

## DESENVOLVIMENTOS, DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A MODELAÇÃO FÍSICA EM ENGENHARIA COSTEIRA E PORTUÁRIA

Conceição J.E.M. Fortes<sup>1</sup>, Rui Capitão<sup>1</sup>, Rute Lemos<sup>1</sup>, Ana Mendonça<sup>1</sup>, Liliana Pinheiro<sup>1</sup>, Diogo Neves<sup>1</sup>, Pedro Poseiro<sup>1</sup>, Francisco Pedro<sup>1</sup>, Maria João Henriques<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Hidráulica e Ambiente, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

### RESUMO

A modelação física em Hidráulica Marítima tem um papel fundamental no apoio aos estudos e projetos de obras marítimas, em especial o que decorre da otimização do seu dimensionamento. Por outro lado, é também uma ferramenta fundamental no desenvolvimento de métodos empíricos e na calibração e/ou validação de modelos numéricos.

Na presente comunicação são apresentados exemplos, recentemente desenvolvidos, de casos de estudo de modelação física em que se considera ter havido contributos inovadores em conceitos, equipamentos, técnicas e procedimentos experimentais. Destaca-se também o papel da modelação física como apoio às formulações empíricas e à modelação numérica e são apontados cenários de desenvolvimento para a modelação física de modo a melhor lidar com os problemas das alterações climáticas.

### 1. INTRODUÇÃO

A modelação física tem sido um importante instrumento de suporte a estudos e projetos de construção de obras de engenharia marítima. É, sem dúvida, a representação mais próxima do conjunto de fenómenos envolvidos na ação da agitação marítima sobre as estruturas portuárias e costeiras, uma vez que permite, rápida e de forma muito completa, visualizar e analisar complexos processos físicos envolvidos na propagação de ondas e na interação destas com as estruturas. Com efeito, a modelação física permite a simulação simultânea de fenómenos físicos tão distintos e complexos como a refração, a difração, a rebentação e a reflexão das ondas, o espraio e o galgamento, assim como interação de ondas com estruturas marítimas, a interação de ondas com navios amarrados ou estudos de dinâmica sedimentar. Além disso, este tipo de modelação é grande valia para o desenvolvimento de métodos empíricos e para a calibração e/ou validação de modelos numéricos.

Recentemente, tem-se desenvolvido um conjunto de técnicas e procedimentos experimentais destinados a facilitar, agilizar e automatizar a obtenção e análise de resultados bem como o acesso dos utilizadores finais aos ensaios (visualização e dados). São disso exemplo o uso de técnicas fotogramétricas para a avaliação dos danos no manto protetor de uma estrutura marítima ou a erosão de taludes arenosos, o uso de equipamento para medição de parâmetros não convencionais em ensaios (como as bolhas de ar durante a rebentação) para a validação de modelos numéricos, ou o uso da transmissão em rede de *video streaming*, para, em tempo quase real, divulgar e fornecer as imagens e dados a qualquer utilizador, Capitão *et al.* (2014).

Há, no entanto, um conjunto de novos desafios e oportunidades que se avizinham para a modelação física, face aos problemas que emergem das incontornáveis e irreversíveis alterações climáticas e para os quais há que apresentar soluções. Com efeito, as instalações de modelação física devem ser adaptadas de modo a poderem acomodar simulações de eventos extremos ou recorrer a soluções ambientalmente sustentáveis (*green solutions*) de proteção costeira (usando, por exemplo, vegetação).

Nesta comunicação apresentam-se exemplos de casos de estudo de modelação física e do seu apoio aos estudos e projetos de obras marítimas e à calibração e validação de fórmulas empíricas e modelos numéricos. Segue-se a descrição do trabalho que tem sido desenvolvido

no sentido de aperfeiçoar técnicas e equipamentos de apoio a ensaios, tais como as técnicas de fotogrametria. Finalmente, são apontados cenários de desenvolvimento para a modelação física de modo a melhor lidar com os problemas das alterações climáticas. Este trabalho baseia-se nos trabalhos de Reis *et al.* (2015) e Fortes *et al.* (2016).

## **2. MODELAÇÃO FÍSICA**

Apresentam-se, de seguida, alguns exemplos do papel da modelação física no apoio aos estudos de engenharia costeira e portuária e na calibração e/ou validação de modelos numéricos.

Quer num caso quer noutro, o Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas (NPE) do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do LNEC, tem uma longa tradição na realização de ensaios em modelo físico, que se realizam no seu Pavilhão de Hidráulica Marítima, assim como na análise de medições deles resultantes. Este pavilhão inclui um conjunto de tanques e canais de ondas, apetrechados com sistemas de geração de ondas e de absorção dinâmica de reflexões, assim como com equipamentos associados de controlo e de aquisição de dados necessários neste tipo de estudos.

### **2.1. Ensaios de apoio aos estudos e projetos de obras marítimas**

Os ensaios mais frequentemente realizados de apoio aos estudos e projetos de obras marítimas no NPE são:

- a) ensaios de agitação de zonas abrigadas para avaliação das condições de tranquilidade (por exemplo, de bacias portuárias);
- b) ensaios de estabilidade e galgamentos de estruturas marítimas.

#### Ensaios de agitação

Os ensaios de agitação têm como objetivo, em geral, a verificação da tranquilidade portuária nos modelos físicos realizados em tanque. Assim, para uma dada condição de agitação incidente na zona exterior à bacia portuária, medem-se as características de agitação em vários locais no seu interior e avalia-se o rácio entre os valores exteriores e interiores da agitação, de modo a aferir o abrigo da configuração nesses locais. Pode-se estudar unicamente uma solução de configuração portuária ou avaliar comparativamente várias soluções.

O modelo físico é construído representando quer a batimetria da zona em estudo quer a envolvente portuária (integrando infraestruturas, terraplenos, obras de proteção, etc.) e ainda uma zona exterior ao porto, de modo a simular corretamente a entrada da agitação marítima incidente no mesmo. Este tipo de modelos é, em geral, de grandes dimensões, a sua construção é realizada de acordo com a lei de semelhança de Froude e as escalas escolhidas são da ordem entre 1/70 e 1/90, Figura 1.

A agitação incidente a considerar no modelo normalmente corresponde às condições mais frequentes de ocorrerem na zona em estudo, em termos de direções, alturas e períodos, para diferentes níveis de maré (médio, ou baixa-mar e/ou preia-mar). Em casos especiais, são também estudadas condições menos frequentes, mas mais adversas em termos do galgamento ou da sobrelevação, por exemplo. As características da agitação marítima incidente são irregulares, descritas normalmente por um espectro em frequência do tipo JONSWAP.

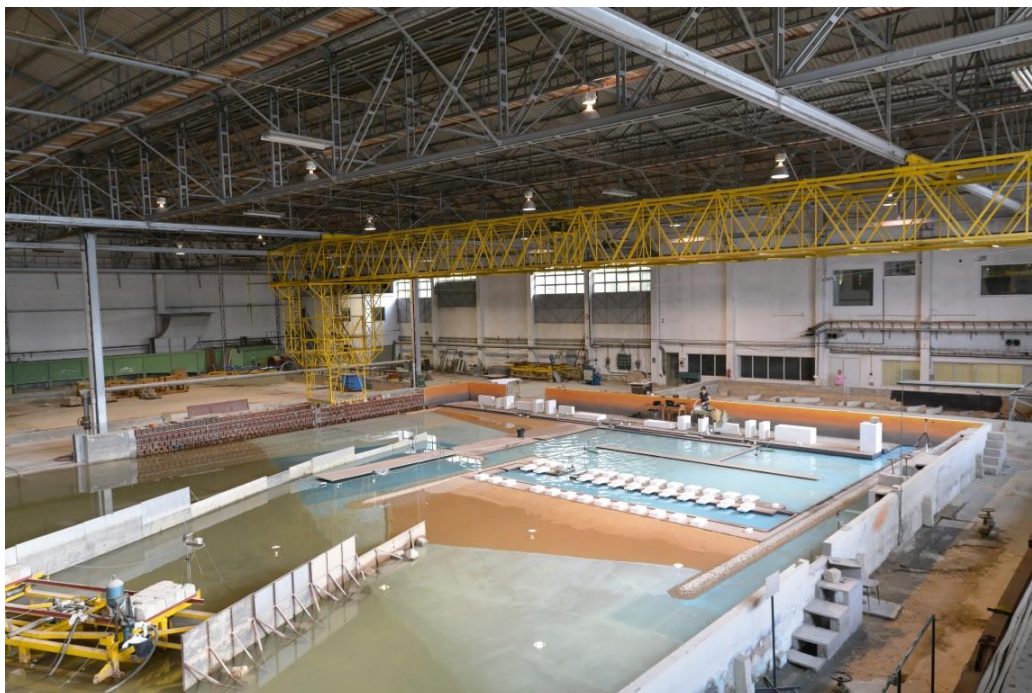


Figura 1 – Aspeto de modelo implantado no tanque de ondas irregulares para ensaios de agitação

Em diferentes locais do modelo, instalam-se sondas resistivas para a medição da elevação da superfície livre pontual, para cada condição de agitação incidente, Figura 2. Duas ou mais sondas localizam-se junto ao equipamento de geração de ondas para medir e confirmar as características da agitação incidente.

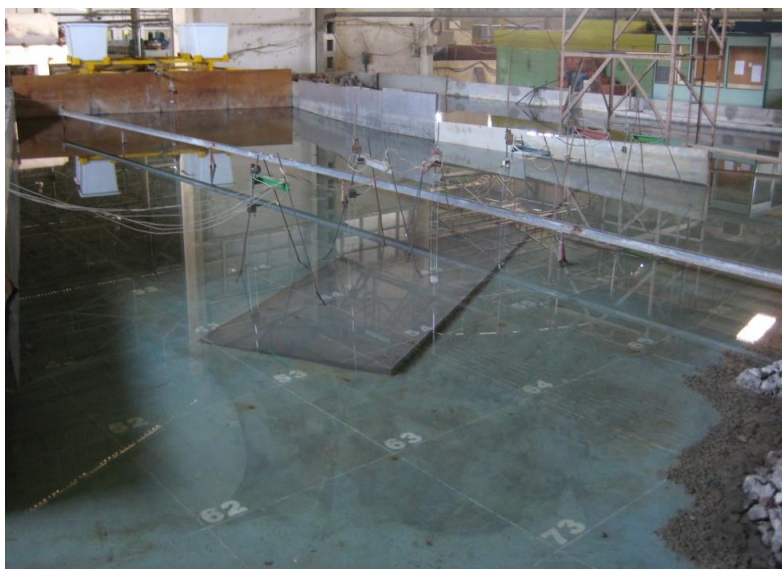


Figura 2 – Sondas resistivas usada na medição da elevação da superfície livre

A Figura 3a ilustra o aspeto da agitação na entrada do porto, canal de navegação e bacia portuária para um ensaio com o rumo de oeste no interior do porto de Leixões.

