Novos instrumentos para a inspecção e diagnóstico de quebra-mares de taludes

Por: **Santos, J.A.** (*); **Neves, M.G.** (*); **Silva, L.G.** (*); **Silvestre, C.** (**); **Oliveira, P.** (**); **Pascoal, A.** (**); **Sebastião, L.** (**); **Alves, J.** (**)

(*) **LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil**
Av. do Brasil, 101
1700-066 Lisboa
Tel.: 21 8443000

(**) **DSOR-ISR, Instituto Superior Técnico**
Av. Rovisco Pais, 1, Torre Norte, Piso 8
1049-001 Lisboa
Tel.: 21 8417000
Fax: 21 8499242

Resumo

Apresentam-se os resultados obtidos, até agora, no âmbito do projecto MEDIRES, cujo objectivo é a melhoria do diagnóstico de quebra-mares de talude, uma medida essencial no processo de tomada de decisão relativo à realização de obras de manutenção e/ou reparação daquelas estruturas. Descreve-se o pré-protótipo do IRIS, um instrumento para levantamentos de alta precisão desenvolvido no âmbito do projecto, e os resultados dos testes realizados no molhe oeste do porto de Sines. Apresenta-se o trabalho já realizado para, com base nas medições da envolvente do manto obtidas com o IRIS, se avaliar a possibilidade de os estragos na estrutura atingirem valores excessivos num dado intervalo de tempo, nomeadamente, a metodologia de estimação da evolução do dano de quebra-mares de taludes.

Palavras-chave:
Quebra-mares de taludes, inspecção robotizada, técnicas de levantamento, diagnóstico, evolução de dano.

Abstract

New diagnose instruments of rubble-mound breakwaters

The results obtained so far in the MEDIRES project are presented. This is a project that aims at improving the diagnosis of rubble-mound breakwaters, a key point in the decision making process concerning the schedule of maintenance or repair works on these sort of structures. The pre-prototype of a high accuracy surveying device, code-named IRIS, is described as well as the results of its sea trials carried out on the Sines's west breakwater. Also presented is the methodology to assess the probability of the armour layer damage to reach excessive values within a fixed time span once the erosion relative to the original profile is evaluated from the surveys of the armour layer envelope and the wave regime at the structure location is known.

Keywords:
Rubble-mound breakwater, automated inspection, surveying techniques, diagnosis, damage evolution.

1. Introdução

O processo de tomada de decisão relativo à realização de obras de manutenção e/ou reparação de um quebra-mar de taludes deve apoiar-se no diagnóstico da estrutura, a realizar na sequência de um programa de acompanhamento da sua evolução. O procedimento mais usual de acompanhamento da evolução destas estruturas é a sua inspecção periódica que, na maioria dos casos, se tem limitado à zona emersa da estrutura. Tal deve-se ao elevado custo associado à observação da parte submersa.

Para contornar este problema está em curso um projecto de investigação em consórcio, intitulado "MEDIRES – Metodologias de Diagnóstico e Inspecção Robotizada de Estruturas Semi-submersas", que envolve a Administração do Porto de Sines (APS), o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), o Pólo de Lisboa do Instituto de Sistemas e Robótica (ISR) e a Autoridad Portuaria de Avilés, Espanha (APA). No âmbito deste projecto estão em desenvolvimento técnicas para levantamento de quebra-mares de talude, bem como metodologias de avaliação e previsão da evolução do estado destas estruturas. As ferramentas e as técnicas em desenvolvimento no âmbito deste projecto têm sido testadas no molhe oeste do porto de Sines e no molhe do porto de Avilés.

Este artigo tem como objectivo descrever o trabalho já desenvolvido no âmbito do projecto MEDIRES. Depois desta introdução, apresenta-se, na secção 2, um breve resumo da actividade do LNEC no âmbito da inspecção sistemática de obras marítimas, descrevendo-se em seguida, na secção 3, o instrumento para realização de levantamentos de alta precisão desenvolvido no âmbito do projecto, os seus componentes e os resultados dos testes com ele realizados no molhe oeste do porto de Sines. Na secção 4 apresenta-se o trabalho já realizado para, com base nas medições da envolvente do manto obtidas com o

IRIS, se avaliar a possibilidade de os estragos na estrutura atingirem valores excessivos num dado intervalo de tempo, focando-se na metodologia implementada para estimar da evolução do dano de quebra-mares de taludes. As conclusões do artigo são apresentadas na secção 5.

