente pode ser obtido por análise comparativa de nuvens 3D. A proposta de resolução baseia-se na seleção de pontos 3D, com recurso à informação visual de uma imagem digital, como princípio chave para a estimativa da localização espacial do centro geométrico dos blocos.

Para tal, foi desenvolvida uma metodologia Soares *et al.* (2017) que permite estimar as posições sucessivas do centro geométrico de cada bloco, com base na segmentação (manual, numa primeira fase) dos limites poligonais de cada face mais exposta (Figura 15a), em imagens RGB (Red Green Blue) georreferenciadas com as nuvens 3D. Destas, são extraídos os conjuntos de pontos delimitados por cada polígono e ajustado um plano por mínimos quadrados, conferindo uma representação plana da face do bloco, no espaço (Figura 15b). Por fim, para faces homólogas de uma série temporal, determinam-se analiticamente os centros geométricos (GC) dos blocos correspondentes e os respetivos deslocamentos no espaço (Figura 15c).



c)

CUBE	Geometric Centre			Displacement			Distance
	GC	X	Y	Z	dx	dy	D
O ₁		0.2241	0.4809	0.1231	0.0084	-0.0044	0.0004
O ₂		0.2325	0.4765	0.1236			

Fig. 15 – Exemplo de determinação do deslocamento do GC de um bloco (em metros), a partir de imagens RGB e nuvens de pontos 3D: a) segmentação de faces sobre as imagens RGB; b) ajustamento por mínimos quadrados de planos, a partir dos pontos 3D correspondentes; c) determinação analítica das posições do GC do bloco (antes e depois) e do respetivo deslocamento.

Atividade 4 - Modelação numérica da evolução do dano em taludes – Pretende-se o estabelecimento de fórmulas de previsão em mantos constituídos por blocos artificiais, em que as fórmulas relacionem o dano com as características do estado do mar - a altura de onda significativa e o período de pico do espetro do estado de agitação e a duração do evento (Smith *et al.*, 1992; Melby e Kobayashi, 1999).

A probabilidade do dano no manto exceder um limite predefinido durante um determinado intervalo de tempo (por exemplo, até à próxima monitorização do manto ou na vida útil da estrutura) é estimada utilizando métodos probabilísticos de nível III, isto é, simulando a resposta do manto a um grande número de sequências de estados do mar durante esse intervalo de tempo. Essas sequências serão estatisticamente consistentes com as características do estado do mar em frente à estrutura, incluindo eventos extremos e os efeitos das alterações climáticas nas características da agitação marítima e no nível médio da água do mar (Weisse *et al.*, 2014; Karambas, 2015).

Para o quebra-mar da Ericeira, utilizou-se a fórmula de Melby e Kobayashi para calcular o incremento do valor do dano médio no manto protetor, S . Realizaram-se cem simulações referentes a períodos de cem anos.

Na Figura 16 apresentam-se os resultados preliminares da evolução do dano em dez das cem simulações realizadas, bem como a curva obtida da média da evolução do valor do dano médio nas cem simulações (linha a vermelho), verificando-se que, tal como seria de esperar, o dano aumenta sobretudo de forma episódica e a maior parte do dano final resulta da ocorrência de acontecimentos extremos. Observar-se ainda, especialmente através da curva correspondente à evolução média do valor do dano médio, que existe uma tendência para a velocidade de incremento do dano médio acumulado abrandar à medida que o seu valor aumenta. Em nenhuma das simulações realizadas o valor do dano médio atingiu valores correspondentes à ruína do manto ($8 \geq S$, van der Meer, 1988). Tal não implica que a probabilidade de falha da estrutura seja nula. Será ainda necessário aumentar o número de simulações, uma vez que a probabilidade de falha é muito baixa, de forma à obtenção de uma aproximação mais fiável do valor da probabilidade de falha.

