

26_30

O LNEC

A MODELAÇÃO FÍSICA NO APOIO AO PROJETO DE OBRAS MARÍTIMAS

Neste artigo, apresenta-se uma breve descrição do papel da modelação física no apoio ao projeto de obras marítimas, seguida de um exemplo de ensaios realizados no âmbito da ampliação do porto de pesca de Rabo de Peixe, São Miguel – Açores, para o qual a variedade de estudos efetuados ilustra as potencialidades da modelação física no apoio ao projeto. Por fim, apresentam-se as considerações finais e os futuros desenvolvimentos.

Conceição Juana Fortes, Maria Teresa Reis,
Maria Graça Neves, Luís Gabriel Silva,
Rui Capitão, Rute Lemos
LNEC

1. INTRODUÇÃO

O incremento das trocas comerciais, da náutica de recreio e da ocupação da orla costeira para fins turísticos levam à necessidade de intervenções na costa, quer relacionadas com o aumento, melhoramento e manutenção das obras marítimas existentes, quer com a resolução de problemas ambientais. As condições severas a que normalmente as estruturas marítimas estão sujeitas, conduzem a situações de obras muito complexas e dispendiosas, quer ao nível do primeiro investimento, quer da sua manutenção.

Para tentar resolver estes problemas tem-se investido muito em Portugal em termos da obtenção e tratamento de dados de agitação marítima, da caracterização dos regimes de agitação marítima, de estudos da dinâmica e morfodinâmica costeira e estuarina, do planeamento e projeto de obras marítimas (quebramares, guias de correntes, estruturas de proteção costeira, canais de acessos a portos), etc. É neste quadro que a modelação física (eventualmente combinada com modelação numérica, ferramentas empíricas e observações in situ) se tornou uma ferramenta fundamental de apoio na análise destes problemas, bem como das suas soluções, em particular no projeto

de obras marítimas, dada a complexidade associada quer aos fenómenos de propagação de ondas, quer de interação onda-estrutura. A modelação física é francamente utilizada para avaliar e otimizar diferentes aspetos do projeto como, por exemplo, as condições de tranquilidade na zona portuária, as sobrelevações nessa zona, as condições de estabilidade e galgamentos das suas estruturas de proteção.

2. O PAPEL DA MODELAÇÃO FÍSICA

A modelação física em Hidráulica Marítima é, sem dúvida, a representação mais próxima do conjunto de fenómenos envolvidos na ação da agitação marítima às estruturas portuárias e costeiras, uma vez que permite uma “fotografia” e análise instantâneas dos complexos processos físicos envolvidos na propagação de ondas e na interação destas com as estruturas. Efetivamente, 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 a estabilidade de estruturas ou a interação de ondas com navios amarrados.

Apesar de ser uma técnica mais onerosa e

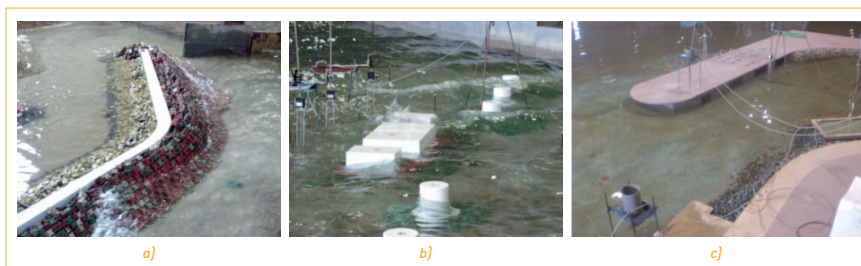
demorada do que o uso de ferramentas empíricas ou de modelos numéricos (atualmente em franco desenvolvimento devido à melhoria da qualidade e da capacidade de computação atualmente instalada), a modelação física é muitas vezes a única capaz de modelar adequadamente alguns fenómenos físicos. Além disso, é utilizada no desenvolvimento de métodos empíricos e na calibração e/ou validação de modelos numéricos.

