



## FERRAMENTAS DE INSPECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE ESTRUTURAS DE PROTECÇÃO PORTUÁRIA

Luís Gabriel Silva<sup>(a)</sup>, João Alfredo Santos<sup>(a)</sup>, Maria da Graça Neves<sup>(a)</sup>

Carlos Silvestre<sup>(b)</sup>, Paulo Oliveira<sup>(b)</sup>, António Pascoal<sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa

<sup>(b)</sup> DSOR/ISR – IST, Av. Rovisco Pais, 1, Torre Norte, Piso 8, 1049-001 Lisboa

### SUMÁRIO

Esta comunicação tem como objectivo descrever o trabalho a desenvolver por uma equipa do LNEC e do IST com duas vertentes complementares: desenvolvimento de metodologias e ferramentas de inspecção precisa e eficaz da geometria de quebra-mares de talude; desenvolvimento de metodologias de diagnóstico do estado de risco da estrutura que permitam ajudar na tomada de decisão de quando e como fazer intervenções na estrutura.

Assim, no âmbito deste trabalho será desenvolvido um instrumento para a caracterização da geometria, quer da parte submersa, quer da parte emersa, de quebra-mares de talude. A aplicação destas técnicas na inspecção de quebra-mares irá pôr à disposição dos técnicos meios para acompanhar a evolução temporal destas estruturas, permitindo localizar com precisão as áreas mais debilitadas. O volume de dados resultante das inspecções da estrutura (parte emersa e imersa) permitirão a realização do diagnóstico, que será efectuado a partir quer da experiência anterior do LNEC neste domínio, quer de resultados obtidos em ensaios em modelo reduzido.

### 1. INTRODUÇÃO

A criação de condições de abrigo em bacias portuárias tem levado à construção de estruturas em locais expostos à acção das intempéries, sendo a acção das ondas o factor ambiental mais importante para a deterioração dessas estruturas.

O quebra-mar de taludes é a estrutura de utilização mais comum em Portugal para a protecção de bacias portuárias. Trata-se de uma estrutura composta por um núcleo de enrocamento de Todo-O-Tamanho (TOT) que é protegido por uma ou mais camadas de elementos com pesos seleccionados (enrocamento e/ou blocos artificiais de betão). Devido às suas características, o projecto destas estruturas é realizado no pressuposto de que obras de reparação ou manutenção serão certamente necessárias durante a sua vida útil.

O custo destas estruturas é muito elevado devido, quer ao volume de materiais empregue, quer às dificuldades inerentes à sua construção. O custo da estrutura e o seu comportamento esperado, bem como as consequências da ruína da estrutura na protecção da bacia portuária e na operacionalidade do porto, justificam a existência de um programa de acompanhamento do seu comportamento que permita decidir sobre a altura mais adequada para a realização de obras de manutenção, ou mesmo de reparação. Esta decisão deve apoiar-se no diagnóstico do estado da estrutura, que por sua vez deve ser baseado num conjunto de variáveis descritoras devidamente padronizadas.

Contudo, dadas as características da estrutura, ainda não são comuns aparelhos de medição que permitam caracterizar de forma contínua o estado de um troço de um quebra-mar. Assim, e devido ao seu reduzido custo, o procedimento mais usual de acompanhamento destas estruturas é a sua inspecção periódica, através da realização de campanhas de observação visual da zona emersa, já que o custo associado à observação da parte submersa é muito elevado e por isso só em casos excepcionais é utilizada.

## **2. OBJECTIVOS DO PROJECTO**

O objectivo do projecto intitulado “*Ferramentas de inspecção e diagnóstico de obras de protecção portuária*” é o estabelecimento de uma metodologia para o diagnóstico de quebra-mares de talude a partir da inspecção periódica, quer da parte emersa, quer da parte submersa. Propõe-se, assim, o desenvolvimento de técnicas sistemáticas para medição “in situ” e o desenvolvimento de metodologias de avaliação e predição da evolução do estado dos quebra-mares, procurando, deste modo, fornecer aos técnicos indicadores claros que permitam caracterizar o estado em que se encontram as estruturas e avaliar a extensão de eventuais intervenções.