2. Observação sistemática de obras marítimas em Portugal

Em 1986 foi implementado pela primeira vez em Portugal, por iniciativa do LNEC, um programa de observação sistemática das estruturas que então se encontravam sob a jurisdição da Direcção-Geral de Portos. Actualmente, o projecto inclui a observação sistemática da zona emersa, através de inspecção visual de 28 quebra-mares distribuídos por toda a costa de Portugal continental, representando cerca de 75% do comprimento total de quebra-mares de taludes em Portugal.

Pretendia-se com este programa de observação sistemática:

- possibilitar a detecção de anomalias do comportamento das estruturas a tempo de permitir introduzir as correcções adequadas e limitar as consequências económicas de eventuais avarias;
- comparar o comportamento real das estruturas com o comportamento previsto no projecto;
- proporcionar uma selecção criteriosa das estruturas mais necessitadas de obras de manutenção e/ou obras de reparação.

A inspecção visual da parte emersa de quebra-mares de taludes permite detectar variações nos taludes do quebra-mar, nomeadamente elementos partidos ou deslocados, bem como a deterioração dos elementos do manto associada aos processos físico-químicos naturais do ambiente agressivo em que a estrutura foi construída. Aquela informação é sempre completada com uma série de fotografias da estrutura inspeccionada, de acordo com um plano de pontos de vista e ângulos de tomada, estabelecidos *a priori* para cada quebra-mar.

ZONE:_____ DATE:_____

ARMOUR LAYER

1. DISPLACED BLOCKS		2. BROKEN BLOCKS		3. SLOPE	
NO DISPLACEMENTS		NO BROKEN BLOCKS		GOOD CONDITION	
A FEW DISPLACEMENTS		A FEW BROKEN BLOCKS		DAMAGED NEAR THE W. L.	
SOME DISPLACEMENTS		SOME BROKEN BLOCKS		DAMAGED	
MANY DISPLACEMENTS		MANY BROKEN BLOCKS		VERY DAMAGED	

4. CONCRETE DEGRADATION		5. FATIGUE	
GOOD CONDITION		NO BLOCKS WITH ROUNDED CORNERS	
SUPERFICIAL HOLES ARE VISIBLE		SOME BLOCKS WITH ROUNDED CORNERS	
SOME CORROSION		MORE THAN **% OF BLOCKS WITH ROUNDED CORNERS	
MUCH CORROSION		MORE THAN **% OF BLOCKS WITH ROUNDED CORNERS	

6. SETTLEMENT OF THE ARMOUR LAYER				7. FILTERS	
6.1. NEAR THE W. L.		6.2. AT THE TOP			
NO SETTLEMENT		NO SETTLEMENT		NOT VISIBLE	
SOME EVIDENCE		SOME EVIDENCE		VISIBLE IN A SMALL ZONE	
SMALLER THAN ** m		SMALLER THAN ** m		VISIBLE IN SEVERAL ZONES	
MORE THAN ** m		MORE THAN ** m		VISIBLE IN A LARGE ZONE	

8. OBSERVER´S GENERAL OPINION											
LEVEL 0		LEVEL 1		LEVEL 2		LEVEL 3		LEVEL 4		LEVEL 5	

CROWN WALL

9. BREAKING		10. SUPERFICIAL CONCRETE DAMAGE		11. CONSTRUCTION JOINTS	
NO BREAKS		GOOD CONDITION		ALL CLOSED	
A FEW BREAKS		SOME SUPERFICIAL HOLES ARE VISIBLE		** <X< ** m	
SOME BREAKS		SOME CORROSION		** <X< ** m	
MANY BREAKS		MUCH CORROSION		X> ** m	

12. SETTLING		13. ROTATION		14. SLIDING	
NO SETTLEMENT		NO ROTATION		NO SLIDING	
SOME EVIDENCE		SOME EVIDENCE		SOME EVIDENCE	
SMALLER THAN ** m		SMALLER THAN ** m		SMALLER THAN ** m	
MORE THAN ** m		MORE THAN ** m		MORE THAN ** m	

15. OBSERVER`S GENERAL OPINION											
LEVEL 0		LEVEL 1		LEVEL 2		LEVEL 3		LEVEL 4		LEVEL 5	

INNER ZONE

1. DISPLACED BLOCKS		2. BROKEN BLOCKS		3. SLOPE	
NO DISPLACEMENTS		NO BROKEN BLOCKS		GOOD CONDITION	
A FEW DISPLACEMENTS		A FEW BROKEN BLOCKS		DAMAGED NEAR THE W. L.	
SOME DISPLACEMENTS		SOME BROKEN BLOCKS		DAMAGED	
MANY DISPLACEMENTS		MANY BROKEN BLOCKS		VERY DAMAGED	