Com base nos registos de elevação da superfície livre obtidos nos diferentes locais, é possível obter por análise temporal ou espectral os valores da altura de onda e do período nos diferentes locais medidos no modelo. Com estes valores calculam-se os índices de agitação (relação entre a altura de onda incidente num dado ponto no interior da zona em estudo e a altura de onda

obtida junto ao gerador, que representa o largo), cuja análise permite verificar se a proteção preconizada para a zona de estudo proporciona uma tranquilidade efetiva ou não, tendo em conta quer as direções de agitação marítima mais frequentes e adversas, quer os níveis de exigência dos equipamentos, das embarcações servidas e das operações próprias de um porto.



Figura 3 – Aspeto da agitação no ensaio com o rumo W para o porto de Leixões

Por vezes, aliada aos ensaios de agitação, faz-se também a avaliação expedita das sobrelevações verificadas em certas zonas de um porto, com recurso a limnímetros, Figura 4. Tal permite avaliar os riscos de inundação dessas zonas e introduzir medidas corretoras, tais como o alteamento e/ou a introdução de muros de proteção ou elevação dos terraplenos.



Figura 4 – Sobrelevação, com inundação dos terraplenos

#### Ensaios de estabilidade e galgamentos

Os ensaios de estabilidade e galgamentos de uma estrutura marítima têm por objetivo principal a análise do comportamento hidráulico-estrutural do manto resistente, com vista à otimização do seu pré-dimensionamento.

Este tipo de ensaios pode ser bidimensionais ou tridimensionais, Figura 5a,b e Figura 6a,b. Os primeiros realizam-se em canal e neles reproduz-se uma secção transversal da estrutura em estudo. Os ensaios tridimensionais realizam-se em tanque e, para além da batimetria, reproduz-se ainda toda a geometria das estruturas a ensaiar, bem como a linha de costa adjacente às obras de proteção. Em ambos os casos, a zona a reproduzir é relativamente pequena (quando comparada com a típica área de reprodução dos ensaios de agitação) embora seja importante garantir as mesmas características do escoamento no protótipo e no modelo. Tal determina que, para este tipo de estudos, as escalas adotadas não devem ser inferiores a 1/60.



No caso de ensaios de estabilidade, Figura 5a, após a reprodução da batimetria e das estruturas a ensaiar, efetuam-se testes correspondentes à ação de estados de agitação marítima, cujas características se pretendem semelhantes às dos estados de agitação de dimensionamento do manto protetor do protótipo. Estes estados de agitação são, em geral, definidos com base em estudos de regimes de extremos na zona de estudo. Estabelece-se então um programa de ensaios caracterizado por um conjunto de níveis de maré, direções de onda e períodos de onda. A cada direção e período associam-se alturas de onda significativas crescentes, que deverão atuar durante um período correspondente a 3 horas no protótipo.



Figura 5 – Ensaios bidimensionais: a) Estabilidade; b) Avaliação qualitativa do galgamento; c) Descarregador, reservatório e balança para avaliação quantitativa do galgamento e da sua extensão

Avaliam-se então os estragos produzidos pela agitação incidente no manto resistente da estrutura em cada um dos troços que a constituem. A contabilização dos estragos pode traduzir-se na avaliação do número de elementos do manto (blocos artificiais e/ou enrocamento) que alteram a sua posição devido à ação da agitação marítima incidente (os chamados “movimentos”), e do número de elementos do manto que são deslocados da sua posição inicial mais do que uma dimensão característica do elemento (as chamadas “quedas”). Em geral, essa avaliação é efetuada apenas visualmente, sendo globalmente calculada a percentagem de quedas e movimentos em relação ao número total de blocos.

Trata-se, assim, de uma metodologia muito dependente da experiência e da sensibilidade do técnico que realiza o ensaio. Para confirmação das quedas, é também usual o recurso a fotografias obtidas no início e no fim de cada ensaio, cujo objetivo é ilustrar a evolução de cada ensaio.

A avaliação dos galgamentos pode ser feita de modo qualitativo, através da sua classificação visual durante o ensaio, Figura 5b e Figura 6a. Esta avaliação baseia-se na forma como a onda ultrapassa o coroamento da estrutura (por salpicos, lâminas de água ou grandes massas de água). A avaliação dos galgamentos pode ser feita ainda de modo quantitativo, Figura 5c e Figura 6b, o que envolve a medição do volume de água que transpõe o coroamento da estrutura. Neste último caso, utiliza-se normalmente um reservatório no tardo da estrutura, onde é recolhida e

medida a água galgada. Pode também ser utilizada uma balança que efetua a medição de caudais individuais de galgamento ao longo do ensaio.

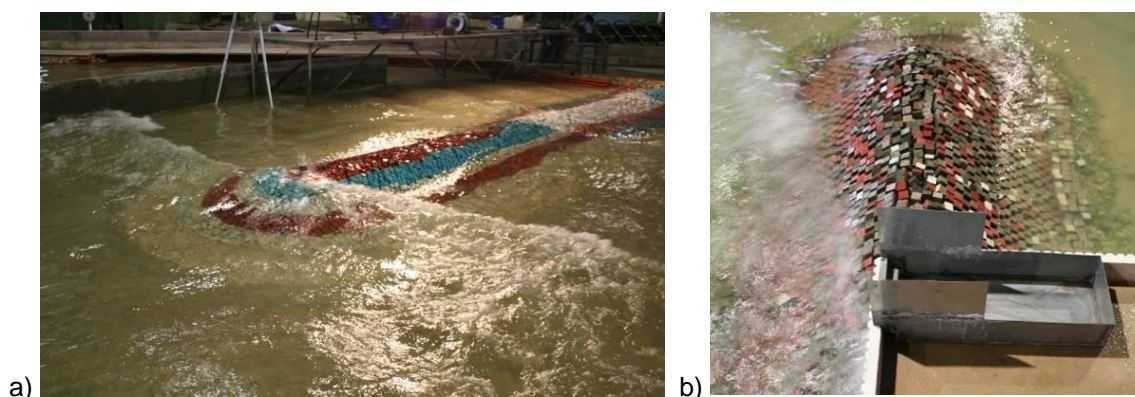


Figura 6 – Ensaio tridimensionais de estabilidade e galgamentos. a) estabilidade e avaliação qualitativa do galgamento; b) reservatório para avaliação quantitativa do galgamento

## 2.2. Ensaio de calibração/validação de fórmulas empíricas

Para validar um conjunto de fórmulas empíricas utilizadas para o cálculo do espraio, foram realizados vários ensaios em modelo físico, num dos canais de ondas irregulares do LNEC, e foi construído um modelo correspondente à secção do quebra-mar sul da Praia da Vitória (Terceira, Açores) que protege o Cais 12 (Figura 7).

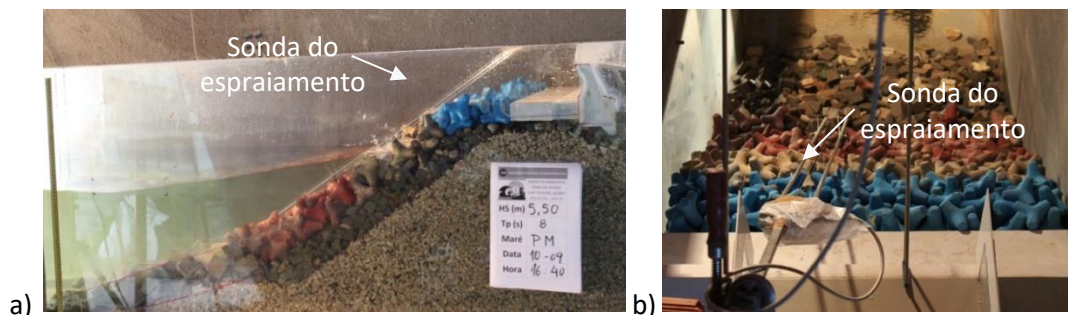


Figura 7 – Modelo físico construído: a) Perfil da secção estudada b) Vista em planta da sonda de espraio

Foram testados dois níveis de mar (preia-mar e baixa-mar) e várias condições de agitação marítima com o objetivo de comparar os resultados obtidos com uma sonda instalada sobre o manto da estrutura e várias fórmulas empíricas. Nesta comparação foram utilizadas as fórmulas de Van der Meer e Stam (1992), Pullen *et al.* (2007) e Bonakdar e Etemad-Shahidi (2011), através do parâmetro  $R_{2\%}$ , que corresponde ao espraio de 2% das ondas (Figura 8).

Globalmente, a concordância entre os valores previstos e medidos para este parâmetro foi melhor para o nível de mar mais baixo, sendo que todas as fórmulas sobestimaram os valores de espraio para o nível de mar superior. As divergências observadas devem-se sobretudo ao espraio medido, uma vez que as ondas facilmente atingem o limite do coroamento do manto do quebra-mar. Nesta situação a água perde o contacto com a sonda e a água que passa sobre o coroamento não é contabilizada pela mesma.

