



## **CARACTERIZAÇÃO HIDROGRÁFICA DA PRAIA DE S. PEDRO PARA MODELAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM RECIFE ARTIFICIAL PARA A PRÁTICA DE SURF**

João Alves(\*), Luís Sebastião(\*), Pedro Bicudo(\*\*)

(\*Blue Edge – Engenharia de Sistemas Lda.

(\*\*)Departamento de Física, Instituto Superior Técnico

### **1. Resumo**

Os recifes para o surf são estruturas costeiras projectadas para alterar a rebentação das ondas de forma a melhorar as condições para a prática deste desporto, cujo crescimento tem potenciado durante as últimas décadas o desenvolvimento económico e social das regiões costeiras. Para além destes benefícios, a implantação de estruturas artificiais submersas contribui para a protecção da costa e para o desenvolvimento da respectiva flora e fauna. Em termos de engenharia costeira, os recifes para o surf são estruturas inovadoras, que criam desafios muito interessantes uma vez que se inserem na dinâmica da zona de rebentação das ondas.

A presente caracterização foi contratada pela Câmara Municipal de Cascais (CMC), no âmbito do protocolo CMC/IST/FCUL/LNEC, que inclui o estudo prévio de um recife para a prática de Surf em São Pedro do Estoril, liderado pelo Vice-Presidente da Câmara Municipal de Cascais, Dr. Carlos Candeias. Trata-se de um dos primeiros estudos europeus de um recife artificial para o surf.

Apresentam-se de forma detalhada os equipamentos e metodologias empregues no levantamento hidrográfico de pormenor e é destacada a importância crucial de ter soluções de engenharia adaptadas às condições de operação de forma a garantir a qualidade dos dados obtidos. O resultado final, sob a forma de modelo digital de terreno da zona em estudo, vai servir de base para a modelação numérica com os códigos REFDIF e FUNWAVE e para construção de um modelo físico à escala reduzida dos recifes.

### **2. Introdução**

O trabalho que se apresenta está englobado no estudo de viabilidade da implementação de dois recifes artificiais, um para a prática de surf na praia de São Pedro do Estoril. Existem à partida diversas ondas em São Pedro que podem ser melhoradas, ou mesmo criadas, com esta nova tecnologia dos recifes artificiais. As ondas já surfadas situam-se a nascente da Ponta do Sal, e os locais onde podem ser criadas novas ondas para o surf situam-se a poente da Ponta do Sal. Após diversas consultas e reuniões com a direcção do Surfing Clube de Portugal, e com os surfistas mais antigos e experientes de São Pedro, a coordenação do estudo de viabilidade optou pelo local onde se iria estudar a viabilidade do recife artificial para o surf. Por as ondas existentes em São Pedro e na Bafureira já terem boas condições para o surf, com características únicas na Costa de Cascais, optou-se por criar uma onda inteiramente nova, que irá partir a Oeste da Ribeira de Caparide, e correr até à Ponta do Sal. Por outro lado o

estudo da onda mais surfada em São Pedro, a onda do Bico, mesmo a nascente da Ponta do Sal, mantém o seu interesse, para a calibração dos modelos numéricos. Desta forma foi tomada a decisão de mapear [1,2,3,4] um rectângulo de 700m por 400m em redor da Ponta do Sal, desde a foz da Ribeira de Caparide até ao fim da Praia de São Pedro do Estoril.

O mapeamento batimétrico da região é crucial para a escolha do local exacto e para a definição da melhor geometria dos recifes. É sobre esse mapeamento tridimensional do terreno que são desenhados os recifes, utilizando para tal ferramentas de software CAD 3D. Esse modelo virtual do terreno já com os recifes é usado para simular a propagação das ondas utilizando ferramentas numéricas de simulação, permitindo avaliar a eficácia do desenho proposto. Este processo pode ser repetido de forma expedita fazendo alterações à forma do recife até encontrar o desenho mais promissor.

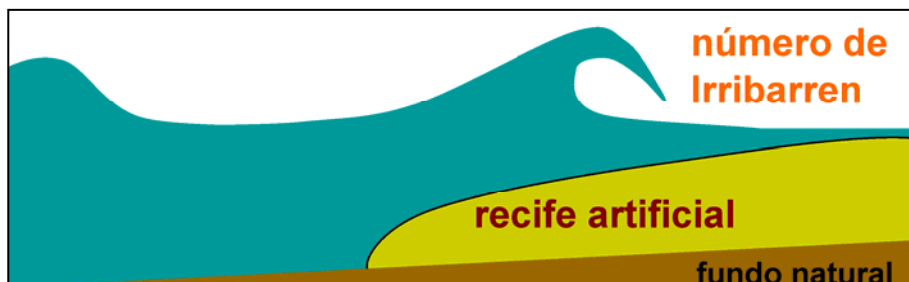


Figura 1: O perfil do recife define o tipo de rebentação, com o número de Irribarren.

