



## MODELAÇÃO FÍSICA EM ZONAS PORTUÁRIAS Desenvolvimentos recentes no LNEC

Conceição J.E.M. Fortes, Rute Lemos, Rui Capitão, Líliana Pinheiro, Rui Reis, Luís Gabriel Silva, César Costa Joana Simão, Rosa Emília Soares, Ana Mendonça, Jan Hilário  
[jfortes@lnec.pt](mailto:jfortes@lnec.pt), [rlemos@lnec.pt](mailto:rlemos@lnec.pt), [rcapitao@lnec.pt](mailto:rcapitao@lnec.pt), [lpinheiro@lnec.pt](mailto:lpinheiro@lnec.pt), [reis@lnec.pt](mailto:reis@lnec.pt), [lgsilva@lnec.pt](mailto:lgsilva@lnec.pt),  
[ccosta@lnec.pt](mailto:ccosta@lnec.pt), [jsimao@lnec.pt](mailto:jsimao@lnec.pt), [resoares@lnec.pt](mailto:resoares@lnec.pt), [amendonca@lnec.pt](mailto:amendonca@lnec.pt), [jhilario@lnec.pt](mailto:jhilario@lnec.pt)

### Resumo

Nesta comunicação, descrevem-se os mais recentes desenvolvimentos no LNEC em termos de instalações experimentais, técnicas de construção, equipamentos e metodologias utilizadas nos ensaios em modelo físico, com a apresentação de casos de estudos realizados para as zonas portuárias de Peniche Ponta Delgada, Leixões.

### Introdução

Desde a formação do LNEC que a modelação física tem sido uma das ferramentas de estudo mais utilizadas, tanto pela sua versatilidade como pela sua fiabilidade, para dar resposta nos diversos estudos de hidráulica marítima em zonas costeiras e portuárias.

Face à modelação matemática ou numérica, esta apresenta como principal vantagem a maior capacidade de representação simultânea de diversos fenómenos complexos presentes na propagação de ondas em zonas costeiras e portuárias e na interação das ondas com o fundo e estruturas marítimas fixas ou móveis, assim como com navios e outros elementos flutuantes. Outra vantagem importante é a possibilidade, através da utilização de equipamentos de medição, de obter séries de variáveis de interesse em condições controladas, que têm a mais-valia de poderem ser, também, utilizadas na validação de modelos numéricos.

Os estudos mais frequentemente solicitados por clientes ao LNEC são os ensaios em modelo físico reduzido, nomeadamente estudos de agitação em zonas marítimas, galgamento e estabilidade de quebra-mares de talude e pressões em estruturas marítimas. Por vezes, são também solicitados ensaios para a avaliação do impacto de estruturas na morfodinâmica de trechos costeiros. No âmbito de trabalhos de investigação, para além dos ensaios referidos, têm vindo a ser realizados ensaios para desenvolvimento de dispositivos de aproveitamento da energia das ondas, ensaios de manobra de navios livres e de navios amarrados em zonas portuárias, ensaios de dissipação de ondas por vegetação, e ensaios de apoio à aquacultura, entre outros. Alguns destes estudos de investigação foram realizados em colaboração com outras entidades (p. ex. Instituto Superior Técnico).

Os avanços verificados na modelação física nos últimos anos no LNEC são notáveis, decorrentes quer da modernização das instalações experimentais, quer do estabelecimento de novas técnicas de construção de modelos físicos e de modernização dos equipamentos eletromecânicos e científicos, quer do aperfeiçoamento de metodologias de medição e exploração dos modelos bem como para o tratamento de dados.

Esta comunicação centra-se nos avanços verificados na modelação física com fundo fixo de zonas portuárias e dá-se principalmente relevo à utilização de metodologias baseadas em análise de imagem para a medição de variáveis no modelo.

### Instalações experimentais

Para a modelação física em Hidráulica Marítima, foram construídos dois novos tanques no Pavilhão de Hidráulica Marítima, com dimensões de 47.6 x 23.6 x 1.8 m (TO1) e 46.6 x 20.6 x 1.8 (TO2) m, que permitem uma melhor representação dos fenómenos físicos e qualidade nos ensaios.

Em colaboração com o INEGI, está também em curso a remodelação do canal de grandes dimensões (COI2), com a instalação de uma nova estrutura móvel deslizante, equipada com apoios fixos e rotulares e capacitada de sensores de força, o que permitirá a fixação dos graus de liberdade desejados em cada ensaio e, assim, estudar o comportamento hidrodinâmico de diversos elementos, tais como hidrofólios e cascos de navios.



