



## RECONSTRUÇÃO DO QUEBRA-MAR DO PORTO DAS LAJES DAS FLORES: A IMPORTÂNCIA DA MODELAÇÃO FÍSICA NO APOIO AO PROJETO

Rute Lemos<sup>1</sup>; Conceição J.E.M. Fortes<sup>1</sup>; Luís Gabriel Silva<sup>1</sup>; Rui Reis; Rosa Soares<sup>1</sup>; Hugo Leite<sup>2</sup>; Flávio Pereira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil; <sup>2</sup>MSW – Estudos e Projetos de Obras Marítimas;

<sup>3</sup>Portos dos Açores, S.A.

[rlemos@lnec.pt](mailto:rlemos@lnec.pt), [jfortes@lnec.pt](mailto:jfortes@lnec.pt), [lgsilva@lnec.pt](mailto:lgsilva@lnec.pt), [rreis@lnec.pt](mailto:rreis@lnec.pt), [resoares@lnec.pt](mailto:resoares@lnec.pt), [hleite@msw-consultores.pt](mailto:hleite@msw-consultores.pt), [fpereira@portosdosacores.pt](mailto:fpereira@portosdosacores.pt).

### Resumo

Em 2 de outubro de 2019, o furacão Lorenzo atingiu as ilhas do Arquipélago dos Açores, provocando a destruição total do molhe de proteção do porto das Lajes das Flores. Visando a reposição das anteriores condições de segurança, foi elaborado um projeto de reparação do molhe, tendo, nesse âmbito, sido incluídos ensaios em modelo físico tridimensional, realizados em tanques de ondas irregulares do LNEC, com o objetivo de avaliar a estabilidade, galgamentos e pressões no muro-cortina, da solução projetada.

Os ensaios realizados (Lemos et al., 2024) compreenderam a avaliação do dano da estrutura, a determinação do galgamento (de forma qualitativa e quantitativa) e das pressões no seu muro-cortina. Estes ensaios foram efetuados para diferentes condições de agitação que incluíram 2 níveis de maré, 3 rumos, 4 períodos de pico e 4 alturas significativas de onda.

Nesta comunicação descrevem-se os ensaios de avaliação do dano da estrutura, em particular da zona da cabeça, para a qual foram ensaiadas várias soluções alternativas para a colocação dos cubos Antifer do pé do talude. No final do estudo foi encontrada a melhor relação estabilidade/custo de construção, do ponto de vista do projetista, enquanto promotor da realização dos ensaios.

### Introdução

Com vista à reposição das anteriores condições de segurança do porto das Lajes das Flores, após a sua destruição com a passagem do furacão Lorenzo, foram realizados ensaios em modelo físico tridimensional, em tanque de ondas irregulares do LNEC, com o objetivo de avaliar a estabilidade, galgamentos e pressões no muro-cortina, da solução projetada para a sua reparação, onde se incluía uma ligeira extensão do comprimento do quebra-mar de proteção do porto.

Os objetivos do estudo eram a verificação da estabilidade hidráulica da extensão total do molhe, avaliando-se também o seu desempenho quanto aos galgamentos, às pressões no muro cortina, bem como as condições de abrigo proporcionadas pela obra a construir.

Foi também objetivo a comparação das condições de abrigo da Solução Proposta com as condições da Situação Atual, representativa da obra antes da passagem do furacão Lorenzo.

Os ensaios foram realizados em duas fases:

Fase 1 – Ensaios de agitação, estabilidade, galgamentos e pressões na superfície frontal do muro-cortina, contemplando a Solução Proposta para o novo quebra-mar.

Fase 2 – Ensaios de agitação contemplando a solução do quebra-mar existente anteriormente à sua destruição pelo furacão Lorenzo, bem como todas as estruturas interiores existentes nessa data

Neste trabalho, é dada ênfase aos ensaios de estabilidade, nomeadamente do setor interior da cabeça do molhe, descrevendo-se as diferentes Alternativas ensaiadas.



