



## 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

### INSPECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE QUEBRA-MARES DE TALUDES. RESULTADOS DO PROJECTO MEDIRES

J.A. Santos<sup>1</sup>, I. Sousa<sup>1</sup>, C. Silvestre<sup>2</sup>, P. Oliveira<sup>2</sup>, A. Pascoal<sup>2</sup>, L. Sebastião<sup>3</sup>, J. Alves<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Av. do Brasil 101, 1700 066 Lisboa  
jasantos@lnec.pt, isousa@lnec.pt

<sup>2</sup>Instituto de Sistemas e Robótica, Instituto Superior Técnico  
Av. Rovisco Pais, 1, 1049 001 Lisboa  
cjs@isr.ist.utl.pt, pjcro@isr.ist.utl.pt, antonio@isr.ist.utl.pt

<sup>3</sup>Blue Edge Sistemas de Engenharia, Lda.  
Calçada de Arroios 40C – 1Esq., 1000-027 Lisboa  
lsebastiao@blueedge.pt, jalves@isr.ist.utl.pt

#### RESUMO

O projecto MEDIRES teve como objectivos o desenvolvimento de instrumentos precisos para o levantamento de quebra-mares de taludes e o estabelecimento de metodologias para o diagnóstico destas estruturas. Concluído com êxito o projecto, dá-se conta nesta comunicação dos resultados alcançados nos quatro anos de trabalho do projecto.

## 1. INTRODUÇÃO

Em Março de 2003 iniciaram-se as actividades do projecto de investigação em consórcio MEDIRES – Metodologias de diagnóstico e de inspecção robotizada de estruturas semi-submersas. Este projecto foi co-financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional, da União Europeia, e por fundos do Governo da República Portuguesa e nele participaram o LNEC, o Instituto Superior Técnico, através do Instituto de Sistemas e Robótica (IST/ISR), a Administração do Porto de Sines (APS) e a Autoridad Portuaria de Avilés (APA). Os objectivos do projecto foram o desenvolvimento de instrumentos precisos para o levantamento de quebra-mares de taludes e o estabelecimento de metodologias para o diagnóstico destas estruturas.

Com este projecto procurou-se contribuir para melhorar o processo de tomada de decisão relativo a realização de obras de manutenção e / ou reparação de um quebra-mar de taludes. Com efeito, embora tal processo deva apoiar-se no diagnóstico da estrutura, realizado na sequência de um programa de acompanhamento da evolução da estrutura, face às dificuldades na caracterização, de forma contínua, do estado de um trecho de um quebra-mar de taludes, 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.

Esta comunicação tem como objectivo descrever o trabalho 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.

Depois desta introdução, faz-se, na secção 2, uma descrição da situação em Portugal no que se refere à inspecção de quebra-mares de taludes anterior ao início do projecto MEDIRES. Em seguida, na secção 3, apresentam-se os trabalhos realizados no âmbito do projecto para o desenvolvimento de instrumentos para a inspecção robotizada daquele tipo de estruturas,



## 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

enquanto na secção 4 se descrevem os procedimentos e as ferramentas informáticas criados para, com base nas medições da envolvente do manto obtidas com aqueles instrumentos, se avaliar a possibilidade de os estragos na estrutura atingirem valores excessivos num dado intervalo de tempo. As conclusões da comunicação são apresentadas na secção 5.

### 2. SITUAÇÃO ANTERIOR

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.

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.

Um auxiliar precioso do observador durante a inspecção visual é o impresso de inspecção 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 e facilitando 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.

Em 1995, alguns anos depois do início do programa de Observação Sistemática de Obras Marítimas (OSOM) no qual o LNEC tem realizado a inspecção visual da parte emersa dos quebra-mares do actual IPTM surgiu a primeira versão da base de dados ANOSOM (análise de observação sistemática de obras marítimas), Reis e Silva (1995), onde se guardava toda a informação recolhida nas campanhas de inspecção visual levadas a cabo pelo LNEC e se fazia o diagnóstico de cada elemento do perfil para cada um dos vários troços em que se dividem as estruturas inspeccionadas. O diagnóstico baseia-se no estado actual do elemento do perfil considerado e na evolução do estado desse elemento desde a última inspecção realizada numa data considerada relevante. Tal inspecção terá ocorrido imediatamente após o mais recente dos seguintes acontecimentos nos últimos cinco anos:

- a construção da estrutura;
- a realização de obras de manutenção / reparação na estrutura;
- o início do período.

O estado de um elemento do perfil numa dada inspecção resulta da média ponderada das classificações atribuídas nessa inspecção aos diferentes itens do elemento que são depois traduzidas numericamente com a utilização de uma tabela. Como o estabelecimento dos pesos a utilizar na média e a tabela de conversão das classificações traduzem o conhecimento da equipa do LNEC sobre a estrutura em análise, tal implica a possibilidade de alteração, quer dos pesos, quer da própria tabela de conversão, com a experiência adquirida ao longo da inspecção sistemática da estrutura.

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 da inspecção visual estar limitada à parte emersa da estrutura, o que limita a qualidade do diagnóstico pois, para avarias que ocorram na parte



submersa da estrutura, pode demorar muito tempo até os seus efeitos se tornarem visíveis na parte emersa. Além disso, para muitos dos parâmetros que é necessário caracterizar no impresso de inspecção apenas existe uma escala qualitativa 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. INSPECÇÃO ROBOTIZADA DE QUEBRA-MARES DE TALUDES**

O objectivo principal desta parte do projecto, cuja actividade foi realizada pelo IST/ISR, era o desenvolvimento de um instrumento capaz de levantar com grande exactidão a totalidade da envolvente de estruturas semi-submersas. Este instrumento, que deveria funcionar também de forma independente em qualquer embarcação, seria colocado num catamarã autónomo cujos sistemas de navegação e controlo garantiriam a repetibilidade da manobra, logo a qualidade dos dados levantados. Com estes instrumentos pretendia-se melhorar a precisão e reduzir os custos dos levantamentos batimétricos e topográficos de quebra-mares de taludes.

#### **3.1 IRIS – o instrumentos para levantamentos de alta precisão**

Este instrumento contém 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.

Previu-se, no início do projecto, a aquisição de um sistema de medição de atitude à firma CrossBow, para auxiliar na correcção dos dados adquiridos pela sonda acústica e pelo laser. Entretanto, o IST/ISR teve acesso a uma unidade semelhante que se mostrou com precisão insuficiente para as necessidades do levantamento. Assim foi decidido avançar, no âmbito do projecto MEDIRES, com o projecto e construção de uma unidade de atitude própria utilizando giroscópios de fibra óptica. Esta decisão permitiu desenvolver “know-how” nacional na área dos sistemas de medição de atitude para corpos em três dimensões, com aplicação diversa.

Em Junho de 2003, ficou concluído o pré-protótipo do IRIS que permitia realizar, somente, levantamentos da parte submersa da envolvente de quebra-mar de taludes. A Figura 1 mostra o aspecto do conjunto que permitia a sua montagem em qualquer embarcação, bem como um detalhe da sonda acústica de feixe estreito e com sistema de varrimento mecânico. Os primeiros testes realizados com este pré-protótipo mostraram que a inclusão de um Sensor de Rumo no instrumento poderia não ser viável para todos os quebra-mares de taludes, especialmente para aqueles cujos elementos do manto contêm materiais ferromagnéticos. Foi, por isso, necessários desenvolver técnicas alternativas para determinação de rumo com base nas medidas realizadas por dois receptores de GPS instalados a bordo.