Figura 1 – Novos Tanques TOI1 (esquerda) e TOI2 (direita)

### Construção de modelos físicos

Quanto à construção dos modelos físicos, refere-se o recurso a novas técnicas e materiais, tais como o uso de métodos não intrusivos (sem destruição da laje do fundo) e perfis para a representação da batimetria e das estruturas a construir, Figura 2a, o fabrico em grande escala de blocos artificiais, Figura 2b, e a impressão 3D de peças do modelo físico ou de suporte dos equipamentos de medição, Figura 2c.

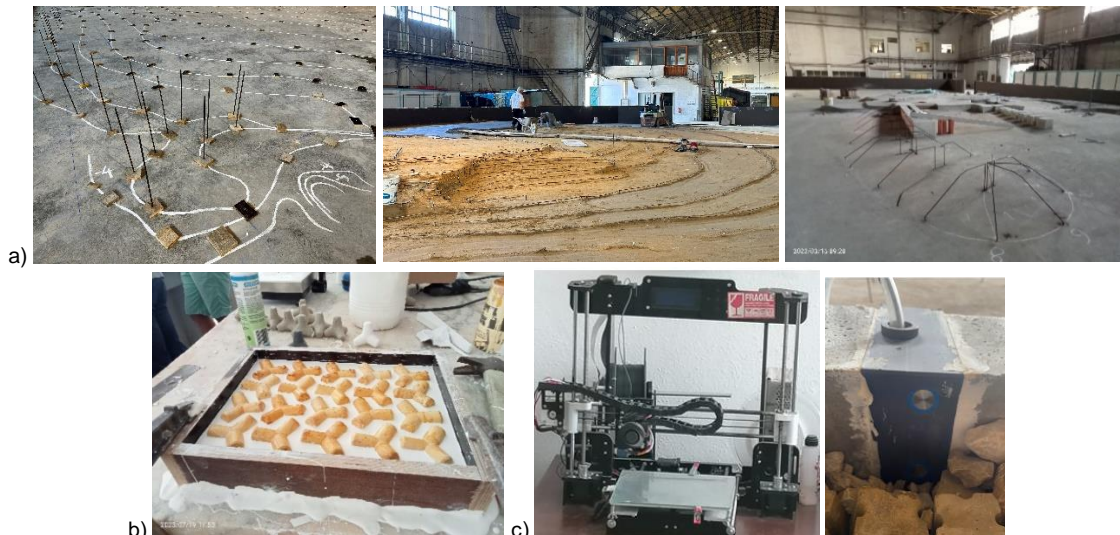


Figura 2 – Construção de modelos físicos: a) Batimetria; b) Fabrico de blocos; c) Impressão 3D

### Equipamentos científicos

Quanto aos equipamentos científicos, têm sido adquiridos ou desenvolvidos diversos equipamentos de medição, como sondas resistivas, câmaras fotográficas e de filmar, sondas *laser*, sensores de pressão, velocímetros (ADV), balanças digitais e sistemas óticos de medição de movimento (Optitrack™) ou sensores de profundidade baseados na metodologia ToF-*Time of Flight* (Kinect™ e Azure™). Estes novos equipamentos permitem a medição de diferentes variáveis de forma simultânea e com elevada precisão e tornam a realização dos ensaios mais rápida e eficiente. Para além disso, foi desenvolvido um sistema de visualização remota por *streaming* que permite aos técnicos envolvidos nos ensaios, e também ao cliente, acompanhar de forma remota a realização de ensaios em modelo físico.

Como exemplo concreto de modernização dos equipamentos experimentais, o LNEC desenvolveu uma nova versão das sondas resistivas, mais robustas, que podem ser aplicadas em zonas mais ou menos profundas num modelo físico e sensores *laser* que permitem medir a velocidade do escoamento, Figura 3a. Por sua vez, adquiriu sensores de pressão para a avaliação da pressão em estruturas marítimas ou em pilares, Figura 3b. Adquiriu também sensores de profundidade Kinect e Azure para o levantamento digital 3D dos modelos, Figura 3c e o sistema Optitrack™, para medição de movimentos de corpos flutuantes.

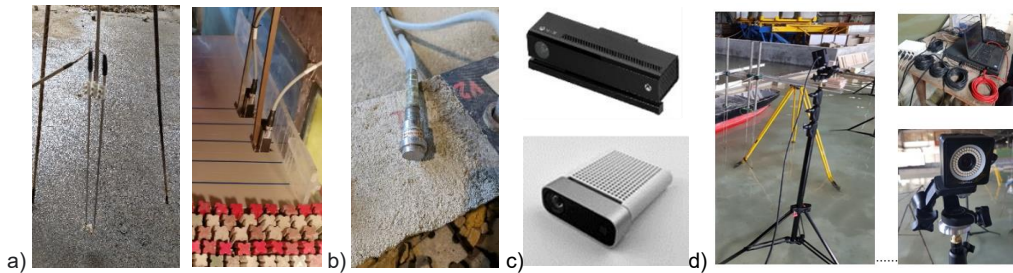


Figura 3 – Equipamentos: a) sondas resistivas e laser; b) Sensores de pressão; c) Kinect V2 e Kinect Azure; d) Sistema Optitrack™

É importante salientar que todas as medições efetuadas com os equipamentos são armazenadas em ficheiros brutos e sincronizadas no tempo. Estes ficheiros são também tratados de imediato com recurso a rotinas desenvolvidas em Matlab, para a visualização imediata dos dados medidos, sob a forma de gráficos, espectros direcionais e para o cálculo de parâmetros estatísticos.