Acresce que uma batimetria muito precisa é necessária para esta nova tecnologia dos recifes artificiais para o surf, em particular em fundos rochosos. Note-se que o fundo da região de São Pedro é essencialmente rochoso, com escarpas submersas que por vezes se elevam desde alguns metros de profundidade até perto da superfície

Estas pedras devem ser consideradas durante a execução do recife, e também para a segurança dos surfistas. Por outro lado o desenho do recife está a ser realizado com muita precisão, atendendo ao objectivo de se criar uma onda com qualidade internacional para surfistas experientes, com parâmetros ilustrados nas Figuras 1 e 2. Assim optou-se [1,2,3,4] por mapear a batimetria com um afastamento horizontal médio entre pontos de 1m, e com a precisão de 0,1m na vertical.



Figura 2: A velocidade da onda é determinada pelo “ângulo de peel” - o ângulo formado entre as frentes de onda e o recife, visto na projecção horizontal.



### **3. Descrição do sistema de medida**

Conceptualmente, um sistema de medida para aplicações marinhas capaz de dar resposta às necessidades de levantamentos em zonas costeiras deverá cumprir os seguintes requisitos:

- Baixo consumo, visto a energia ser fornecida por baterias instaladas a bordo;
- Elevada integração (evitar sistemas não orientados para funcionamento M2M (machine to machine): Reduzir a necessidade de monitorização humana permanente e implementar mecanismos de diagnóstico automático;
- Modularidade: Permitir incorporar diferentes sistemas de medida para diferentes configurações de trabalho;
- Adaptabilidade: Poder ser instalado em diferentes tipos de embarcação tendo em vista diferentes cenários de operação;
- Elevada capacidade operacional: Permitir a operação numa gama de profundidade alargada com elevado ritmo de aquisição de dados.

O sistema que se apresenta resulta da primeira versão do instrumento para levantamentos de alta precisão, IRIS, o qual tem vindo a ser desenvolvido ao abrigo do projecto “MEDIRES – Metodologias de Inspeção Robotizada de Estruturas Semi Submersas” que é financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional e por Fundos do Governo da República Portuguesa.

#### **3.1. Sistema Eléctrico**

A arquitectura dos sub-sistemas que constituem a ferramenta de medida, 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 [9] 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. 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 sonar 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 3 apresenta um diagrama com a arquitectura do equipamento de aquisição de dados.

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 microcontroladores, 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.

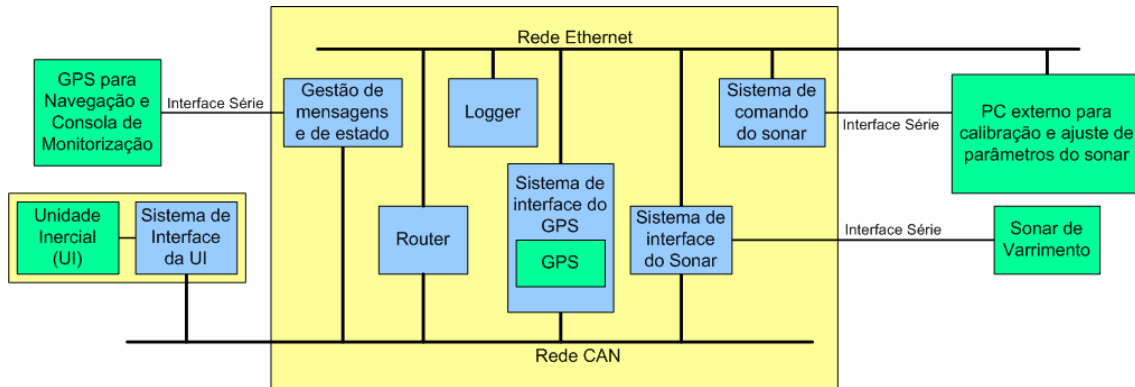


Figura 3: Diagrama de blocos do sistema de medida

O Sistema de Comando do sonar fornece uma interface para a ligação, via computador pessoal, de um operador humano para verificação de dados em tempo real ou para ajuste dos parâmetros do levantamento. 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.

