

## **Análise da evolução das ondas na praia da Cornélia, recorrendo a medições *in situ* e a modelação numérica.**

Mariana Rocha

Oceanógrafa Física, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [mmrocha@lnec.pt](mailto:mmrocha@lnec.pt)

Theo Moura

Físico, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [tmoura@lnec.pt](mailto:tmoura@lnec.pt)

Conceição Fortes

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [jortes@lnec.pt](mailto:jortes@lnec.pt)

Rui Capitão

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [rcapitao@lnec.pt](mailto:rcapitao@lnec.pt)

Óscar Ferreira

Professor, CIMA, Universidade do Algarve, Edifício 7, Campus de Gambelas, 8005-139, Faro, [oferreir@ualg.pt](mailto:oferreir@ualg.pt)

### **RESUMO**

Nesta comunicação faz-se uma análise comparativa entre as medições efectuadas na Praia da Cornélia, na Costa da Caparica, durante os dias 11 a 15 de Maio de 2010, e os resultados numéricos da aplicação do modelo não linear COULWAVE para as condições de agitação verificadas. Tem, portanto, como objectivo principal, a avaliação do desempenho do modelo na simulação da hidrodinâmica da rebentação em condições reais.

O modelo numérico COULWAVE (LYNETT e LIU, 2002), baseado nas equações do tipo Boussinesq, deduzidas a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e movimento utilizando o conceito de camadas múltiplas (*multi-layer*), simula a propagação de ondas fortemente não-lineares e dispersivas, em zonas de profundidade variável. As condições de fronteira foram geradas com base em séries temporais de elevação medidas a uma profundidade aproximada de 9.4 m (abaixo do nível médio do mar).

Os resultados numéricos são comparados com séries de elevação medidas por sensores de pressão posicionados próximo da linha de costa. São apresentadas análises no domínio do tempo e estatísticas de conjunto, que têm como objectivo validar as simulações. Esta abordagem permite avaliar o desempenho do modelo para simular as condições específicas do local, mas também permite, de uma maneira geral, contribuir para uma maior confiança na sua utilização em escalas temporais e espaciais maiores, necessárias numa perspectiva de gestão operacional.

**Palavras-chave:** Praia da Cornélia, Campanha de Campo, Modelação Numérica, COULWAVE.

## 1. INTRODUÇÃO

A zona costeira é uma região de dinâmica complexa, fruto da interacção de diversos agentes, entre os quais o vento, as correntes de maré e as ondas gravíticas. As ondas geradas pelo vento são consideradas o agente forçador dominante em regiões costeiras de águas pouco profundas e as principais responsáveis pelo transporte de sedimentos na zona de rebentação. Com o objectivo de melhor compreender este fenómeno, está em curso o projecto BRISA (Interacção entre a rebentação das ondas e o transporte de areias), o qual inclui a realização de ensaios experimentais, modelação numérica e a realização de campanhas de recolha de dados de campo. Este projecto é financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia e tem como propósito a análise da rebentação de ondas e sua influência no transporte de sedimentos. O projecto está a ser desenvolvido pelo LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil, em conjunto com diversas entidades de pesquisas de Portugal, nomeadamente a Universidade do Algarve (UALG) e a Universidade de Aveiro (UA).

Tendo como intuito a compreensão da hidrodinâmica da praia da Cornélia, Costa da Caparica (Fig. 1), neste trabalho analisam-se duas componentes desse projecto: as medições efectuadas na praia e os resultados correspondentes obtidos por modelação numérica.

As medições foram efectuadas nos dias 11 a 15 de Maio de 2010, com diversos instrumentos posicionados ao longo de um perfil de praia. Foram também adquiridos dados de agitação em águas mais profundas. O objectivo foi a obtenção de dados hidro e morfodinâmicos *in situ* com vista ao conhecimento da dinâmica da rebentação e do transporte de sedimentos na praia.

Quanto à modelação numérica, utilizou-se o modelo COULWAVE (LYNETT e LIU, 2002), que simula a propagação de ondas fortemente não-lineares e dispersivas, em zonas de profundidade variável. Este modelo baseia-se nas equações do tipo Boussinesq, deduzidas a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e movimento, utilizando o conceito de camadas múltiplas (*multi-layer*). Realizou-se, então, um conjunto de simulações numéricas com o modelo COULWAVE para a zona da Praia da Cornélia, para os dias da campanha. As condições de fronteira foram geradas a partir de séries temporais de elevação medidas com o instrumento posicionado na profundidade aproximada de 9.4 m (NMM). Os resultados numéricos são comparados com séries de elevação medidas pelos sensores de pressão posicionados ao longo do perfil de praia e posteriormente são apresentadas análises no domínio do tempo e estatísticas de conjunto, que têm como objectivo validar as simulações.

Esta comunicação começa por descrever sucintamente a campanha de campo e a análise efectuada aos dados obtidos pelos sensores de pressão, passando depois para uma descrição breve do modelo COULWAVE e terminando com a sua aplicação às condições da campanha e a avaliação do seu desempenho.

## 2. DESCRIÇÃO GERAL DA CAMPANHA

### 2.1 Introdução

A campanha realizou-se entre os dias 11 e 15 de Maio de 2010 nas imediações da Praia da Cornélia (sul da Praia da Saúde, Fig. 1), Costa da Caparica, Portugal, e teve como objectivos a aquisição de dados hidrodinâmicos e morfológicos para posteriores testes e validações de modelos numéricos, assim como a melhoria do conhecimento da dinâmica da rebentação e a sua influência no transporte de sedimentos e na morfodinâmica da praia em estudo. Para além das instituições participantes do projecto, também elementos da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL) fizeram parte desta campanha.



Fig. 1 – Local da segunda campanha de campo do Projecto BRISA.

## 2.2 Equipamentos instalados

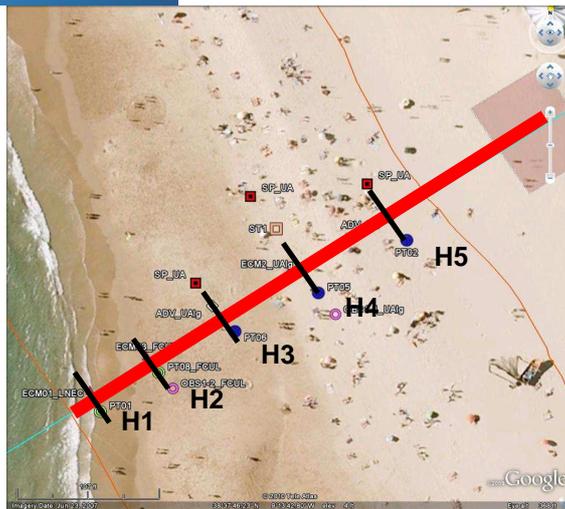
Esta campanha de campo, descrita em BEZERRA *et al.* (2010), envolveu o uso de transdutores de pressão (PT), correntómetros eletromagnéticos (ECM), correntómetros acústicos (ADV), sensores para medição de turbidez e de sólidos em suspensão (OBS) e instrumentos de posicionamento geográfico (DGPS), entre outros.