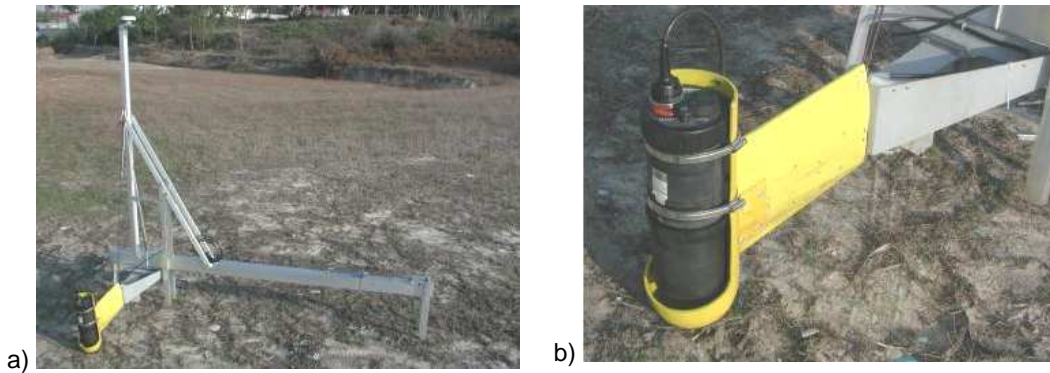


Figura 1 – O pré-protótipo do IRIS. a) vista de conjunto; b) detalhe do sondador acústico de varrimento mecânico

No que respeita ao levantamento da parte emersa da estrutura, foram desenvolvidos procedimentos para calibração do sensor laser, que também podem ser utilizados para a calibração do sondador acústico de varrimento mecânico, e com os quais se pretende reduzir os erros nas reconstruções das superfícies levantadas por aqueles sistemas. Estes procedimentos foram testados primeiro com dados sintéticos e com dados obtidos no levantamento de um modelo a escala reduzida de um quebra-mar de taludes construído no LNEC.

### 3.2 O DELFIMx

Embora o IRIS tivesse sido projectado para trabalhar como um instrumento de levantamento autónomo em qualquer embarcação, desde que convenientemente solidarizado à mesma, pretendeu-se também que o instrumento fosse montado num catamarã autónomo, denominado DELFIM e propriedade do ISR – IST, para o qual já tinham foram desenvolvidos sistemas de controlo e navegação que garantem a repetibilidade da manobra e, conseqüentemente, a qualidade dos dados obtidos.

Testes de desempenho efectuados na fase inicial do projecto com catamarã DELFIM permitiram verificar que a sua utilização com a estrutura IRIS seria difícil pois aquele catamarã, devido à sua forma, apresenta modos dinâmicos rápidos associados ao ângulo de picada levando à deterioração dos resultados do levantamento. O Instituto Superior Técnico, recorrendo a verbas próprias, avançou para a construção de um catamarã alternativo, denominado DELFIMx, Figura 2, o qual foi projectado para apresentar um comportamento dinâmico o mais estável possível, reduzindo ao máximo os ângulos de rolo e picada bem como as respectivas velocidades.

Tal como o seu predecessor, este catamarã autónomo, que tem um comprimento de 3 m e uma boca de 2 m, pode seguir rotas pré-determinadas com grande precisão, está 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 inclinação. Deste modo, o veículo sabe onde está e o rumo que leva.

Este veículo está integrado numa rede de comunicações em tempo real, via rádio, desenvolvida no ISR para aplicações de robótica multi veículo. Esta rede utiliza rádios com protocolo TDMA (Time Division Multiple Access) e permite aceder de terra aos dados produzidos pelo instrumento.



Figura 2 – O catamarã DELFIMx

O Sistema de Controlo do Veículo, que é de importância extrema para o sucesso do levantamento e para a preservação da integridade da plataforma foi projectado, procurando garantir a repetibilidade dos levantamentos. Para além disso, o sistema de controlo do veículo 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 deste se aproximar demasiado, em virtude de ondulação, corrente ou perturbações inesperadas.

Foram desenvolvidos e testados dois controladores para o MEDIREsX: o primeiro procura seguir um trajecto pré-definido enquanto o segundo, que utiliza os mesmos princípios básicos no que se refere ao controlo, define o caminho a seguir a partir da identificação da linha de costa feita a partir de medições realizadas com um distanciómetro laser. Este procedimento permite ao catamarã efectuar levantamento de estruturas sem risco para a plataforma, deixando os obstáculos sempre a uma distância de segurança.

Para o controlo do catamarã utilizou-se uma abordagem de seguimento de trajecto para que esta embarcação navegue ao longo do caminho desejado. A solução encontrada baseou-se na definição de um vector de erro que deve ser forçado a anular-se pelo controlador de seguimento de caminhos. A metodologia proposta para o projecto do controlador assume uma representação da dinâmica do catamarã do tipo politópica com variação linear de parâmetros. O problema da síntese do controlador é resolvido utilizando desigualdades lineares matriciais. Para aumentar o desempenho no que se refere ao seguimento do trajecto, utiliza-se uma técnica de projecto de controladores de previsão. O controlador não linear resultante foi implementado utilizando a Metodologia D no âmbito da teoria de controlo de ganhos comutados.

### 3.3 Controlo de Missão

Ao nível do controlo de missão, o trabalho incidiu no aperfeiçoamento de ferramentas de software e de hardware para programação e execução de missões por veículos autónomos. Estas ferramentas têm vindo a ser desenvolvidas pelo ISR/IST para apoio às suas actividades de robótica oceanográfica e o trabalho realizado permitiu melhorar as capacidades da linguagem de programação CORAL desenvolvida pelo ISR/IST.

O sistema de controlo de missão é uma ferramenta que permite a um utilizador, não necessariamente familiarizado com os procedimentos de robótica oceanográfica, programar, executar e acompanhar a evolução de um veículo no mar. O sistema desenvolvido pelo ISR/IST permite o planeamento e a execução da missão recorrendo a interfaces de utilização intuitiva, Figura 3, nos quais basta apontar ou arrastar sobre o mapa da área onde se pretende realizar o levantamento ou escolher de uma lista de acções possíveis as pretendidas para o veículo.

