



4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

## NOVOS INSTRUMENTOS PARA A INSPECÇÃO E DIAGNÓSTICO DE QUEBRA-MARES DE TALUDES

João Santos<sup>1</sup>, Maria da Graça Neves<sup>1</sup>, Luís Gabriel Silva<sup>1</sup>  
Carlos Silvestre<sup>2</sup>, Paulo Oliveira<sup>2</sup>, António Pascoal<sup>2</sup>, Luís Sebastião<sup>2</sup>; João Alves<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente  
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa  
jasantos@lnec.pt, gneves@lnec.pt, lgsilva@lnec.pt

<sup>2</sup>DSOR-ISR, IST, Av. Rovisco Pais, 1, Torre Norte, Piso 8, 1049-001 Lisboa  
cjs@isr.ist.utl.pt, pjcro@isr.ist.utl.pt, antonio@isr.ist.utl.pt

### 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: a base de dados que guarda a informação recolhida naquele levantamento, o pacote numérico para cálculo da evolução da agitação marítima e a metodologia de estimação da evolução do dano de quebra-mares de taludes.

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de tomada de decisão relativo a 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. 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. 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 Inspeção Robotizada de Estruturas-semi-submersas” e 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 sistemáticas 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 são testadas no molhe oeste do porto de Sines e no molhe do porto de Avilés.

Esta comunicação tem como objectivo descrever 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.

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



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

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: a adaptação da base de dados já existente para guardar a informação recolhida naquele levantamento, o desenvolvimento do pacote numérico para cálculo da evolução da agitação marítima desde o largo até à costa ou ao interior de bacias abrigadas e a metodologia implementada para estimar da evolução do dano de quebra-mares de taludes. As conclusões da comunicação 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.

Com a implementação daquele programa de observação sistemática de obras marítimas, visavam-se, fundamentalmente, três objectivos principais:

- 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, permitindo, assim, aperfeiçoar critérios de concepção e especificar melhor as propriedades dos materiais a empregar, as técnicas de fabrico de alguns componentes e os processos construtivos a adoptar;
- Proporcionar uma selecção criteriosa e tecnicamente sustentada das estruturas mais necessitadas em termos 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.

Numa inspecção visual o observador desloca-se ao longo do coroamento do quebra-mar duas vezes. Na primeira passagem, o observador identifica os troços em que se dividiu a estrutura e que são inspeccionados na passagem seguinte, observando os detalhes da estrutura considerados merecedores de atenção especial na inspecção anterior. Na segunda passagem, que é muito mais demorada que a primeira, o observador preenche os impressos de inspecção e tira algumas fotografias de acordo com o esquema estabelecido.

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 de 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.



4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

ZONE: \_\_\_\_\_

DATE: \_\_\_\_\_

**ARMOUR LAYER**

<b>1. DISPLACED BLOCKS</b>		<b>2. BROKEN BLOCKS</b>		<b>3. SLOPE</b>	
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	
<b>4. CONCRETE DEGRADATION</b>			<b>5. FATIGUE</b>		
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		
<b>6. SETTLEMENT OF THE ARMOUR LAYER</b>				<b>7. FILTERS</b>	
<b>6.1. NEAR THE W. L.</b>		<b>6.2. AT THE TOP</b>			
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	
<b>8. OBSERVER'S GENERAL OPINION</b>					
LEVEL 0		LEVEL 1		LEVEL 2	
				LEVEL 3	
					LEVEL 4
					LEVEL 5

**CROWN WALL**

<b>9. BREAKING</b>		<b>10. SUPERFICIAL CONCRETE DAMAGE</b>		<b>11. CONSTRUCTION JOINTS</b>	
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	
<b>12. SETTLING</b>		<b>13. ROTATION</b>		<b>14. SLIDING</b>	
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	
<b>15. OBSERVER'S GENERAL OPINION</b>					
LEVEL 0		LEVEL 1		LEVEL 2	
				LEVEL 3	
					LEVEL 4
					LEVEL 5

**INNER ZONE**

<b>1. DISPLACED BLOCKS</b>		<b>2. BROKEN BLOCKS</b>		<b>3. SLOPE</b>	
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	
<b>4. CONCRETE DEGRADATION</b>			<b>5. FATIGUE</b>		
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		
<b>6. SETTLEMENT OF THE ARMOUR LAYER</b>				<b>7. FILTERS</b>	
<b>6.1. NEAR THE W. L.</b>		<b>6.2. AT THE TOP</b>			
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	
<b>8. OBSERVER'S GENERAL OPINION</b>					
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 inspeção visual



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

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 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, 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.