### 3.1.1. Sistemas Comerciais

#### 3.1.1.1. GPS

Para a georeferenciação dos pontos sondados, foi usado um equipamento de GPS diferencial RTK ASHTECH DG16 (16 canais) que apresenta os seguintes valores de precisão para os diferentes modos de funcionamento:

- Precisão de posição em tempo real: modo autónomo 3.2 m (50%)
- Precisão de posição em tempo real: modo RTK, horizontal <10 cm (95%)
- Precisão de velocidade: 0.03 m/s (95%)
- Precisão de posição em pós processamento: 5 cm (95%)



Figura 4: GPS diferencial RTK ASHTECH DG16 (OEM)

### .3.1.1.2 Sonar

Para a medição da distância ao fundo, foi usado o sonar de varrimento mecânico Trittech Super Seaking DFP que apresenta como principais características:

- Frequências: 600KHz e 1.1MHz
- *Scan Rate*: até 700 disparos por minuto (depende da gama de trabalho)
- Abertura: 1 grau a 1.1MHz; 2 graus a 600KHz
- Resolução: <1mm
- Precisão: superior a 1% da gama de trabalho
- Possibilidade de varrimento ajustável de 0 a 360 graus



Figura 5: Sonar de varrimento mecânico Trittech Super Seaking DFP

O sonar de varrimento utilizado pela pode operar em duas frequências distintas (600 KHz and 1.1 Mhz) o que proporciona uma grande flexibilidade para uso em diferentes condições de profundidade, reflectividade do fundo, sedimentos em suspensão, etc. Apesar de ser um sonar de um único feixe, o seu sistema de varrimento mecânico permite a obtenção de dados com densidade espacial suficiente para realizar mapeamentos tridimensionais do fundo, comparáveis aos resultados obtidos com sistemas multi-feixe. Comparativamente a um sistema multi-feixe, as reduzidas dimensões do sistema permitem a sua utilização em embarcações de menor porte o que representa uma capacidade de intervenção acrescida em virtude de se poder instalar em embarcações de reduzida dimensão. Este facto é especialmente importante para intervenções em águas litorais e interiores. Sendo este um sonar de varrimento mecânico, permite que seja feito o levantamento de uma faixa do fundo cuja largura dependerá da profundidade do mesmo (a largura típica é igual ao dobro da profundidade), conforme se ilustra na Figura 6.

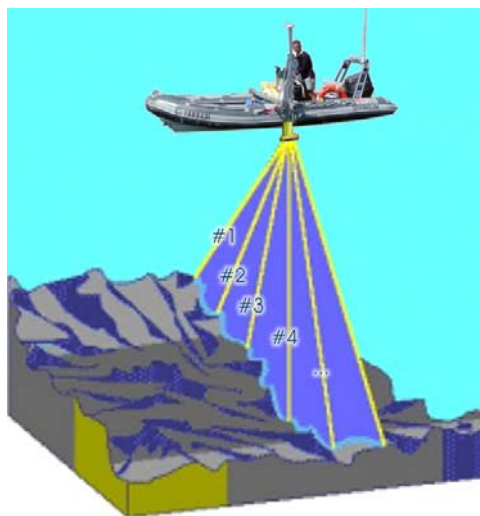


Figura 6: Operação do sonar de varrimento

### 3.1.1.3 Unidade Inercial

Para que seja possível representar com rigor os resultados dos ecos do sonar, é necessário que a sua posição e orientação no espaço seja conhecida com precisão. Ao garantir que este se encontra solidário com um sistema de GPS, o problema da posição encontra-se solucionado. Porém, diferenças na orientação do sonar (e.g. balanço da embarcação por efeito das ondas) implicam direcções de disparo diferentes e consequentes diferenças nas leituras. Torna-se imprescindível o uso de uma unidade inercial capaz de medir ângulos segundo os 3 eixos de rotação por forma a poder compensar os dados obtidos. Para este efeito, a Blue Edge utiliza uma unidade composta por 3 acelerómetros, 3 giroscópios e 1 magnetómetro triaxial que faz uso de técnicas de filtragem de Kalman, permitindo a obtenção de estimativas de posição e velocidade angulares para os 3 eixos de rotação com precisões que chegam aos 0.5<sup>o</sup> em regime estático.