4. CONCRETE DEGRADATION		5. FATIGUE	
GOOD CONDITION		NO BLOCKS WITH ROUNDED CORNERS	
SUPERFICIAL HOLES ARE VISIBLE		SOME BLOCKS WITH ROUNDED CORNERS	
SOME CORROSION		MORE THAN **% OF BLOCKS WITH ROUNDED CORNERS	
MUCH CORROSION		MORE THAN **% OF BLOCKS WITH ROUNDED CORNERS	

6. SETTLEMENT OF THE ARMOUR LAYER				7. FILTERS	
6.1. NEAR THE W. L.		6.2. AT THE TOP			
NO SETTLEMENT		NO SETTLEMENT		NOT VISIBLE	
SOME EVIDENCE		SOME EVIDENCE		VISIBLE IN A SMALL ZONE	
SMALLER THAN ** m		SMALLER THAN ** m		VISIBLE IN SEVERAL ZONES	
MORE THAN ** m		MORE THAN ** m		VISIBLE IN A LARGE ZONE	

8. OBSERVER´S GENERAL OPINION											
LEVEL 0		LEVEL 1		LEVEL 2		LEVEL 3		LEVEL 4		LEVEL 5	

** valores a definir de acordo com a estrutura inspeccionada

Figura 1. O impresso de inspecção visual.

O impresso de inspecção (**Figura 1**) é um auxiliar precioso do observador, pois dirige a sua atenção para os aspectos mais relevantes do estado da estrutura a inspeccionar, fornecendo uma base para o registo sistemático daqueles aspectos, o que facilita a comparação do estado da estrutura em inspecções levadas a cabo em instantes diferentes. A qualidade da informação registada no impresso de inspecção depende fortemente da configuração do impresso e da experiência do observador. Cada impresso diz normalmente respeito a um troço apenas e procura caracterizar os vários componentes da secção transversal da

estrutura, nomeadamente o manto resistente, o coroamento e o tardoz.

Toda a informação relativa a cada uma das campanhas de observação visual é armazenada na base de dados ANOSOM. Esta base de dados inclui ainda um pequeno historial de cada uma das estruturas em observação e a caracterização tão exacta quanto possível de cada um dos troços em que cada uma das obras foi dividida.

Com base nos elementos recolhidos nas diversas campanhas de observação visual, e aplicando determinados critérios pré-estabelecidos, é possível fornecer ao utilizador a classificação do estado actual de cada um dos troços já referidos, bem como o seu estado de evolução e o respectivo estado de risco. Estes resultados permitem caracterizar globalmente a segurança das estruturas, bem como avaliar a eventual necessidade de se efectuarem obras de vulto ou pequenas reparações, isto é, realizar o diagnóstico da estrutura.

3. Novas ferramentas de inspecção

Pese embora as virtudes da inspecção visual da parte emersa dos quebra-mares de taludes realizada pelo LNEC, nomeadamente no que se refere à compreensão do comportamento *in-situ* destas estruturas e às indicações sobre a necessidade de obras de reparação ou manutenção que dela se pode obter, esta abordagem tem algumas limitações intrínsecas. A mais importante resulta do facto de a inspecção visual estar limitada à parte emersa da estrutura pois, para avarias que ocorram na parte submersa da estrutura, pode demorar muito tempo até que os seus efeitos se tornem visíveis na parte emersa. Além disso, para muitos dos parâmetros que é necessário caracterizar no impresso de inspecção, apenas existe uma escala qualitativa (**Figura 1**) ficando ao critério do observador o estabelecimento dos limites quantitativos para essa escala. Finalmente, deve referir-se o facto de não existir qualquer influência directa do regime de agitação no diagnóstico da estrutura.

3.1. Inspecção robotizada de quebra-mares de taludes

Para obstar a alguns destes problemas, o LNEC, o ISR, a APS e a APA estão envolvidos num projecto de investigação em consórcio, cujo objectivo é o desenvolvimento de ferramentas e metodologias para a inspecção da geometria dos taludes de quebra-mares.

Uma das fases mais importantes deste projecto é o desenvolvimento pelo ISR de um instrumento de medição para a realização de levantamentos com alta precisão. Este instrumento, denominado IRIS, será constituído por um sistema *laser* para levantar a parte emersa da estrutura e por uma sonda acústica com varrimento mecânico para levantar a parte submersa, **Figura 2**.