O IRIS conterà 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. Proceder, também, às correcções das medidas dos perfis obtidos, utilizando os dados de posição, movimento (acelerações linear e velocidades angulares) e atitude.

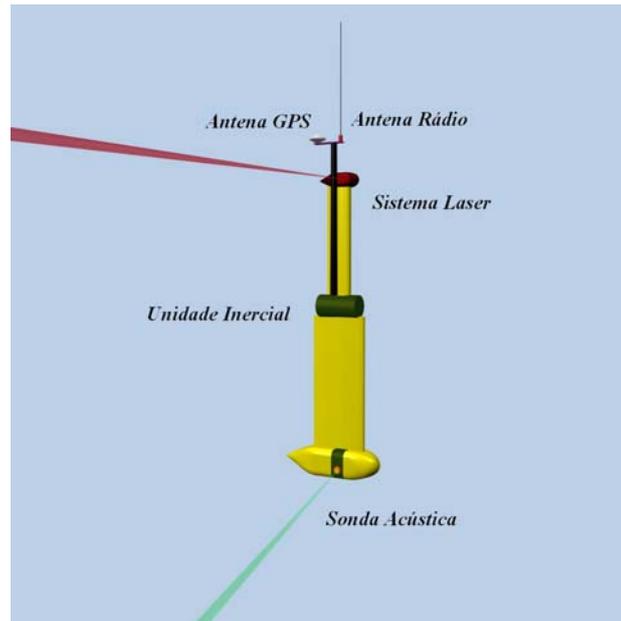


Figura 2 – Instrumento para fazer levantamentos de alta precisão

Previa-se, ainda, a inclusão de um Sensor de Rumo no instrumento mas os primeiros testes realizados com o pré-protótipo do IRIS mostraram que tal pode não ser viável para todos os quebra-mares de taludes, ver secção 3.3.

Neste instrumento pode incluir-se também uma sonda acústica do tipo sonar lateral para realizar levantamentos mais rápidos, embora de mais baixa precisão, os quais podem ser muito úteis para uma primeira identificação do local onde se vai realizar a inspecção de modo a parametrizar correctamente todo o sistema.

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 a garantem a repetibilidade da manobra e, conseqüentemente, 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 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 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 ao longo de um possível levantamento de um quebra-mar.

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 utilizará a linguagem CORAL+ (desenvolvida pelo ISR), e permitirá a cooperação entre os sistemas instalados no Catamarã e o Sistema de Coordenação do Levantamento instalado no instrumento.



Figura 3 – Catamarã a fazer um levantamento

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. Com efeito, 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 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 deste 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 mecânica, 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).



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.

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.

### 3.2.1 Arquitectura de sistemas do IRIS

A arquitectura dos sistemas que constituem o IRIS, é modular e foi concebida em torno da rede de tempo real CAN Bus em complementaridade com Ethernet. Estas duas redes, com especificações, capacidades e objectivos distintos são utilizadas para se obter uma solução versátil e fiável. A rede CAN bus (Robert Bosh GmbH, 1991) fornece um meio para sincronização e troca de mensagens (sejam elas de sistema, de estado ou de registo simplificado) em tempo real de grande fiabilidade, embora com taxa de transmissão limitada.

Esta rede, criada para ambientes de pequena escala, apresenta uma arquitectura “multi-master” com controlo de acesso ao nível físico do tipo CSMA/CR (carrier sense, multiple access / collision resolution, na literatura anglo-saxónica), que, juntamente com um vasto grupo de técnicas para sinalização e detecção de erros, tornaram o CAN bus uma solução muito atraente para construção de sistemas distribuídos. Um exemplo excelente da sua aceitação e robustez é o seu uso generalizado na indústria automóvel.