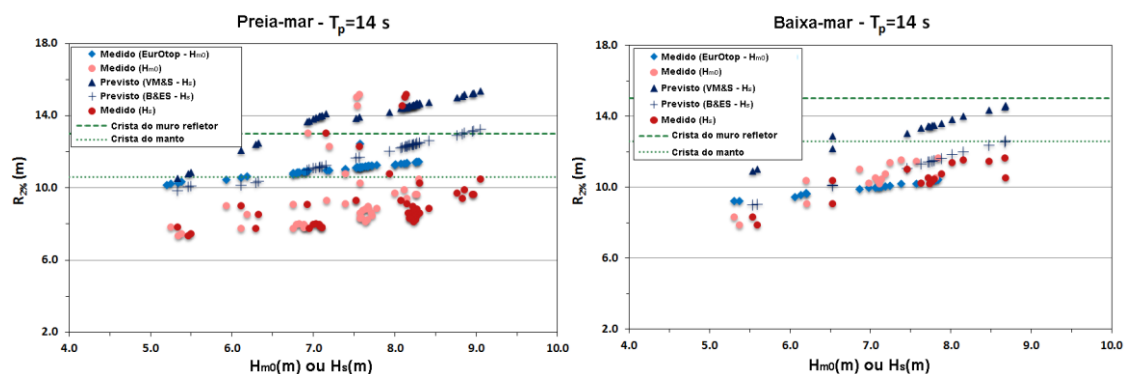


Figura 8 – Comparação do  $R_{2\%}$  medido e previsto com  $H_{m0}$  e  $H_s$ , para Preia-mar e Baixa-mar e  $T_p$  de 14 s

## 2.3. Ensaios para validação dos modelos numéricos

### 2.3.1. Estudos de rebentação de ondas

O desenvolvimento tecnológico recente tem permitido a utilização de modelos numéricos para compreender e simular fenómenos de complexidade acrescida. No entanto, uma vez que a sua utilização carece de calibração/validação, é à modelação física que usualmente se recorre para esse processo.

A modelação física ainda é mais necessária como apoio à modelação numérica nos estudos de rebentação de onda, cujo fluxo turbulento associado é elevado, sendo, por isso, de natureza bastante complexa.

Neste domínio, os dois modelos numéricos adotados para o estudo de rebentação de ondas têm como base duas formulações diferentes para a resolução das equações de dinâmica de fluidos: (i) um modelo Euleriano multifase, que resolve as equações RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*), desenvolvido na plataforma OpenFOAM® (Green Shields, 2015). Este modelo permite a computação em paralelo com recurso a um *cluster* de computadores; (ii) e um modelo Lagrangiano, que utiliza um método SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*) construído numa plataforma que permite a computação em placa gráfica (GPU) através do código DualSPHysics® (Crespo *et al.*, 2015).

O desempenho destes dois códigos numéricos foi avaliado em Neves *et al.* (2016), para dois tipos de rebentação de onda, progressiva e mergulhante, utilizando dados experimentais de Ting e Kirby (1994). Na Figura 9 mostram-se as condições experimentais usadas nesta avaliação.

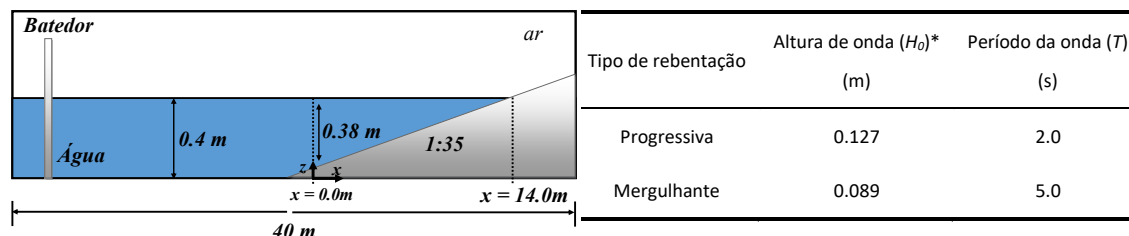


Figura 9 – Condições experimentais. Geometria do canal (à esquerda). Características das ondas geradas (à direita)

As simulações com OpenFOAM e DualSPHysics, para ambas as rebentações, são mostradas na Figura 10. A elevação da superfície livre e os perfis verticais de velocidade média longitudinal na secção imediatamente a seguir à rebentação estão representados na Figura 11.

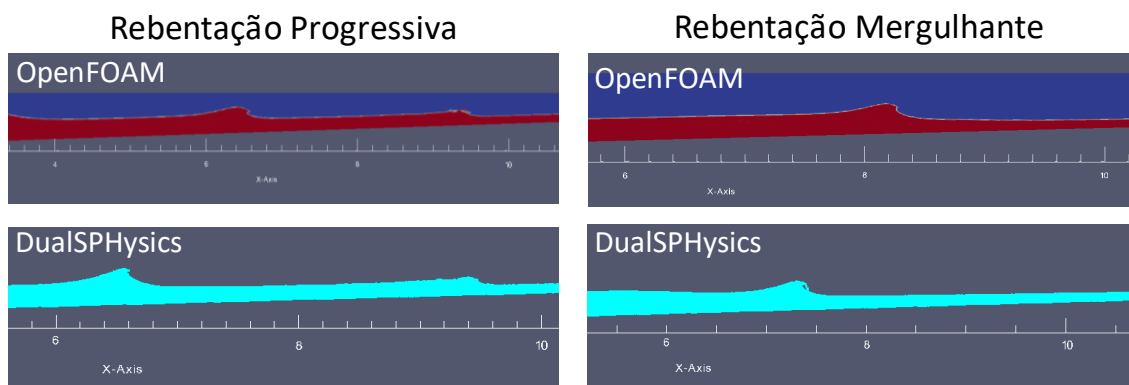


Figura 10 – Simulações OpenFOAM e DualSPHysics para os dois tipos de rebentação de onda

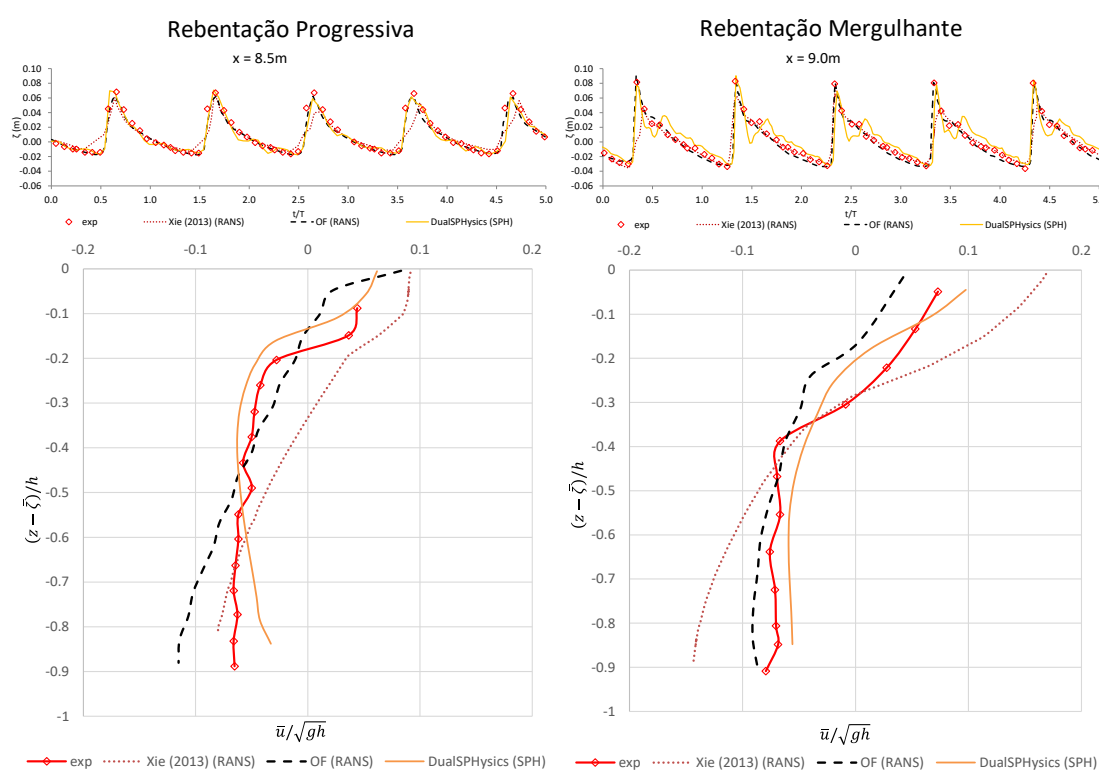


Figura 11 – Elevação da superfície livre (em cima) e perfis verticais de velocidade média longitudinal (em baixo) na secção imediatamente a seguir à rebentação para os dois tipos de rebentação de onda

Os resultados foram comparados com modelos numéricos desenvolvidos por outros autores (Xie, 2013), revelando que os modelos OpenFOAM e DualSPHysics apresentam até a data os melhores ajustes aos dados experimentais para as mesmas condições experimentais. Os resultados indicam também um melhor desempenho computacional do modelo OpenFOAM no caso da elevação da superfície livre e um melhor ajuste aos dados experimentais para o modelo DualSPHysics na determinação dos perfis verticais de velocidade média longitudinal.

### 2.3.2. Estudo do comportamento de navios

Com o objetivo de retomar a atividade do NPE de modelação física do comportamento de navios, realizaram-se dois conjuntos de ensaios em modelo físico para a medição dos movimentos de um navio sujeito a diferentes condições de agitação incidente.



No primeiro conjunto de ensaios, pretendia-se simular os movimentos de um navio quando sujeito a diversos estados de agitação marítima. No segundo conjunto de ensaios, pretendia-se simular os movimentos de um navio quando sujeito a ondas de esteira, i.e., ondas geradas pela passagem de outro navio nas proximidades, Simão *et al.* (2016) e Pedro *et al.* (2017). Em ambos os casos, as funções de transferência, que relacionam a amplitude da agitação incidente com a amplitude de cada movimento, e cujo valor depende da frequência da agitação, foram estabelecidas e comparadas com as que são obtidas com um modelo numérico, o modelo hidrodinâmico WAMIT.

Os modelos dos navios utilizados nestes ensaios foram cedidos pelo Centro de Engenharia e Tecnologia Naval e Oceânica CENTEC do IST, num trabalho de parceria com aquele centro ligado à engenharia naval, Hinostroza e Guedes Soares (2016). Do ponto de vista da engenharia costeira, o comportamento dos navios no interior de portos fornece dados importantes para avaliar a segurança e a operacionalidade dos terminais portuários. Por este motivo, a modelação física do comportamento de navios no interior de portos, quer em manobra, quer amarrados, é uma aposta do NPE.