Os referidos equipamentos foram colocados ao longo de um perfil de praia (Fig. 2a), onde se montaram 5 estruturas em H (Fig. 2b), identificadas de 1 a 5, do largo para terra. A cerca de 9.4 m (NMM) de profundidade, foi colocada uma poita com um transdutor de pressão (PT06\_UAlg\_Offsh) aproximadamente em frente [X (Eastings): 9°14,073', Y (Northings): 38°37,417'] ao perfil dos equipamentos colocados na face de praia (Tabela 1).

**Tabela 1 - Identificação dos equipamentos.**

Estrutura	Equipamento			
	ECM	PT	ADV	OBS
+9.4 (NMM)		PT06_UAlg_Offsh		
H1	ECM_LNEC	PT01_LNEC		
H2		PT06_UAlg	ADV_UAlg	
H3	ECM_UAlg	PT05_UAlg		OBS_UAlg
H4	ECM_FCUL	PT_FCUL		OBS_FCUL
H5		PT02_LNEC	ADV_UA	

Na Fig. 2 e na Fig. 3 mostra-se a localização do perfil de praia onde foram posicionados os equipamentos e alguns aspectos da colocação desses equipamentos no terreno, em especial os analisados neste trabalho.



a)

b)

Fig. 2 - a) Localização do perfil da praia onde foram posicionados os equipamentos (Google Earth) e b) Fotografia do perfil com os equipamentos e esquema com localização das estruturas em H usadas na campanha (montagem da autoria da Universidade do Algarve).

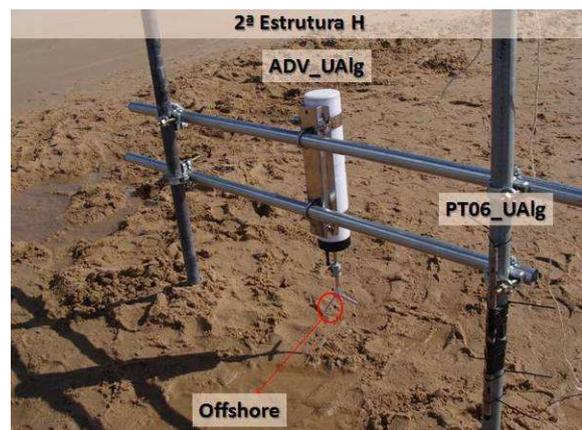
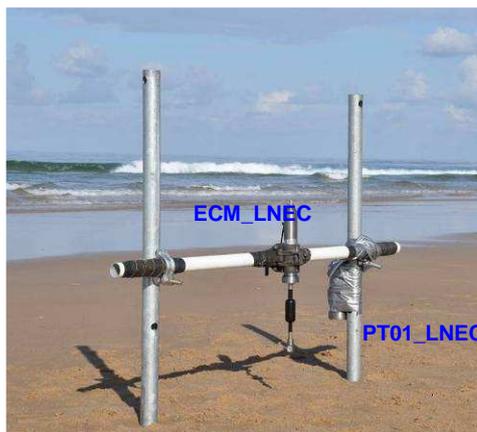


Fig. 3: a) 1ª estrutura, correntómetro (ECM\_LNEC) e o sensor de pressão Infinity\_WH (PT01\_LNEC) e b) 2ª estrutura, um correntómetro acústico (ADV\_UA1g), um sensor de pressão LevelTroll500 (PT06\_UA1g)

Todos os equipamentos foram colocados em baixa-mar, geo-referenciados através de um sistema RTK-DGPS e sincronizados com o Observatório Astronómico de Lisboa.

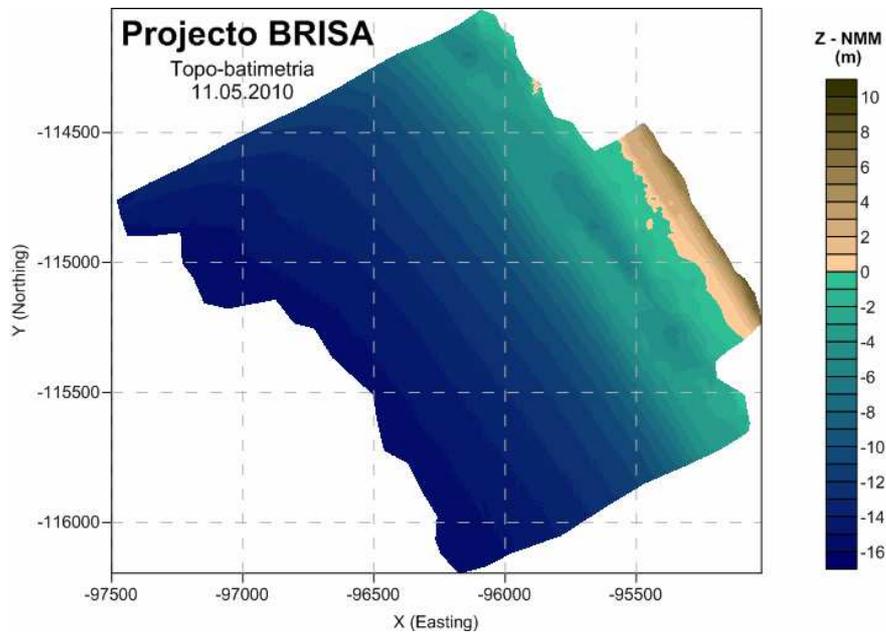
### 2.3 Medições *in situ*

Os dados obtidos consistem em medições simultâneas de pressão, velocidades de corrente e concentração de sedimentos em transporte na coluna de água, para os diferentes pontos ao longo do perfil de praia já referido, localizado na zona de rebentação. Além disso, foram também registadas as variações de pressão num transdutor colocado ao largo.

Foi efectuada a recolha de sedimentos em todos os locais com equipamento, ao longo do perfil. Com efeito, foram recolhidas com uma armadilha de sedimentos colocada perto do local da