A rede Ethernet 100 Mbits/sec fornece a largura de banda adequada para lidar com sistemas com capacidade de produção de grande volume de dados, como acontece com o sondador acústico e o receptor de GPS. A existência deste tipo de interface universal também aumenta a facilidade de interface entre o protótipo e outros equipamentos standard.

A Figura 5 apresenta um diagrama com a arquitectura do equipamento do IRIS. Os quatro blocos principais representam igual número de contentores ou elementos físicos do instrumento de levantamento. O núcleo do sistema consiste em vários nós baseados em micro-controladores, cada um deles com uma tarefa específica no referido instrumento. Eles tratam da comunicação entre os diversos sistemas comerciais, tais como receptores de GPS, a Unidade de Referência de Movimento, e o sondador acústico de varrimento mecânico, e fornecem funcionalidades básicas de sistema, tais como sincronização e verificação de estado.

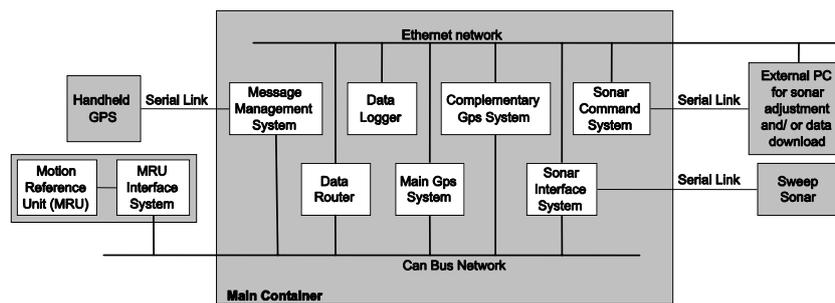


Figura 5 – Arquitectura do instrumento para levantamentos de grande precisão IRIS

O Sistema de Comando do Sonar fornece uma interface para a ligação, via computador pessoal, de um operador humano ao sondador acústico para verificação de dados em tempo real ou para ajuste dos parâmetros do mesmo sondador. O sistema de registo de dados recolhe a informação produzida pelos diversos equipamentos devidamente sincronizada e referenciada temporalmente.

Os dados recolhidos são armazenados num disco de estado sólido e podem ser acedidos e copiados para um computador pessoal através de um interface Ethernet simples. O sistema de interface CAN Bus/Ethernet trata da ligação entre as duas redes.

Neste caso particular, a sua função principal consiste na recepção das mensagens de registo geradas no CAN Bus e o seu envio para o Sistema de Registo dos Dados utilizando o protocolo UDP. Existe também um receptor GPS portátil capaz de receber dados que acumula as funções de diagnóstico do sistema e consola do utilizador com as de instrumento de navegação para o piloto da embarcação e no qual se podem definir trajectórias a seguir pela embarcação durante o levantamento.

### 3.2.2 Geo-referenciação dos dados dos levantamentos

No que se segue, **I** designa um referencial fixo na zona do levantamento e **S** é um referencial solidário com a embarcação que transporta o IRIS e com origem num ponto seleccionado desse mesmo instrumento. A notação seguinte é necessária para a exposição:

$\mathbf{p}_i = [x_i \quad y_i \quad z_i]^T, i = \{0,1,2\}$  – coordenadas, no referencial **I** de, respectivamente, o referencial **S** e do primeiro e segundo receptores de GPS colocados na embarcação que transporta o IRIS;

$\lambda(\phi, \theta, \psi)$  – vector das coordenadas angulares (ângulos XYZ de Euler, designados na literatura anglo-saxónica por roll, pitch, e yaw) que parametrizam localmente a orientação de **S** em relação a **I**;

${}^I \boldsymbol{\omega}_S$  – vector velocidade angular de **S**;

${}^I \mathbf{R}_S(\lambda)$  – matriz de rotação de **S** para **I**;

A Unidade de Medição Inercial (IMU, *Inertial Measurement Unit* na literatura anglo saxónica) fornece as coordenadas  $\lambda(\phi, \theta, \psi)$  bem como as componentes da velocidade angular do referencial **S** em relação a **I**, expressas no referencial fixo à embarcação **S**, i.e.  ${}^S ({}^I \boldsymbol{\omega}_S)$ . O sondador acústico, com um ângulo de varrimento instantâneo  $\varepsilon$ , fornece medições do quebra-mar, também expressas no referencial **S**.