O projecto desenvolve-se em duas vertentes complementares que consistem em:

1. Utilizar os últimos avanços da tecnologia de posicionamento, navegação e controlo de veículos autónomos para desenvolver metodologias e ferramentas de inspecção precisa e eficaz dos movimentos dos blocos em estruturas semi-submersas. As metodologias a desenvolver deverão focar em técnicas que permitam determinar com precisão a posição relativa dos blocos do manto protector do quebra-mar.
2. Desenvolver metodologias de diagnóstico do estado de risco da estrutura, a partir de medidas da evolução dos quebra-mares ao longo dos anos e com base em testes em modelos reduzidos.

No âmbito do projecto será desenvolvido um instrumento para a caracterização da geometria da parte submersa de quebra-mares de talude. Esse instrumento será utilizado na inspecção de um quebra-mar de protecção de um porto (que funcionará como estrutura-piloto), onde serão efectuadas várias campanhas para identificar e testar as modificações do aparelho necessárias à sua fácil utilização. A aplicação das técnicas a desenvolver na inspecção da zona submersa de quebra-mares irá pôr à disposição dos técnicos meios para acompanhar a evolução temporal destas estruturas permitindo localizar com precisão as áreas mais debilitadas.

O volume de dados resultante das inspecções da estrutura (parte emersa e imersa) será condensado num conjunto reduzido de parâmetros que permita a caracterização do estado da estrutura e a sua evolução. A definição dos patamares dos parâmetros, que permitirão a realização do diagnóstico, será efectuada a partir quer da experiência anterior do LNEC neste domínio, quer da realização de ensaios em modelo reduzido.

Para permitir uma fácil utilização dos dados obtidos será implementado um sistema de informação onde serão tratados os resultados das observações por forma a produzir os indicadores de estado de risco da obra.

## **3. RELAÇÃO COM O ESTADO DA ARTE**

A construção de estruturas portuárias teve, em Portugal, um incremento significativo a partir de meados do séc. XX. Embora o custo destas estruturas seja muito elevado e sejam conhecidos alguns episódios esporádicos de observação de algumas delas, a verdade é que só em meados dos anos 80 começaram a ser dados os primeiros passos no sentido de acompanhar de uma forma sistemática comportamento evidenciado pelas diversas obras de protecção portuária de Portugal Continental.

Pita (1985) descreve as técnicas de observação consideradas aplicáveis a quebra-mares de talude, a estrutura de criação de abrigo portuário mais comum nos portos portugueses, e apresenta um plano de observação deste tipo de estruturas. Este plano foi implementado pelo LNEC, procedendo-se desde 1986 à observação visual sistemática de estruturas de abrigo. Actualmente, o plano inclui a observação visual sistemática da zona emersa de 28 quebra-mares distribuídos por toda a costa de Portugal Continental.

Ainda no âmbito desse programa, foi criada uma base de dados contendo informação sobre as estruturas, os dados relativos às observações efectuadas e o seu processamento. Com base

nos resultados desse processamento pode determinar-se o estado em que se encontram os trechos das obras observadas, o grau de evolução e o estado de risco em que se encontra (Silva, 1996). Oliver et al. (1998) apresenta um plano de observação de quebra-mares muito semelhante ao implementado no LNEC, mas que tem em conta não só o estado estrutural da obra mas também o seu estado funcional.

Apesar da sua importância, estas bases de dados contêm essencialmente resultados de campanhas de observação visual do estado das obras, não tendo em conta os estragos da parte imersa, onde ocorre parte dos problemas que afectam a segurança das mesmas. Com base nesses dados, a avaliação do estado global da estrutura, do seu estado de evolução e de risco não é completa e pode, naturalmente, conduzir a que o estado de degradação global de determinada obra seja sub-valorizado.