Em Portugal, esta atividade tem vindo a ser desenvolvida, desde 1948, no Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas (NPE) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). O LNEC dispõe de instalações experimentais (Fig. 1) com uma área de 6500 m², ocupada essencialmente por tanques e canais de ondas, apetrechados com sistemas de geração de ondas e com os equipamentos de medição necessários a este tipo de estudos.

Para apoio ao projeto de obras marítimas no país e no estrangeiro, o NPE já realizou mais de 250 estudos em modelo físico. Os ensaios mais frequentemente realizados são (Figura 2): a) ensaios de estabilidade e galgamentos de estruturas marítimas; b) ensaios de agitação de zonas abrigadas, para avaliação das condições de tranquilidade; e c) ensaios de sobrelevação de zonas portuárias.



> 1



> 2



> 3

3. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO DA AMPLIAÇÃO DO PORTO DE PESCA DE RABO DE PEIXE

3.1. Objetivos do estudo

Rabo de Peixe é uma das mais importantes comunidades piscatórias da ilha de S. Miguel, Açores [Fig. 3], cujas condições portuárias se pretendeu melhorar. Para o efeito, a Lotaçor – Serviço de Lotas dos Açores, encomendou à CONSULMAR - Projectistas e Consultores, Lda. os respetivos estudos e projetos. Foram analisadas onze soluções alternativas, tendo a solução selecionada sido validada no que diz respeito à estabilidade, aos galgamentos e às condições de agitação e sobrelevação, através de modelação física tridimensional, solicitada ao LNEC pela Secretaria Regional do Ambiente e do Mar (SRAM) da Região Autónoma dos Açores. Esta vasta gama de estudos para apoio a este projeto ilustra a importância da modelação física nesta área de engenharia [Luís *et al.*, 2011]. Tratou-se de um estudo que se revestiu de alguma complexidade e cuja realização decorreu em 2011, no LNEC. Na Fig. 3 apresentam-se duas fotografias do porto antes e após a sua ampliação.

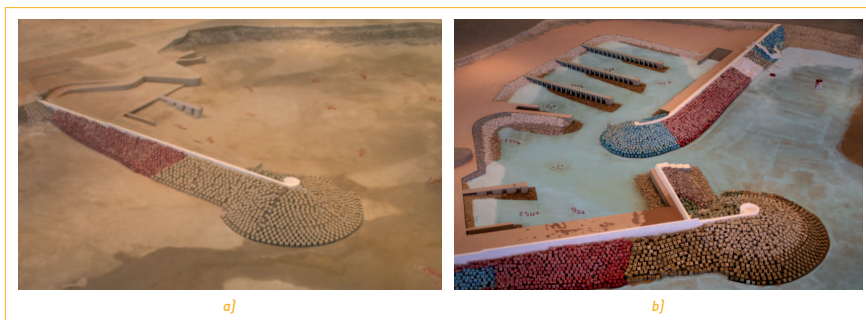
3.2. Caracterização do Modelo

O modelo foi construído e explorado à escala geométrica de 1:54 num tanque do NPE [semelhança de Froude]. Foram representados [Fig. 4]: configuração dos fundos, totalidade da bacia portuária e linha de costa envolvente, obras de abrigo e obras interiores existentes - Situação Atual, obras de abrigo e obras interiores previstas [incluindo o alteamento do muro-cortina do molhe existente] – Solução Projetada. Para a verificação da tranquilidade portuária procedeu-se à medição das características da agitação marítima à saída do gerador e no exterior, na entrada e no interior do porto. Para a avaliação expedita das sobrelevações foram realizadas medições em “mar aberto”, em frente à cabeça do molhe existente e no interior da

> Figura 1: Vista de um dos tanques das instalações experimentais.

> Figura 2: Modelos físicos: a) Estabilidade e galgamentos, Vila Franca, Açores; b) Agitação, Socorridos, Madeira; c) Estabilidade e sobrelevação, Ponta Delgada, Açores.