No primeiro caso, Figura 12a (Simão *et al.* 2016) utilizou-se um acelerómetro, colocado no interior do navio, para registar as acelerações nas direções X, Y e Z, assim como os ângulos de guinada, cabeceio e balanço. As medições com o acelerómetro, a escalas tão pequenas, revelaram-se muito pouco precisas, com uma incerteza associada muito significativa. Substituiu-se então o acelerómetro por um giroscópio, que regista as acelerações lineares e angulares permitindo obter movimentos e rotações instantâneos, o que permitiu obter medições mais fidedignas dos movimentos. Com esta informação foi possível determinar os movimentos do navio segundo os seis graus de liberdade e relacioná-los com as características da agitação incidente. Foram ainda colocadas oito sondas resistivas em redor do navio que permitiram a caracterização do campo de ondas resultante da interação do navio com as ondas incidentes. Testou-se uma gama variada de alturas, períodos e direções de onda que incluem condições frequentes e condições extremas, com o objetivo de caracterizar um leque abrangente de resposta do navio.

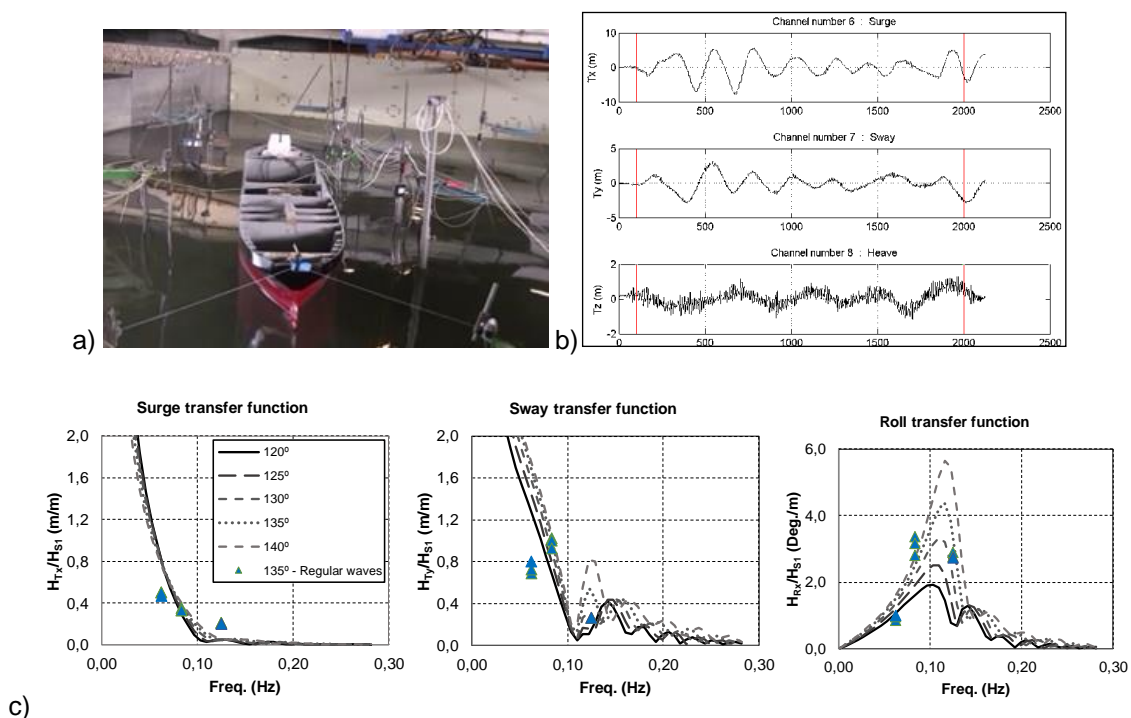


Figura 12 – a) Modelo do navio e equipamento de medição; b) Séries temporais de movimentos do navio; c) Função de transferência para os modos de avanço, deriva e rolo (Simão *et al.* 2016)

Os ensaios em modelo físico decorreram num tanque com dimensões aproximadas de 20 m x 35 m utilizando um gerador de ondas com uma frente de onda de 6 m. O navio tinha comprimento

de 3.45 m, boca de 0.54 m e peso total de 214.92 kg (incluindo o modelo, o equipamento de medição e pesos colocados no seu interior). A escala do modelo foi de 1:50. As séries temporais medidas, Figura 12b, foram analisadas e tratadas no domínio do tempo e da frequência. Identificaram-se fenômenos não lineares e efeitos de laboratório, como por exemplo, ondas estacionárias devidas a reflexões nas paredes do tanque, Figura 12c.

No segundo caso, Pedro *et al.* (2017), foi realizado um conjunto de ensaios com dois navios, um em movimento e outro parado, Figura 13. O objetivo foi caracterizar o campo de ondas de esteira gerado pelo navio em movimento ao longo de uma trajetória retilínea com velocidade constante, bem como os movimentos do navio parado induzidos por aquelas ondas.

Foram realizados testes para várias velocidades e para diferentes níveis de água. Para cada teste (velocidade e nível de água) mediu-se a elevação da superfície livre, com um conjunto de sondas resistivas, e a velocidade do escoamento induzido pela passagem do navio, com um conjunto de ADV. Os movimentos foram medidos segundo os seis graus de liberdade, com um giroscópio.

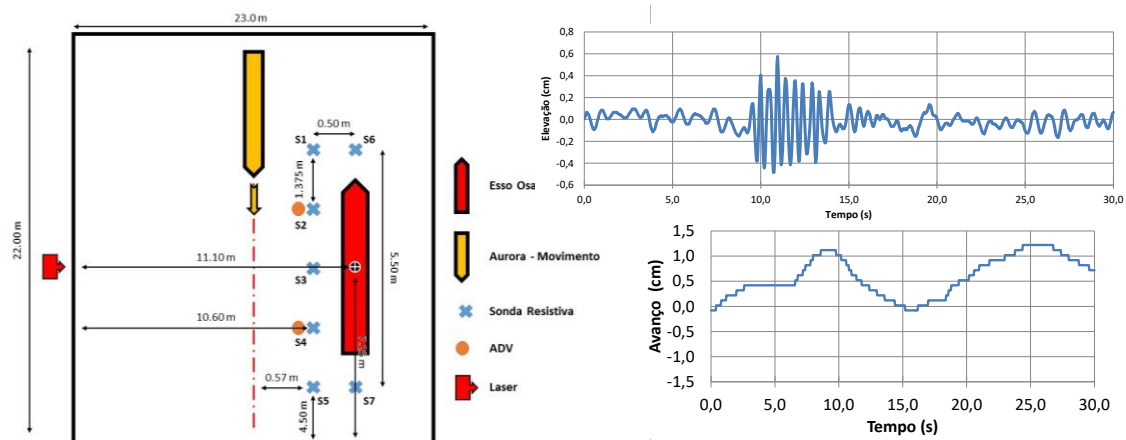


Figura 13 – Esquema do posicionamento dos navios e do equipamento. Série temporal da elevação da superfície livre medida na sonda 3. Movimento de avanço do navio parado

O navio em movimento é um modelo à escala, autopropulsionado, com comprimento de 2.59 m, boca de 0.43 m e calado máximo de 0.11 m.

A Figura 14 apresenta as séries temporais dos movimentos do navio “Esso Osaka”, segundo cada um dos seus seis graus de liberdade, no Teste 7 (profundidade no tanque de 0.82 m e velocidade de avanço do “Aurora” de 0.86 ms<sup>-1</sup>).

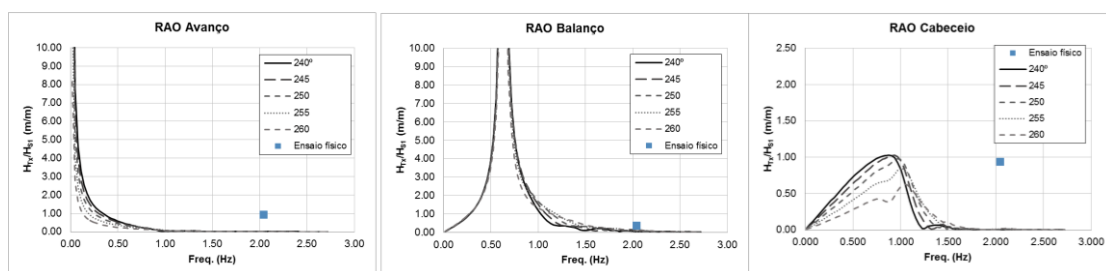


Figura 14 – Funções de transferência do navio (RAO), obtidos numericamente (linhas cinzentas) e do Teste 7 (ponto azul)

Para as frequências das ondas de esteira reproduzidas nos ensaios aqui apresentados (2.041Hz e 2.22Hz), a resposta do navio é muito reduzida, e aproxima-se de zero, em qualquer dos seis movimentos, quando a frequência aumenta. Os dados dos ensaios, com exceção do movimento de guinada, mostram uma resposta também ela de reduzida amplitude. É de salientar que estes ensaios resultam de testes ainda preliminares onde foram identificados uma série de aspetos a

melhorar de forma a obter dados mais rigorosos. As amplitudes medidas são tão pequenas que os efeitos de laboratório se sobrepuseram às quantidades medidas.

### 3. RECENTES DESENVOLVIMENTOS

Tendo a ferramenta “Modelação Física” interesse inquestionável para o LNEC, é claro o interesse na continuação do investimento físico e intelectual no sentido de aperfeiçoar técnicas e equipamentos de apoio a ensaios. De entre estas, destacam-se: a implementação de técnicas de estereofotogrametria – utilizada no levantamento de envolventes e perfis de modelos de quebra-mares; a análise digital de imagens para comparação de fotografias obtidas no final de cada ensaio; e o desenvolvimento de software de deteção de movimentos de blocos durante a realização de ensaios (Ferreira, 2006), (Lemos et al, 2014), (Rodrigues, 2014) e (Lemos et al, 2016).

Para além destes aspetos, e no sentido de facilitar o acesso aos ensaios em modelo físico pelos seus utilizadores finais (projetistas, donos de obra, investigadores, etc.), tem vindo também a assistir-se ao desenvolvimento de técnicas de visualização remota dos ensaios, em tempo real, através de *image streaming* e de utilização de software de acesso remoto para visualização e partilha de dados obtidos nos ensaios, Capitão *et al.* (2015).

Por outro lado, verifica-se o recurso, cada vez maior, a novas metodologias e tecnologias, para aperfeiçoar técnicas de controlo e medição, assim como aperfeiçoar e atualizar os equipamentos de medição.