Assumindo, sem perda de generalidade, que o sondador acústico está colocado na origem do referencial solidário com a embarcação **S**, apontando para baixo, e que o ângulo de



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

varrimento está contido no plano transversal (definido pelos eixos  $(\mathbf{y}_s, \mathbf{z}_s)$ ), as medições  $d(i)$ , resultantes do levantamento da parte submersa do quebra-mar, podem ser georeferenciadas no referencial de inércia  $\mathbf{I}$  considerando os valores instantâneos da posição e atitude da embarcação da seguinte forma

$$\mathbf{z}(i) = \mathbf{p}_0 + {}^I \mathbf{R}_s(\lambda) \mathbf{R}_x(\varepsilon) [0 \ 0 \ d(i)]^T \quad (1)$$

em que  $\mathbf{R}_x(\varepsilon)$  é a matriz de transformação do referencial solidário com o feixe do sondador acústico para o referencial fixo à embarcação  $\mathbf{S}$ .

Importa referir que o conjunto de sensores instalado na embarcação disponibiliza estimativas de todas as variáveis necessárias aos cálculos indicados em (1). Contudo, o ângulo de proa ( $\psi$ ) é estimado a partir de medições fornecidas por magnetómetros instalados no interior da IMU.

Estas medições são corrompidas pelas distorções não lineares do campo magnético provocadas pelo material do casco da embarcação (Denne 1979) bem como perturbações induzidas pela proximidade do próprio quebra-mar, quando este é construído com materiais ferro-magnéticos. No caso do molhe oeste do porto de Sines, identificaram-se, depois de alguns testes preliminares, erros da ordem de 5 graus na medição de  $\psi$ , o que impede a sua utilização num levantamento de grande precisão.

Em alternativa, considerou-se a utilização das medições dos dois receptores de GPS instalados a bordo, depois de calibração cuidadosa. Utilizou-se também uma técnica de pós-processamento “off-line” para combinar as correcções obtidas da estação de terra calibrada com as medições dos dois receptores de GPS instalados a bordo da embarcação que leva o IRIS.

Esta técnica permite a compensação de perturbações comuns, dando estimativas precisas das trajectórias de ambos os receptores de GPS instalados na embarcação. Partindo da geometria do problema, uma medida do ângulo de guinada pode ser obtida trivialmente a partir das relações

$$\psi_m = \tan^{-1}((y_1 - y_2)/(x_1 - x_2)) - \psi_{inst} \quad (2)$$

em que  $\psi_{inst}$  é uma constante que leva em conta a posição relativa dos receptores de GPS instalados a bordo. Importa referir que o método proposto não necessita de qualquer compensação devida à declinação magnética local.

O ângulo de proa que se obtém directamente a partir da diferença entre as medições de posição de dois receptores de GPS é corrompido por ruído de alta frequência. A fusão com os dados disponíveis de um giroscópio que mede a velocidade angular em torno do eixo vertical  $z$ , recorrendo a técnicas de regularização com filtros complementares de passo fixo, é essencial para obter estimativas exactas do ângulo de proa da plataforma.

### 3.2.3 Projecto de estimadores óptimos e filtros regularizadores

O estimador e o filtro regularizador foram projectados utilizando a abordagem estocástica clássica  $H_2$ , a qual dá origem, para sistemas lineares, a estimativas que minimizam a covariância do erro, Gelb (1975) e respectivas referências bibliográficas. Filtros de Kalman complementares surgem naturalmente no contexto de estimação de sinais, a partir de medições de sensores em regiões de frequência distintas, embora complementares, Brown e Hwang (1992), e serão utilizados para resolver o problema em causa.