> Figura 3: Localização e aspeto geral do Porto de Rabo de Peixe em 1998 e em 2014, antes e após a sua ampliação, respetivamente.



> 4

bacia portuária. Para a avaliação dos galgamentos, procedeu-se à medição de volumes de galgamentos no tardo do molhe existente. Os ensaios foram realizados com os rumos da agitação marítima correspondentes às direções de NNW e N, simulando-se agitação irregular. Ensaíram-se dois níveis de maré: Baixa-mar mínimo (BM) e Preia-mar máximo (PM). Foram ainda realizados, para um conjunto reduzido de condições de agitação marítima, ensaios com um nível de água excecional, Preia-mar máximo acrescido de sobrelevação meteorológica (PM+S).

Foram reproduzidos valores de período de pico da agitação incidente, T_p , de 8 s, 11 s e 14 s. A cada valor de T_p associaram-se valores de altura de onda significativa, H_s , compreendidos entre 3.0 m e o limite imposto pela rebentação das ondas na aproximação ao porto.

3.3. Ensaios de Agitação e Sobrelevação

Com base nos registos de elevação da superfície livre obtidos foi possível verificar que o conjunto de estruturas proposto proporcio-

nava uma tranquilidade efetiva à renovada bacia portuária, tendo em conta as direções de agitação marítima mais frequentes e adversas e os níveis de exigência das embarcações servidas e das operações próprias de um porto de pesca (Fig. 5).

Os ensaios permitiram confirmar a existência de sobrelevações com algum relevo no interior da bacia portuária (Fig. 6). Para os níveis mais elevados da maré, as sobrelevações causaram inundação dos terraplenos portuários (Fig. 7). Como tal, o LNEC recomendou a subida da cota dos terraplenos e/ou a construção de um mure-



> 6



> 6



> 7

> Figura 4: Aspeto geral do modelo: a) Situação Atual e b) Solução Projetada.

> Figura 5: Condições de agitação no interior e no exterior do porto (Solução Projetada).

> Figura 6: Exemplificação da elevação do nível de água no anteporto, visível junto ao cais.

> Figura 7: Inundação dos terraplenos do porto para a Solução Projetada.



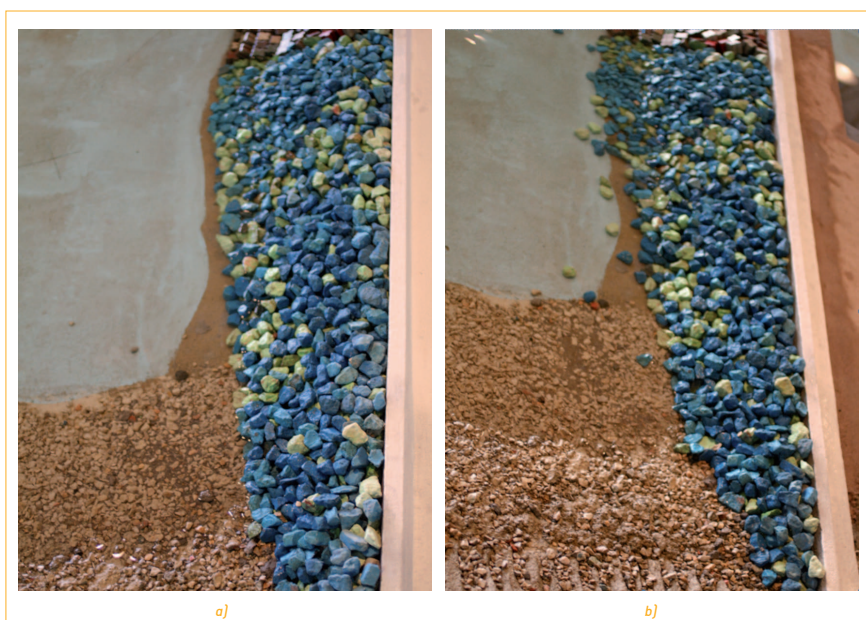
> 8

te com as devidas condições de drenagem, ao longo do perímetro da bacia portuária.