Figura 7: Unidade inercial Seatex MRU6

### 3.2 Sistema mecânico

Para garantir a coerência das diferentes medidas entre si, é indispensável que todos os sensores se encontrem rigidamente acoplados. Tal facto é conseguido com uma estrutura modular, adaptável a diferentes tipos de embarcação que garante uma correcta instalação mecânica dos diferentes sensores. A estrutura em questão, que pode ser vista na Figura seguinte, é construída em alumínio, logo extremamente leve, não colocando qualquer tipo de instabilidade na embarcação. Pode ser instalada em embarcações com boca entre 1.6 m e 2.6 m e resolve à priori o problema de encontrar, para cada operação, os parâmetros físicos de instalação dos diferentes sensores. Das imagens pode facilmente distinguir-se um mastro, com a antena de GPS no topo, o sonar (protegido por uma carenagem em fibra de vidro) e a caixa estanque que alberga a unidade inercial.



Figura 8: Estrutura modular em diferentes cenários de operação



### 3.3 Geo-referenciação dos dados dos levantamentos

Por forma a georeferenciar cada ponto sondado, há que relacionar os valores medidos pelos diferentes sensores temporalmente e espacialmente. Relativamente à relação temporal, foram implementados no sistema eléctrico algoritmos de sincronismo que, fazendo uso da infra-estrutura de rede disponível, garantem que os relógios dos diferentes sub-sistemas não apresentam desvios superiores a 500  $\mu$ seg. A forma de relacionar espacialmente as diferentes medidas é apresentada em [11] e particulariza-se em seguida.

Considerando **I** um referencial fixo na zona do levantamento e **S** um referencial solidário com a embarcação que transporta o equipamento de medição, assumam-se a seguinte notação:

$\mathbf{p} = [x_i, y_i, z_i]^T$ , – coordenadas, no referencial **I** do referencial **S** onde se encontra a antena de GPS utilizada para a medição instantânea da posição.

$\lambda (\varphi, \theta, \psi)$  – 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 inercial fornece as coordenadas  $\lambda (\varphi, \theta, \psi)$  bem como as componentes da velocidade angular do referencial **S** em relação a **I**, expressas em **S**, i.e.  ${}^S(\boldsymbol{\omega}_S)$ . O sonar, com um ângulo de varrimento instantâneo  $\varepsilon$ , fornece medições de distância ao fundo, 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 varrimento está contido no plano transversal (definido pelos eixos  $(y_S, z_S)$ ), as medições  $d(i)$ , resultantes do levantamento, podem ser georeferenciadas no referencial de inércia **I** considerando os valores instantâneos da posição e orientação da embarcação da seguinte forma

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

em que  $\mathbf{R}_x (\varepsilon)$  é a matriz de transformação do referencial solidário com o feixe do sonar para o referencial fixo à embarcação **S**. Importa referir que o conjunto de sensores instalado na embarcação disponibiliza estimativas de todas as variáveis necessárias aos cálculos indicados, contudo essas variáveis não são medidas exactamente em simultâneo. Para solucionar esta questão recorre-se a técnicas de interpolação e decimação antes de aplicar a expressão acima indicada.

### 3.4 Pós processamento

O sistema aqui descrito inclui uma estação fixa de GPS própria, instalada no local para o efeito, garantindo uma grande precisão absoluta de posicionamento nas 3 dimensões. Nessa estação são gravados todos os dados e medições feitas relativamente aos satélites visíveis incluindo medições de fase da onda portadora. Posteriormente esses dados são combinados com os dados recolhidos a bordo de embarcação por meio de algoritmos sofisticados que permitem ir muito além da precisão normal do sistema GPS. O processamento normal de GPS diferencial permite eliminar grande parte dos erros e obter uma precisão que pode variar entre 1 e 3m (95%). O pós processamento com a informação de fase produz resultados muito melhores, pois, à semelhança dos algoritmos *Real Time Kinematics*, consegue resolver a ambiguidade relativa ao número de comprimentos de onda entre a antena receptora e o satélite. Desta forma, em condições boas e com uma estação fixa estacionada na proximidade do local do levantamento consegue-se uma precisão relativa a essa estação da ordem dos



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

5cm. Para garantir que a precisão absoluta (em relação ao sistema de coordenadas adoptado) é também elevada realizou-se o pós processamento da estação fixa relativamente a estações de referência existentes na zona. Além disto, relativamente ao datum vertical é possível aumentar ainda mais o rigor das medidas efectuadas por estacionamento de um GPS sobre pontos de altitude conhecida – por exemplo marcas de nivelamento ou pontos referenciados noutros levantamentos.