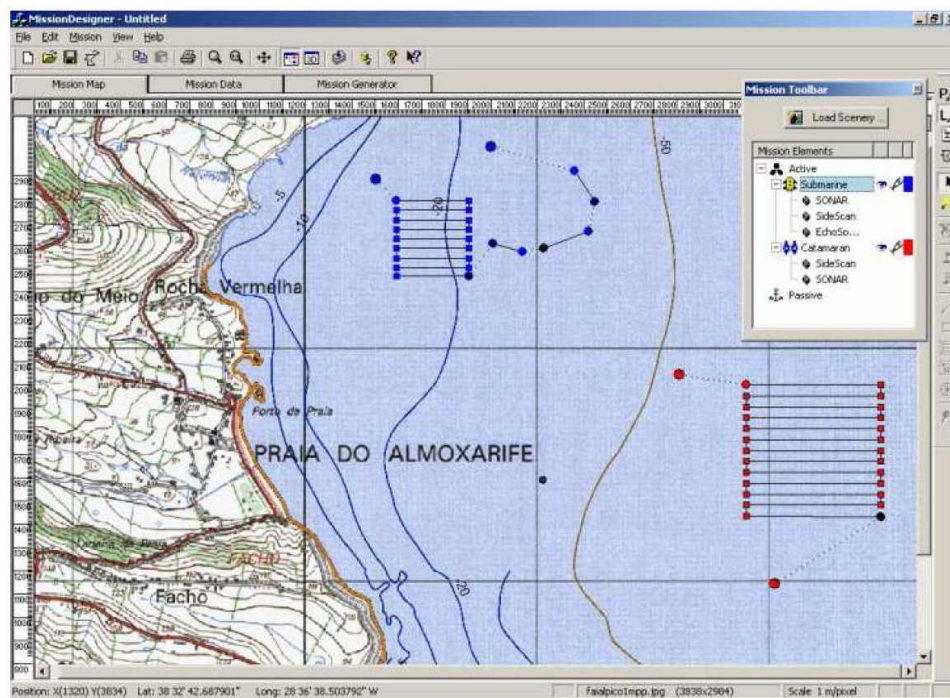


Figura 3 – Interface gráfica do sistema de controlo de missão

O sistema de controlo de missão desenvolvido apoia-se numa arquitectura distribuída de computadores. Os processos distribuídos são coordenados utilizando mecanismos de sincronização e de comunicação inter-processos / inter-computadores que foram implementados sobre CAN bus e sobre Ethernet, utilizando o protocolo de Internet (IP) bem como outros protocolos de comunicação. A arquitectura distribuída de computadores foi projectada com base em PCs (PC104) correndo o sistema operativo Windows Embedded NT e micro-controladores de 8 e 16 bits (tais como o Siemens C509L e o Philips XAS3) que comunicam utilizando o controlador padrão Intel 82527 Controller Area Network (protocolo CAN 2B). Todas as placas dos microcontroladores foram desenvolvidas no ISR/IST tendo em vista a satisfação de requisitos muito rigorosos relativamente ao consumo de energia, à fiabilidade e ao custo.

### 3.4 Os levantamentos do IRIS

Os equipamentos para a inspecção robotizada de quebra-mares de taludes desenvolvidos no âmbito do projecto MEDIRES foram testados em levantamentos do molhes oeste de Sines e do molhe de retenção de areias do porto de Avilés (Espanha).

Pretendia-se com tais levantamentos não só avaliar o estado das estruturas levantadas mas também, e mais importante, confirmar a adequabilidade dos equipamentos à utilização pretendida e eventualmente afinar procedimentos de operação dos mesmos. Nesta tarefa contou-se com a colaboração preciosa das administrações portuárias de Sines e de Avilés que disponibilizaram os meios materiais e humanos necessários.

Na Figura 4 pode observar-se o pré-protótipo do IRIS instalado numa das embarcações de trabalho do porto de Sines nos primeiros testes deste equipamento realizados em Junho de 2003. Estes foram testes muito interessantes pois revelaram dois problemas operacionais que ainda não tinham sido identificados antes.



Figura 4 – O pré-protótipo do IRIS instalado numa das embarcações de trabalho do porto de Sines. Junho de 2003.

O primeiro problema estava relacionado com a medição do rumo da embarcação que transporta o IRIS. Verificou-se que as medições da bússola electrónica utilizada para o efeito eram perturbadas pelo material ferromagnético utilizado nos elementos do manto do quebra-mar. Isso 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 problema foi a altura da agitação marítima próximo do molhe. Constatou-se que uma embarcação como o DELFIM, o catamarã inicialmente proposto para transportar o IRIS, dificilmente sobreviveria em estados de mar semelhantes ao observado naquele local num dia de Verão. Concluiu-se que a previsão da agitação marítima próximo da estrutura a inspecionar era fundamental não só para a definição das solicitações críticas na estrutura, necessárias à previsão da evolução do dano, mas também para o planeamento das próprias inspecções com o DELFIM. Esta conclusão estimulou também o desenvolvimento do DELFIMx, um veículo autónomo com melhor desempenho em situações semelhantes à observada.

A Figura 5a) mostra que o levantamento realizado pelo IRIS é bastante exaustivo, tendo-se um bom varrimento do manto protector (nesta parte da estrutura foram levantados 63969 pontos). Este elevado número de pontos levantados implica um detalhe muito bom na descrição do talude do manto protector sendo visíveis na Figura 5 b), com a perspectiva da superfície obtida com o SURFER™ a partir dos pontos levantados, as arestas dos cubos do manto protector.

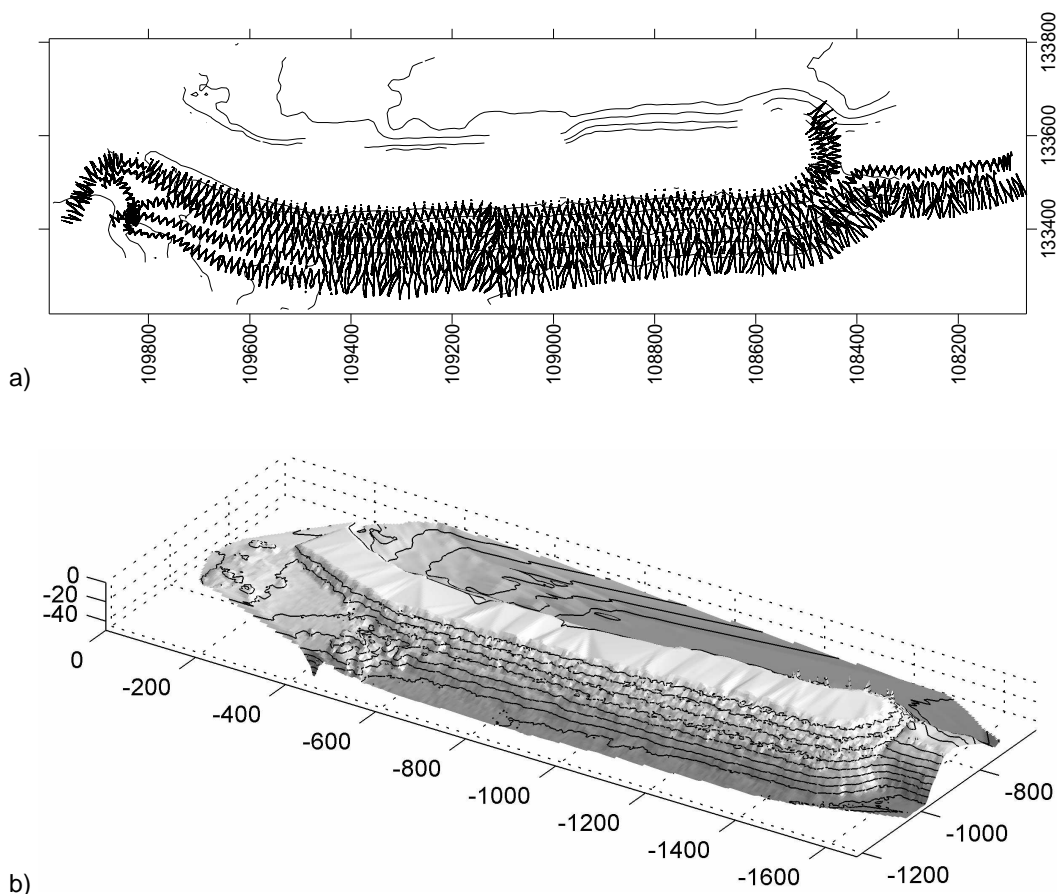


Figura 5 – a) Pontos levantados pelo IRIS ao longo do manto protector do molhe Oeste do porto de Sines em 2003; b) Perspectiva da superfície ajustada pelo SURFER™ a esses pontos.