### Ensaios em modelo físico

Os ensaios foram realizados em modelo físico tridimensional num dos tanques de ondas irregulares do LNEC, onde foi representada a solução proposta para a reconstrução do quebra-mar do porto das Lajes das Flores (Figura 1). O modelo foi construído e explorado à escala 1:58.9, de acordo com a lei de semelhança de Froude.



Figura 1. Implantação do modelo no tanque.

O manto resistente do quebra-mar desenvolveu-se em talude com uma inclinação de 3:2, entre a cota -16.00 (ZH) e a cota +11.00 (ZH), terminando numa berma de coroamento com 15.8 m de largura, constituída por uma camada de cubos Antifer. O manto resistente foi constituído por Cubos Antifer com 62 t na cabeça e com 56.8 t no tronco. (Figura 2).

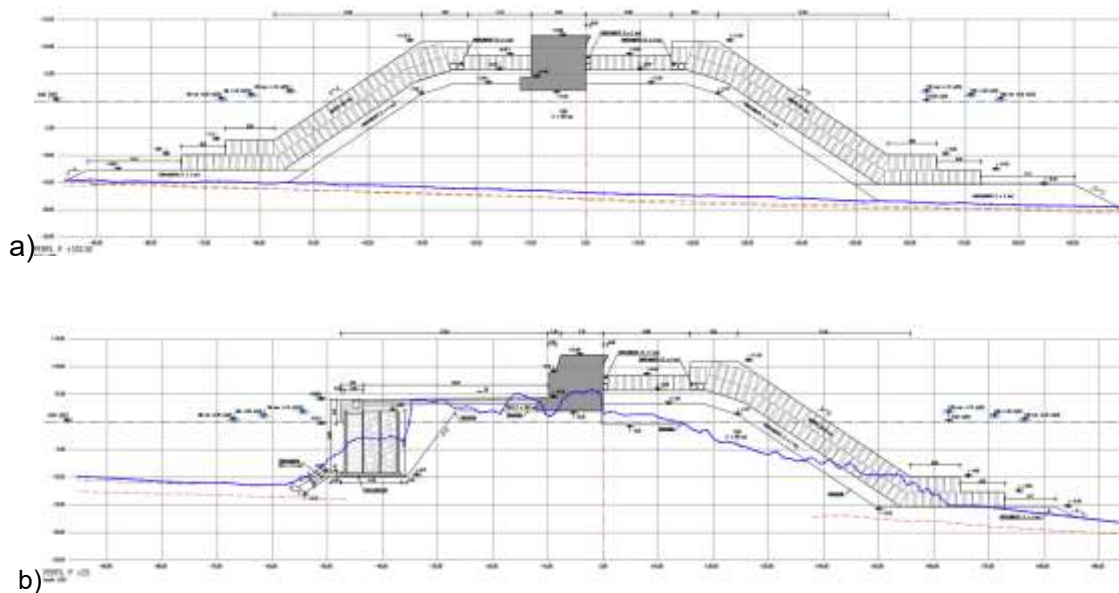


Figura 2. Perfis relativos à cabeça (a) e ao tronco na zona do cais (b).

Os ensaios de estabilidade compreenderam três direções de agitação: E-20-N, S-30-W e S-35-E), três níveis de maré: 0.0 m (ZH), +1.8 m (ZH) e +3.0 m (ZH), associados a períodos de pico de 12 s, 16 s, 20 s e 22 s e alturas de onda significativas que variaram entre 6.0 m e 11.0 m.

A avaliação do dano foi realizada através da contagem de blocos removidos e com movimentos, bem como recorrendo a levantamentos da envolvente do modelo físico no final de cada série de

ensaios (Figura 3). Estes levantamentos foram realizados utilizando um sensor de posição Kinect V2, tendo as respetivas nuvens de pontos sido coordenadas através de pontos de controlo colocados na superestrutura e no fundo do tanque, nas imediações do pé da estrutura (Lemos et al., 2023). Estas nuvens de pontos permitiram, também a obtenção de perfis comparativos entre o estado inicial do modelo (sem estragos) e o seu estado no final da série de ensaios.