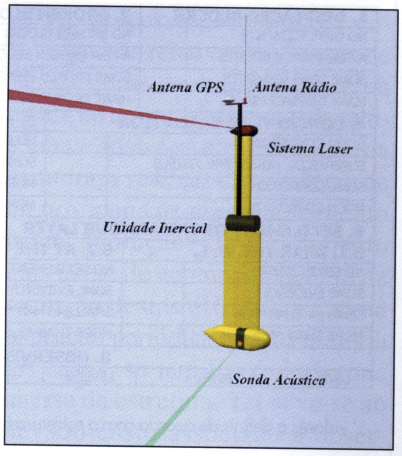

Figura 2. Instrumento para fazer levantamentos de alta precisão.

O IRIS 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, para levantar a parte submersa das estruturas com grande precisão. O varrimento mecânico do feixe da sonda possibilita a realização do levantamento com o veículo de suporte a uma distância segura do quebra-mar;
- um sistema *laser* com varrimento 2-D, para o levantamento topográfico de grande precisão da parte emersa da estrutura;
- um sistema de posicionamento via satélite, em tempo real, que fornece 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 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. Procede, também, às correcções das medidas dos perfis obtidos, utilizando os dados de posição, movimento (acelerações linear e velocidades angulares) e atitude.

Embora o IRIS possa trabalhar como um instrumento de levantamento autónomo em qualquer embarcação, desde que convenientemente solidarizado à mesma, pretende-se neste projecto que o instrumento seja montado num catamarã autónomo, propriedade do ISR – IST, e para o qual foram desenvolvidos sistemas de controlo e navegação que garantem a repetibilidade da manobra e, consequentemente, a qualidade dos dados obtidos.

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 (GPS com RTK). Para além disso, o veículo possui um sistema de orientação que lhe permite determinar o seu rumo e in-

clinação. 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 aceder de terra aos dados produzidos pelo instrumento. A **Figura 3** 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 num possível levantamento de um quebra-mar.

Figura 3. Catamarã a fazer um levantamento.

Dada a especificidade do projecto, directamente relacionada com a qualidade dos dados a obter, irá ser necessário projectar/redesenhar o sistema de controlo da missão do DELFIM, que permitirá a cooperação entre os sistemas instalados no catamarã e o sistema de coordenação do levantamento instalado no instrumento.

Também o sistema de controlo do veículo, que é de importância extrema para o sucesso do levantamento e para a preservação da integridade da plataforma, terá de ser redesenhado. Para além disso, o sistema de controlo do veículo já é capaz de executar missões com os seguintes requisitos:

- baixa velocidade de progressão, função da definição do levantamento desejada. É esta velocidade que dita o espaçamento dos pontos;
- seguimento do quebra-mar, a distância constante, de forma a uniformizar os dados do levantamento;
- controlo de atitude de grande precisão, de modo a permitir apontar as sondas na direcção desejada;
- capacidade de afastar o veículo rapidamente da estrutura no caso de este se aproximar demasiado, em virtude de ondulação, corrente ou perturbações inesperadas.

3.2. O pré-protótipo do IRIS

Em Junho de 2003 ficou concluído o pré-protótipo do IRIS que permite realizar, somente, levantamentos da parte submersa da envolvente de quebra-mar de taludes. A **Figura 4** mostra um detalhe da sonda acústica de feixe estreito e com sistema de varrimento mecânico, bem como o pré-protótipo do IRIS instalado numa das embarcações de apoio do porto de Sines.

Na parte superior da **Figura 4b**) pode observar-se a antena de GPS, bem como uma caixa preta que lhe está ligada e que contém a unidade de medição inercial. O perfilador acústico só é colocado na posição de funcionamento quando se vai iniciar o levantamento. Nesta fase do projecto, a estrutura de apoio do pré-protótipo foi concebida para ser instalada em pequenas embarcações e não no DELFIM. A acoplagem IRIS-DELFIM será abordada mais tarde no projecto.

Esta versão do instrumento IRIS é composta por uma unidade de medição inercial (Seatex MRU-6), dois receptores GPS (Ashtech DG14), com as antenas respectivas cuidadosamente calibradas e instaladas à popa e à proa da embarcação onde se instala o IRIS, e por um sondador acústico de varrimento mecânico (Systems Technologies SeaKing).

Em terra é colocado um receptor GPS (Ashtech DG14) devidamente calibrado e que fornecerá correcções para a fase de pós-processamento. Não é necessária qualquer comunicação entre a embarcação que leva o IRIS e a estação fixa de GPS, o que simplifica o planeamento da missão e evita o condicionamento de *line-of-sight* (horizonte desobstruído) entre a estação fixa e as estações móveis na realização do levantamento.