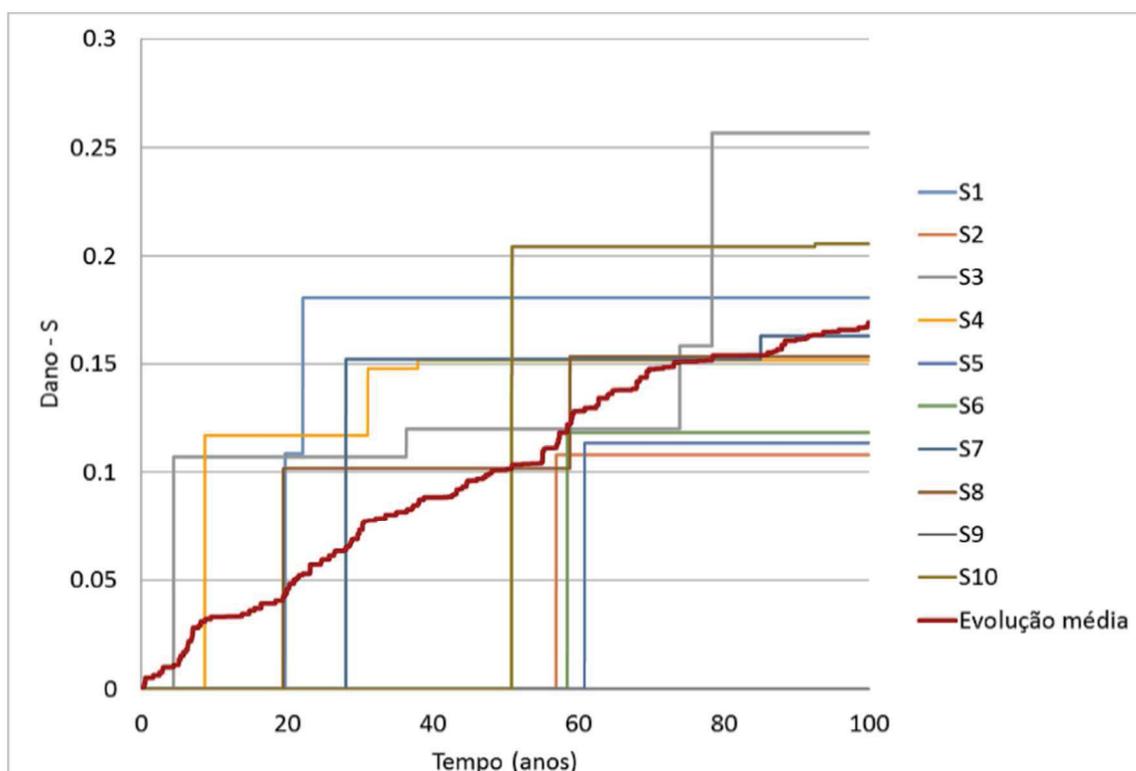


Fig. 16 – Evolução média do dano (linha a vermelho) num período de 100 anos para o quebra-mar da Ericeira.

Atividade 5 – Modelação numérica da resposta da superestrutura – Pretende-se o estabelecimento de fórmulas para a previsão da estabilidade da superestrutura.

Foram realizados ensaios com medição de pressões nas superestruturas dos quebra-mares dos portos da Ericeira e de Peniche (ver Atividade 3). Os dados de pressão obtidos nos ensaios foram analisados e comparados com os resultados do modelo numérico IH2VOF para os dois quebra-mares em estudo, a fim de se escolherem os valores dos parâmetros dos meios porosos a utilizar na aplicação deste modelo. Uma vez escolhidos estes valores, o modelo IH2VOF foi aplicado a condições de agitação distintas das dos ensaios, alargando a gama de condições analisadas.

Os dados do modelo físico e do modelo numérico para o porto da Ericeira (Pereira *et al.*, 2021) e para o porto de Peniche (Domingos, 2022) foram comparados com os resultados das fórmulas disponíveis na literatura, a fim de se escolher a(s) fórmula(s) a ser incorporada no sistema de previsão e apoio à decisão. Está em curso a análise dos resultados do modelo IH2VOF para uma maior gama de condições de agitação. Na Figura 17 apresenta-se a comparação de resultados das fórmulas e do IH2VOF para algumas condições de agitação regular não ensaiadas, para os dois quebra-mares em estudo. Como se pode observar, para este caso (nível de preia-mar e período de 12 s), a fórmula de Günbak e Gökce (1984) é a que, em geral, apresenta valores das forças nas superestruturas mais próximos e, simultaneamente, sempre superiores aos do modelo, embora a de Martin *et al.* (1999) apresente resultados mais próximos dos valores do IH2VOF, mas com valores sempre inferiores a estes.