Assuma-se que as medidas se encontram disponíveis, com um período de amostragem  $h$ , para o ângulo de proa (obtidas com a abordagem detalhada na sub-secção anterior) bem como para a velocidade angular em torno do eixo vertical. As ideias básicas da filtragem



4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária  
Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

complementar são muito intuitivas e podem ser apresentadas de forma simples a partir da versão discretizada da cinemática da atitude do corpo rígido, escrita em forma compacta como

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}(k+1) \mathbf{x}(k) + \mathbf{B} \mathbf{u}(k) + \zeta(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(k) + v(k) \end{aligned} \quad (3)$$

em que  $\mathbf{x}(k) = [\psi^T(k) b^T(k)]^T$  é o vector das variáveis de estado,  $\mathbf{u}(k) = [0 \ 0 \ 1] \mathbf{Q}^T \mathbf{R}_s(\lambda)^S ({}^I \boldsymbol{\omega}_s)$  representa a componente vertical da velocidade angular,  $b$  é um termo de polarização associado ao sensor das velocidades angulares, e  $\mathbf{Q}$  é uma matriz que relaciona as velocidades angulares no referencial fixo à embarcação com as derivadas dos ângulos de Euler. As matrizes

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = [h \ 0]^T \text{ e } \mathbf{C} = [1 \ 0]$$

relacionam as variáveis acima e  $k$  é uma forma compacta de escrever o instante  $t_k = hk$ . Os estados e as medições são corrompidas por ruídos brancos,  $\zeta$  e  $v$ , não correlacionados de média nula e co-variância  $\mathbf{Q}(k) = \mathbf{E}[\zeta(k)^T \zeta(k)]$  e,  $\mathbf{R}(k) = \mathbf{E}[v(k)^T v(k)]$  respectivamente, representando  $\mathbf{E}[\cdot]$  o operador valor esperado.

O estimador que tem a menor co-variância do erro esperado é o filtro de Kalman (Gelb 1975) que no caso do par  $(\mathbf{A}, \mathbf{C})$  ser observável e o par  $(\mathbf{A}, \mathbf{Q}^{1/2})$  ser controlável, existe, é estável e único. A estrutura desse filtro é composta por uma fase de predição baseada no modelo subjacente da equação (3) que se calcula como

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}^-(k) &= \mathbf{A} \hat{\mathbf{x}}^+(k) + \mathbf{B} \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{P}^-(k) &= \mathbf{A} \mathbf{P}^+(k) \mathbf{A}^T + \mathbf{Q}(k) \end{aligned} \quad (4)$$

em que  $\hat{\mathbf{x}}^-(k)$  e  $\mathbf{P}^-(k)$  são, respectivamente a predição do estado e a co-variância do erro de predição. Dada uma nova medição  $\mathbf{y}(k)$ , as estimativas são actualizadas da forma seguinte

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}}^+(k+1) &= \hat{\mathbf{x}}^-(k) + \mathbf{K}(k) [\mathbf{y}(k) - \mathbf{C} \hat{\mathbf{x}}^-(k)] \\ \mathbf{P}^+(k+1) &= \mathbf{P}^-(k) - \mathbf{A} \mathbf{P}^-(k) \mathbf{C}^T (\mathbf{C} \mathbf{P}^-(k) \mathbf{C}^T + \mathbf{R}(k))^{-1} \mathbf{C} \mathbf{P}^-(k) \mathbf{A}^T \end{aligned} \quad (5)$$

onde  $\hat{\mathbf{x}}^+(k)$  e  $\mathbf{P}^+(k)$  são, respectivamente, os valores actualizados do estado e da co-variância do erro e  $\mathbf{K}(k) = \mathbf{P}^-(k) \mathbf{C}^T (\mathbf{C} \mathbf{P}^-(k) \mathbf{C}^T + \mathbf{R}(k))^{-1}$  é o ganho do filtro de Kalman. De notar que o filtro se baseia em informação de ângulo de proa de baixa frequência, rejeitando dessa forma as perturbações de alta frequência presentes nas medições daquela grandeza, e combina-a com a informação fornecida pelo sensor de velocidade angular na região de frequência complementar, compensando também alguma polarização que possa existir. Além disso, importa referir que este filtro, representado na Figura 3, é causal e pode ser aplicado em tempo real durante a missão para produzir estimativas do ângulo de proa e da respectiva velocidade.