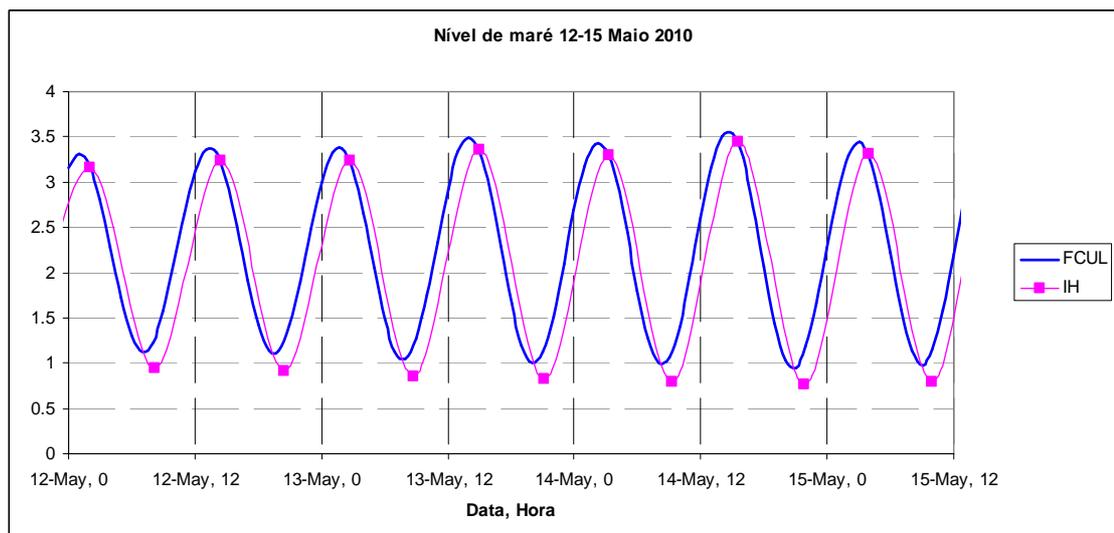
estrutura H3, durante as enchentes diurnas, amostras de sedimento em transporte na coluna de água.

Finalmente, realizou-se um levantamento topo-batimétrico (Fig. 4) da zona costeira adjacente à área em estudo no dia 11 de Maio de 2010, durante a preia-mar diurna. Este levantamento foi efectuado ao longo de 19 secções perpendiculares à linha de costa, com espaçamento de 100 m entre si.



**Fig. 4 - Modelo digital de terreno obtido a partir do levantamento topo-batimétrico realizado no dia 11-05-2010, BEZERRA *et al.* (2010).**

Na Fig. 5 apresentam-se duas estimativas do nível da maré (referidas ao Zero Hidrográfico - ZH) para o local e datas da campanha, obtidos pelo Instituto Hidrográfico e pela FCUL.



**Fig. 5 - Nível de maré entre 12 e 15 de Maio de 2010.**

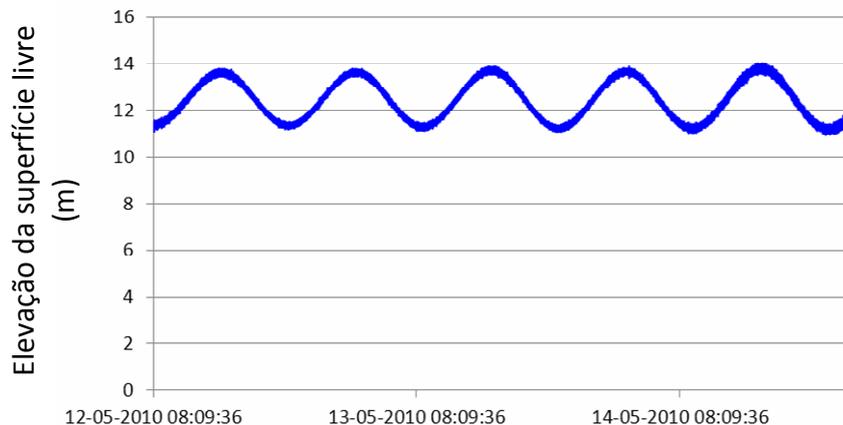
## 2.4 Registo de dados durante a campanha

No presente trabalho, foram apenas considerados os dados relativos às séries temporais de elevação da superfície livre obtidas pelos transdutores de pressão em águas mais profundas e nas estruturas H1 e H5. Estes transdutores, anteriormente designados por PT06\_UAlg\_Offsh, PT01\_LNEC e PT02\_LNEC (ver Tabela 1), serão, para simplificar a leitura, de agora em diante designados por PT06, PT01 e PT02, respectivamente. As suas características são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2 – Identificação, posição e frequência de aquisição dos instrumentos PT06, PT01 e PT02.**

Estrutura	Identificação	Modelo	X (Easting)	Y (Northing)	Z (NMM)	Frequência de aquisição (Hz)
-	PT06	Infinity_WH	-95847.090	-115311.000	-9.4	5
H1	PT01	Infinity_WH	-95357.825	-114985.584	-0.294	1
H5	PT02	LevelTroll500	-95279.189	-114931.251	1.231	2

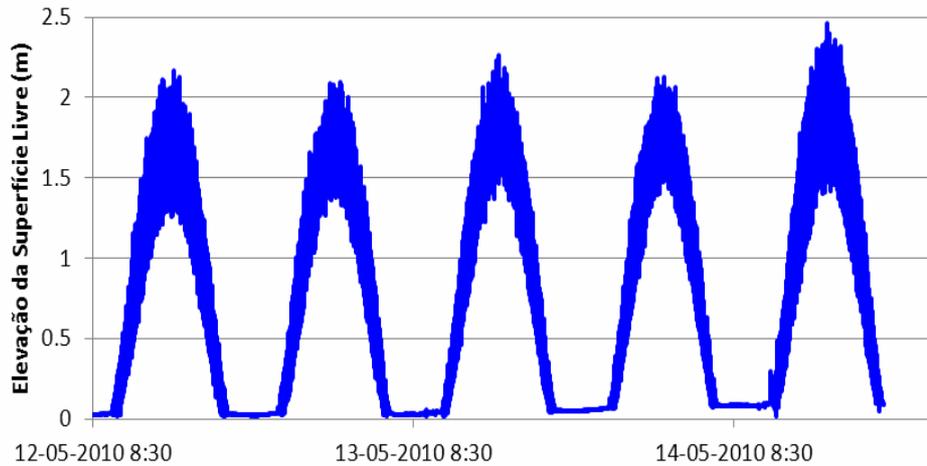
A Fig. 6 representa a variação da elevação da superfície livre no local (em águas mais profundas) onde esteve estacionado o transdutor PT06, desde o momento em que foi assente no fundo, às 08:14:23 do dia 12 de Maio, até ao instante em que foi retirado, às 07:40:00 do dia 15 de Maio.



**Fig. 6 - Elevação da superfície livre obtida pelo transdutor de pressão PT06, das 08:14:23 de 12-05 às 23:59:59 de 14-05 (os valores do eixo x começam ligeiramente antes dos do gráfico).**

Por seu lado, a Fig. 7 mostra a variação da elevação da superfície livre obtida com o transdutor PT01, entre as 08:30 do dia 12-05 e as 10:26 do dia 14-05 e as 10:45 e as 19:43 deste último dia.

Nos dias 12 e 13 de Maio, a aquisição com PT01 foi efectuada de forma contínua, dia e noite. Devido a uma avaria do equipamento, possivelmente associada a problemas de software, a frequência de aquisição efectivamente obtida foi de 1 Hz entre as 08:30 do dia 12 e as 10:26 do dia 14 e não a desejada (e programada) de 10 Hz, usualmente utilizada neste tipo de instrumentos, que apenas foi conseguida entre as 10:45 e as 19:43 do dia 14. Apesar disso, os dados puderam ser aproveitados para o projecto.