### 4 – Programação e Operação

Com o objectivo de preparar a operação no terreno foi efectuada uma visita preliminar à zona de levantamentos. Esta visita foi feita durante a baixa-mar e permitiu identificar potenciais perigos para a navegação e dessa forma definir à priori zonas de segurança para a operação. Conforme se pode constatar pela Figura 9, a zona apresenta formações rochosas que exigem um cauteloso planeamento dos trabalhos em função das horas de maré.



**Figura 9: Praia de S. Pedro em maré baixa**

Em termos de garantia da qualidade final dos dados, as principais condicionantes para este tipo de levantamento onde a embarcação chega tão perto quanto possível de terra ou de obstáculos rochosos, são a ondulação, o vento, a altura da maré e naturalmente a cobertura GPS. Uma vez que, de forma a obter uma cobertura espacial tão densa quanto possível, será desejável navegar a uma velocidade bastante baixa, a ondulação e o vento são obstáculos bastante difíceis para a tarefa de seguimento de rotas. A altura de maré condiciona a extensão da zona a cobrir e a cobertura GPS está directamente relacionada com as precisões atingíveis pelo sistema.

Com a informação recolhida na visita preliminar e com o objectivo de aproveitar o mais possível uma “janela” de operação aceitável, procedeu-se a uma segmentação do local dos levantamentos em sub-regiões. Com a divisão que se apresenta na Figura 10, foi possível planejar os trabalhos em função das marés e definir grelhas de cobertura mais apertadas para as zonas menos profundas (áreas A, B, C e F). Na Figura 11 é apresentado o planeamento das fiadas a realizar em cada operação. Para cada uma das regiões (A a F) foram definidos dois conjuntos de fiadas (representados com diferentes tons de azul) por forma a, por um lado, contornar possíveis erros de “tracking” de GPS uma vez que as fiadas se encontram bastante próximas e por outro flexibilizar a operação ao estabelecer sub-levantamentos mais curtos.



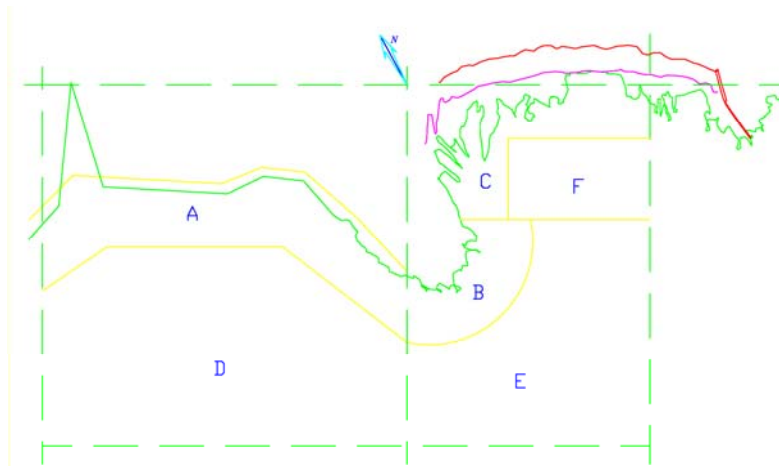


Figura 10: Segmentação da zona de levantamentos

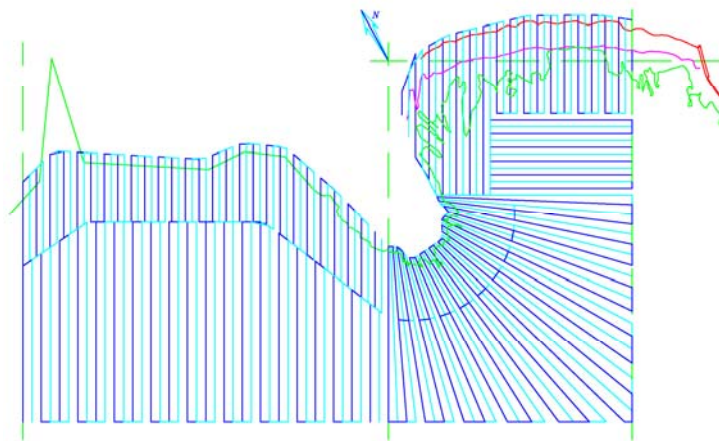


Figura 11: Planeamento das fiadas

Os levantamentos hidrográficos tiveram lugar entre os dias 22 e 24 de Março de 2007. Na Figura 12 encontra-se uma foto da embarcação usada nos levantamentos durante a manobra de rampa para colocação na água no primeiro dia de operação.