O levantamento da parte submersa dos quebra-mares tem sido frequentemente efectuado recorrendo a mergulhadores. Algumas tentativas têm sido feitas utilizando sondas acústicas. Neste caso, os levantamentos são normalmente feitos com fiadas perpendiculares ao quebra-mar que distam entre si de cerca de 40 a 50 metros. Estes métodos dão origem a informação pouco precisa do perfil da barreira e do estado geral de conservação do quebra-mar, devido às fiadas em anos sucessivos não serem efectuadas exactamente na mesma localização, podendo entre elas existir um erro da ordem dos 5 a 10 metros. A informação obtida por estes métodos é limitada, não permitindo acompanhar a evolução do perfil dos quebra-mares ao longo do tempo nem avaliar a extensão dos danos em cada instante. A tarefa da determinação do estado do quebra-mar, torna-se assim, extremamente complexa, não sendo muitas vezes claro qual a extensão dos danos e, conseqüentemente, a dimensão da reparação a efectuar.

#### 4. TÉCNICAS E FERRAMENTAS DE INSPECÇÃO A DESENVOLVER

Este projecto, pretende desenvolver um instrumento para levantamentos batimétrico e topográfico de alta precisão de estruturas semi-submersas. Pretende-se utilizar uma sonda acústica com varrimento mecânico para mapeamento da parte da estrutura abaixo da linha de água e um sistema laser para levantamento da restante parte.

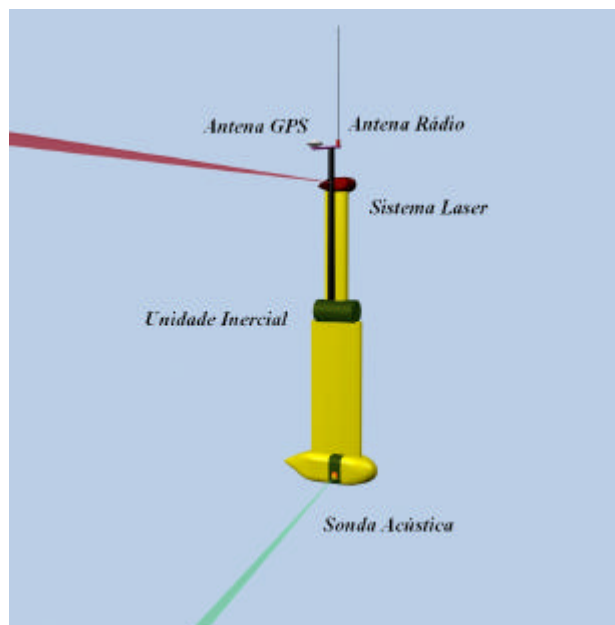


Figura 1: Instrumento para fazer levantamentos de alta precisão

Este instrumento conterá os seguintes sensores e sistemas:

- Uma sonda acústica, com feixe muito fino (abertura de cerca de 1 grau), equipada com um sistema de varrimento mecânico, que vai permitir fazer levantamentos da parte submersa das estruturas com grande precisão. Desta forma será possível realizar o levantamento mantendo o veículo a uma distância de segurança do quebra-mar.
- Uma sonda acústica do tipo sonar lateral que pode também ser colocada no instrumento para realizar levantamentos mais rápidos embora de mais baixa precisão. Esta técnica pode ser muito útil para uma primeira identificação do local onde se vai realizar a inspecção de modo a parametrizar correctamente todo o sistema.
- Um sistema laser com varrimento 2D irá servir para fazer levantamento topográfico de grande precisão da parte emersa da estrutura.
- Um sistema de posicionamento via satélite, em tempo real que irá fornecer a posição do instrumento com precisão centimétrica.
- Um sensor de movimento colocado no instrumento mede os ângulos instantâneos de rolo e picada (roll e pitch) bem como as acelerações instantâneas.
- Um Sensor de Rumo colocado no instrumento irá fornecer medidas precisas da rumo do mesmo.
- Um Sistema de Sincronização e Navegação, responsável pela amostragem e sincronização dos dados de todo levantamento. Este Sistema recebe ordens do Sistema de Coordenação do Levantamento e envia comandos para posicionamento e disparo dos diversos equipamentos. Finalmente, procede às correcções das medidas dos perfis obtidos utilizando os dados de posição, movimento (acelerações linear e velocidades angulares), e atitude.
- Um Sistema de Coordenação do Levantamento, responsável pela interacção com os sistemas de controlo do veículo e controlo de missão do veículo autónomo em que o instrumento está instalado.
- Uma Consola de Monitorização do Levantamento, de forma a aceder em tempo real aos dados produzidos pela instrumento para avaliação in situ da qualidade dos mesmos. Existirá também no instrumento um computador destinado ao registo de dados temporal e espacialmente sincronizados e etiquetados.
- Um sistema de Pós-processamento dos Dados do Levantamento que consiste em criar uma ferramenta para processar os dados obtidos durante a missão recorrendo a metodologias de tratamento espacial e temporal das séries obtidas. O objectivo final desta análise “off-line” é aumentar a precisão dos dados da navegação utilizando algoritmos sofisticados, multirritmo, para fusão da informação obtida pelos diversos sensores (GPS, movimento e rumo). Finalmente, utilizando a informação corrigida da navegação, compensar e corrigir espacialmente os dados obtida pelas sondas (acústicas e laser).

O instrumento a desenvolver, que incluirá um sistema de navegação de alta precisão, quando integrado com o sistema de controlo para posicionamento preciso do veículo autónomo que o transporta, permitirá produzir secções transversais bem como levantamentos tridimensionais com a regularidade espacial adequada à estrutura semi-submersa. Técnicas semelhantes poderão ser utilizadas para verificar o posicionamento de novos blocos aquando da reparação do quebra-mar.

Este instrumento destinar-se-á a equipar um catamarã autónomo, propriedade do Instituto de Sistemas e Robótica (ISR/Pólo do Instituto Superior Técnico – IST), relativamente ao qual serão desenvolvidos sistemas de controlo e navegação de modo a garantir a repetibilidade da manobra e consequentemente a qualidade dos dados obtidos. Pode, no entanto e se tal se mostrar conveniente, equipar um outro qualquer veículo de superfície autónomo ou não.

Este catamarã autónomo, denominado DELFIM, pode seguir rotas pré-determinadas com grande precisão, é equipado com dois motores eléctricos com hélices e desloca-se à velocidade máxima de 5 nós. Para determinar com exactidão a sua posição e velocidade, recorre a um sistema de posicionamento via satélite (denominado DGPS). Para além disso, o

veículo possui um sistema de orientação que lhe permite determinar o seu rumo e inclinação. Deste modo, o veículo sabe onde está e o rumo que leva.

Este veículo está também integrado numa rede de comunicações em tempo real, via rádio, desenvolvida no ISR. Esta rede, especialmente desenhada para aplicações de robótica multi-veículo, utiliza rádios com protocolo TDMA (Time Division Multiple Access) e vai permitir ter acesso em terra aos dados produzidos pelo instrumento. A Figura 2 apresenta o conceito da utilização do catamarã DELFIM para realizar levantamento de quebra-mares. A figura mostra a colocação do instrumento no veículo autónomo bem como a utilização do sistema laser e da sonda acústica ao longo de um possível levantamento de um quebra-mar.