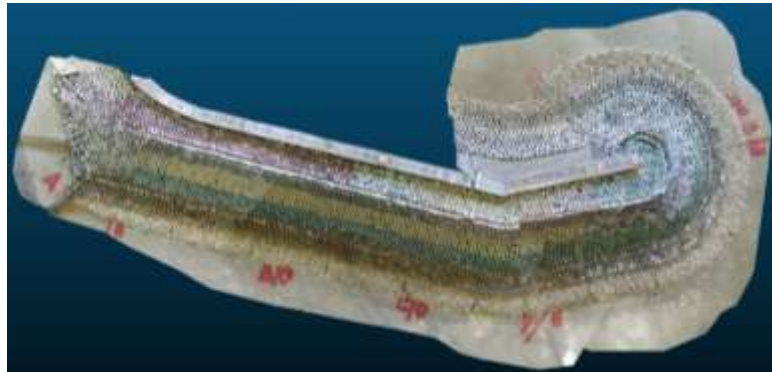


Figura 3. Nuvem de pontos obtida no final de uma série de ensaios.

## Resultados

Durante os ensaios do primeiro rumo ensaiado (rumo E-20-N) verificou-se alguma vulnerabilidade na estabilidade do setor interior da cabeça, devido a alguma instabilidade do pé do talude, com maior importância nos ensaios com  $T_p=20$  s (Figura 4).

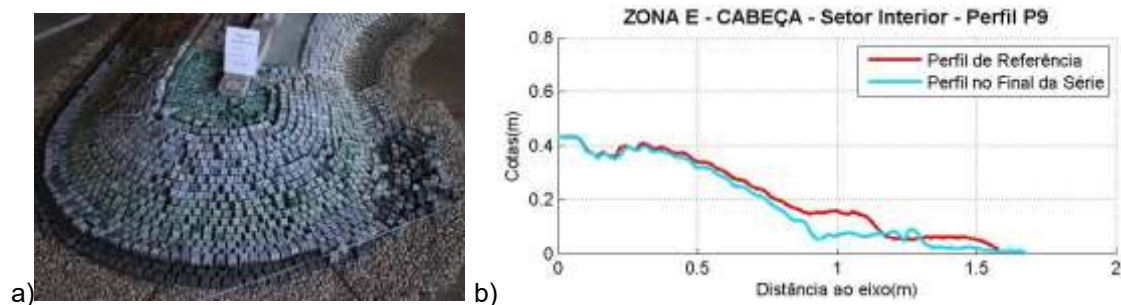


Figura 4. Aspeto do setor interior da cabeça (a) e de um perfil da zona afetada (b) no final da série de ensaios com  $T_p=20$  s.

A anomalia teve repercussão na estabilidade do manto resistente, devido à perda de apoio, levando à necessidade de vários ensaios extraordinários até ser conseguida uma solução estável. Foram ensaiadas 6 variantes (Figuras 5 a 7) da colocação dos cubos Antifer do pé do talude, de forma a encontrar a melhor relação estabilidade/custo de construção.

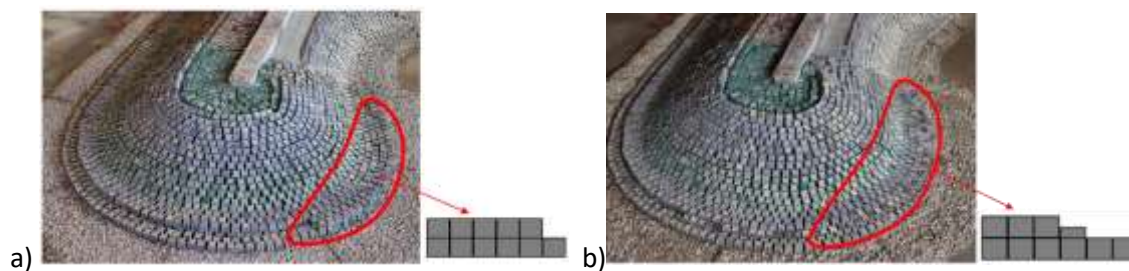


Figura 5. Solução A (a) e Solução B (b).