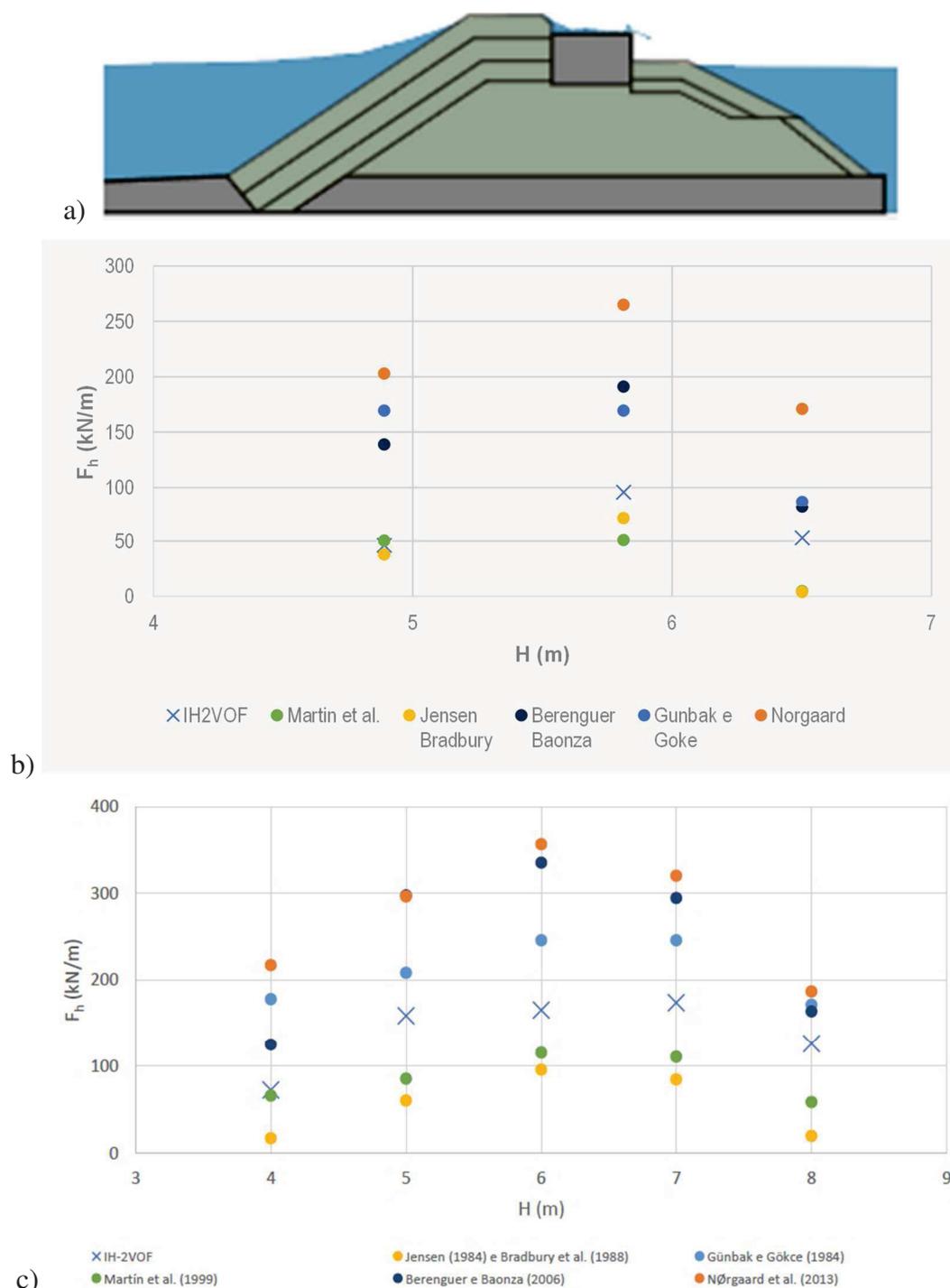


Fig. 17 – a) Modelo IH2VOF aplicado ao Porto de Peniche. Comparação de resultados do modelo numérico e das fórmulas empíricas para o nível de preia-mar e $T=12$ s: b) porto da Ericeira; c) porto de Peniche.