Figura 2: Catamarã a fazer um levantamento

Dada a especificidade do projecto, directamente relacionada com a qualidade dos dados a obter, será necessário projectar/redesenhar os seguintes sistemas do DELFIM:

- Sistema de Controlo da Missão: É necessário projectar e implementar um sistema de controlo de missão, utilizando a linguagem CORAL+ (proprietária do ISR), de forma a permitir a cooperação entre os sistemas instalados no Catamarã e o Sistema de Coordenação do Levantamento instalado no instrumento.
- Sistema de Controlo do Veículo: Este será de importância extrema para o sucesso do levantamento e para a preservação da integridade da plataforma. Só a garantia de repetibilidade permitirá a comparação entre os dados obtidos ao longo de diversos levantamentos. Para além disso, o sistema de controlo do veículo terá ser capaz de executar missões com os seguintes requisitos:
  - 1- Baixa velocidade de progressão, função da definição do levantamento desejada. É esta velocidade que dita o espaçamento dos pontos;
  - 2- Seguimento do quebra-mar, a distância constante, de forma a uniformizar os dados do levantamento;
  - 3- Controlo de atitude de grande precisão de modo a apontar as sondas na direcção desejada;
  - 4- Capacidade de afastar o veículo rapidamente do quebra-mar no caso deste se aproximar demasiado, em virtude de ondulação, corrente ou perturbações inesperadas.

As técnicas de inspeção a desenvolver deverão ser exaustivamente testadas num quebra-mar, que funcionará como estrutura-piloto. Ao longo do projecto, serão efectuadas várias campanhas nesse quebra-mar por forma a identificar e testar as modificações necessárias às ferramentas e algoritmos, de modo a garantir a qualidade dos dados obtidos. Nesta fase é essencial a colaboração da entidade responsável pela exploração do porto, quer na disponibilização dos meios de apoio à realização das campanhas e na sua coordenação, quer no acompanhamento da definição das características de operação do instrumento.

## **5. ESTABELECIMENTO DE UMA METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO DA ESTRUTURA**

O LNEC possui uma metodologia de diagnóstico baseada em observações visuais da parte emersa da estrutura. Os moldes em que este programa se tem desenvolvido foram evoluindo ao longo do tempo, em função dos meios disponíveis e dos resultados que entretanto foram sendo obtidos, com vista à sua optimização.

Pretende-se neste trabalho desenvolver uma metodologia de avaliação do estado de risco de um quebra-mar de talude, ampliada a uma análise conjunta de parâmetros da parte emersa e submersa – *parâmetros de estado*. Para tal serão analisadas as metodologias existentes e será determinado um método de diagnóstico e análise de risco da estrutura onde serão definidos os parâmetros a medir, a regularidade das medições e o peso relativo de cada parâmetro observado. Com base nesses parâmetros, pretendem-se obter patamares de risco que serão validados com os dados de protótipo e de modelo, existentes ou adquiridos no decorrer do projecto.

Para tal será escolhido um caso de estudo onde se recolherá toda a informação existente sobre a estrutura (as suas características, observações realizadas, incluindo equipamento e técnicas utilizados na observação) e sobre a acção que a solicitou ao longo do seu tempo de vida útil (características e persistência). Toda esta informação será armazenada num sistema de informação, a desenvolver no âmbito do projecto. Este sistema permitirá também a análise da informação recolhida.

Serão ainda seleccionados e analisados os dados de modelo físico e os de campo recolhidos com os instrumentos desenvolvidos no âmbito do projecto de forma a serem utilizados no diagnóstico de acordo com a metodologia a desenvolver. Embora já exista grande experiência no LNEC no que se refere a ensaios com modelos físicos reduzidos, as variáveis relativas ao comportamento de quebra-mares de taludes observadas nestes ensaios são essencialmente o número de elementos do manto protector que oscilam ou são deslocados da sua posição pela acção da onda e ao volume de água que galga o coroamento da estrutura. Assim, será necessário adquirir / aperfeiçoar um instrumento capaz de caracterizar a geometria dos taludes de um quebra-mar, isto é, capaz de fornecer dados semelhantes aos que serão obtidos pelo aparelho desenvolvido no âmbito do projecto.