**Fig. 7 - Representação gráfica dos dois conjuntos de dados da elevação da superfície livre obtidos pelo sensor de pressão Infinity\_WH, no ponto PT01, das 08:30 de 12-05 às 10:26 de 14-05 e das 10:45 de 14-05 às 19:43 de 14-05.**

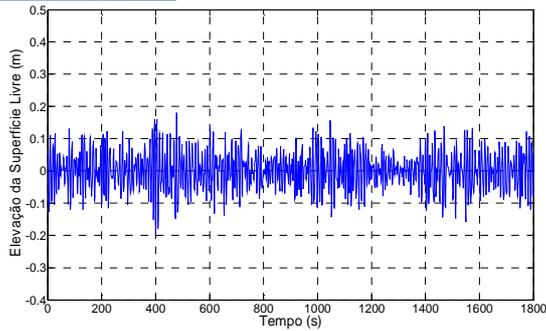
## 2.5 Tratamento de dados

### 2.5.1 Caracterização dos registos e do respectivo espectro

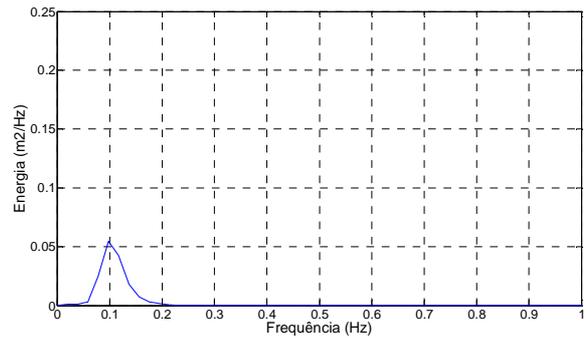
Na coluna esquerda da Fig. 8 está representada, sob a forma gráfica, a elevação da superfície livre em cada um dos três transdutores, para um período de 30 min com início às 3:00 do dia 13 de Maio. A coluna direita da mesma figura mostra, também sob a forma gráfica, os espectros de energia correspondentes ao mesmo período.

Os espectros obtidos nos pontos PT06 e PT01, apesar de diferentes, apresentam o maior pico de energia numa frequência próxima de 0.1 Hz ( $T_p \sim 10$  s). No caso de PT02, embora essa frequência corresponda ainda uma energia significativa é em frequências inferiores que surge o máximo de energia.

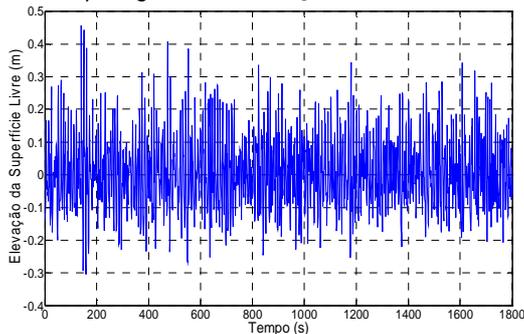
Verifica-se também que o espectro correspondente ao sensor colocado em maiores profundidades (PT06), apenas apresenta um pico bem definido de energia, o que está de acordo com o que seria esperado no local. Por outro lado, nos sensores junto à costa, surgem outras componentes de frequência com energia associada já significativa, que são o resultado de processos não-lineares devidos aos efeitos conjugados da propagação das ondas em águas pouco profundas e da rebentação local. Enquanto que no sensor PT01 esses valores estão, em geral, associados a ondas de menor período, no sensor PT02 estão associadas a ondas longas, o que aparenta ser o resultado do facto de, de modo aproximado, o sensor PT01 se localizar antes da linha de rebentação e o PT02 se localizar após esta.



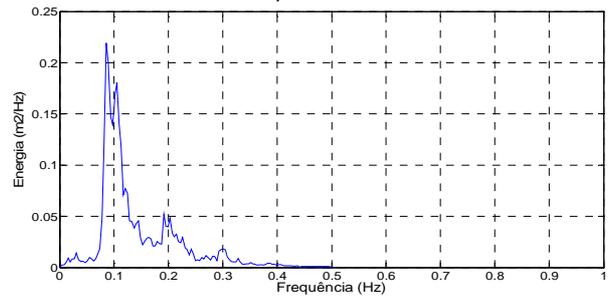
a) Registo da elevação em PT06.



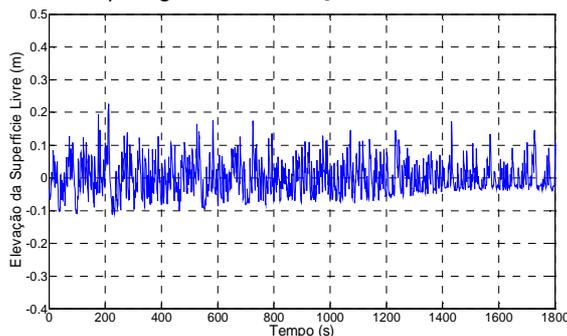
b) PT06



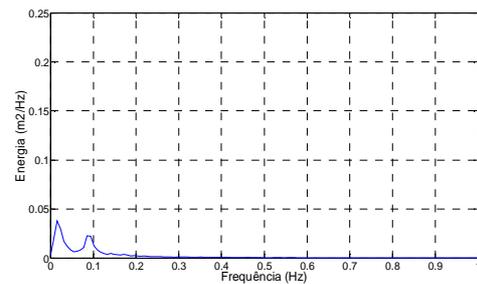
c) Registo da elevação em PT01.



d) PT01



e) Registo da elevação em PT02.



f) PT02

**Fig. 8 - Registos da elevação da superfície livre (coluna da esquerda) e respectivos espectros de energia (coluna da direita) para um período de 30 min com início às 3:00 do dia 13-05, para os três transdutores de pressão.**