Atividade 6 – Protótipos do sistema de previsão e apoio à decisão - Pretende-se o desenvolvimento de um sistema de previsão do dano em QMT, alerta e tomada de decisão relativamente à segurança dos quebra-mares para os portos da Ericeira e de Peniche.

Protótipo para o porto da Ericeira

Foi implementada uma versão de teste do protótipo do sistema HIDRALERTA (Poseiro, 2019) para o porto da Ericeira, Zózimo *et al.* (2021a, b). Tal envolveu a extração dos dados de agitação

marítima e de ventos do ECMWF (*European Center for Medium Range Weather forecast*) na zona ao largo do porto. Estes dados constituem 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 ao longo do quebra-mar para que possam ser utilizados como dados de entrada para o cálculo do dano nesta estrutura (Figura 18). Presentemente, o modelo efetua as previsões a 3 dias da agitação marítima no exterior e no interior do porto.

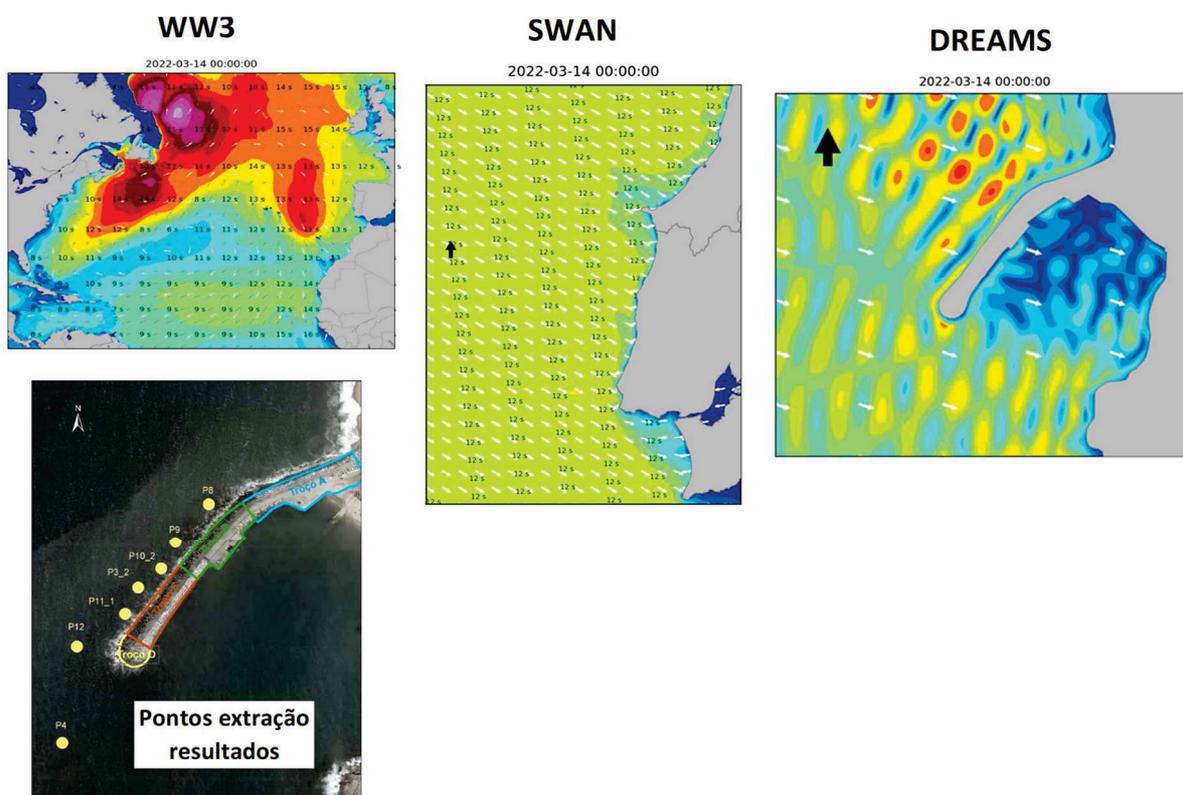


Fig. 18 – Mapas de resultados (WW3, SWAN e DREAMS) das previsões e pontos de extração dos resultados do modelo DREAMS para o protótipo do porto da Ericeira.