3.3. Os levantamentos do IRIS

O pré-protótipo do instrumento para levantamentos de alta precisão tem sido testado no molhe oeste do porto de Sines. A estrutura actualmente existente, que tem cerca de 1400 m de comprimento, resultou do reacondicionamento do quebra-mar inicial, cujo manto resistente

Figura 4. O pré-protótipo do IRIS. a) Detalhe da sonda acústica de feixe estreito com varrimento mecânico; b) Aspecto do IRIS montado numa embarcação de apoio do porto de Sines.

do perfil corrente era constituído por dolos com 40 toneladas.

Com efeito, depois dos temporais de Fevereiro de 1978 e de Fevereiro de 1979, que praticamente o destruíram, aquele quebra-mar foi reconstruído, entre 1990 e 1992, utilizando cubos Antifer de 90 toneladas, no perfil corrente, e de 110 toneladas, na cabeça. Devido à importância desta estrutura e à sua história, a Administração do Porto de Sines decidiu mandar realizar levantamentos do quebra-mar praticamente todos os anos. Estes levantamentos incluem, quer a parte emersa quer a parte submersa, tornando este quebra-mar a estrutura mais adequada para avaliar o desempenho do IRIS.

Os levantamentos da parte submersa do molhe oeste do porto de Sines têm sido levados a cabo pelo Instituto Hidrográfico (IH). Quase todos os anos, um conjunto de perfis é levantado com um sondador acústico simples. As linhas de levantamento estão afastadas cerca de 50 m nos primeiros 1000 m do desenvolvimento do quebra-mar e 25 m na parte restante até à cabeça do quebra-mar, **Figura 5 a)**.

Embora estes levantamentos sejam realizados regularmente desde 1993, apenas os dados dos levantamentos de 2000, 2001 e 2003 estão armazenados num formato digital que possibilita o seu processamento. Em cada ano, o número de pontos levantados é de cerca de 4000, excepto em 2001, altura em que foram levantados 6000 pontos.

Quer a **Figura 5 a)** quer a **Figura 5 b)** apresentam as isolinhas da superfície definida a partir do levantamento realizado pelo IH em 2000. Na **Figura 5 b)**, sobreposto àquelas isolinhas está um mapa com a diferença entre a superfície já referida e a superfície que pode definir-se a partir do levantamento de 2003 do IH. A figura mostra que, naqueles três anos e para a maior parte do quebra-mar, aquela diferença não ultrapassa 1 m e só

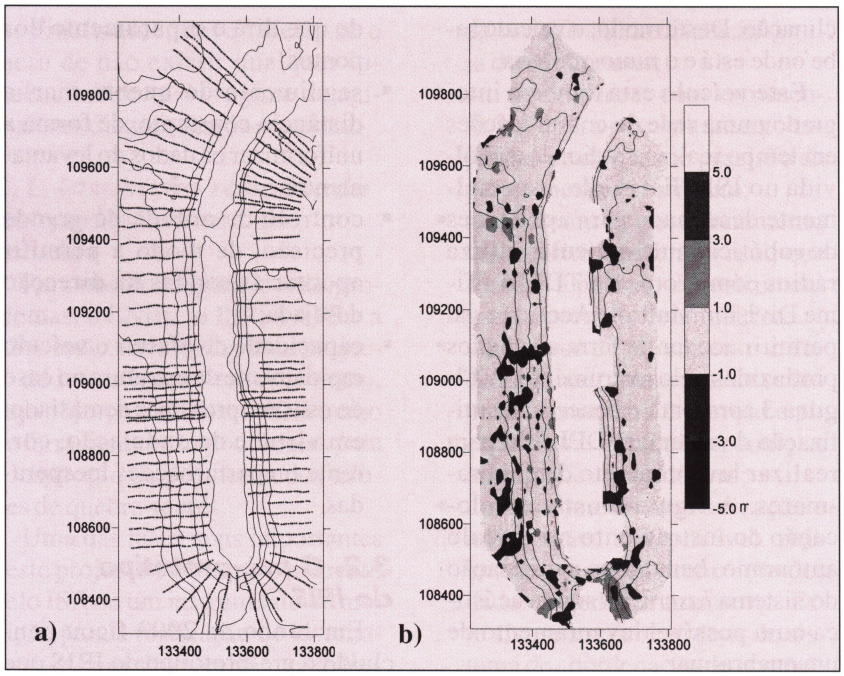

Figura 5. a) Alinhamentos dos perfis levantados pelo IH em 2003; b) Diferenças entre os levantamentos do IH de 2003 e 2000.

em regiões muito limitadas aquela diferença está entre 1 m e 3 m.