3.4. Ensaios de Estabilidade

No que respeita à estabilidade, os ensaios permitiram constatar que a subida da cota de coroamento do muro-cortina do molhe não pôs em causa a estabilidade da estrutura, apesar de para a Solução Projetada se ter observado um número superior de quedas e movimentos dos cubos Antifer do manto resistente do tronco, relativamente ao verificado para a Situação Atual.

Os ensaios de estabilidade da Solução Projetada permitiram concluir sobre a possibilidade de diminuição da robustez do sector interior da cabeça do contra-molhe, o que veio a traduzir-se numa redução do custo final da empreitada. Nas Figs. 8 e 9 apresentam-se exemplos do aspeto do tronco do molhe principal (Situação Atual) e do enraizamento do contra-molhe (Solução Projetada), respetivamente, antes e depois de um ensaio.



> 9

3.5. Ensaios de Galgamento

Os ensaios da Situação Atual permitiram confirmar que o molhe principal era francamente galgado para condições de agitação marítima adversas associadas aos níveis de maré mais elevados (Fig. 10).

O alteamento da cota do muro-cortina em 2.5 m mostrou-se bastante eficaz, tendo reduzido o volume de galgamentos para 1/5 a 1/6 dos volumes registados para a Situação Atual. Face às condições de agitação reproduzidas no modelo, o contra-molhe pode considerar-se como uma estrutura quase não galgável.

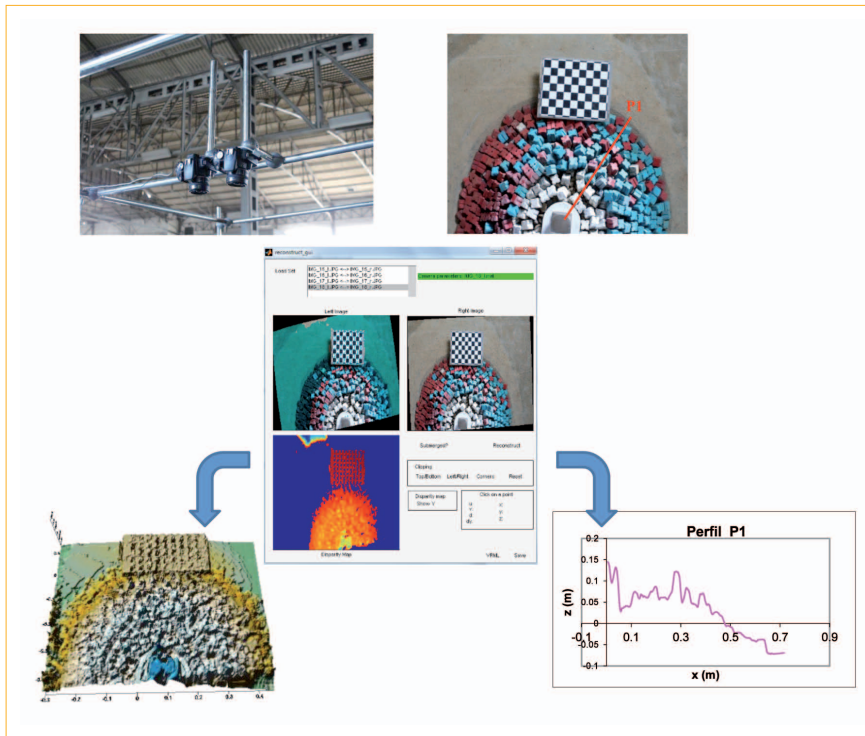


> 10

> Figura 8: Situação Atual. Aspeto do tronco do molhe principal no ensaio com o rumo NNW, nível de maré de BM, $T_p = 14$ s: a) início do ensaio e b) após atuação de $H_s = 6.0$ m.

> Figura 9: Solução Projetada. Aspeto do enraizamento do contra-molhe no ensaio com o rumo N, PM, $T_p = 11$ s: a) início do ensaio e b) após atuação de $H_s = 7.5$ m.