Com a utilização na estrutura em estudo dos instrumentos desenvolvidos, afinar-se-ão não só as técnicas de inspeção com os referidos instrumentos, nomeadamente a dimensão da malha espacial de amostragem do talude da estrutura, mas também as próprias características operacionais destas ferramentas. Mais uma vez, nesta fase é essencial a colaboração da entidade responsável pela exploração do porto, quer na disponibilização dos meios de apoio à realização das campanhas e na sua coordenação, quer no acompanhamento da definição das características de operação dos instrumentos.

Dos levantamentos do talude da estrutura deverá resultar um conjunto de valores com as coordenadas de pontos nesse talude que permitirá a criação um modelo digital do terreno para o mesmo talude a partir do qual se definirão os parâmetros geométricos relevantes para a caracterização do estado da estrutura.

Para obter esses patamares de risco são necessários definir passos tais como: determinação das funções da estrutura, divisão da estrutura em troços de acordo com as suas características estruturais e funcionais, estabelecimento de um critério de funcionalidade e de requerimentos estruturais, estabelecimento dos procedimentos de observação da estrutura, análise dos dados

e determinação do estado de risco. Cada um destes passos deve ser criteriosamente estudado, analisado e validado.

Como resultado obter-se-á um método validado de análise do estado de risco do porto em estudo e a indicação do método de observação mais conveniente para a estrutura em causa, tendo em conta as suas características específicas. Dentro dessas recomendações para a monitorização da estrutura, serão contemplados o equipamento necessário e a periodicidade recomendável das observações, os principais fenómenos a observar e a análise dos dados a realizar, a fim de obter indicações sobre o estado actual, o estado de evolução da estrutura e o seu estado de risco.

Para permitir uma fácil utilização dos dados obtidos será implementado um sistema de informação onde serão tratados os resultados das observações por forma a produzir os indicadores de estado de risco da obra.

## **6. NOTA FINAL**

O desenvolvimento de um instrumento que permite melhorar a caracterização do estado de estruturas de protecção portuária e o estabelecimento de uma metodologia para o diagnóstico destas estruturas permitirá um melhor planeamento de reparações, com a consequente economia de meios, constituindo também uma fonte de informação de base para novos projectos.

Uma inspecção adequada e um programa de manutenção destas estruturas permitirão assegurar a sua estabilidade e funcionalidade.

Além disso, o aparelho a desenvolver no âmbito do projecto para o levantamento da parte emersa e submersa de estruturas de protecção portuária poderá também ser utilizado na inspecção de outras estruturas submersas, avaliando a sua evolução em condições normais ou o seu estado após a ocorrência de acidente.

## **REFERÊNCIAS**

Abecasis, F., Castanho, J. e Matias, M., 1970. Coastal regime. Carriage of material by swell and currents. Model studies and in situ observations. Influence of port structures. Coastal defense works. Breakwaters. *Memória n. 362 do LNEC*, 40 p.

Castanho, J., Gomes, N., Carvalho, J., Vera-Cruz, D., Araújo, O., Teixeira, A. e Weinholtz, M., 1974. Means controlling littoral drift to protect beaches, dunes, estuaries and harbour entrances. Establishment of artificial beaches. *Memória n. 448 do LNEC*, 26 p.

Oliver, J. e J. Lesnik, 1998. Condition and Performance Rating Procedures for Rubble Breakwaters and Jetties. U.S. Army Corps of Engineering. Technical Report REMR-OM-24.

Pita, C., 1985. Considerações sobre a observação de quebra-mares de talude. *Memória n. 647 do LNEC*, 17 p.

Prickett, T. L., 1996. Coastal structure underwater inspection technologies. Coastal Engineering Technical Note III-62, WES, p. 8.

Silva, L. G., 1996. Observação sistemática de quebra-mares de talude da costa portuguesa. Recursos Hídricos, vol. 17, n. 1.