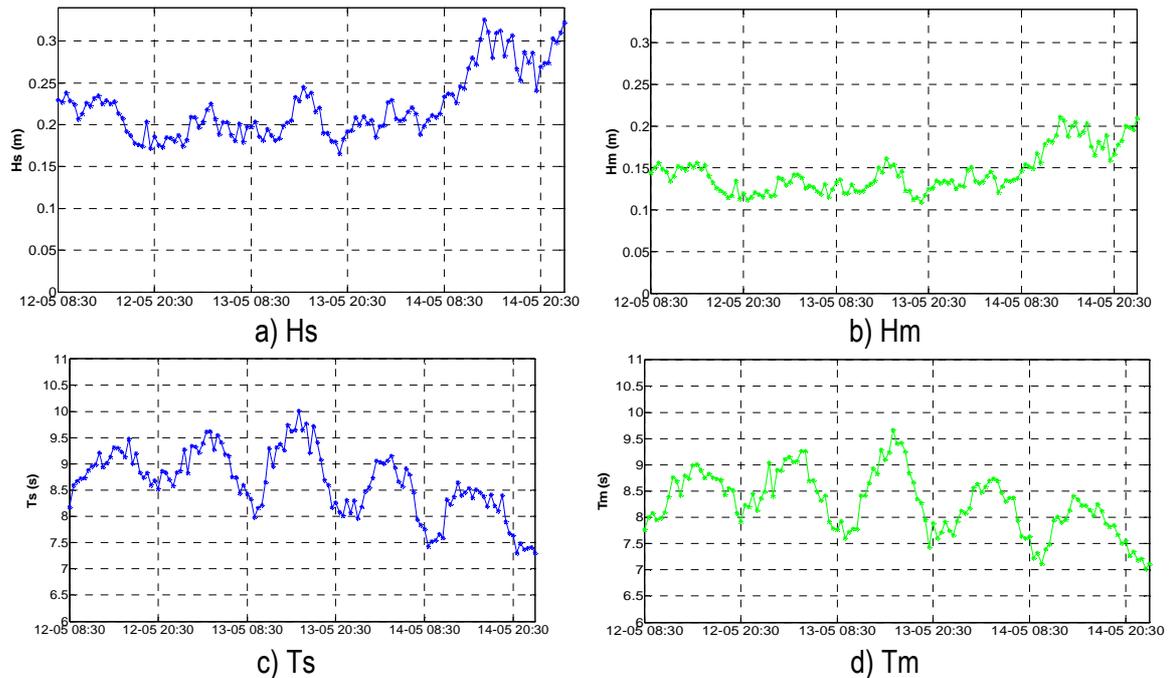
### 2.5.2 Análise temporal dos registos de 30 minutos

As características de agitação marítima referentes aos diversos registos de elevação da superfície livre, de 30 minutos de duração, considerados representações dos diferentes estados de mar estacionários ocorridos ao longo do período de medição, foram calculadas para os três transdutores referidos: PT06, PT01 e PT02. Para cada medição efectuada por um dado transdutor assim definido:

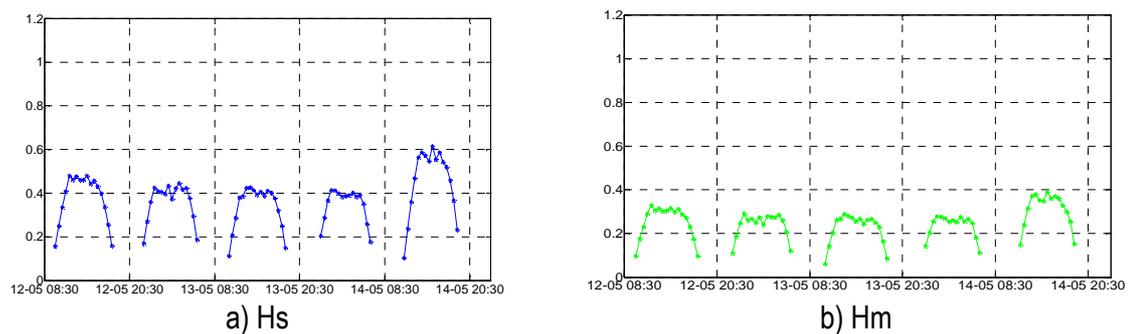
- Foi removida a componente de maré do registo total;
- Foi dividido o registo acima em períodos de 30 minutos, para análise isolada dos diferentes estados de mar, assumindo-se que esses intervalos respeitam as realizações de um mesmo processo estocástico estacionário e ergódico;

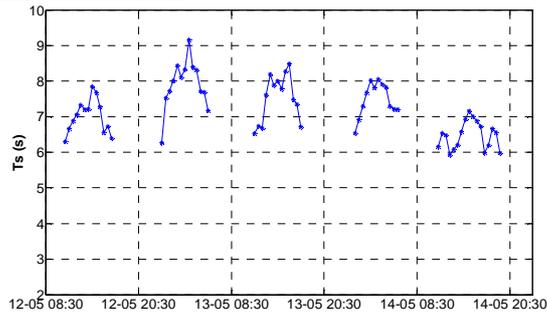
- Foi efectuada a análise temporal desses registos com o programa REGISTOS (FORTES e CAPITÃO, 2009) e um programa desenvolvido no âmbito deste trabalho, em Matlab, utilizando a função zero\_crossing;
- Finalmente, foram obtidos, para cada registo, os valores de  $H_s$  (altura significativa),  $H_m$  (altura média),  $T_s$  (período significativo) e  $T_m$  (período médio).

Na Fig. 9, Fig. 10 e Fig. 11 apresentam-se os valores de  $H_s$ ,  $H_m$ ,  $T_s$  e  $T_m$  para os transdutores PT06, PT01 e PT02, respectivamente.

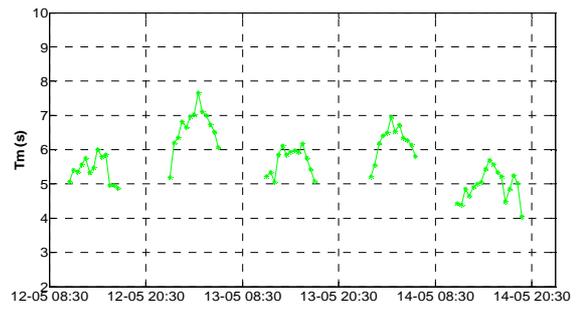


**Fig. 9 - Valores de a) Altura significativa, b) Altura média, c) Período significativo e d) Período médio, obtidos pelo transdutor PT06 (Infinity\_WH), entre 12-05 às 08:30 e 14-05 às 23:30 (em intervalos de 30min).**



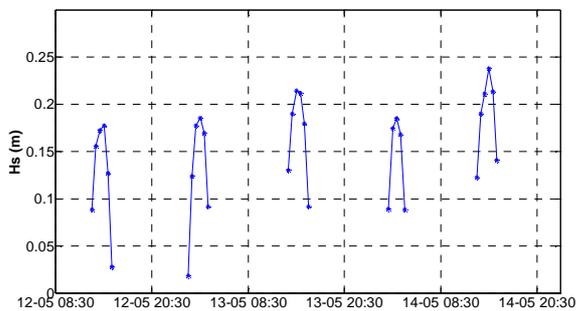


c) Ts

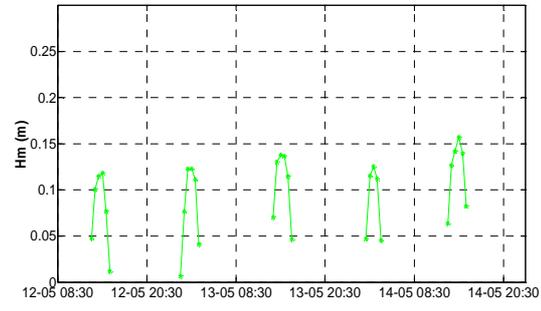


d) Tm

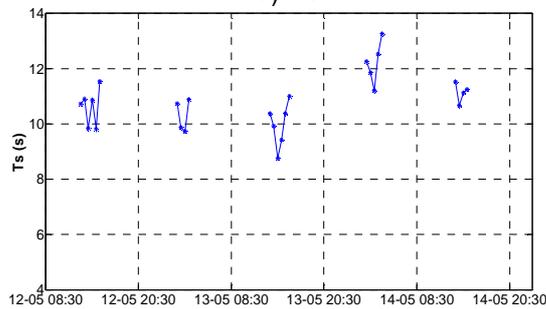
**Fig. 10 - Valores de a) Altura significativa, b) Altura média, c) Período significativo e d) Período médio, obtidos pelo transdutor PT01 (Infinity\_WH), entre 12-05 às 08:30 e 14-05 às 10:00 e entre as 10:45 e as 19:15 do dia 14-05 (em intervalos de 30min).**