Figura 12: Embarcação utilizada nos levantamentos

Na Figura 13 apresenta-se a totalidade dos pontos levantados durante a campanha. Nesta figura sobressaem de forma bastante evidente os varrimentos efectuados pelo sonar ao longo das fiadas. Esse varrimento foi configurado para uma excursão de 90 graus centrado em torno da vertical.

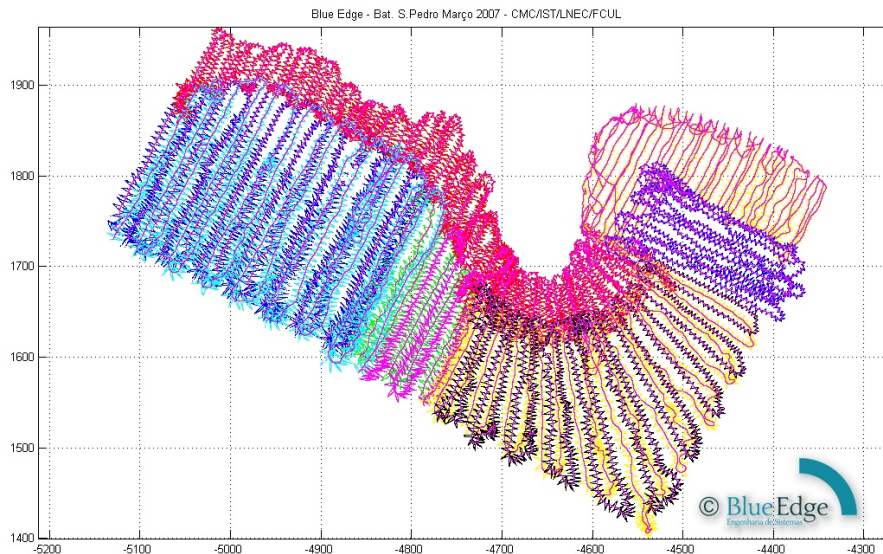


Figura 13: Pontos levantados

## 5 – Dados

Os dados correspondentes aos levantamentos em questão são entregues em anexo a este documento, em suporte digital, contendo, em separado as coordenadas de cada ponto do leito e da superfície. A par da informação geográfica, a referência temporal associada (precisão melhor que 1 milissegundo), permite saber a altura instantânea da maré em cada ponto do levantamento, caso seja necessário. Os dados oriundos do GPS foram pós-processados estimando-se que o erro máximo no plano vertical seja de 10 cm (50%) e no plano horizontal 50 cm (50%). As coordenadas de posição estão expressas no sistema Hayford-Gauss Datum 73 e os dados altimétricos estão referidos ao Zero Hidrográfico (valores aferidos com os dados de maré publicados pelo Instituto Hidrográfico). Nas figuras seguintes exibem-se algumas representações gráficas obtidas a partir dos dados recolhidos.