### Metodologias de medição e exploração do modelo

#### Determinação do espraimento

Para a determinação do espraimento e galgamento em quebra-mares de talude, tem sido utilizada a metodologia *Timestack* proposta por Andriolo (2022), baseada na análise de imagens captadas por uma câmara de filmar. Esta metodologia consiste na utilização de algoritmos desenvolvidos em Matlab que permitem a extração de “frames” do vídeo a analisar e delas extrair todos os pixels que se encontram ao longo de um pré-definido segmento de reta (transeto) sobre o talude, sendo depois efetuada a conversão desses pixels em parâmetros do espraimento.

Nos ensaios 2D de espraimento de Peniche, utilizou-se uma câmara de vídeo comercial (Samsung Digital Camcorder HMX Q10BP) que filmou a sequência de imagens durante o tempo de ensaio com uma frequência de 50 frames/s, sendo o *Timestack* e os resultados em termos de parâmetros do espraimento apresentados na Figura 4, Lemos *et al.* (2022). Está em curso a aplicação desta metodologia em ensaios 3D e na avaliação do galgamento de estruturas.

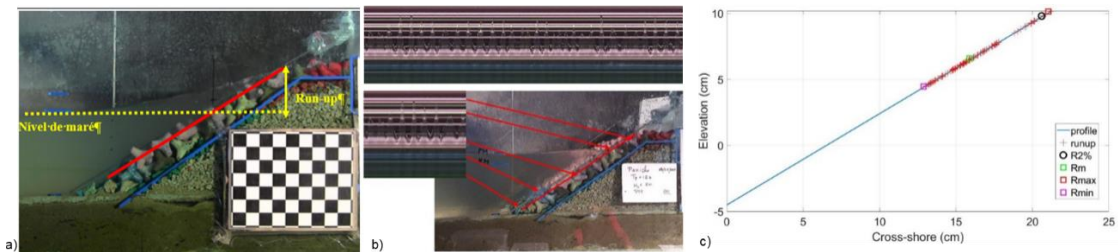


Figura 4 – Peniche: a) Modelo físico e transeto; b) TimeStack e correspondência no modelo; c) Eventos de espraimento ao longo do talude

#### Evolução do dano

Uma das metodologias que tem sido desenvolvida recentemente, é a determinação de volumes e profundidades de erosão/acreção no manto do talude, com base na realização de levantamentos consecutivos da envolvente dos taludes dos modelos. Tais levantamentos podem ser realizados de forma não intrusiva, recorrendo a técnicas fotogramétricas com sensores RGB, sensores de profundidade baseados na metodologia ToF (*Time of Flight*) e sensores de *laser scanning* LiDAR (*Light Detection And Ranging*). Dependendo das condições de levantamento e da metodologia de pós-processamento das nuvens de pontos obtidas, estas técnicas permitem obter modelos tridimensionais de superfície digitais, com maior ou menor precisão.

Nos ensaios 3D de estabilidade do projeto de reparação do molhe principal de Ponta Delgada, os levantamentos foram realizados no início e no final de cada série de ensaios com o Kinect a uma distância de 2.0 m usando o software Microsoft KinectFusion. As nuvens de pontos obtidas foram processadas usando as ferramentas e algoritmos do software *CloudCompare*. Esses

algoritmos permitiram calcular o volume erodido, por comparação das nuvens inicial e final (mapa de diferenças) e, por sua vez, estimar o parâmetro adimensional ( $S_{3D}$ ) representativo do número de blocos removidos do manto, Figura 5, *Lemos et al.* (2023). Recentemente, para avaliar qual a melhor e mais eficaz técnica, estão a ser testados outros sensores de posição: Azure, Sensor RGB (SLR Nikon D7100), e sensor LIDAR do smartphone iPhone 14 Pro, *Capitão et al.* (2023).