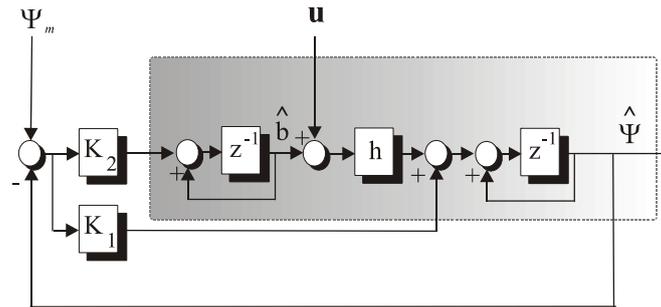


Figura 6 – Filtro de Kalman complementar

Por último, para completar o pós-processamento, um filtro não causal de passo fixo foi concebido para o sistema apresentado na equação (3) utilizando a co-variância da predição  $\mathbf{P}^-(k)$  e o valor actualizado da co-variância da estimação  $\mathbf{P}^+(k)$ , calculadas como indicado em (4) e (5), respectivamente. A solução clássica (Gelb 1975) fornece valores óptimos para as estimativas do estado *a posteriori*  $\hat{\mathbf{x}}(k)$  e para a co-variância do erro *a posteriori*  $\mathbf{P}(k)$  utilizando as expressões de recorrência regressivas

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(k) &= \mathbf{P}^-(k) \mathbf{A}^T \mathbf{P}^+(k)^{-1} \\ \hat{\mathbf{x}}(k) &= \hat{\mathbf{x}}^-(k) + \mathbf{G}(k) [\hat{\mathbf{x}}(k+1) - \hat{\mathbf{x}}^+(k+1)] \\ \mathbf{P}(k) &= \mathbf{P}^-(k) + \mathbf{G}(k) [\mathbf{P}(k+1) - \mathbf{P}^+(k)] \end{aligned} \quad (6)$$

em que  $\mathbf{G}(k)$  é o ganho do filtro regularizador. Este filtro não causal é utilizado no pós-processamento dos dados do levantamento com o objectivo de obter estimativas do ângulo de guinada com erro de estimativa *a posteriori* mínimo.

### 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 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 6 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 cerca de 4000, excepto 2001, altura em que foram levantados 6000 pontos.

Quer a Figura 6 a), quer a Figura 6 b) apresentam as isolinhas da superfície definida a partir do levantamento realizado pelo IH em 2000. Na Figura 6 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 em regiões muito