O último levantamento foi realizado em Julho de 2007, de novo em Sines, mas agora já com o IRIS instalado no DELFIMx, como pode observar-se na Figura 6. Neste levantamento confirmou-se a bondade dos procedimentos definidos para controlo do DELFIMx, nomeadamente a capacidade de seguir uma trajectória evitando o obstáculo quebra-mar identificado a partir do distanciómetro laser.

De referir que o pré-protótipo do IRIS, que só permite o levantamento da parte submersa da estrutura, tem sido frequentemente avaliado em cenário real de operação pela empresa Blue Edge Sistemas de Engenharia Lda. em levantamentos inseridos no plano de monitorização do impacto da construção dos molhes do Douro, mercê de protocolo firmado entre aquela empresa e o IST/ISR.

#### 4. NOVAS FERRAMENTAS DE DIAGNÓSTICO

Com levantamentos consecutivos 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 dos estragos na estrutura atingirem valores considerados excessivos, logo realizar o diagnóstico da estrutura.

Para alcançar esse objectivo, foram dados vários passos no âmbito do projecto MEDIRES e 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



Figura 6 – O IRIS instalado DELFIMx. Julho de 2007.

proximidade da costa ou ao interior de bacias abrigadas e na implementação de uma metodologia para avaliação da evolução do dano de quebra-mares de taludes.

#### 4.1 A nova base de dados ANOSOM

Face à importância da informação qualitativa acerca da deterioração dos materiais dos elementos do perfil do quebra-mar, que apenas pode obter-se com a inspeção visual deste tipo de estruturas, foi decidido que a nova base de dados ANOSOM a desenvolver no âmbito do projecto MEDIRES deveria continuar a incluir a informação recolhida nas campanhas de inspeção visual, para além da informação obtida nos levantamentos da envolvente do perfil, Lemos *et al.* (2005).

Assim as funcionalidades básicas da base de dados são:

- Inserção, correcção e eliminação de dados;
- Processamento dos dados inseridos tendo em vista o diagnóstico da estrutura.

Nos dados a editar identificam-se três grandes categorias

- Dados da estrutura, nos quais se incluem os relativos à divisão conceptual da mesma em troços, a caracterização dos elementos da envolvente do perfil de cada um desses troços e as datas da realização de obras de reparação ou manutenção nos mesmos troços;
- Dados das campanhas de inspeção visual, onde, para além do conteúdo dos formulários de inspeção visual, se incluem as fotografias tiradas durante aquelas campanhas;
- Dados dos levantamentos da envolvente da estrutura, contendo as coordenadas dos pontos levantados, a superfície da envolvente definida numa malha regular, obtida da nuvem formada pelos pontos levantados utilizando o programa SURFER™, e os parâmetros utilizados naquele programa para obter aquela superfície.

O volume de informação associado, quer às fotografias obtidas nas inspecções visuais, quer aos dados da envolvente do perfil, e a utilização pretendida para esta informação fazem com que seja mais razoável guardar na base de dados o caminho até aos ficheiros respectivos do que incluir a totalidade desta informação na base de dados.

O processamento dos dados das inspecções visuais permite

- classificar o estado actual dos elementos do perfil de cada um dos troços da estrutura;
- realizar o diagnóstico daqueles elementos do perfil.

Enquanto a determinação do estado actual dos elementos do perfil, ou o estado dos mesmos observado numa dada inspecção, implica apenas a conversão em números das opiniões do observador acerca dos vários itens inspeccionados e o cálculo de uma média ponderada envolvendo esses números, a realização do diagnóstico implica, além do cálculo desta média em duas inspecções distintas, a identificação da inspecção realizada em data considerada relevante face à data a que se refere o diagnóstico.

O processamento dos dados de levantamento da envolvente da estrutura contempla

- determinação da envolvente da estrutura;
- identificação das zonas de variação do perfil do quebra-mar;
- quantificação daquelas variações (determinado-se então o dano sofrido pela estrutura).

Falta apenas implementar a previsão da evolução do dano para que todas as funcionalidades desejadas para esta base de dados estejam operacionais. Quase todo o processamento destes dados recorre à aplicação SURFER™.

Para a comparação de perfis aquela aplicação ajusta a um conjunto de pontos distribuídos aleatoriamente no espaço uma superfície descrita numa grelha regular no plano horizontal. A obtenção de um perfil dessa superfície implica a definição do traço no plano horizontal da superfície que se pretende intersectar com a envolvente do quebra-mar. A comparação entre secções obtidas em levantamentos distintos fica mais fácil se as superfícies envolventes do quebra-mar estiverem descritas nas mesmas grelhas. O mesmo se passa com a comparação de superfícies correspondentes a levantamentos distintos que facilita a identificação de zonas de erosão e de acreção na envolvente do quebra-mar e a eventual definição de outros perfis onde seja interessante determinar a evolução respectiva.

A Figura 7 apresenta a interface para a comparação de perfis, bem como o gráfico com o resultado dessa comparação. Escolhida a estrutura, são colocados nas combobox

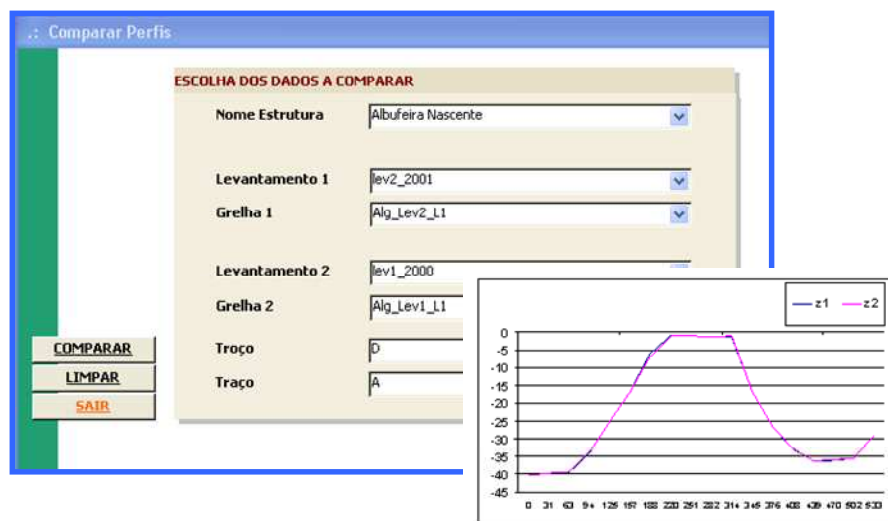


Figura 7 – Interface para comparação de perfis de duas envolventes



## 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

Levantamento 1 e Levantamento 2 os nomes dos levantamentos disponíveis. Assim que é seleccionada uma grelha de entre as disponíveis para um dado levantamento, fica limitada a escolha do segundo levantamento e da grelha respectiva. Pretende-se com isto evitar a repetição de perfis na mesma estrutura e a comparação de perfis realizados em grelhas obtidas com parâmetros do SURFER™ diferentes.