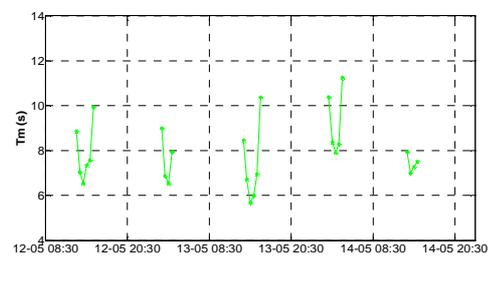
a) Hs



b) Hm



c) Ts



d) Tm

**Fig. 11 - Valores de a) Altura significativa, b) Altura média, c) Período significativo e d) Período médio, obtidos pelo transdutor PT02 (LevelTroll500), entre as 11:00 e as 20:00 de 12-05, a 1:00 e as 6:00 e as 13:30 e as 17:30 de 13-05, e a 1:00 e as 7:00 e as 12:30 e as 17:30 de 14-05 (em intervalos de 30min).**

A Fig. 9 apresenta as variações de Hs, Hm, Ts e Tm ao longo do período registado pelo transdutor PT06, colocado a uma profundidade de 9.4 m (NMM). As alturas significativa e média registam valores de 0.17 a 0.25 m e de 0.1 a 0.15 m, respectivamente, nos dias 12 e 13 de Maio. A partir do início da manhã do dia 14, verifica-se um aumento progressivo dos valores de Hs e Hm, mantendo-se até ao final nos valores mais elevados do período total observado. Nos períodos significativo e médio é notória uma oscilação em ciclos de aproximadamente 12 h. No final do registo analisado observa-se uma diminuição de cerca de 1 s dos períodos, sensivelmente a partir do mesmo instante em que as alturas da onda aumentam.

A Fig. 10 apresenta as variações de Hs, Hm, Ts e Tm ao longo do período registado pelo transdutor PT01, colocado à profundidade, bastante reduzida, de 0.294 m (NMM), o que explica a descontinuidade dos registos, uma vez que este sensor se encontra periodicamente emerso nos períodos de maré mais baixa. Como tal, parte dos registos não foram considerados como válidos e alguns ainda respondem à diminuição de altura resultante do recuo da linha de água. Neste sensor, verifica-se um aumento das alturas de onda relativamente aos dados registados pelo sensor PT06, devido ao empolamento sofrido pelas ondas e uma diminuição dos períodos devida à interacção com as ondas ressacadas. A tendência para maiores alturas e menores períodos na fase final do período analisado mantém-se, em concordância com os dados obtidos no PT06.

Devido ao facto de o transdutor PT02 estar posicionado ainda mais junto a terra, os registos válidos neste transdutor são ainda em número inferior a PT01 (ver Fig. 11). Assim as medições efectuadas com este sensor são caracterizadas por grandes períodos de descontinuidade, correspondentes à emersão do instrumento durante os períodos de maré mais baixa. Não é, por isso, possível retirar indicações válidas da agitação marítima para este ponto de medição.

A partir da análise da Fig. 9 e da Fig. 10 (e mesmo da Fig. 11) é possível concluir que no início do período analisado as condições de agitação marítima foram pouco energéticas tornando-se um pouco mais severas no dia 14 de Maio de 2010, sendo esta agitação maioritariamente o resultado da actuação do vento local. Porém, o exíguo período de medições e as condições em que estas foram efectuadas, não permitem admitir mais do que meros valores indicativos da agitação marítima local.

### 3. APLICAÇÃO DO MODELO COULWAVE

#### 3.1 Introdução

Nas secções seguintes, descrevem-se as simulações numéricas da propagação de ondas na zona da praia da Cornélia, efectuadas com o modelo numérico COULWAVE. Avalia-se a precisão do modelo numérico comparando os respectivos resultados (séries da elevação da superfície livre e alturas de onda) com os dados obtidos pelos sensores PT06, PT01 e PT02.

#### 3.2 O modelo COULWAVE

O modelo COULWAVE, LYNETT e LIU (2002), é um modelo de diferenças finitas para a propagação de ondas fortemente não-lineares (a razão entre a amplitude da onda e a profundidade pode ser de ordem até 1) e dispersivas, em zonas de profundidade variável. As equações do modelo, do tipo Boussinesq, são deduzidas a partir da integração em profundidade das equações de continuidade e movimento, utilizando o conceito de camadas múltiplas (*multi-layer*). Em cada camada admite-se um dado perfil de velocidades, através de funções quadráticas com valores iguais na interface que divide a coluna de água. Esta aproximação conduz a um sistema de equações sem as derivadas espaciais de ordem elevada resultantes do uso de funções polinomiais de ordem superior, que é normalmente utilizado na dedução das equações de Boussinesq. Com estes perfis de velocidade, que coincidem na fronteira entre camadas, é deduzido um conjunto de equações que permite estender a aplicabilidade do modelo a águas muito profundas e apresentar características lineares até  $kh \sim 8$  e um comportamento não-linear de 2ª ordem até  $kh \sim 6$ .

Seguindo o procedimento de KENNEDY et al (2002), são introduzidos termos adicionais nas equações de modo a serem tidos em conta o atrito de fundo, a rebentação de ondas e a geração de

ondas no interior do domínio. Além disso, são incluídos termos de profundidade dependentes do tempo para se ter em conta variações do perfil de fundo no tempo devidas à ocorrência de um deslizamento ou de um sismo.

O modelo é assim aplicável desde águas muito profundas até à rebentação e apresenta características lineares até  $kh \sim 8$  e um comportamento não-linear de 2ª ordem até  $kh \sim 6$ . Contudo, como admite aproximações para a distribuição vertical da velocidade em cada uma das camadas em que é dividida a coluna de água, variações significativas do fundo podem não ser correctamente simuladas pelo modelo.