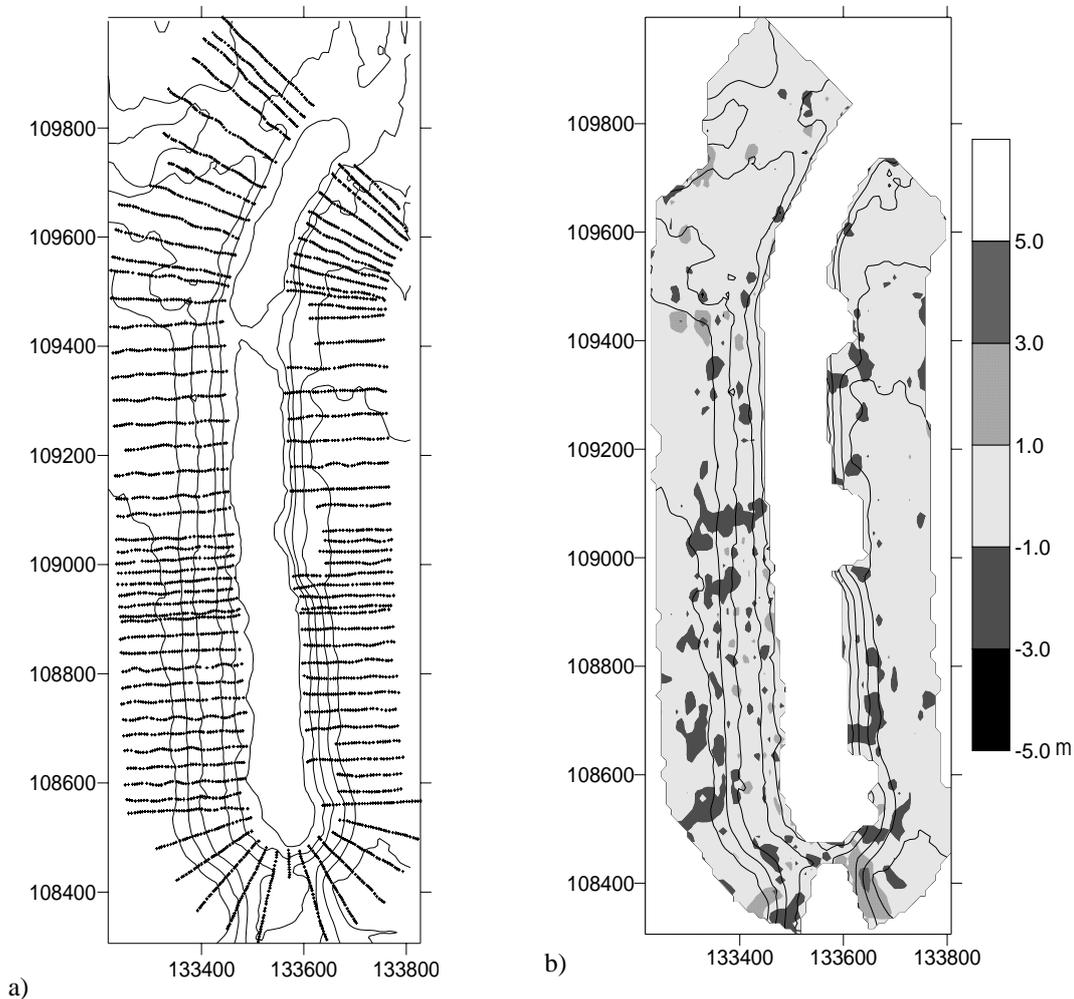


Figura 7 – a) Alinhamentos dos perfis levantados pelo IH em 2003; b) Diferenças entre os levantamentos do IH de 2003 e 2000.

limitadas aquela diferença está entre 1 e 3 m. Importa recordar que aquelas superfícies foram obtidas a partir de perfis que em alguns casos distam 50 m e que o diâmetro equivalente dos cubos Antifer é 3,27 m, pelo que os resultados obtidos para as regiões entre aqueles perfis devem ser interpretados com muita cautela.

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 haviam 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, adicionou-se hematite, um minério de ferro, aos agregados do betão com que aqueles cubos foram construídos. Essa a razão porque nas fotografias do molhe oeste do porto de Sines aparece sempre uma mancha escura na zona da cabeça daquela estrutura. Tal implica que as medições de rumo fornecidas pela 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.