#### 3.1. Estereofotogrametria

De modo a avaliar a evolução do dano ocorrido no manto resistente de um quebra-mar ao longo dos ensaios em modelo reduzido, é necessário proceder-se ao levantamento de perfis transversais. De modo a agilizar essa tarefa, tem vindo a ser utilizado no LNEC um método de levantamento da envolvente de modelos de quebra-mares de talude baseado em estéreo-fotogrametria (Figura 15a,b). Esta técnica permite, partindo de pares estéreo-fotogramétricos (fotos simultâneas do mesmo cenário obtidas com um par de câmaras fotográficas digitais instaladas permanentemente sobre o modelo), extrair a forma, dimensão e posição dos objetos nela contidas.

Partindo das representações tridimensionais no início e no fim de cada ensaio, podem ser obtidos perfis para avaliar a evolução do dano através da determinação da área e do volume erodido. O método utilizado no LNEC faz uso de um software (Ferreira, 2016) que permite corrigir a refração da luz na interface ar-água, permitindo a realização dos levantamentos sem esvaziar o canal.

Esta técnica foi testada intensivamente em ensaios bidimensionais de quebra-mares de talude (Contente, 2012) e também, com resultados bastante satisfatórios, em ensaios tridimensionais (Figura 15b), bem como em modelos físicos com fundos móveis (Figura 15c,d).

Outros softwares tais como o MicMac, referido em Henriques et al. (2016), ou o Agisoft Photoscan permitem a modelação tridimensional de modelos físicos a partir de múltiplas fotografias Lemos et al. (2017). A Figura 16 ilustra a representação da nuvem de pontos utilizada na modelação 3D de um modelo bidimensional de um quebra-mar de taludes, bem como as fotografias e pontos de referência utilizados na sua obtenção.

Estes softwares permitem gerar nuvens densas de pontos, ortomosaicos sendo que, com base nestes, podem-se gerar modelos digitais de superfície, perfis, etc.. Dada a sua versatilidade, são capazes de processar centenas de fotos, ao mesmo tempo que permite um controle completo sobre a precisão dos resultados obtidos. No final do processamento, obtém-se, para além de diversos outputs gráficos e resultados, também um relatório detalhado do processo.

O software Agisoft Photoscan, na sua versão "demo", foi usado para obter um modelo 3D da cabeça do quebra-mar de Sines do modelo físico instalado nas instalações experimentais do LNEC, aquando dos ensaios do prolongamento do molhe Leste do porto de Sines. Para isso, usaram-se cerca de 100 pontos de referência, materializados através de marcações "+" colocada na superfície de blocos considerados relevantes da estrutura e capturaram-se 102 fotografias

em que se tentou, para além de obter um grau mínimo de sobreposição entre fotografias adjacentes, capturar o máximo de marcações em cada fotografia.

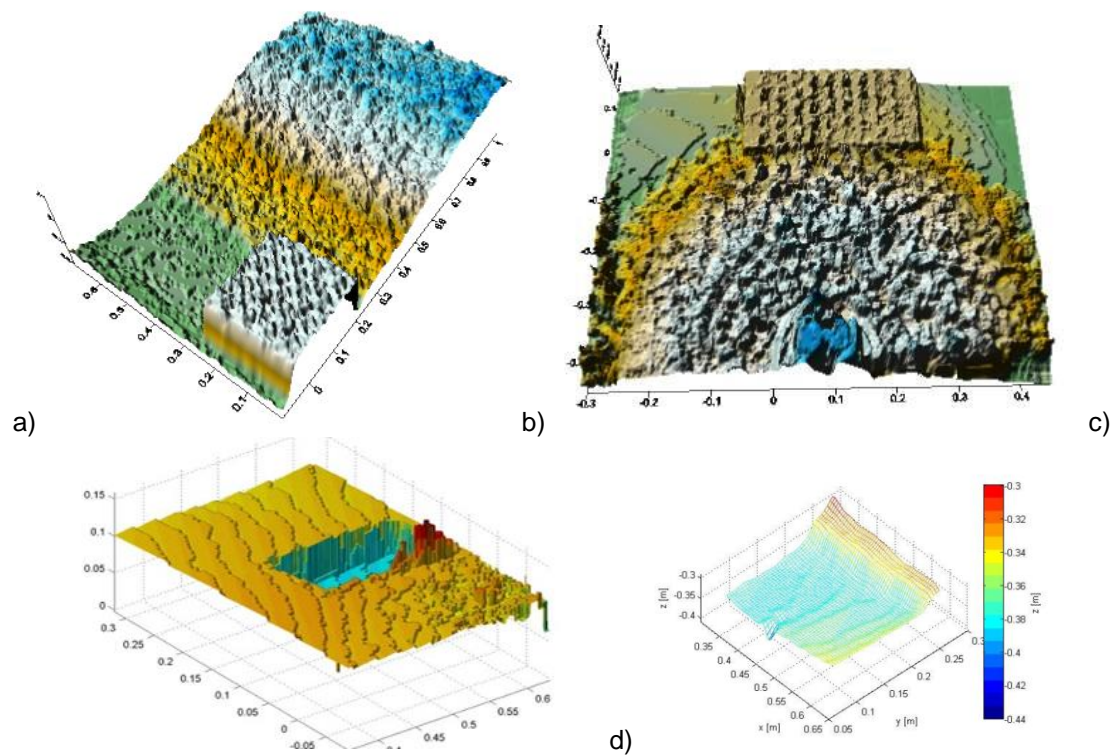


Figura 15 – Envoltantes resultantes de levantamentos estereofotogramétricos: a) Ensaio bidimensional; b) Ensaio tridimensional (Lemos *et al.*, 2014); c) Levantamento estéreo fotogramétrico em areia moldada (Pedro *et al.*, 2016); d) Imagem e reconstrução da erosão em torno de recifes artificiais (Santos, 2015)

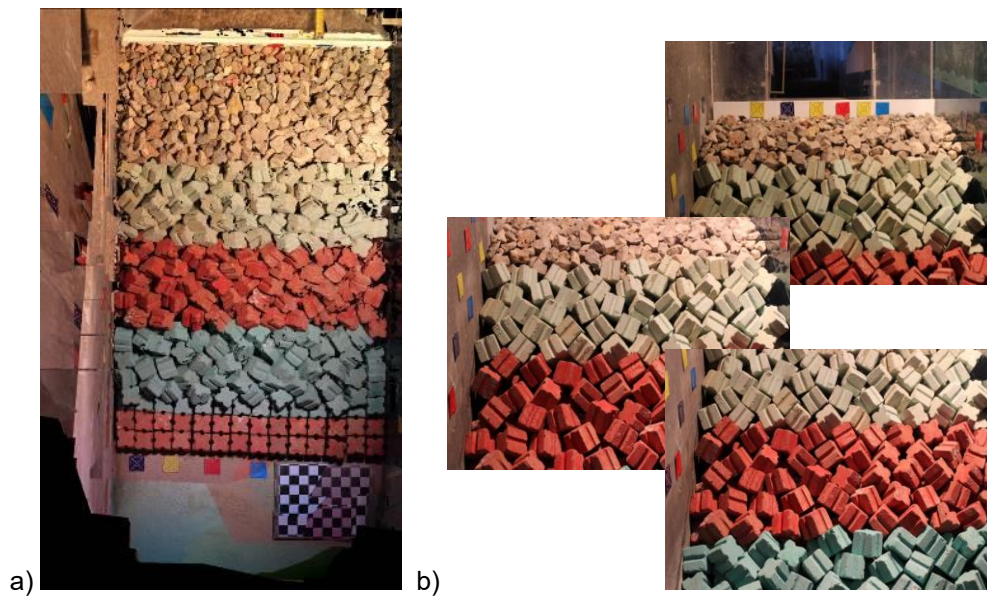


Figura 16 – Modelo 3D obtidas com o software MicMac b) 3 das cerca de 50 fotografias utilizadas na obtenção do modelo 3D



Na Figura 17 mostram-se os resultados do modelo digital de terreno (DEM) (Figura 17a), o modelo 3D (Figura 17b), assim como duas das 102 fotografias produzidas para este processamento (Figura 17c).

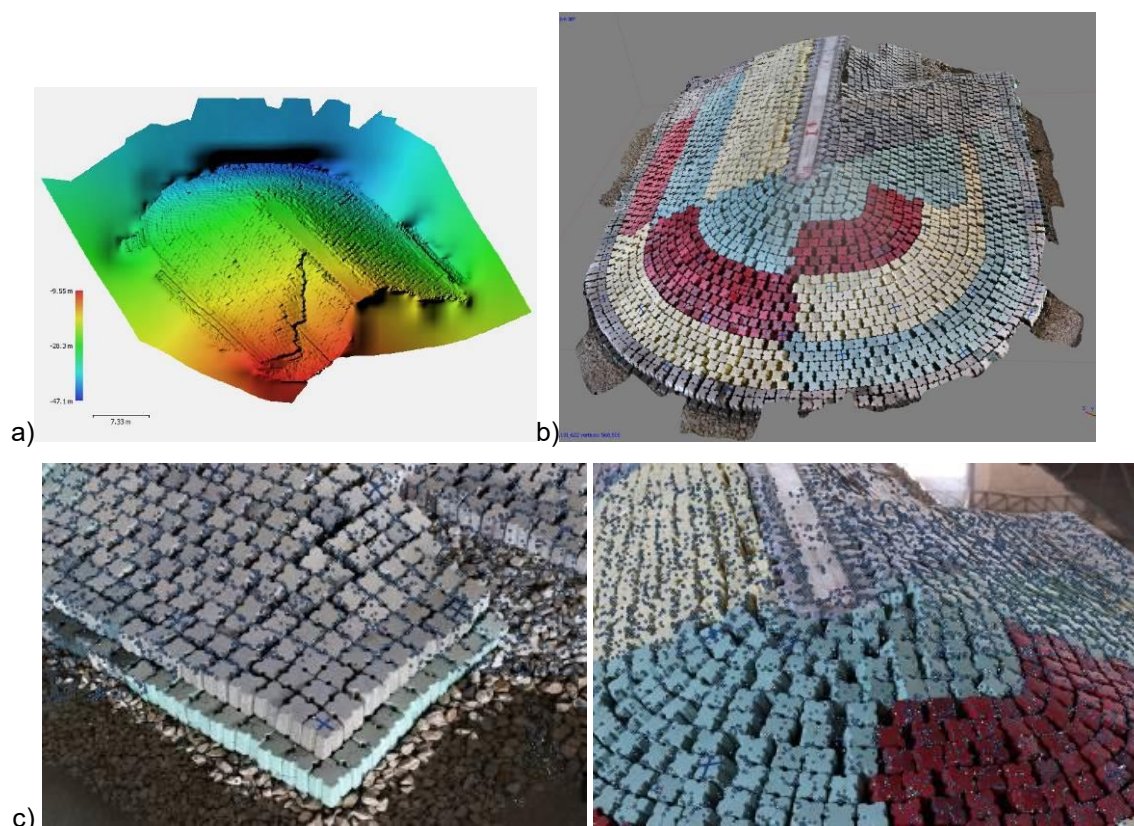


Figura 17 – Agisoft Photoscan. a) modelo digital de superfície (DEM); b) modelo 3D; c) Duas imagens usadas no processamento

### 3.2. Kinect sensor

O uso do sensor Kinect, Figura 18a, Rocha, (2017) e Lemos *et al.* (2017), com a aplicação do *Microsoft® Kinect® sensor application* para efetuar levantamentos é sem dúvida uma ferramenta potente com bastante interesse para o levantamento de modelos.