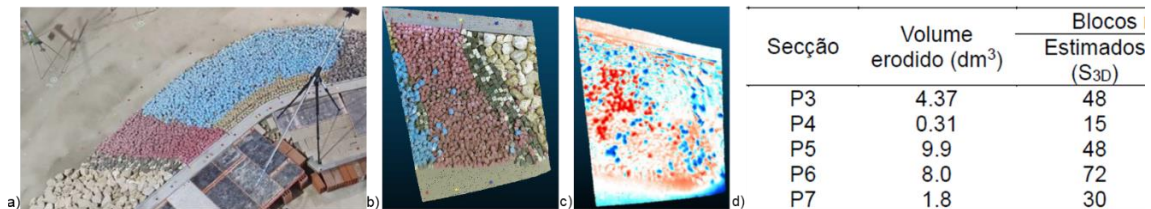


Figura 5 – Porto de Ponta Delgada: a) Modelo físico; b) Levantamento final (Zona 3); c) Mapa de diferenças; d) Volume erodido e número estimado e contado de blocos removidos

#### Movimentos de navios amarrados e forças nas amarras e defensas

No que diz respeito a ensaios com navios, foram desenvolvidas metodologias para a medição de: a) movimentos induzidos pela agitação incidente num navio amarrado ao cais, utilizando um sistema ótico de captura de movimentos (Optitrack™); b) forças nas amarras e de impacto em defensas, utilizando sensores de força ligados a um sistema de elasticidade variável desenvolvido no LNEC, que permite reproduzir corretamente as relações constitutivas dos elementos de amarração, mesmo que estas sejam não lineares e complexas.

No modelo físico do porto de Leixões (*Pinheiro et al.*, 2020), Figura 6, foi estudado o comportamento do navio “Esso Osaka” amarrado no posto “A”, para diferentes condições de agitação incidente. Os movimentos do Esso Osaka foram medidos segundo os seis graus de liberdade com recurso ao sistema Optitrack™. Efetuou-se ainda a determinação das forças nas amarras e defensas com recurso ao sistema de medição de forças do LNEC. Recentemente, têm sido realizados ensaios para avaliar as forças de impacto dos navios nas diversas defensas instaladas num cais (*Pinheiro et al.*, 2022) e, deste modo, verificar a energia de impacto e a distribuição das forças de impacto em vários cenários de acostagem.

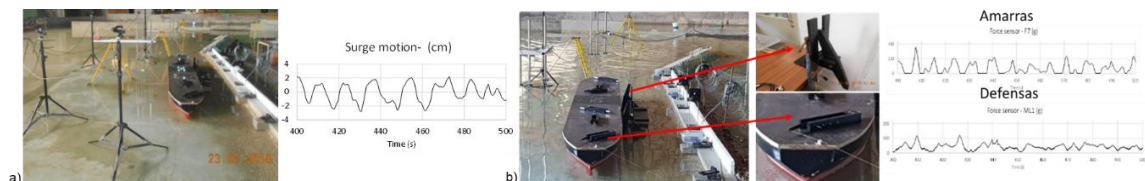


Figura 6 – Porto de Leixões: a) Sistema OptiTrack e resultados; b) Sistema de forças em amarras e defensas e resultados

#### **Agradecimentos**

Agradece-se aos projetos C2IMPRESS (Horizonte Europa, GA n.º 101074004) e LIFE Garachico (LIFE20 CCA / ES / 001641).

#### **Referências**

- Andriolo (2019) MATLAB programs for the video analysis of wave run-up measurements on a breakwater in a laboratory flume, Bsafe4sea project report, junho.
- Capitão, R., Lemos, R., Fortes, C.J.E.M., Jonatas, R. (2023) Avaliação de desempenho de técnicas de reconstrução 3D aplicadas a modelos físicos de quebra-mares, 11as JPECP Matosinhos, 3 e 4 de outubro.
- Lemos, R., Fortes, C.J.E.M., Silva, L.G., Pinheiro, L. (2022) An estimation of the damage of scale models of breakwaters using the time of flight method, *Mecânica Exper.*, 35, APAET, pp. 51-60.
- Lemos, R.; Fonte, R., Fortes, C., Andriolo, U., Rito, R. (2023) Determination of wave run-up through the Timestack methodology and through a resistive wave gauge. A comparative analysis. *Engenharia Térmica*, 2023, 22.1: 25-31
- Pinheiro, L.; Pedro, F.; Abdelwahab, H.S.; Fortes, C.J.E.M.; Santos, J.A.; Capitão, R. (2020) Extensão do molhe norte do Porto de Leixões: modelação física de um navio amarrado no posto A. *Recursos Hídricos*, 41,1, pp.17-28, março.
- Pinheiro, L. Simão, J. Costa, C. Manso, J. Marcelino, J. Fortes. C.J.E.M. (2022) Scale Model Tests of Ship Impact on Fenders. 3rd TESTE, 21- 23 June 2022, (FCT NOVA), Portugal.