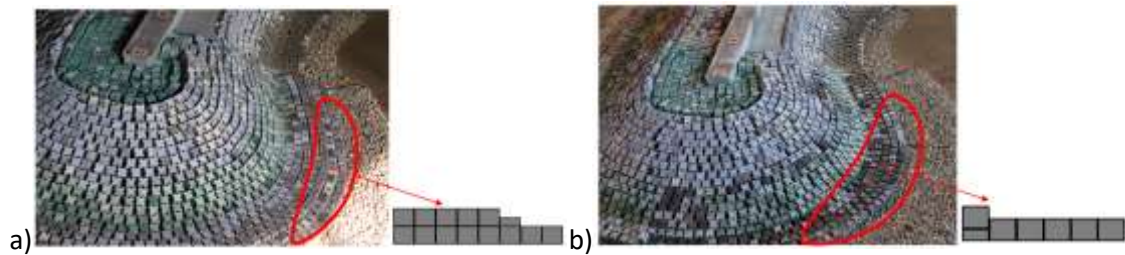


Figura 6. Solução C (a) e Solução D (b).

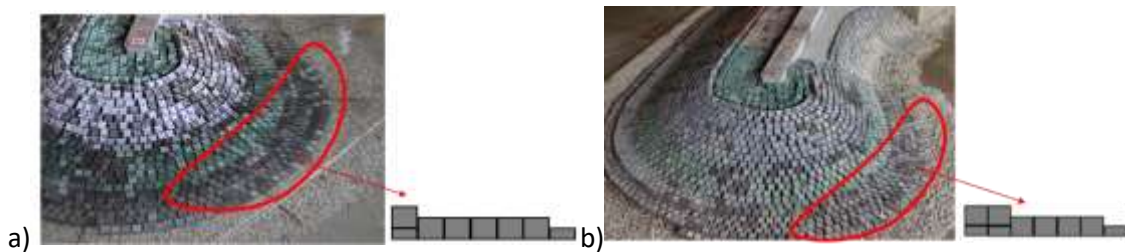


Figura 7. Solução E (a) e Solução F (b).

A última variante ensaiada (Solução F) passou por abdicar dos blocos do pé do talude que eram removidos precocemente, por se encontrarem em cotas demasiado altas e sem travamento suficiente, e em colocar meio cubo Antifer a fim de proporcionar travamento entre os blocos do talude e os do pé. Esta solução revelou-se a mais eficaz de todas as variantes testadas.

### Conclusões

Em relação ao pé do setor interior da cabeça do quebra-mar, a resolução da anomalia inicial não se mostrou tão fácil, já que foi necessário testar uma série de soluções para que o LNEC e também o projetista pudessem considerar estável o comportamento do elemento.

Por iniciativa do projetista, esta solução veio posteriormente a ser utilizada também no pé do talude exterior do corpo do quebra-mar, com resultados positivos tanto do ponto de vista da estabilidade como do ponto de vista económico.

Este caso de estudo foi, tal como outros casos alvo de estudo por parte do LNEC, ilustrativo da importância da modelação física na otimização do projeto de obras marítimas, tanto no que diz respeito à estabilidade hidráulica, como no que diz respeito à vertente económica do projeto.

### Agradecimentos

Agradece-se à Portos dos Açores a disponibilidade de apresentação de resultados do estudo.

### Referências Bibliográficas

- Lemos, R., Silva, L.G., M.G., Fortes, C.J.E.M, Costa, C., Reis, R., Simão, J., Soares, R. (2024). "Reconstrução do quebra-mar de proteção do porto das Lajes das Flores (ilha das Flores – Açores). Ensaios em modelo físico tridimensional". Relatório 261/2024 – DHA/NPE.
- Lemos, R., Fortes, C., Santos, J.A., Mendonça, A. (2023). "Damage Evolution in Physical Scale Model Tests of a Stretch of the Breakwater of Peniche Harbour". In: Chastre, C., et al. Testing and Experimentation in Civil Engineering. TEST&E 2022. RILEM Bookseries, vol 41. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-29191-3\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-031-29191-3_31)