Até à data, foram já realizados dois levantamentos do molhe oeste do porto de Sines com o pré-protótipo do IRIS. O primeiro decorreu em Junho de 2003 e o segundo em Junho de 2004. No primeiro daqueles levantamentos, a primeira vez em que o pré-protótipo do IRIS foi utilizado, verificou-se que havia dois detalhes que não tinham sido devidamente considerados até então.

O primeiro estava relacionado com a medição do campo magnético terrestre, que era fundamental para a determinação do rumo do IRIS. Com efeito, para se obter os cubos Antifer mais pesados, utilizados na cabeça do quebra-mar, foi adicionado um minério de ferro aos agregados do betão com que aqueles cubos foram construídos. Tal implica que as medições de rumo fornecidas por uma bússola electrónica sejam perturbadas pela estrutura. Foi este problema que levou à utilização de dois receptores de GPS (um à popa e outro à proa) para a determinação do rumo da embarcação que transporta o IRIS e do próprio IRIS.

O segundo detalhe foi a altura da agitação marítima próximo do molhe. Num dia de Verão houve várias ondas cuja espuma galgou a cabine da embarcação. Essas ondas seriam certamente excessivas para o catamarã DELFIM. A avaliação do regime geral observado num ponto frente ao molhe oeste de Sines (Coli *et al.* 2004) mostrou que a frequência de ocorrência de estados de agitação com altura significativa inferior a 1 m é inferior a 1%. Isto implica que se deve ser muito cuidadoso na selecção das datas para o levantamento dos taludes deste quebra-mar com o IRIS instalado no catamarã DELFIM. Em alternativa, pode utilizar-se o instrumento para levantamentos DELFIM instalado noutro tipo de embarcação.

Apesar daqueles contratempos, a **Figura 6** mostra que o levantamento realizado pelo IRIS é bastante exaustivo. Em vez de um conjunto de levantamentos de perfis ao longo do quebra-mar, tem-se um bom varrimento do manto protector (apenas nesta parte da estrutura foram levantados 63 969 pontos). Este elevado número de pontos le-

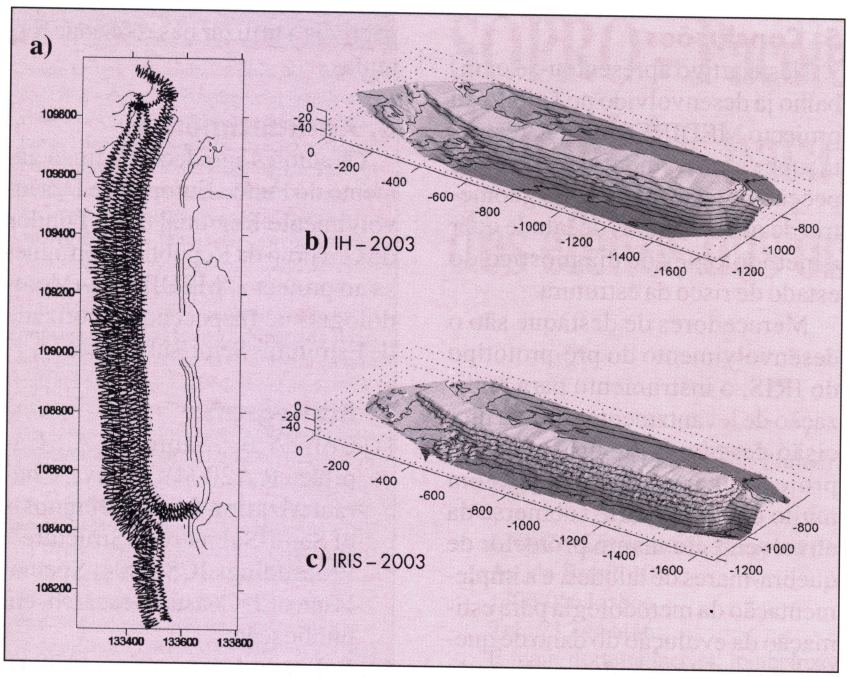

Figura 6. a) Pontos levantados pelo IRIS em 2003; b) Perspectiva da superfície obtida com os pontos levantados pelo IH em 2003; c) Perspectiva da superfície obtida com os pontos levantados pelo IRIS em 2003.

vantados implica um maior detalhe na descrição do talude do manto protector, como pode ver-se na mesma figura, que apresenta as perspectivas das superfícies que podem ser definidas a partir do levantamento do IH de 2003, **Figura 6 b**), e do levantamento do IRIS de 2003, **Figura 6 c**).