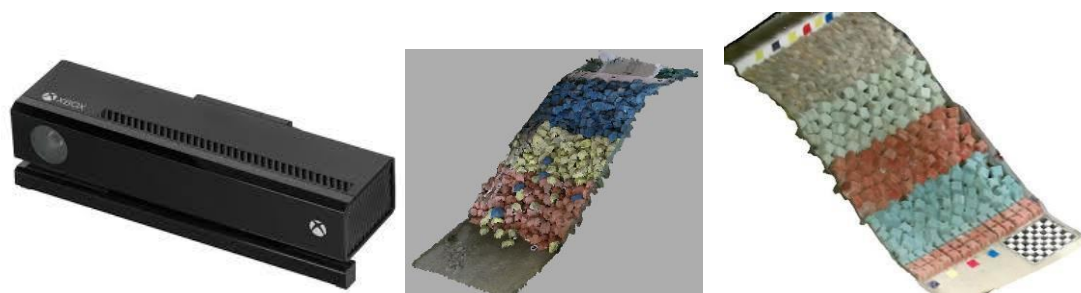


Figura 18 – a) Kinect sensor b) Modelos tridimensionais obtidos com Microsoft® Kinect® *sensor application* em levantamentos de ensaios em canal

O Kinect V2 é constituído por uma câmara RGB, um sensor infravermelho com 3 iluminadores de infravermelhos e 4 sensores de deteção de áudio.

O Kinect V2 utiliza o método *Time of flight* que se baseia no diferencial de tempo entre a emissão e a receção do sinal, partindo do princípio que a velocidade da luz é constante e determina o tempo que o sinal demora a ser retornado ao sensor (Rocha, 2017).

Assim sendo, é possível uma rápida e fácil captura de informação de objetos ou superfícies com alto índice de refletividade ou com baixa luminosidade. Com o uso do sensor e do software associado é possível capturar objetos a distâncias variando entre os 0.5 m e os 8 m.

Numa aplicação recente, foi possível adquirir uma nuvem de pontos em tempo real com cerca de 2 922 123 pontos, Figura 18b. O seu posterior processamento permitiu a extração de superfícies e perfis, Lemos *et al.* (2017).

### 3.3. Análise automática da estabilidade

Para a deteção automática de quedas e movimentos de blocos do manto no final dos ensaios em modelo reduzido de quebra-mares de talude, foram desenvolvidos algoritmos de análise digital de imagens tendo por base a comparação entre fotografias obtidas no início e no final de cada ensaio. Estas técnicas são particularmente eficientes na deteção de quedas de blocos de enrocamento, as quais são difíceis de detetar visualmente.

A Figura 19b representa a imagem resultante da comparação de fotos (Figura 19a) obtidas no final de dois ensaios consecutivos. Estes algoritmos permitem a avaliação quantitativa de áreas modificadas durante o ensaio. Contudo, não permitem ainda distinguir se essa área corresponde a erosão ou a acreção. Foi também desenvolvido um software (Courela *et al.*, 2015) que permite a deteção de movimento dos blocos do manto, através da análise digital de imagens vídeo (Figura 20).

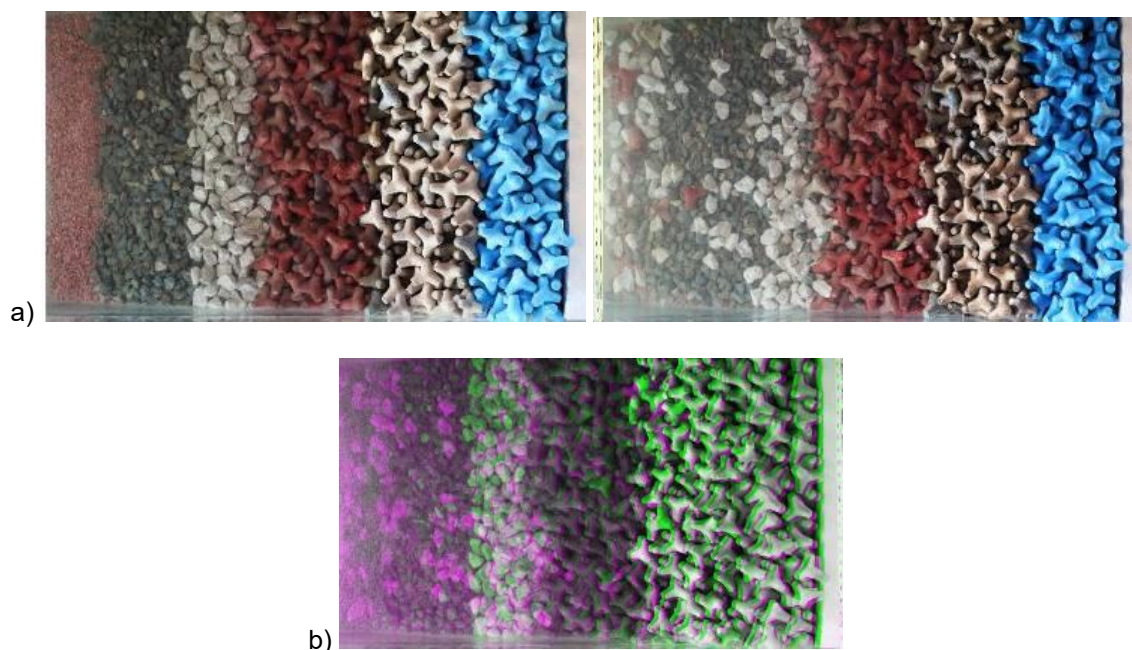


Figura 19 – a) Imagens obtidas no final de dois ensaios tridimensionais consecutivos; b) Imagem resultante da comparação das imagens (Pedro *et al.*, 2015)

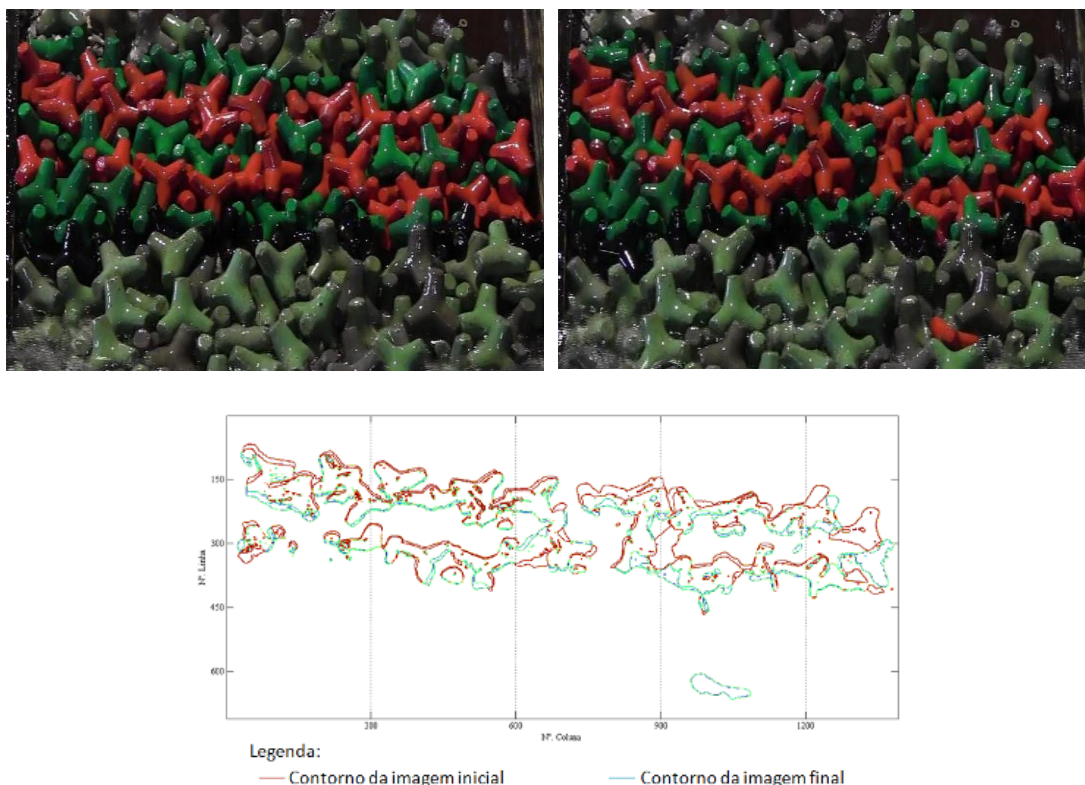


Figura 20 – a) Imagens inicial e final b) Representação da posição inicial e final dos blocos, Courela *et al.* (2015)

#### 4. DESAFIOS E OPORTUNIDADES DA MODELAÇÃO FÍSICA

Um conjunto de novos desafios e oportunidades avizinham-se para a modelação física, face aos problemas que emergem das incontornáveis e irreversíveis alterações climáticas, Fortes *et al.* (2016). Efetivamente, neste âmbito, prevê-se um aumento na frequência e magnitude dos eventos extremos (por exemplo, tempestades, inundações, sobrelevação do nível do mar de índole meteorológica) que afetará certamente corpos de água naturais (mares, lagos, estuários, rios), assim como, naturalmente, as zonas costeiras e portuárias. Em particular, o previsível aumento do nível médio das águas do mar torna estas zonas ainda mais vulneráveis a eventos extremos.