Foi iniciada a otimização do código inicial do sistema HIDRALERTA (Poseiro, 2019) de forma a simplificar a integração de futuros desenvolvimentos, tendo sido implementada a opção de adquirir os dados de agitação e de ventos ao largo através do programa Copernicus, em acréscimo aos obtidos através da plataforma ECMWF (<https://www.ecmwf.int/>), que tem estado a ser utilizada até ao momento. Encontra-se em fase de conclusão o desenvolvimento da nova plataforma Web que terá novas funcionalidades em termos de análise de dados e de interatividade do utilizador com o sistema.

Protótipo para o porto de Peniche

O protótipo para o porto de Peniche está em desenvolvimento e os modelos numéricos SWAN e DREAMS estão a ser implementados. Na Figura 19 apresentam-se os domínios computacionais do SWAN e a malha batimétrica do modelo DREAMS.

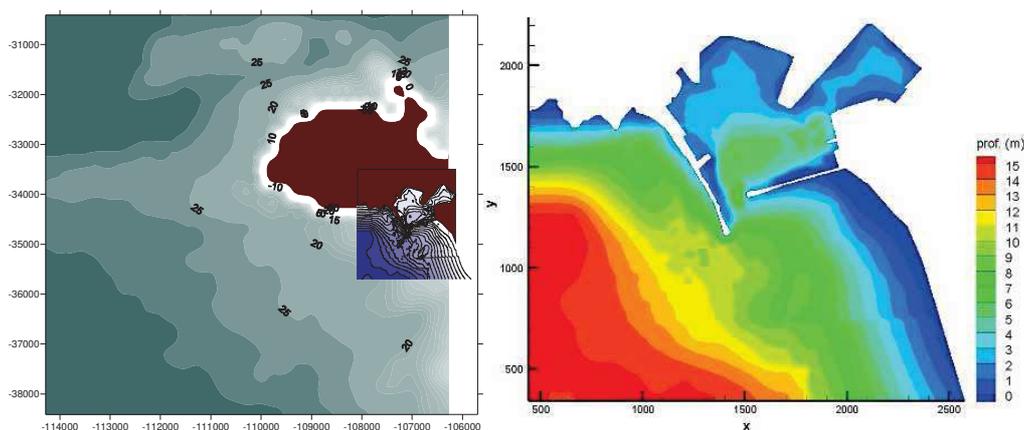


Fig. 19 – Domínios computacionais dos modelos numéricos SWAN e DREAMS para o porto de Peniche.

Em ambos os protótipos, serão incluídas as fórmulas desenvolvidas nas Atividades 4 e 5 permitindo, com base nos estados de mar, estimar a evolução do dano nos QMT e o comportamento das superestruturas ao longo de um determinado intervalo de tempo. A comparação dessas estimativas com limites predefinidos, permitirá identificar a necessidade de intervenções e a sua priorização.

TAREFAS FUTURAS

Os desenvolvimentos futuros para os quebra-mares em estudo dos portos da Ericeira e de Peniche passam por:

- a) Realização de levantamento com *drone* e nivelamento trigonométrico em 2022;
- b) Análise detalhada dos vídeos e caracterização dos parâmetros hidrodinâmicos (espraiamento e celeridade);
- c) Realização de ensaios em modelo físico 3D (apenas para o quebra-mar da Ericeira);
- d) Análise dos resultados dos ensaios realizados em modelos físicos 2D e 3D;
- e) Estabelecimento das fórmulas de evolução do dano nos taludes dos quebra-mares;
- f) Aplicação do modelo numérico IH2VOF a novas condições de agitação e níveis de maré;
- g) Avaliação das fórmulas da resposta das superestruturas dos quebra-mares;
- h) Implementação no sistema das fórmulas de evolução do dano e da resposta das superestruturas dos quebra-mares;
- i) Finalização e validação dos dois protótipos do HIDRALERTA.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos projetos: BSAFE4SEA - Breakwaters SAFETY control through a FORecast and decision support SystEm Analysis, Ref. PTDC/ECI-EGC/31090/2017; 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; BLUESAFEPOR (ref: FA_04_2017_016); e EW-COAST - Early Warning system for COASTal risks induced by storm (ALG-LISBOA-01-145- FEDER-028657). Agradecem