Depois dos levantamentos falta apenas seleccionar o traço da superfície vertical que deve intersectar as duas envolventes. Para isso, selecciona-se primeiro o traço, de entre a lista de traços com traços, e depois o traço, de entre os definidos para o traço seleccionado.

O resultado da comparação é um ficheiro cujo nome é obtido da concatenação de "ResPerfil" com o nome das duas grelhas onde foram determinados os perfis e com o nome do traço da superfície vertical com que as duas superfícies foram intersectadas. O ficheiro tem cinco colunas contendo: as coordenadas de pontos sobre o traço para os quais foram calculadas as ordenadas de cada uma das superfícies; a distância, ao longo do traço, entre o ponto respectivo e o primeiro ponto do traço, considerado a origem; as ordenadas (coordenadas z) na superfície gerada a partir do "Levantamento 1" e do "Levantamento 2", respectivamente, correspondente ao ponto das duas primeiras colunas.

### 4.2 O pacote SOPRO

A caracterização das condições de agitação marítima numa determinada zona da costa, é realizada usualmente definindo o chamado regime (ou regimes) de agitação marítima na zona de interesse. Estes regimes podem ser de três tipos: observado, médio ou de extremos e devem ser definidos a partir de um volume significativo de dados de agitação marítima. Os dados podem ser recolhidos no local por equipamentos de medição adequados (por exemplo, bóias-ondógrafo direccionais) ou obtidos através de modelos para a geração de ondas a partir de um campo de ventos devidamente calibrado. Como os instrumentos de medição da agitação marítima apenas conseguem uma caracterização pontual das variáveis de interesse, a utilização de modelos numéricos de propagação permite uma descrição abrangente, do ponto de vista espacial, da agitação marítima na zona em estudo. Por outro lado, nem sempre os instrumentos de medição estão instalados na proximidade da zona de interesse, sendo, por isso, necessário transferir o regime de agitação do ponto de medição para outro mais próximo da zona em estudo.

Para responder a estas necessidades, foi desenvolvida no LNEC uma aplicação informática, chamada SOPRO, Pinheiro *et al.* (2005), que permite a caracterização de regimes de agitação marítima próximo de estruturas costeiras ou no interior de portos.

O pacote SOPRO é composto por um conjunto de bases de dados, uma interface com o utilizador e um conjunto de módulos de cálculo. O pacote foi criado no sistema gestor de base de dados Microsoft Access™ e utiliza o Visual Basic for Applications (VBA) como linguagem de programação.

A interface com o utilizador, Figura 8, permite o armazenamento e manipulação de dados, a execução dos modelos de propagação da agitação marítima e de simulação da trajectória de navios, assim como a obtenção dos resultados e a criação das correspondentes visualizações gráficas. A selecção do módulo (ou módulos) mais apropriado(s) depende do objectivo do estudo e dos fenómenos envolvidos na propagação da agitação.

Este pacote permite, de forma integrada, realizar estudos de propagação da agitação marítima desde o largo até ao interior de zonas abrigadas e ainda estudos de navegação, simplificando gestos repetitivos e diminuindo a possibilidade de ocorrência de erros em procedimentos complicados.

Os módulos SEAWAVES, REGIMES e SWAN, incluídos no pacote SOPRO, foram aplicados à região de Sines, Figura 9a), para a determinação dos regimes observados de agitação marítima junto ao Molhe Oeste do Porto de Sines (no ponto designado por PTA), Pinheiro *et al.* (2006).

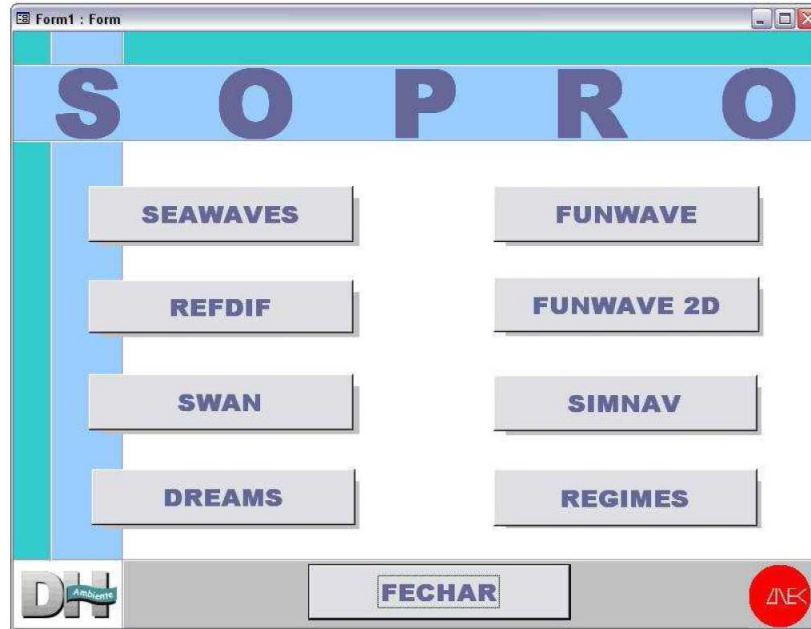


Figura 8 – Janela inicial do pacote SOPRO

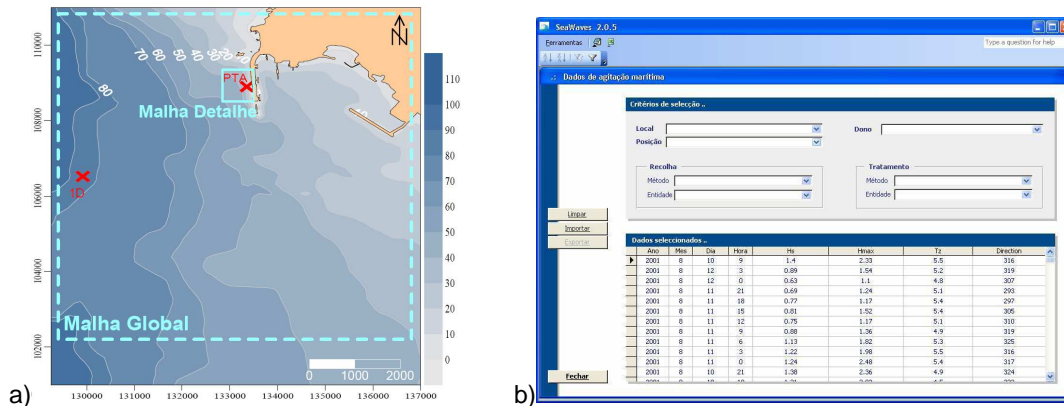


Figura 9 – a) Região do Porto de Sines; b) Interface do módulo SEAWAVES

Com o módulo SEAWAVES, Ribeiro *et al.* (2004), de consulta de bases de dados de agitação marítima, seleccionaram-se os dados de agitação marítima correspondentes a 15 anos de observações disponíveis na bóia-ondógrafo Sines 1D, instalada ao largo de Sines, a uma profundidade de -97 m (ZH), Figura 9 b).