Por outro lado, esses fenómenos que decorrem das alterações climáticas tem características muito complexas e de grande variabilidade espacial e temporal, pelo que a modelação física terá de desenvolver técnicas/procedimentos que permitam a sua caracterização com precisão

A modelação física tem, por isso, de se adaptar para conseguir reproduzir estas novas situações decorrentes dos impactos das mudanças climáticas nos sistemas costeiros, estuarinos e fluviais, bem como ser um instrumento fiável para contribuir na definição de soluções “adaptativas” para aumentar a resiliência das zonas em estudo, i.e., testar potenciais estratégias de adaptação (HYDRALAB+, 2016). Neste sentido apontam-se alguns cenários de desenvolvimento para a modelação física:

- a) **Experimentação e metodologias de ensaio que incorporem sequências de eventos de temporal, incluindo efeitos cumulativos:** embora se saiba a importância da simulação do comportamento conjunto dos parâmetros do projeto (altura e período de onda e nível de maré) esta dependência não é normalmente aplicada na modelação física. Além disso, os efeitos cumulativos que se observam por causa da sequência de tempestades podem levar a falhas progressivas de estruturas, devido a, por exemplo, instabilidades nas peças do manto, assim como galgamentos. É fundamental descrever



corretamente a evolução dos temporais, de modo a poder modelar corretamente os danos e a sua progressão;

- b) **Experimentação e metodologias de ensaio incorporando a subida do nível médio do mar:** A inclusão da subida do nível do mar é fundamental, pelo que devem ser empregues métodos de conceção probabilísticos, com base em dados ambientais no planeamento e execução de estudos de modelos físicos. Atualmente, as estruturas costeiras/portuárias são concebidas em conformidade com as condições ambientais prevalecentes, mas devem igualmente incluir a “folga” necessária para fazer face as mudanças climáticas previstas;
- c) **Técnicas de medição não intrusivas:** é fundamental o desenvolvimento de técnicas que permitam uma avaliação dos fenómenos complexos, com características de grande variabilidade espacial e temporal que decorrem das alterações climáticas, sem interferir nos mesmos ou no próprio sistema modelado. Nesse sentido, por exemplo para a medição dos danos nos modelos físicos, métodos recorrendo a scanners, lasers terrestres e estereofotogrametria) começam a ser utilizados, uma vez que permitem efetuar um levantamento à distância, da superfície o modelo do quebra-mar com grande precisão.

No âmbito do projeto HYDRALAB+ (H2020-INFRAIA-2014-2015), foi realizado num canal de ondas irregulares do LNEC um conjunto de ensaios em modelo físico de um perfil de um quebra-mar de talude (Figura 21), no qual foi feita a análise da propagação de ondas, do espraio, do galgamento e da estabilidade do perfil, para situações extremas correspondentes a cenários de alterações climáticas (Hofland *et al.*, 2017; Mendonça *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2017).



Figura 21 – RECIPE. HYDRALAB+ Project. Perfil do quebra-mar ensaiado.

Os ensaios foram desenvolvidos no âmbito de uma tarefa do projeto HYDRALAB+ (tarefa 8.2 do sub-projeto RECIPE), que teve como objetivo de avaliar o dano e o galgamento no perfil de um quebra-mar, com um talude permeável, constituído por enrocamento. Foi definido um total de 15 ensaios, considerando valores de altura de onda significativa, período de pico e níveis de água que permitissem a simulação de eventos extremos.

A campanha de ensaios foi definida de forma a simular quatro abordagens distintas na representação de tempestades: A) efeito cumulativo de tempestades (através do aumento da altura significativa de onda) com o aumento do nível de água; B) efeito cumulativo de tempestades com um nível de água constante; C) período de onda constante; D) efeito cumulativo de tempestades com um nível de água constante e reconstrução do modelo.

Foram ainda realizados dois ensaios adicionais para o mesmo perfil, mas com um talude impermeável. Estes ensaios foram realizados com um nível de água e um período de pico constantes e alturas de onda significativas crescentes.

O presente estudo pretende comparar os valores de galgamento e espraio obtidos nos ensaios em modelo físico e os previstos pela formulação empírica do EurOtop (2016), para os vários cenários de alterações climáticas (Figura 22). Esta análise é feita com o intuito de estimar com precisão a ocorrência de galgamento em quebra-mares, um fenómeno que ainda se torna



mais relevante em cenários de alterações climáticas. Com efeito, nestes cenários é previsível a subida do nível médio do mar, bem como o aumento da intensidade e frequência de temporais, o que pode dar origem a fenómenos de espraimento/galgamento cada vez mais frequentes, tornando assim cada vez mais vulneráveis as estruturas de proteção costeiras e portuárias, bem como as zonas por elas protegidas.

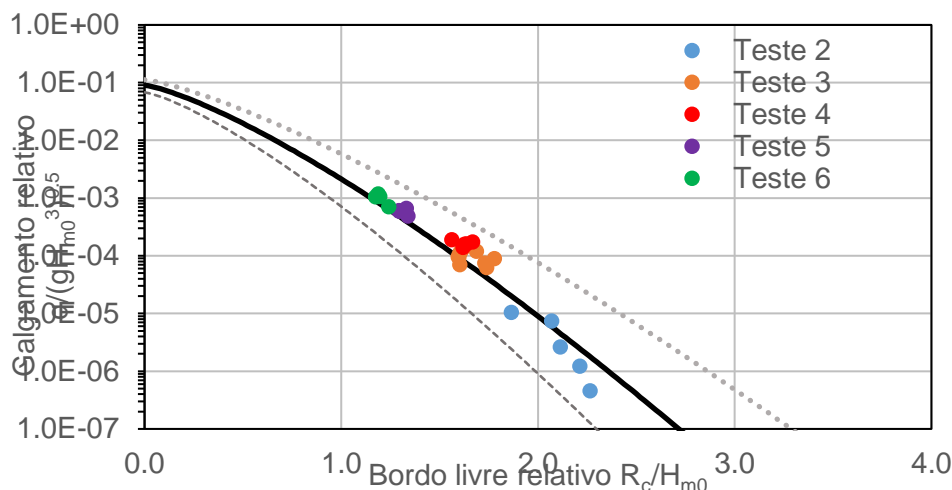


Figura 22 – Valores de galgamento médio relativo estimado (EurOtop, 2016) e medido,  $\eta/(gH_{m0}^3)^{0.5}$ . Relação com o bordo livre relativo,  $R_c/H_{m0}$ : testes 2 a 6

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A maioria das instalações experimentais no LNEC está suficientemente bem preparada para simular as ações típicas do clima de agitação, reconhecendo-se, de um modo geral, que os tanques e canais de onda tradicionais apresentam limites mais conservadores, em termos de declividade das ondas, que os encontrados no ambiente natural (para ondas geradas pelo vento).

No entanto, em cenários de alterações climáticas, essas ações forçadoras serão mais intensas, frequentes e instáveis (por exemplo, poderá haver maior variabilidade sazonal ou interanual, em relação à mudança climática, que varia lentamente), assim como mais dependentes umas das outras, levando à ocorrência de tempestades (furacões) com ondas mais acentuadas (ou seja, com uma maior altura de onda para a relação de comprimento de onda).

Nos últimos anos têm sido realizados esforços significativos para gerar adequadamente ondas extremas, para as quais o equipamento tradicional de geração de ondas nem sempre fornece uma boa solução. Assim, se por um lado os efeitos das mudanças climáticas deverão ser devidamente reproduzidos, a utilização de equipamentos e técnicas inovadoras em instalações experimentais (por exemplo, com novas técnicas de geração de ondas) deverão ser também consideradas prioridades, de modo a possibilitar a simulação de eventos extremos.

Uma vez que há uma incerteza significativa na previsão dos efeitos das mudanças climáticas nas variáveis que servem de base ao projeto das estruturas costeiras e hidráulicas (ou seja, estabelecendo o aumento do nível do mar ou a previsão de eventos extremos), o uso de cenários, estimando possíveis realidades futuras, a médio e longo prazo, é de suma importância.

Os métodos de análise de probabilidade conjunta e métodos probabilísticos estão também a ganhar relevância no contexto das mudanças climáticas, especificamente nas fases de planeamento e operação de estudos em modelo físico, que, por serem morosos e dispendiosos, beneficiam da aplicação destes métodos, possibilitando uma seleção mais adequada das condições representativas a serem incluídas no programa de testes.

Destaca-se ainda a relevância da reprodução de sequências de eventos extremos ao longo da vida útil da estrutura, incluindo os efeitos cumulativos, através de sequências de tempestades que podem levar a falhas progressivas, devidas, por exemplo, à instabilidade dos elementos do manto e do seu impacto no processo de galgamento. Assim, uma descrição correta da evolução

da tempestade é considerada fundamental para analisar a progressão do dano e o seu impacto no galgamento. A definição de sequências de eventos extremos exige, por um lado, a caracterização correta desses eventos (em termos de altura de onda, período de onda, direção da onda, nível do mar, entre outros) e a sua adequada interação.

A intenção de reproduzir a cronologia dos eventos pode levar, simultaneamente, a durações de teste muito maiores e à necessidade de incluir a variação do nível de maré (ou seja, o nível de maré a variar no processo de interação onda-estrutura). Isso requer o desenvolvimento de novos sistemas para controlar o enchimento e esvaziamento de instalações experimentais (taxa de fluxo variável e controlada, uma vez que a velocidade e variação do nível de maré não são constantes). Requer também a análise dos efeitos na operação de outros equipamentos cujo desempenho é influenciado pelo nível de água, nomeadamente os sistemas de absorção de ondas dinâmicas / ativas, baseados em medições em tempo real do nível de água em frente ao bater, e mesmo em alguns sistemas de absorção passivos sensíveis às mudanças no nível da água.

A medição do dano da estrutura deve, de preferência, ser obtida sem esvaziamento e enchimento do canal ou do tanque, o que pode levar uma quantidade considerável de perda de tempo. Assim, as medições devem ser realizadas através da superfície da água: atualmente, os perfis mecânicos são ainda o dispositivo de medição mais utilizado, mas novos métodos (sistemas de varrimento laser terrestre, varrimento laser subaquático e fotogrametria) devem ser usados para digitalizar a superfície das estruturas costeiras para obter medidas mais precisas de danos (erosão). Com estas técnicas, a superfície pode ser obtida com resolução e precisão milimétrica.