também à Infraestrutura Nacional de Computação Distribuída (INCD) pelo acesso à infraestrutura digital de suporte à investigação. Agradecem ainda ao Museu Nacional Resistência e Liberdade - Fortaleza de Peniche, à Doca Pesca Portos e Lotas S.A. e à GNR pelo apoio prestado nos casos de estudo do projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] Andriolo, U. (2019). Nearshore Wave Transformation Domains from Video Imagery. *Journal of Marine Science and Engineering* 7, no. 6: 186. <https://doi.org/10.3390/jmse7060186>.
- [2] Andriolo, U.; Mendes, D.; Tabora, R. (2020). Breaking wave height estimation from timex images: two methods for coastal video monitoring systems. *Remote Sensing*, 12(2), 204.
- [3] Andriolo, U.; Poseiro, P.; Reis, M.T.; Bastos, A.P.; Fortes, C.J.E.M.; Garcia, T. (2016). Investigating the use of a video-technique for wave run-up measurements on a breakwater in a laboratory flume. *Proc. 4^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Lisboa, 21 a 23 de junho, pp. 478-480. ISBN:978-989-705-097-8.
- [4] Berenguer, J.M.; Baonza, A. (2006). Rubble mound breakwater crown wall design. *Proc. National Conference of the Port and Coastal Technical Association*, Algeciras, Espanha, pp. 35-56.
- [5] Bradbury A.P.; Allsop, N.W.H.; Stevens R. V. (1988). Hydraulic performance of breakwater crown walls. *Hydraulics Research*, Wallingford, Report SR146,1988.
- [6] Domingos, R.J.O. (2022) Modelação Numérica de Forças em Superestruturas. O Caso do Quebra-mar de Peniche. *Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa*.
- [7] Fortes, C.J.E.M. (2002). Transformações Não Lineares de Ondas em Zonas Portuárias. *Análise pelo Método dos Elementos Finitos*. Tese de Doutoramento, IST-UL.
- [8] Fortes, C.J. E.M.; Andriolo, U.; Lemos, R.; Manta, A. (2022). Avaliação do espraçamento por análise de vídeos de ensaios em modelo físico. *Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária, PIANC, Sines*, 7 e 8 de abril.
- [9] Fortes, C.J.E.M.; Lemos, R.; Santos, J.A.; Reis, M.T. (2021). Avaliação do galgamento e espraçamento em quebra-mares de talude. o caso do porto da Ericeira. *12º Congresso Nacional de Mecânica Experimental – CNME2020*, Leiria, 29 de setembro a 1 de outubro.
- [10] Günbak, A.R.; Gökce, T. (1984). Wave screen stability of rubble mound breakwaters. *International Symposium of Maritime Structure in Mediterranean Sea*, Atenas, Grécia, pp. 2099-2112.
- [11] Henriques, M.J.; Capitão, R.; Fortes, C.J.E.M.; Silva, H.; Reis, M.T.; Lemos, R. (2019). Photo surveys with drones. The improvement of OSOM+, the systematic monitoring of maritime works. *JISDM 2019 - the 4th Joint International Symposium on Deformation Monitoring*, Atenas, Grécia, 15 a 17 de maio.
- [12] Jensen, O.J. (1984). *A Monograph on Rubble Mound Breakwaters*. Danish Hydraulic Institute, Dinamarca.
- [13] Karambas, T.V. (2015). Modelling of climate change impacts on coastal flooding/erosion, ports and coastal defence structures. *Desalination and Water Treatment*, 54:8, 2130-2137. DOI:10.1080/19443994.2014.934115.