O módulo SWAN, correspondente ao modelo numérico de propagação de agitação marítima SWAN, Booij *et al.* (1996), foi utilizado para transferir dados de agitação desde a zona da bóia-ondógrafo, 1D, até PTA. Foram utilizadas duas malhas encaixadas, uma global (resolução de 125 m e dimensão de 6875 m por 6750 m) cobrindo toda a região de Sines e a outra mais fina (resolução de 5 m e dimensão de 450 m por 500 m), encaixada na primeira, localizada junto ao quebra-mar, Figura 9a). As características da agitação ao largo constituem a condição de fronteira na malha global em um ou dois dos lados dessa fronteira dependendo da direcção daquela agitação. Os resultados da malha global fornecem as condições de fronteira para a malha fina.



A aplicação do módulo REGIMES permite a transferência dos dados do ponto 1D para o ponto PTA. Assim, são primeiramente preenchidas as folhas de cálculo deste módulo correspondentes aos dados de agitação marítima seleccionados no ponto 1D pelo módulo SEAWAVES e aos valores da matriz de transferência calculados pelo módulo SWAN. Com esses dados obtém-se automaticamente uma nova folha de cálculo que contém os valores dos dados transferidos para o ponto PTA. Estes valores constituem o regime geral observado em PTA e com base neles constroem-se os gráficos da Figura 10.

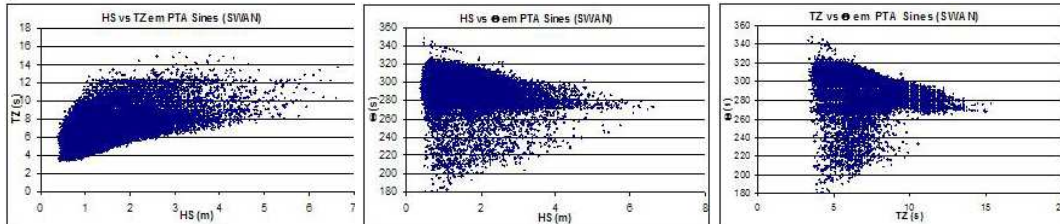


Figura 10 – Relações  $HS = f(TZ)$ ,  $HS = f(\Theta)$  e  $TZ = f(\Theta)$  no ponto PTA.

Com base nos valores transferidos constroi-se a amostra de extremos, considerando-se, para tal, os valores máximos da altura significativa de onda obtidos no Inverno marítimo (de Outubro de um ano civil a Março do seguinte). Obteve-se uma amostra de 15 valores com intervalo entre observações anual. Partindo destes valores, definiu-se o regime de extremos em PTA, utilizando o programa ADAPTA e a metodologia definida em Carvalho e Capitão (1996). No Quadro 1 apresentam-se as alturas de onda extrapoladas e as gamas de valores observados de TZ e  $\Theta$  associados a períodos de retorno de 10, 50 e 100 anos para a distribuição de extremos seleccionada.

Quadro 1 – Regime de extremos no ponto PTA

T (anos)	HS (m)	TZ (s)	$\Theta$ (°)
10	6.79	9 - 18	200 - 295
50	8.14	10 - 19	190 - 285
100	8.72	11 - 20	185 - 280

### 4.3 Evolução do dano de quebra-mares de taludes

Para a avaliação das necessidades de reparação de um quebra-mar de talude, isto é, para a realização do seu diagnóstico, pode contribuir a previsão da evolução da erosão no manto protector dessa estrutura. Conhecida a posição da envolvente do manto protector logo após a construção da estrutura, identificam-se, por comparação com o levantamento mais recente, as zonas de erosão e de acreção do manto. Definindo dano,  $\bar{S}(t)$ , como a relação entre a área erodida medida num dado instante, num perfil do quebra-mar, e a área da secção característica dos elementos do manto, alguns autores já apresentaram algumas fórmulas para a determinação da evolução desse mesmo dano, levando em conta o dano actual e as características do estado de agitação a que o manto pode estar sujeito.

Um exemplo é a fórmula de Melby e Kobayashi (1999) na qual se estabelece que o dano acumulado no final de uma tempestade numa secção de um quebra-mar de talude depende do dano sofrido antes do início da tempestade bem como dos parâmetros do estado de agitação associado à tempestade, incluindo a sua duração.



## 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

$$[\bar{S}(t)]^{1/b} = [\bar{S}(t_n)]^{1/b} + (a_s N_s^5)^{1/b} \frac{t - t_n}{T_m} \quad (1)$$

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 mantém constantes;  $N_s = H_s / (\Delta D_{n50})$  é o parâmetro de estabilidade no mesmo intervalo de tempo;  $\Delta$  é a densidade submersa dos elementos do manto;  $D_{n50}$  o diâmetro nominal mediano desses mesmos elementos. 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.

Com base nesta fórmula pode prever-se a probabilidade de falha do manto protector, utilizando-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.

Não é difícil verificar que, mesmo para estados de agitação com alturas significativas pequenas a equação (1) prevê um aumento no dano da estrutura. Se esse estado de agitação tiver uma duração muito grande, então aquela equação prevê um dano acumulado improvável. 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.

Limitação importante desta fórmula é o facto dos parâmetros  $a_s$  e  $b$  disponíveis terem sido ajustados apenas para mantos protectores de enrocamento pelo que a sua utilização em mantos com elementos artificiais, os mais comuns nos quebra-mares portugueses, carece da realização de ensaios com modelos físicos reduzidos de longa duração para a determinação daqueles parâmetros.

Como o manto protector do molhe oeste do porto de Sines é constituído por cubos Antifer e os coeficientes 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 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 11 apresentam-se as curvas com a evolução do dano da estrutura em 5 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.