> Figura 10: Exemplificação do aspeto de alguns dos maiores galgamentos observados no decurso dos ensaios: a) Situação Atual, rumo NNW, nível de maré de PM, $T_p = 14$ s e $H_s = 7.0$ m; b) Solução Projetada, rumo NNW, nível de maré de PM+S, $T_p = 14$ s e $H_s = 7.0$ m.



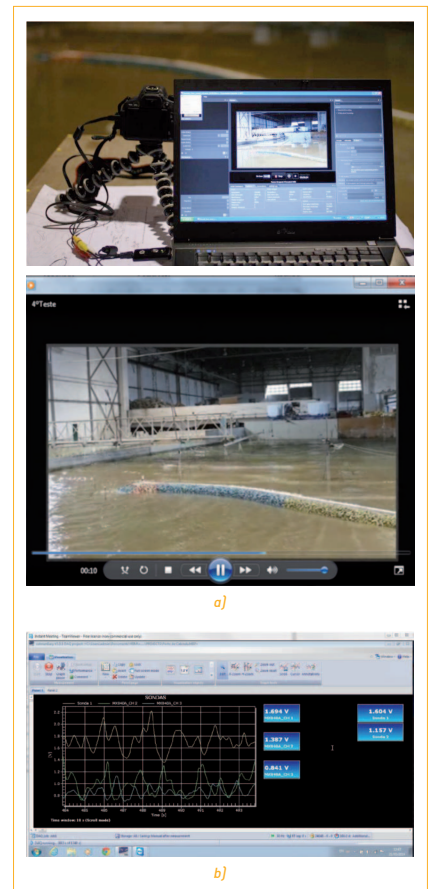
> 11

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Neste artigo, apresentou-se de forma sucinta o papel da modelação física no apoio ao projeto de obras marítimas, ressaltando que, até à data, é esta a única ferramenta que permite reproduzir, com confiança, alguns dos fenómenos presentes e atuantes nas estruturas. Ao longo do tempo de implementação desta metodologia, ela tem vindo a ser sucessivamente melhorada, tanto em termos da simulação da agitação marítima incidente, como em termos de técnicas de obtenção de resultados (caracterização da agitação marítima e observação e análise de resultados obtidos). Tendo em conta a continuação da utilização desta ferramenta de interesse inquestionável, mantém-se o investimento físico e intelectual

no sentido de aperfeiçoar técnicas e equipamentos, de entre as quais se destacam: a implementação de técnicas de estereofotogrametria – utilizada no levantamento de envolventes e perfis de modelos de quebra-mares, Fig. 11; 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.

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 dos ensaios em tempo real através de *image streaming* e à utilização de software de acesso remoto para visualização e partilha de dados obtidos nos ensaios, Fig. 12.



> 12

AGRADECIMENTOS

Agradece-se à Secretaria Regional do Ambiente e do Mar (SRAM) da Região Autónoma dos Açores, a permissão para a apresentação dos resultados dos ensaios em modelo físico. Agradece-se também ao Eng. Francisco Silva as fotografias disponibilizadas e à CONSULMAR a colaboração no âmbito deste estudo. ■

REFERÊNCIAS

- LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. “Obras de expansão do porto de pesca de Rabo de Peixe (ilha de S. Miguel – Açores). Ensaios em modelo reduzido”. Relatório 247/2011 – NPE, Lisboa, julho de 2011.
- Luís, L.; Freire, S.C.; Reis, M.T.; Rodrigues, E.; Silva, G. (2011). “Ampliação do porto de pesca de Rabo de Peixe, São Miguel, Açores. Estudos, projectos e ensaios físicos tridimensionais”. Proc. 7^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/PIANC, Porto, 6 e 7 de outubro de 2011.

> Figura 11: Técnicas de estereofotogrametria.

> Figura 12: Visualização de um ensaio em tempo real através de *image streaming* (a) e acesso remoto para visualização da aquisição de dados durante os ensaios (b)