Outra questão importante surge: como escalar o tempo ao considerar eventos com um longo período de tempo? O desafio será definir durações de teste mais curtas, compatíveis com os requisitos de estudos e projetos atuais, que poderão produzir resultados equivalentes. Salientam-se também os problemas relacionados com a escala dos materiais, como a argila e areia e, consequentemente, com as suas características geotécnicas, importantes na análise de estabilidade das estruturas, e, em particular, com o fenómeno de liquefação.

A maioria dos estudos em instalações experimentais é feito com água doce, devido a razões económicas ou operacionais. As características da água utilizada nos ensaios não são uma grande preocupação, desde que tenha sido adequadamente dimensionada. Em alguns casos, no entanto, é importante considerar a água doce e salgada, nomeadamente na interface mar-rio (estuários), e na simulação de interação entre ondas e correntes. Nestes casos serão necessárias instalações experimentais com grandes áreas.

Sugerem-se assim as seguintes linhas de atuação (*guidelines*) para a modelação física, consentâneas com os estudos de impacto das mudanças climáticas, que se preveem num futuro próximo:

- a) Adaptação das instalações de modelação física para poderem acomodar simulações de eventos extremos, tais como tsunami e/ou vagalhões (freak/rogue waves);
- b) Desenvolvimentos de software de geração de ondas e de técnicas não intrusivas (fotogrametria, por exemplo) para medição de parâmetros no modelo físico, para lidar com cenários de mudanças climáticas (situações extremas);
- c) Realização de ensaios de séries de longa duração com o objetivo de chegar a um novo grau de dano da estrutura e a formulações de previsão de falha relacionada com estados limites últimos ou de serviço, tendo em conta os dados climáticos previstos;
- d) Desenvolvimento de técnicas de análise de forças e pressões em cenários de mudanças climáticas.

Finalmente, uma linha de investigação que claramente terá de ser desenvolvida é a interdisciplinaridade dos estudos efetuados. Cada vez com mais frequência, o desenvolvimento de um novo projeto envolve uma panóplia alargada de estudos, incluindo os seus impactos sociais, económicos e ambientais, que se podem influenciar e/ou condicionar mutuamente. Assim, afigura-se necessária a adaptação das instalações experimentais ao estudo da interação da biologia, morfodinâmica e hidrodinâmica com as estruturas costeiras e portuárias.

## AGRADECIMENTOS

Agradece-se o financiamento concedido pelos projetos H2020-INFRA-2014-2015, N.654110 - HYDRALAB+ Adaptation for Climate Change e "M&M Ships PTDC/EMSTRA/5628/2014. Agradece-se aos colegas André Ramos, Pedro Guerreiro, Joana Simão e Rosa Emília Soares a ajuda na realização dos ensaios.

## REFERÊNCIAS

- Bonakdar, L. and Etemad-Shahidi, A., 2011. Predicting wave run-up on rubble-mound structures using M5 model tree, *Ocean Engineering*, 38 (1), p. 111-118.
- Capitão, R., Fortes, C.J.E.M., Lemos, R., Wellens, P., 2014. The RADE Project - Hydrolink, Nr. 2/2014.
- Contente, J., 2012. Desenvolvimento de uma técnica fotogramétrica, aplicada à evolução do dano em ensaios em modelo reduzido de quebra-mares de taludes. Estágio. FCT/UAlg.
- Courela, J.M., Carvalho, R.F., Lemos, R., Fortes, J., Leandro, J., 2015. Rubble-mound breakwater armour units displacement analysis by means of digital images processing methods in scale models. *Proc. 2nd IWHS: Data Validation*, IAHR, Coimbra, maio.
- Crespo, A. J. C., Domínguez, J. M., Rogers, B. D., Gómez-Gesteira, M., Longshaw, S., Canelas, R., García-Feal, O. (2015). "DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)," *Computer Physics Communications*, 187, 204–216.
- EurOtop, 2016. Manual on wave overtopping of sea defences and related structures. An overtopping manual largely based on European research, but for worldwide application. Van der Meer, J.W., Allsop, N.W.H., Bruce, T., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Pullen, T., Schüttrumpf, H., Troch, P. and Zanuttigh, B., [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com).
- Ferreira, R., 2006. Reconstruction of a Submerged Model Breakwater and Interface Estimation. Master Thesis. Instituto Superior Técnico (IST), Lisboa.
- FLUENT, 2006. User Guide FLUENT version 6.3.26. FLUENT Inc., USA.
- Fortes, C.J.E.M., Capitão, R., Lemos, R., Neves, M.G., Pinheiro L.V., Reis, M.T., 2016. O papel da modelação física no apoio aos estudos de engenharia costeira e portuária. Desafios e oportunidades. 10.º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, CNME2016. Lisboa, LNEC, 12 a 14 de outubro. ISBN 978-972-49-2287-4.
- Greenshields, C.J., 2015. OpenFOAM userguide version 2.4.0, OpenFOAM Foundation Ltd.
- Henriques, M.J., Braz, N., Roque, D., Lemos, R., Fortes, C.J.E.M., 2016. Controlling the damages of physical models of rubble-mound breakwaters by photogrammetric products - Orthomosaics and point clouds", In *Proceedings of the 3rd Joint International Symposium on Deformation Monitoring (AC) (AP)*.
- Hinostroza, M.A., Guedes Soares, C., 2016. Parametric estimation of the directional wave spectrum from ship motions. *Int. J. Maritime Engineering* 158.
- HYDRALAB+, 2016. WP6-NA5 Foresight studies: Experimental facilities for studies of climate change and adaptation Identification of datasets for impacts of climate change.
- Hofland, B., Rosa-Santos, P., Taveira-Pinto, F., Almeida, E., Lemos, R., Mendonça, A., Fortes, C.J.E.M., 2017. Measuring damage in physical model tests of rubble mounds. *ICE - Coasts, marine structures and breakwaters 2017*, 5-7 September 2017, Liverpool, UK. 10p.
- Lemos, R., Fortes, C.J.E.M., Santos, J.A., Capitão, R., Silva, L.G., 2014. Contribuição para uma automatização da visualização, análise e partilha de ensaios em modelo físico reduzido de estruturas marítimas. 12.º Congresso da Água / 16.º ENASB / XVI SILUBESA, Lisboa, março
- Lemos, R., Henriques, M., Muralha, A., Jonatas, R., Fortes, C.J.E.M., Capitão, R., 2017. Survey of a two-dimensional scale model of a rubble-mound breakwater using different stereo-photogrammetric techniques. *INGEO2017*. LNEC, Lisboa, 23-25 outubro.
- Lemos, R., Loja, M.A.R., Rodrigues, J., Rodrigues, J.A., 2016. Photogrammetric analysis of rubble mound breakwaters scale model tests. *AIMS Environmental Science*, 3(3): 541–559, DOI: 10.3934/environsci.2016.3.541, September 2016.

- Mendonça, A., Lemos, R., Reis, M.T., Fortes, C.J.E.M., Neves, M.G., Ramos, A., Capitão, R., 2017. Overtopping events in breakwaters: comparison of 2D physical experiments and empirical formulae. 37th IAHR World Congress, August 13th to 18th, 2017 – Kuala Lumpur, Malaysia. 3749-3757pp. ISSN 1562-6865.
- Neves, D.R.C.B., Pires-Silva, A. A., Fortes, C.J.E.M., Matos, J.S.G., 2016. A Comparison of Wave Breaking with RANS and SPH numerical models. Proceedings of the Twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference, Rhodes, Greece, June /July, 2016. ISBN 978-1-880653-88-3; ISSN 1098-6189.
- Pedro, F., Lemos, R., Fortes, C.J.E.M., Santos, J.A., 2016. Application of stereo photogrammetry to physical scale model tests with mobile beds. 10º Cong. Nac.de Mecânica Experimental, LNEC, 12-14 de outubro.
- Pedro, F., Hinostroza, M., Pinheiro, L., Santos, J.A., Fortes, C.J.E.M., Ramos, A., 2017. Caracterização experimental de um navio parado sujeito a ondas de esteira. 13º SILUSBA, Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa, 13 a 15 de Setembro de 2017, na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). 15p. ISBN 978-989-8509-19-2.
- Pullen, T., Allsop, N.W.H., Bruce, T., Kortenhaus, A., Schuttrumpf, H., Van der Meer, J., 2007. EurOtop: Wave overtopping of sea defences and related structures: Assessment Manual, Environment Agency, UK, Expertise Netwerk Waterkeren, NL, and Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, DE, August. ISSN 0452-7739.
- Reis, M.T., Silva, L.G., Neves, M.G., Lemos, R., Capitão, R., Fortes, C.J.E.M., 2015. Physical modelling as a fundamental tool for the design of harbours and maritime structures. PIANC book 2014, pp. 135-157.
- Rocha, C., 2017. Monitorização dos modelos de quebra-mares com o sensor Microsoft Kinect V2. Tese de Mestrado em Engenharia Geográfica. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- Rodrigues, J., 2014. Controlo fotogramétrico da condição de estruturas quebra-mar. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, dezembro.
- Santos, R., 2015. Modelação física da interação onda-estrutura em fundo arenoso. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil, FCT, Universidade Nova de Lisboa.
- Silva, E., Allsop, W., Riva, R., Santos, P., Mendonça, A., Reis, M.T., 2017. The Conundrum of Specifying very low Wave Overtopping Discharges. Proc. Coasts, Marine Structures and Breakwaters 2017, 5 - 7 September 2017, Liverpool Waterfront, UK.
- Simão, J., Pinheiro, L., Lesme, H., Hinostroza, M., Santos, J. A., Fortes, C.J.E.M. 2016. Ship movements' analysis in a scale model 10º Congresso Nacional de Mecânica Experimental, LNEC, 12-14 de outubro.
- Van der Meer, J.W. and Stam, C.J.M. 1992. Wave runup on smooth and rock slopes of coastal structures, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 118(5), p. 534-550.
- Ting, F. C. K., and Kirby, J. T. (1994). "Observation of undertow and turbulence in a laboratory surf zone," Coastal Engineering, 24(1-2), 51–80.
- Xie, Z. (2013). "Two-phase flow modelling of spilling and plunging breaking waves," Applied Mathematical Modelling, 37(6), 3698–3713.