A resolução das equações referidas é semelhante à formulação apresentada por WEI *et al.* (1995) utilizando um esquema predictor-corrector de Adams-Bashforth. O esquema de diferenças finitas consiste num esquema explícito de Adams-Bashforth de 3ª ordem no tempo para o passo predictor e implícito de 4ª ordem no tempo para o passo corrector. Para as derivadas espaciais são utilizadas diferenças finitas centrais com uma precisão de 4ª ordem. As derivadas espaciais e temporais de ordem superior são efectuadas com uma precisão de 2ª ordem. O modelo é formalmente preciso até  $\Delta t^4$  no tempo e  $\Delta x^4$  no espaço. A diferença relativamente a WEI *et al.* (1995) refere-se a alguns termos não-lineares dispersivos e à existência de termos adicionais, devidos à dependência temporal da profundidade.

Para as fronteiras exteriores, são aplicados dois tipos de condições: reflexão total e radiação. No primeiro caso utiliza-se a metodologia de WEI e KIRBY (1995) enquanto que para a radiação ou condição de fronteira aberta, usa-se um esquema de fronteira absorvente (*sponge layer*), de acordo com KIRBY *et al.* (1995).

Os dados de entrada do modelo COULWAVE encontram-se descritos em LYNETT e LIU (2002). Os resultados fornecidos pelo modelo constam das séries temporais e espaciais da elevação da superfície livre e velocidades horizontais nos pontos do domínio definidos pelo utilizador.

### 3.3 Condições de aplicação do modelo COULWAVE

As condições de onda incidentes no modelo COULWAVE corresponderam a ondas regulares com as características dos valores medidos no sensor PT06 durante os dias de medição, de 12 a 14 de Maio. Nestes cálculos, a direcção da onda foi considerada perpendicular ao domínio computacional, uma vez que, apesar de esta opção constituir uma considerável simplificação, não foram registadas as direcções de onda na posição com este equipamento, por impossibilidade de este medir esse parâmetro.

O tempo de cálculo (cerca de 3 horas) correspondeu à simulação de 127 períodos caracterizados por diferentes condições de agitação marítima. As condições de cada período de 30 minutos foram simuladas pelo modelo durante 300 s, com um intervalo de 1 s.

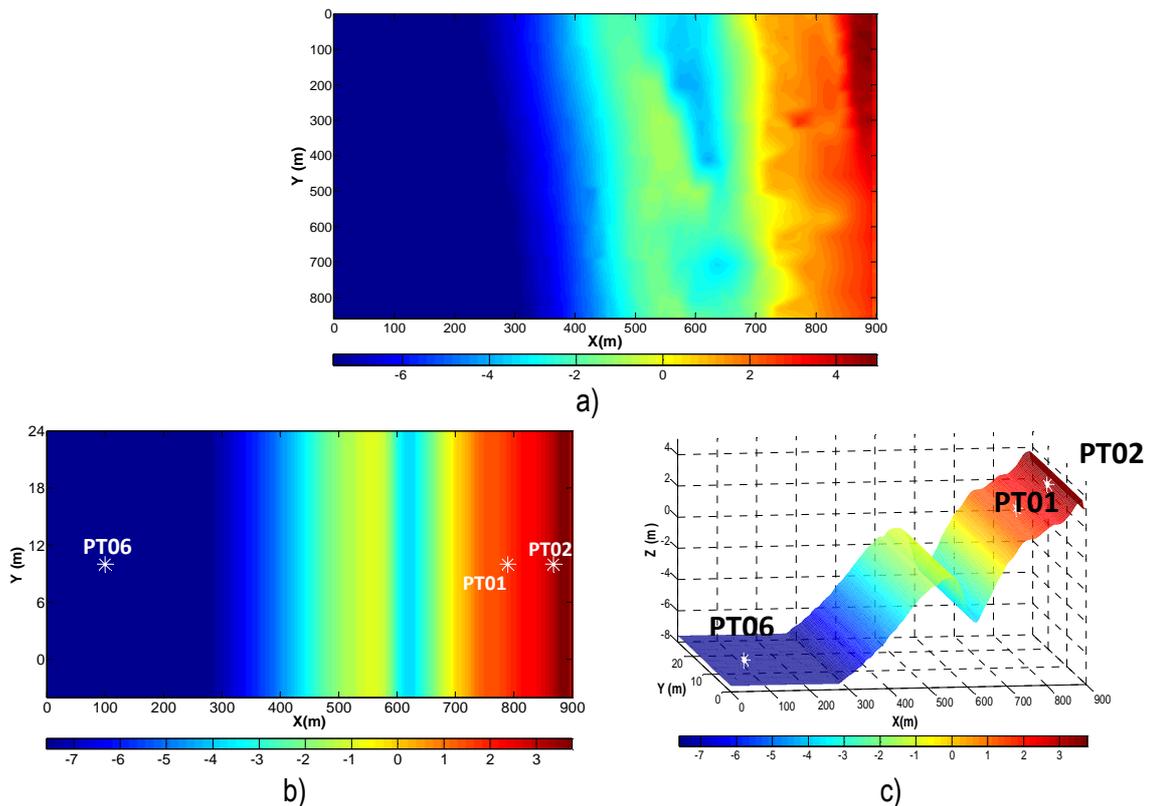
A zona de estudo foi discretizada por uma malha regular de espaçamento constante  $\Delta x = \Delta y \approx 2.0$  m, com dimensão de 900 m na direcção  $x$  e 28 m na direcção  $y$  (Fig. 12b). Esta malha é gerada pelo modelo com base num número mínimo de pontos por comprimento de onda, 30 (nesta simulação) definido consoante o período. A batimetria considerada pela malha (Fig. 12a) correspondeu a uma aproximação da batimetria real (Fig. 12a). Com efeito, a batimetria considerada correspondeu à extensão em largura da batimetria do perfil de praia no qual foram instalados os instrumentos (Figs. 12b e c).

Foi também adicionada ao domínio uma zona de profundidade constante na qual se efectuou a geração da onda através do método da função-fonte, WEI *et al.* (1995). Foram usadas nas extremidades laterais (barlamar e sotamar) do domínio de cálculo, condições fronteira de absorção (camadas de  $L/2 = gT^2/4\pi$ , sendo  $L$  o comprimento de onda e  $T$  o período) com o objectivo de

absorver a energia das ondas que atingem estas regiões. Nas restantes fronteiras foram consideradas condições de reflexão total.

Em todas as simulações, considerou-se apenas uma camada, equações completamente não-lineares (com termos dispersivos não-lineares) e atrito de fundo (coeficiente de atrito =  $1.0 \times 10^{-2}$ ). O número de *Courant* admitido foi igual a 0.4 e a função-fonte foi colocada na posição  $x = 100$  m. Para os restantes parâmetros do modelo, consideraram-se os valores sugeridos pelo manual (LYNETT e LIU, 2002).

Os resultados numéricos foram obtidos para as posições correspondentes aos instrumentos PT06 ( $x=100$  m,  $z=-7.6$  m), PT01 ( $x=790$  m,  $z=1.706$  m) e PT02 ( $x=868$  m,  $z=3.231$  m). As profundidades encontram-se referidas ao Zero Hidrográfico.