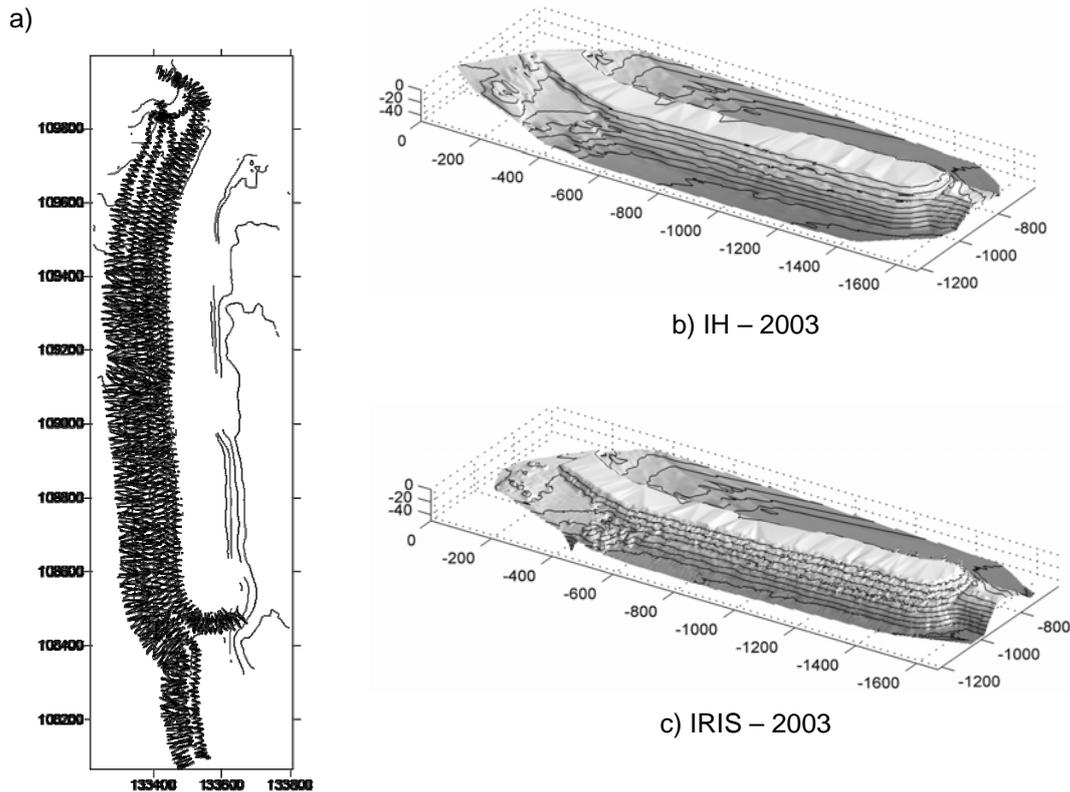


Figura 8 – a) Pontos levantados pelo IRIS em 2003; b) Perspectiva da superfície obtida com os pontos levantados pelo IH em 2003; c) Perspectiva da superfície obtida com os pontos levantados pelo IRIS em 2003.

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 noutra espécie de embarcação. Nesse caso, poderá perder-se a repetibilidade da manobra que é assegurada pelos sistemas de controlo do veículo e da missão do DELFIM.

Apesar daqueles contratemplos, a Figura 7 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 da estrutura foram levantados 63969 pontos). Este elevado número de pontos levantados 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 7 b) – e do levantamento do IRIS de 2003 – Figura 7 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 dos estragos na estrutura atingirem valores considerados excessivos, logo realizar o diagnóstico da estrutura.



## 4<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005

Para alcançar esse objectivo, já foram dados alguns 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 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

Uma vez que a informação dos levantamentos relevante para o diagnóstico de quebra-mares de taludes se pode resumir à evolução de perfis transversais da sua envolvente e que os dados dos referidos levantamentos são obtidos numa nuvem de pontos sobre essa envolvente, tornou-se necessário desenvolver vários procedimentos para facilitar a extracção de perfis daqueles levantamentos e para gerir esta informação na base de dados.

Como os resultados das inspecções visuais da parte emersa da estrutura continuarão a ter um papel relevante no diagnóstico, a base de dados tem de armazenar a informação recolhida, quer nas campanhas de inspecção visual, quer nos levantamentos com os instrumentos desenvolvidos no âmbito do MEDIRES, mas também deve tratar essa informação para depois se produzir o diagnóstico da estrutura.

Já existia no LNEC uma base de dados, chamada ANOSOM – Análise da Observação Sistemática de Obras Marítimas –, que satisfazia alguns dos requisitos mencionados acima, incluindo o diagnóstico descrito no ponto 2.2. Contudo, face ao novo tipo de informação que se pretendia adicionar e às funcionalidades a implementar, foi decidido desenvolver uma nova estrutura de base de dados, mantendo-se a designação ANOSOM para a nova aplicação, Lemos *et al.* (2005). Na Figura 8 apresenta-se o diagrama de entidades e relações para a nova base de dados ANOSOM.

O impresso de inspecção apresentado na Figura 1 continua a ser o suporte para a recolha desta informação obtida nas campanhas de observação visual. Além disso, o diagnóstico baseado apenas nos resultados daquelas campanhas continua a ser uma opção. Isso implica a manutenção do troço como a unidade fundamental da inspecção, embora nos levantamentos faça mais sentido, a priori, uma abordagem ao nível da estrutura completa.

Além da informação sobre as inspecções, armazena-se também informação acerca de cada um dos troços em que se divide a estrutura, nomeadamente no que diz respeito a dimensões e materiais utilizados, bem como a intervenções (obras de manutenção ou reparação) realizadas em cada troço. Aliás, estas intervenções são especialmente importantes para a determinação da data relevante a partir da qual se deve avaliar a evolução do elemento do perfil.

No que respeita aos levantamentos, é expectável que eles produzam uma nuvem de pontos distribuídos mais ou menos aleatoriamente sobre a envolvente da estrutura. Como não há qualquer utilidade, para já, no armazenamento na base de dados das coordenadas desses pontos, a base de dados contém apenas a referência ao ficheiro com aquelas coordenadas.

Para a comparação de perfis utiliza-se o Golden Software Surfer™ que 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.