4. Novas ferramentas de diagnóstico

Com os levantamentos do IRIS é possível conhecer a evolução da envolvente do manto protector do quebra-mar. Partindo de uma medida dessa evolução e do regime de agitação na zona de implantação da estrutura pode avaliar-se a possibilidade de os estragos na estrutura atingirem valores considerados excessivos, logo, realizar o diagnóstico da estrutura.

Para alcançar esse objectivo já foram dados alguns passos no âmbito do projecto MEDIRES, que consistiram na adaptação de uma base de dados já existente para incluir a informação recolhida nos levantamentos realizados com o IRIS; no desenvolvimento de um pacote numérico para o cálculo da evolução da agitação marítima desde o largo até à proximidade da costa ou ao interior de bacias abrigadas, o pacote SOPRO (Pinheiro *et al.* 2005); e na implementação de uma metodologia para avaliação da evolução do dano de quebra-mares de taludes. Neste artigo foca-se apenas este último aspecto.

No diagnóstico de quebra-mares de taludes podem utilizar-se as ferramentas empregues na verificação da segurança de estruturas com métodos probabilísticos. Tal implica a definição de modos de falha e das respectivas relações solicitação resistência que, neste caso, devem ser válidas mesmo para estruturas com alguns danos iniciais.

Embora existam vários modos de falha que devem ser considerados para o estabelecimento da probabilidade de falha de um quebra-mar de taludes, o trabalho realizado até agora no âmbito do MEDIRES tem-se concentrado no modo de falha por instabilidade hidráulica do manto.

Melby e Kobayashi (1999) apresentaram uma fórmula que pode ser adequada para este tipo de utilização. Com efeito, eles estabeleceram que o dano numa secção de um quebra-mar de talude provocado por uma tempestade depende do dano sofrido antes do início da tempestade, bem como dos parâmetros do estado de agitação associado à tempestade, incluindo a sua duração:

$$\left[\bar{S}(t)\right]^{1/b} = \left[\bar{S}(t_n)\right]^{1/b} + \left(a_S N_S^5\right)^{1/b} \frac{t - t_n}{T_m} \qquad (1)$$

em que $\bar{S}(t)$ é o dano médio no instante t contido no intervalo $t_n \leq t \leq t_{n+1}$, durante o qual se pode admitir que os parâmetros caracterizadores da agitação marítima (H_s, a altura significativa e T_m, o período médio de zero ascendente) se mantêm constantes; $Ns = Hs/(\Delta D_{n50})$ é o parâmetro de estabilidade no mesmo intervalo de tempo. Esta fórmula permite a avaliação da evolução do dano no manto, quer desde a sua construção quer se for conhecido apenas o seu estado actual.

No cálculo da probabilidade de falha do manto protector pode utilizar-se um procedimento probabilístico de nível III: um conjunto de sequências de estados de agitação independentes, correspondentes a um determinado intervalo de tempo, é gerado aleatoriamente de acordo com a distribuição de probabilidade respectiva, estimando-se o dano no fim de cada uma dessas sequências e contando-se o número de falhas no conjunto simulado. O quociente entre o total de falhas e o número de sequências simulado é uma estimativa da probabilidade de falha.

Para reduzir a influência de estados de agitação pouco energéticos na simulação do comportamento do manto sob a acção de agitação marítima utilizou-se o conceito de número de estabilidade crítico (Smith *et al.*, 1992) para definir um limiar de altura significativa abaixo do qual o aumento do dano pode ser desprezado.

Como o manto protector do molhe oeste do porto de Sines é consti-

tuído por cubos Antifer e os coeficientes a_S e b da equação (1) foram determinados para mantos de enrocamento, aquela equação não pode ser utilizada ainda para estimar a evolução do manto desta estrutura. Em vez disso, a metodologia de avaliação da probabilidade de falha (Sousa *et al.*, 2005) foi testada com o molhe de protecção do porto de pesca de Sines, que é constituído por enrocamento com 4,5 toneladas.

Definidas as distribuições de probabilidade de H_s e de T_m para um ponto frente a este molhe, utilizou-se o pacote @Risk (Palisade Corporation, 1994) para gerar as séries temporais dos parâmetros da agitação marítima nesse mesmo ponto. Realizaram-se 100 simulações, cada qual cobrindo um período de 100 anos.

Na **Figura 7** apresentam-se as curvas com a evolução do dano da estrutura em cinco das 100 simulações realizadas, bem como a curva resultante da média daquelas 100 simulações. A figura mostra que a maior parte do dano é o resultado de episódios notáveis. A mesma figura mostra, especialmente a curva com a média das 100 simulações, que existe uma tendência para o abrandamento do dano acumulado à medida que a estrutura vai ficando danificada, indiciando uma aproximação a um estado de equilíbrio nunca atingido.