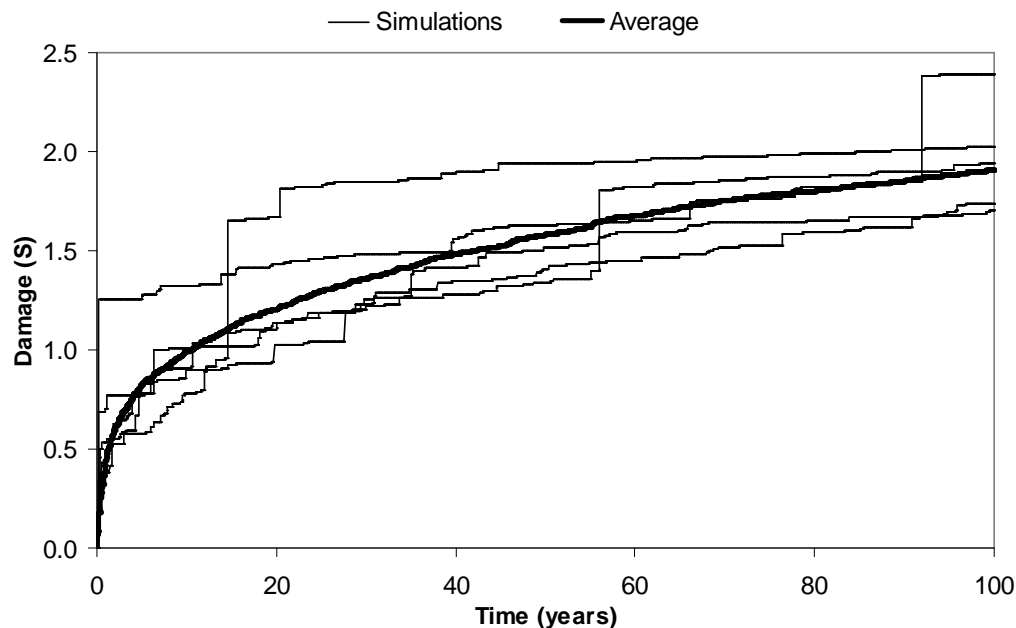


Figura 11 – Evolução do dano acumulado em cinco simulações com 100 anos de duração e média de 100 simulações

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 a obter em ensaios de longa duração com modelo físico reduzido da estrutura em estudo.

#### 4.4 Fotogrametria em modelos físicos reduzidos

Para aumentar a eficiência daqueles ensaios de longa duração com modelo físico reduzido, durante os quais vários levantamentos da envolvente do manto protector têm de ser realizados, desenvolveu-se no âmbito do projecto MEDIRES uma técnica baseada na reconstituição de cenas submersas a partir de pares de fotografias, Ferreira *et al.* (2005). Tal técnica evita o esvaziamento do tanque ou canal onde decorrem os referidos ensaios e não perturba a superfície a ser levantada. O equipamento necessário para a obtenção do par de imagens estéreo consiste apenas em duas máquinas fotográficas solidamente ligadas entre si por forma que a posição relativa das mesmas não se altere, Figura 12.

A calibração do equipamento é de importância capital em qualquer sistema baseado em visão estéreo. Por isso, cada vez que se modifica a configuração das máquinas fotográficas, em resultado de uma alteração consciente do factor de ampliação das câmaras, da sua distância focal ou da sua posição relativa, ou de uma alteração inconsciente, o sistema necessita de ser novamente calibrado. O procedimento de calibração define a métrica utilizada na medição de distâncias e ângulos, bem como a origem do sistema de coordenadas da cena reconstruída. Para essa calibração são necessários várias fotografias de um padrão plano, como se mostra na Figura 13.



Figura 12 – Equipamento necessário para a obtenção de pares de imagens estéreo

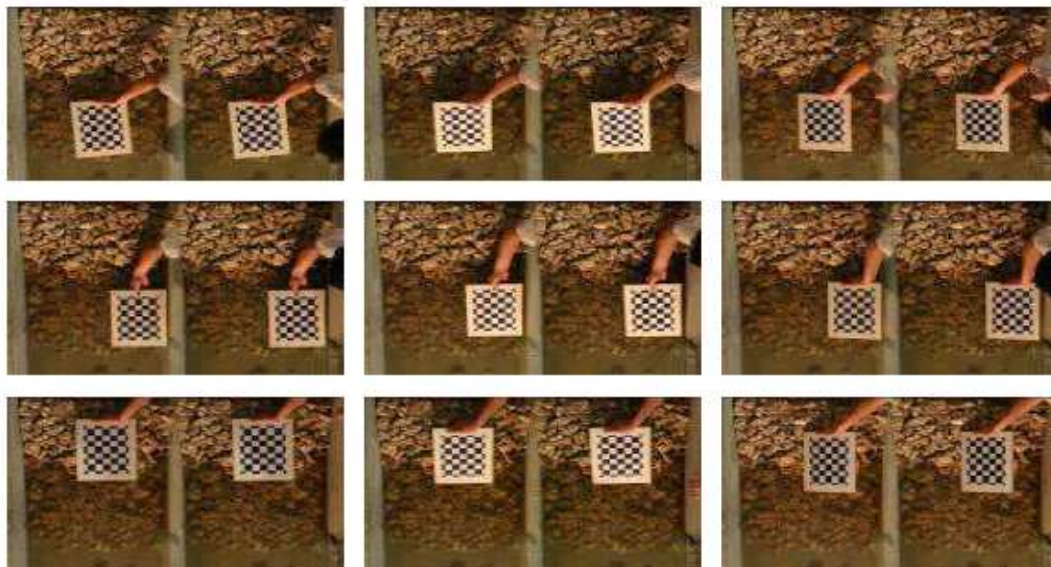


Figura 13 – Exemplo de conjunto de pares de imagens estéreo utilizados na calibração da configuração das máquinas fotográficas

Avaliou-se a qualidade dos levantamentos obtidos com o procedimento de reconstituição comparando perfis extraídos de levantamentos de um talude de enrocamento construído num canal de ensaio com os levantados desse mesmo talude realizados com um perfilador laser. Na Figura 14, onde se apresentam dois desses perfis, pode verificar-se a boa concordância entre os perfis. Contudo, porque é virtualmente impossível garantir que as duas linhas dizem respeito exactamente ao mesmo perfil da envolvente do talude, as diferenças entre as diferenças entre aquelas linhas não podem ser atribuídas inequivocamente a eventuais erros no procedimento de reconstituição da cena.

A Figura 15, com os perfis definidos pela intersecção do mesmo plano vertical com as superfícies ajustadas aos pontos resultantes da reconstrução de pares estéreo obtidos na ausência de água no canal e com uma altura de água de 35 cm em relação ao pé do talude, mostra que o procedimento para compensar a presença da interface ar-água dá resultados muito semelhantes aos dos procedimentos normais de reconstrução de cenas a partir de imagens obtidas sem qualquer interface.

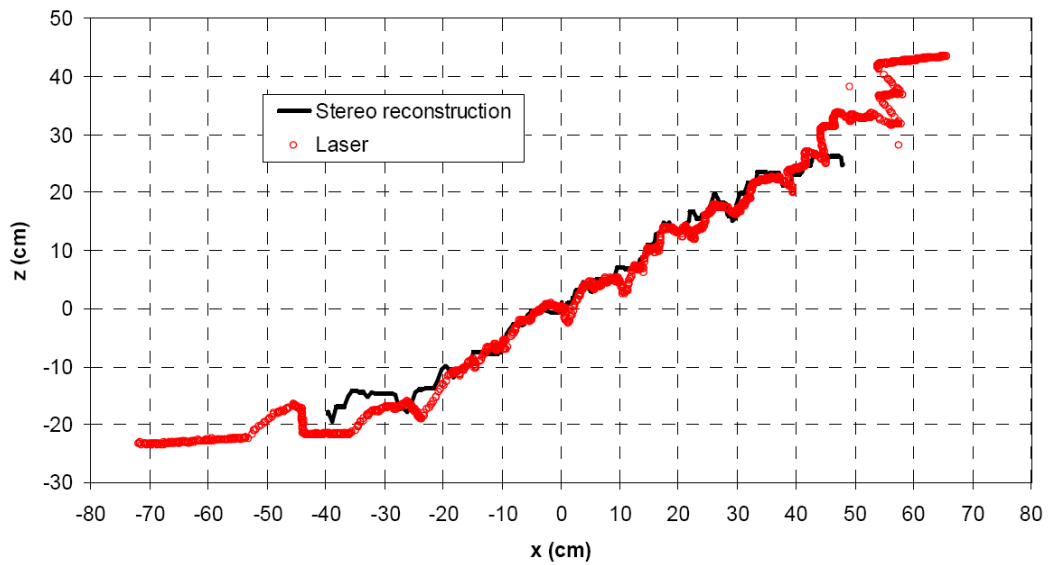


Figura 14 – Comparação entre perfil obtido com perfilador laser e perfil extraído de levantamento obtido de reconstituição estéreo de talude parcialmente submerso