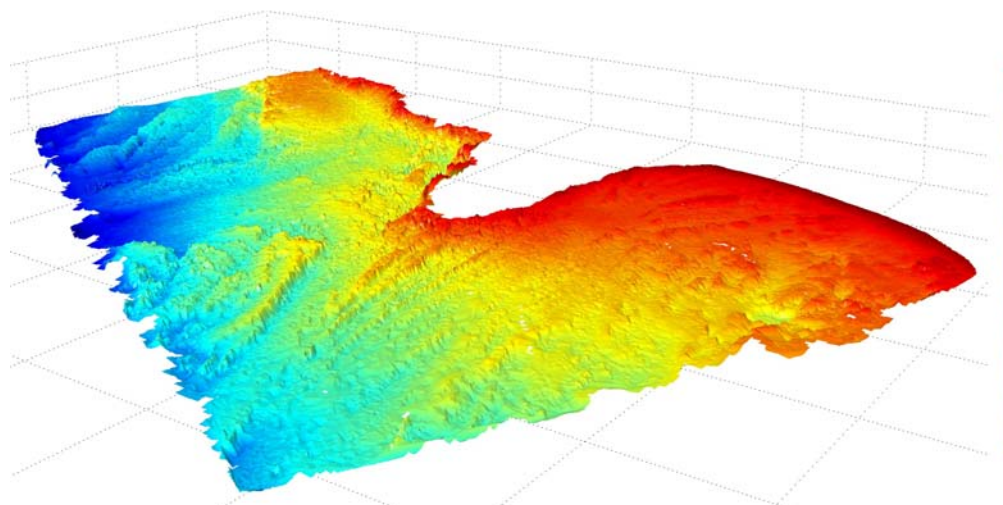


Figura 14: Representação dos dados em perspectiva

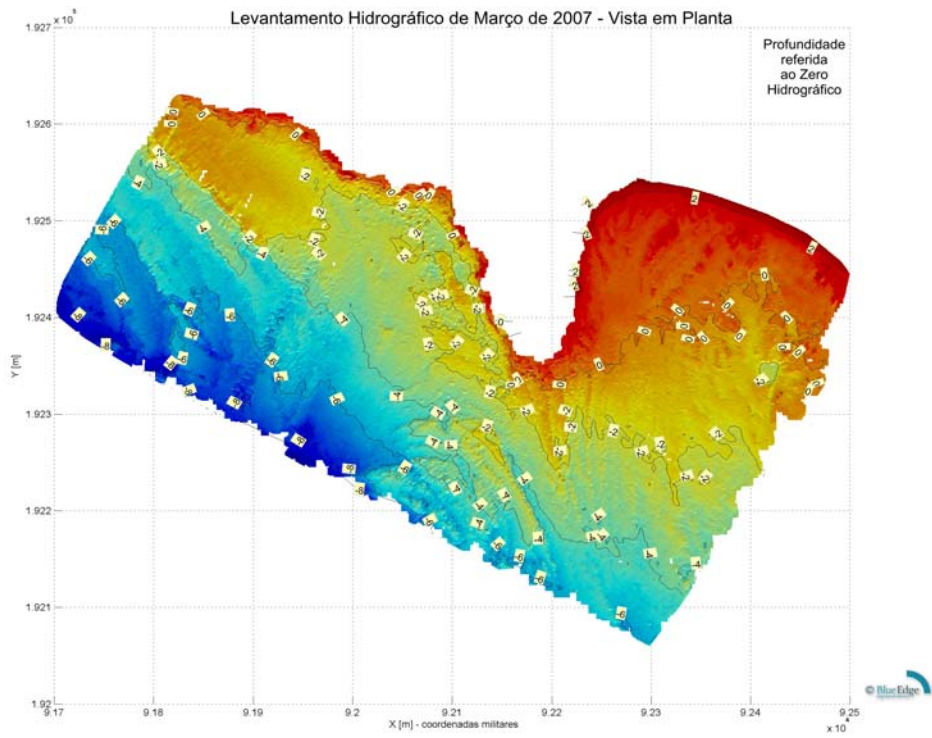


Figura 15: Representação 2D com curvas de nível

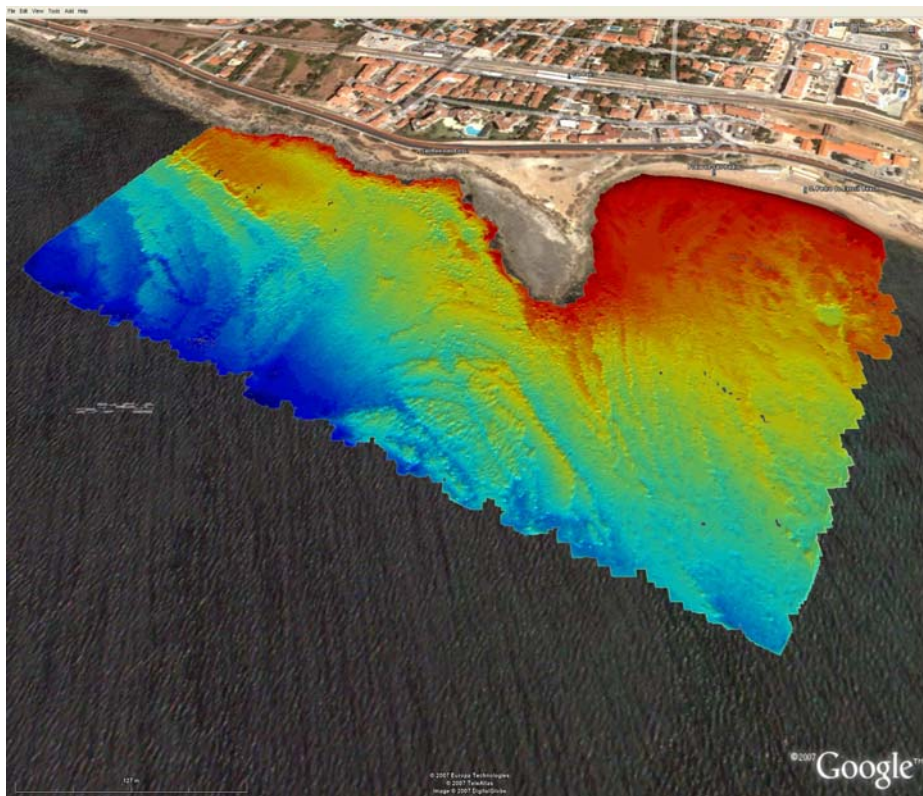


Figura 16: Sobreposição em Google Earth



## **6. Modelação**

Sobre esta caracterização batimétrica são aplicados diversos modelos, necessários para o estudo prévio e para o futuro projecto do recife para o surf de São Pedro. Inicialmente estuda-se o comportamento do recife por simulação de modelos numéricos e posteriormente será construído um modelo físico à escala.

A batimetria será igualmente crucial para o projecto de execução do recife – nomeadamente no cálculo de volumes a adicionar bem como para apoio durante a fase de construção.

O recife está a ser desenhado pela CMC, Instituto Superior Técnico (IST) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), recorrendo a ferramentas de CAD 3D.

Presentemente está a ser modelada numericamente a propagação da ondulação desde o largo até à costa com o modelo numérico REFDIF e com a aplicação SOPRO desenvolvida no LNEC [5,6,7,8]. A rebentação da ondulação sobre o recife, incluindo a sua direcção (“peel angle”) e a sua forma (número de Irribarren) está a ser modelada numericamente com os modelos REFDIF e FUNWAVE, pelo LNEC e pelo IST, e com a aplicação MOREIAS desenvolvida no LNEC [5,6,7,8]. O desenho do recife está a ser sobreposto na presente batimetria pelo LNEC. Estes estudos numéricos servem ainda de preparação para o modelo físico à escala reduzida, que está a ser construído no LNEC. Este modelo servirá para analisar o pormenor da rebentação das ondas, de forma a estudar a viabilidade de criar uma onda de qualidade mundial em São Pedro do Estoril.

Os resultados preliminares permitiram verificar que no local escolhido para a nova onda a criar com a construção de um recife artificial para o surf, já existe um recife natural que tem um grande potencial de desenvolvimento para a criação de uma onda nova de qualidade mundial. O recife existente não produz ainda ondas de qualidade, por ser demasiado irregular, mas pode servir de base de sustentação para a construção de um excelente recife para o surf.