Embora o procedimento descrito possa ser utilizado, quer para o dimensionamento dos elementos do manto quer para determinar a probabilidade de uma dada solução satisfazer um critério pré-definido, deve ter-se sempre em mente que o modelo para a evolução do dano só é válido para estruturas semelhantes à considerada. Caso se pretenda utilizar este modelo em estruturas cujo manto não seja de enrocamento é necessário verificar-se a sua validade e, possivelmente, ajustar os parâmetros da equação (1) com um novo conjunto de resultados experimentais.

5. Conclusões

Neste artigo apresentou-se o trabalho já desenvolvido no âmbito do projecto MEDIRES, no que respeita, quer a instrumentos para a inspecção precisa e eficaz da geometria de quebra-mares de talude quer a metodologias de diagnóstico do estado de risco da estrutura.

Merecedores de destaque são o desenvolvimento do pré-protótipo do IRIS, o instrumento para realização de levantamentos de alta precisão desenvolvido no âmbito do projecto, capaz de levantar com muito detalhe a parte submersa da envolvente do manto protector de quebra-mares de taludes, e a implementação da metodologia para estimação da evolução do dano de quebra-mares de taludes utilizando métodos probabilísticos.

Com a inclusão, em breve, do laser no IRIS ter-se-á um instrumento capaz de levantar, quer a parte submersa quer a parte emersa de quebra-mares de taludes. Por outro lado, a implementação das fórmulas de Melby e Kobayashi (1999) para cálculo da evolução do dano de um quebra-mar com manto protector de enrocamento mostrou as capacidades destas fórmulas e reforçou o interesse na realização de ensaios de grande duração com modelos físicos reduzidos de estruturas com mantos protectores constituídos por elementos artificiais, para se obter os coeficientes respectivos a utilizar nas referidas fórmulas.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional e dos Fundos do Governo da República Portuguesa ao projecto "MEDIRES – Metodologias de Inspecção Robotizada de Estruturas Semi-submersas".

7. Bibliografia

[1] Coli, A.B.; Santos, J.A.; Capitão, R. (2004). "Wave Characterization for the Diagnosis of Semi-Submerged Structure". Proceedings ICS 2004, Special Issue of J. Coastal Research, em publicação.

[2] Palisade Corporation (1994). "Risk analysis and simulation add-in for Microsoft Excel or Lotus 1-2-3, Windows Version Release 3.1 User's Guide". Palisade Corporation, USA.

[3] Pinheiro, L.; Fortes, C.J.; Neves, M.G.; Santos, J.A. (2005). "An operational tool for wave regime characterization and propagation. Application to the port of Sines", in WAVES 2005, Madrid, Julho de 2005.

[4] Sousa, I,A.; Pinheiro, L.; Santos, J.A.; Capitão, R. (2005). "Storm data analysis for risk assessment of rubble-mound structures", in WAVES 2005, Madrid, Julho de 2005.

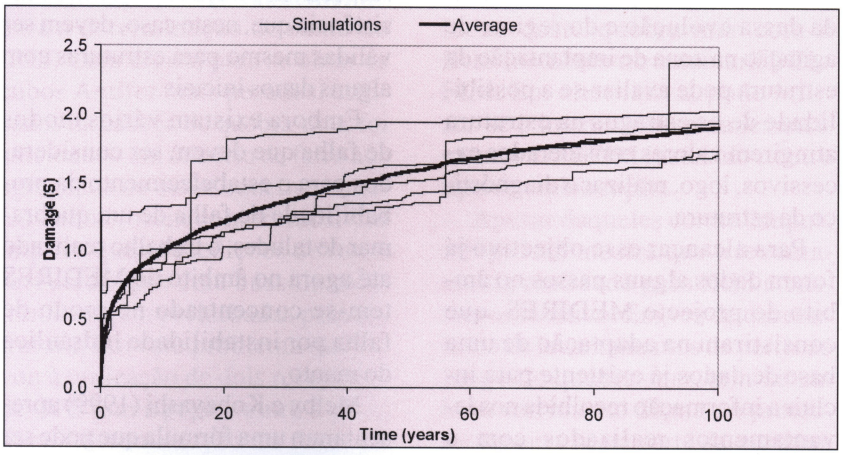

Figura 7. Evolução do dano acumulado em cinco simulações com 100 anos de duração e média de 100 simulações.