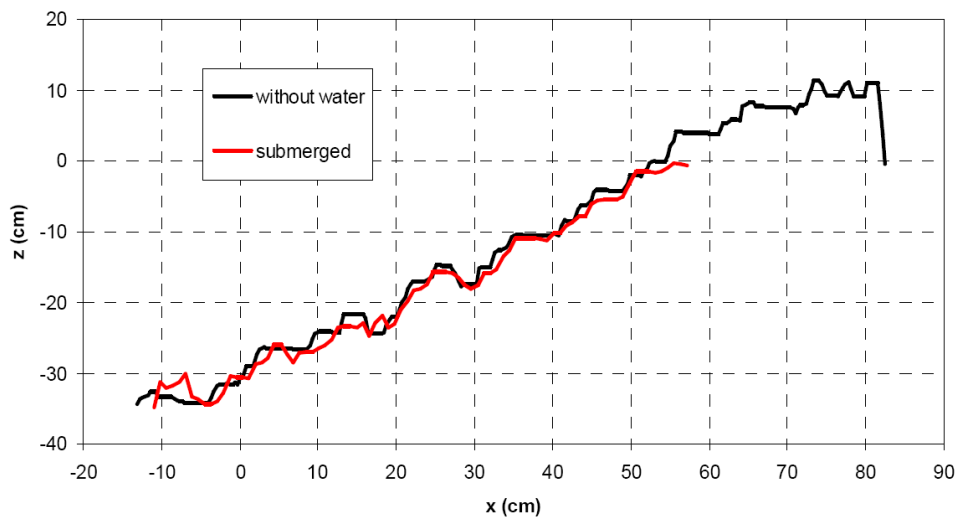


Figura 15 – Comparação entre perfis obtidos de reconstituições estéreo a partir de imagens obtidas com um talude emerso e com o mesmo talude parcialmente submerso

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no âmbito do projecto MEDIRES têm o potencial para modificar o panorama da inspecção de quebra-mares de taludes em Portugal.

Estão operacionais instrumentos para a inspecção robotizada de quebra-mares de taludes que produzem levantamentos com grande detalhe da envolvente deste tipo de estruturas, sendo a operação realizada com um instrumento de grande precisão instalado num veículo autónomo cujos sistemas de navegação e controlo garantem a repetibilidade e a segurança da manobra.



## 5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007

Com o desenvolvimento de procedimentos e as ferramentas informáticas criados para, com base nas medições da envolvente do manto obtidas com aqueles instrumentos, se estimar a possibilidade de os estragos na estrutura atingirem valores excessivos num dado intervalo de tempo:

- Base de dados para guardar e processar a informação recolhida naqueles levantamentos;
- Pacote numérico para cálculo da propagação da agitação marítima desde o largo até ao interior de bacias abrigadas;
- Metodologia para estimar a evolução do dano de quebra-mares de taludes;
- Sistema para fotogrametria em modelos físicos reduzidos,

estão reunidas as condições para a avaliação das necessidades de obras de manutenção ou reparação em quebra-mares de taludes (isto é para realizar o diagnóstico deste tipo de estruturas) partindo da evolução da envolvente do manto protector.

Embora alguns dos instrumentos desenvolvidos no âmbito do projecto já estejam em uso, nomeadamente:

- O pré-protótipo do instrumento para levantamentos de alta precisão, IRIS, tem sido avaliado em cenário real de operação pela empresa Blue Edge Sistemas de Engenharia Lda, mercê de protocolo firmado com o ISR/IST. Os levantamentos, efectuados com sucesso, estão inseridos no plano de monitorização do impacto das obras de construção dos molhes do Douro;
- o pacote SOPRO, na realização de estudos de propagação de ondas com modelo numérico solicitados ao LNEC

importa agora promover a utilização generalizada destes instrumentos para que a realização do projecto atinja um dos seus impactos esperados mais relevantes: a melhoria do processo de decisão relativo à manutenção / reparação de quebra-mares de taludes.

### 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 Inspeção Robotizada de Estruturas Semi-Submersas”.

### BIBLIOGRAFIA

- BOUIJ, N.R.; HOLTHUIJSEN, L.H.; RIS, R.C. (1996). – *The SWAN wave model for shallow water*, in ICCE '96, Orlando (USA), 21-27 de Julho de 1996, pp. 668-676.
- CARVALHO, M.M.; CAPITÃO, R.P. (1996) – *Valores Extremos da Agitação Marítima na Costa Oeste de Portugal*, In Revista Recursos Hídricos, Vol. 17, N.º 1, Março.
- FERREIRA, R.; COSTEIRA, J.P.; SANTOS, J.A. (2005) – *Stereo reconstruction of a submerged scene*, In Proceedings da 2nd Iberian Conference on Pattern Recognition, MARQUES, J.S.; PÉREZ DE LA BLANCA, N.; PINA, P., eds. Estoril: 7 a 9 de Junho. Springer, 102-109.
- LEMONS, R.; GONÇALVES, A.; SANTOS, J.A.; SILVA, L.G.; RAMALHO, J.P. (2005). – *Base de dados de inspeções de quebra-mares de taludes*, 7º SILUSBA, Évora, Junho.
- MELBY, J.A.; KOBAYASHI, N. (1999). – *Damage progression and variability on breakwater trunks*, Proceedings of Coastal Structures '99, ASCE, 309-315.



**5<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Lisboa, 11 e 12 de Outubro de 2007**

- 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.
- PINHEIRO, L.; FORTES, C.J.; SANTOS, J.A.; NEVES, M.G.; CAPITÃO, R. (2006) – *Caracterização de Regimes de Agitação Marítima utilizando a Ferramenta SOPRO*, in 8º Congresso da Água, Lisboa, Março.
- REIS, M.T.; SILVA, L.G. (1995) – *Observação Sistemática de Obras Marítimas. Base de Dados ANOSOM: Manual de Utilização*, (Versão provisória), LNEC, Lisboa, Dezembro.
- RIBEIRO, M.; GONÇALVES, A.; CAPITÃO, R.; FORTES, C.J. (2004). – *Base de dados de agitação marítima da costa portuguesa*, in 7º Congresso da Água, Lisboa, Março.
- SMITH, W.G.; KOBAYASHI, N.; KAKU, S. (1992) – *Profile Changes of Rock Slopes by Irregular Waves*, In Proceedings of 23rd Coastal Engineering Conference, Volume 2: 1559-1572.
- 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.