Nota-se ainda que no lado nascente da Ponta do Sal, o recife é irregular, o que explica porque a onda de São Pedro inicia-se com uma secção tubular, “plunging” e depois se torna uma onda mais cheia, “plunging” passando em seguida outras secções com características distintas até chegar ao limite nascente da praia de São Pedro.

## **7 Conclusões**

A batimetria desta onda do Bico é a primeira batimetria de uma onda para o surf, realizada em Portugal, com a precisão ideal para os próprios surfistas entenderem melhor a onda que costumam surfar. Assim, para além do grande valor para as entidades responsáveis pelo desenvolvimento do litoral e para a comunidade científica, esta caracterização hidrográfica interessa também directamente a toda a comunidade surfista.

A aplicação de tecnologias de ponta ao nível de aquisição e processamento de dados foi o elemento chave que possibilitou à Blue Edge a concretização de mais um levantamento de alta resolução. A miniaturização dos equipamentos e a especialização em robótica marinha de elevada precisão permitiu a realização em condições de operação particularmente difíceis, muito próximas de costa, e muito condicionadas pelas marés devido à profundidade reduzida.

Os algoritmos de filtragem avançada são instrumentais na fusão dos dados de todos os sensores e as técnicas de representação tridimensional permitem passar uma imagem clara da realidade que só desta forma se torna visível.

O sistema descrito apresenta como principais vantagens a flexibilidade de utilização, operacionalidade, e custo. A relação custo/benefício deste tipo de levantamentos é bastante apelativa pois permite obter reconstruções 3D a uma fracção do preço de soluções multi-feixe e em cenários onde nem sempre é possível aplicar essa tecnologia.