- [14] Lemos, R.; Fortes, C.J.E.M.; Santos, J.A.; Mendonça, A. (2022). Evolução do dano em ensaios em modelo físico de um trecho do quebra-mar do porto de Peniche. Test&e 2022, FCT Nova, Costa da Caparica, 21 a 23 de junho.
- [15] Lemos, R.; Santos, J.A.; Fortes, C.J.E.M. (2021). Evolução do dano em modelo físico de um trecho do quebra-mar do porto da Ericeira. 12º Congresso Nacional de Mecânica Experimental – CNME2020, Leiria, 29 de setembro a 1 de outubro.
- [16] Losada, I.J.; Lara, J.L.; Guanache, R.; Gonzalez-Ondina, J.M. (2008). Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters. *Coastal Engineering* 55, 47–62.
- [17] Martin, F.; Losada, M. A.; Medina, R. (1999). Wave loads on rubble mound breakwater crown walls. *Coastal Engineering*, 37(2), p.p. 149-174. ISSN:0378-3839.
- [18] Melby, J.A.; Kobayashi, N. (1999). Damage progression and variability on breakwaters trunks. *Proc. Coastal Structures '99*, pp. 309-315.
- [19] Mendonça, A.; Fortes, C.J.E.M.; Lemos, R.; Neves, M.G.; Capitão, R.; Pinheiro, L.; Costa, C.; Reis, R.; Simão, J.; Soares, R. (2021). Porto de Peniche: ensaios em modelo físico de um trecho do quebra-mar oeste. 12º Congresso Nacional de Mecânica Experimental – CNME2020, Leiria, 29 de setembro a 1 de outubro.
- [20] NØrgaard, J.Q.H.; Andersen, T.L.; Burcharth, H.F. (2013). Wave loads on rubble mound breakwater crown walls in deep and shallow water wave conditions. *Coastal Engineering*, pp. 137-147.
- [21] Pereira, F.; Neves, M.G.; López-Gutiérrez, J.-S.; Esteban, M.D.; Negro, V. (2021). Comparison of existing equations for the design of crown walls: Application to the case study of Ericeira breakwater (Portugal). *Journal Mar. Sci. Eng.* 2021, 9(3), 285. <https://doi.org/10.3390/jmse9030285>.
- [22] 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. Tese de Doutoramento, IST-UL.
- [23] Santos, J.A.; Lemos, R.; Fortes, C.J.E.M.; Neves, M.G.; Pinheiro, L.V.; Pinto, M.; Sanches, C.; Gueifão, J.; Zózimo, A.C. (2021). Modelação física da resposta à agitação incidente de um trecho do quebra-mar do porto da Ericeira. *Revista Recursos Hídricos, APRH*, Vol. 42, Nº 1, 91-100, março, pp. 51-63. DOI:10.5894/rh42n1-cti10. ISSN:0870-1741.
- [24] Smith, W.G.; Kobayashi, N.; Kaku, S. (1992). Profile changes of rock slopes by irregular waves. *Proc. 23rd ICCE - International Conference in Coastal Engineering, ASCE*, Vol. 2, pp. 1559-1572.
- [25] Soares, F.; Henriques, M.J.; Rocha, C. (2017). Concrete block tracking in breakwater models. FIG Working Week 2017, Helsinki, Finland, 29 May - 2 June. FIG article of the month of June.
- [26] SWAN TEAM (2006). Swan User Manual version 40.51. Department of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 111 pp.
- [27] van der Meer, J.W. (1988). Deterministic and probabilistic design of break water armour layer. *Journal of Waterways, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol. 114, Issue 1.
- [28] Weisse, R.; Bellafiore, D.; Menéndez, M.; Méndez, F.; Nicholls, R.J.; Umgiesser, G.; Willems, P. (2014). Changing extreme sea levels along European coasts. *Coastal Engineering* 87, pp. 4- 14. DOI:10.1016/j.coastaleng.2013.10.017.

[29] Zózimo, A.C.; Fortes, C.J.E.M.; Pinheiro, L.V. (2021a). Validação do protótipo do sistema To-SEAlert para o porto da Ericeira. Depressões Elsa e Fabien. Proc. 6^{as} Jornadas de Engenharia Hidrográfica, 3 a 5 de novembro, pp. 183-186. https://jornadas.hidrografico.pt/recurs.os/files/documentos/Livro_Atas_6JEH_2020.pdf

[30] Zózimo, A.C.; Pinheiro, L.; Santos, M.I.; Fortes, C.J.E.M. (2021b). Aplicação e validação do sistema HIDRALERTA em situações de tempestade. Revista Territorium 28 (II), Riscos, maio, pp. 145-167. DOI:https://doi.org/10.14195/1647-7723_28-2_11. ISSN:0872-8941.