**Fig. 12 - a) Representação do domínio e batimetria reais, b) Adaptação do domínio e batimetria para cálculo 1D e c) Representação 3D da batimetria do domínio. Em b) e c) os marcadores brancos assinalam os pontos de cálculo da malha correspondentes aos instrumentos PT06, PT01 e PT02 (respectivamente, do largo para a costa).**

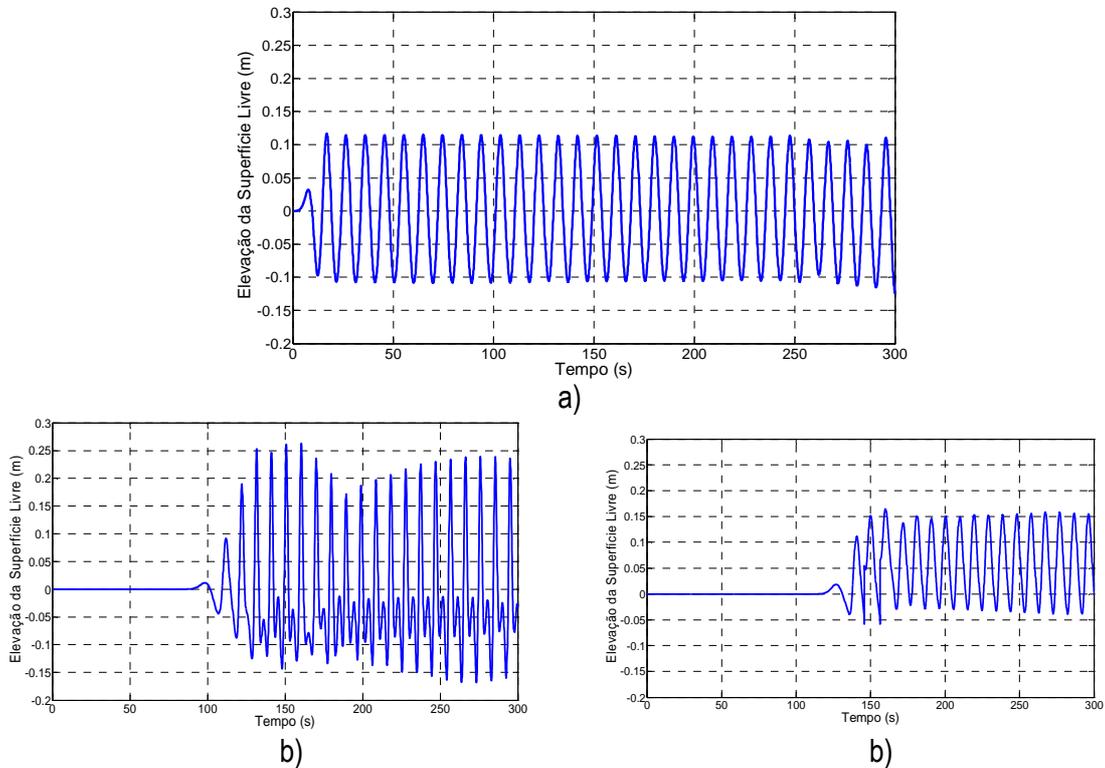
### 3.4 Resultados

#### 3.4.1 Elevação da superfície livre

Na Fig. 13 observa-se a elevação da superfície livre gerada pelo COULWAVE com as condições de agitação medidas às 3:00 do dia 13 de Maio no transdutor PT06, durante 300 s, para as posições de a) PT06, b) PT01 e c) PT02.

Como se pode observar na Fig. 13a, a elevação simulada segue inicialmente uma forma sinusoidal de amplitude e período constantes. A elevação representada na Fig. 13b corresponde a um transdutor colocado junto à costa, na zona de rebentação, o que justifica o comportamento não-

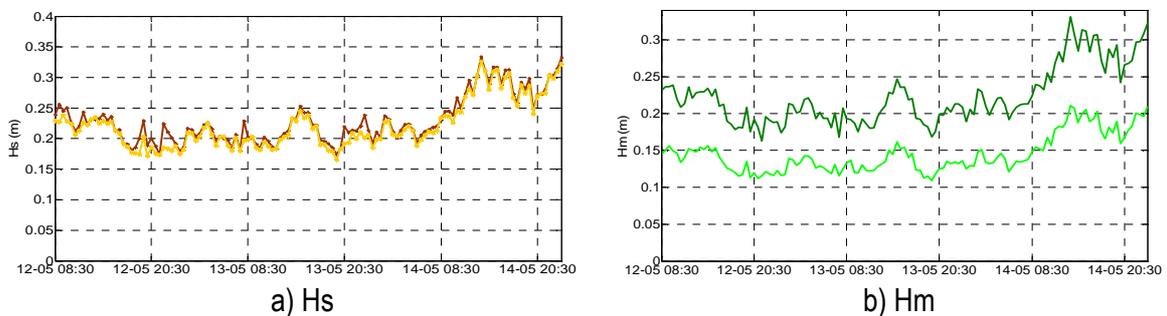
linear da superfície livre, com oscilações irregulares de amplitude e período. É também notório um aumento da amplitude neste registo em relação ao primeiro, de cerca de 0.2 m para 0.4 m, resultante da diminuição da profundidade. A Fig. 13c mostra a simulação da elevação da superfície livre no ponto analisado de maior cota, situado após a linha de rebentação, em que, como tal, a variação da elevação da superfície livre apresenta novamente características não-lineares mas de menor amplitude face a PT01, o que acontece pelo facto de a onda já ter rebentado.

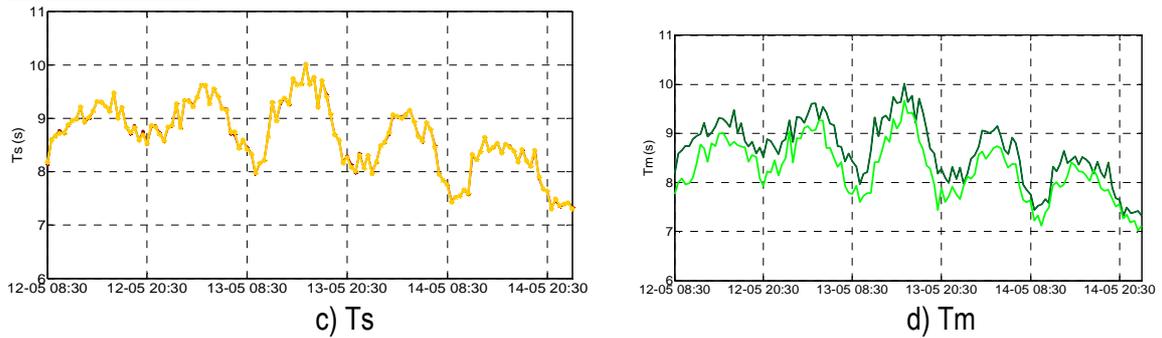


**Fig. 13 - Elevação da superfície livre às 3:00 do dia 13-05, simulada para as posições a) PT06, b) PT01 e c) PT02.**

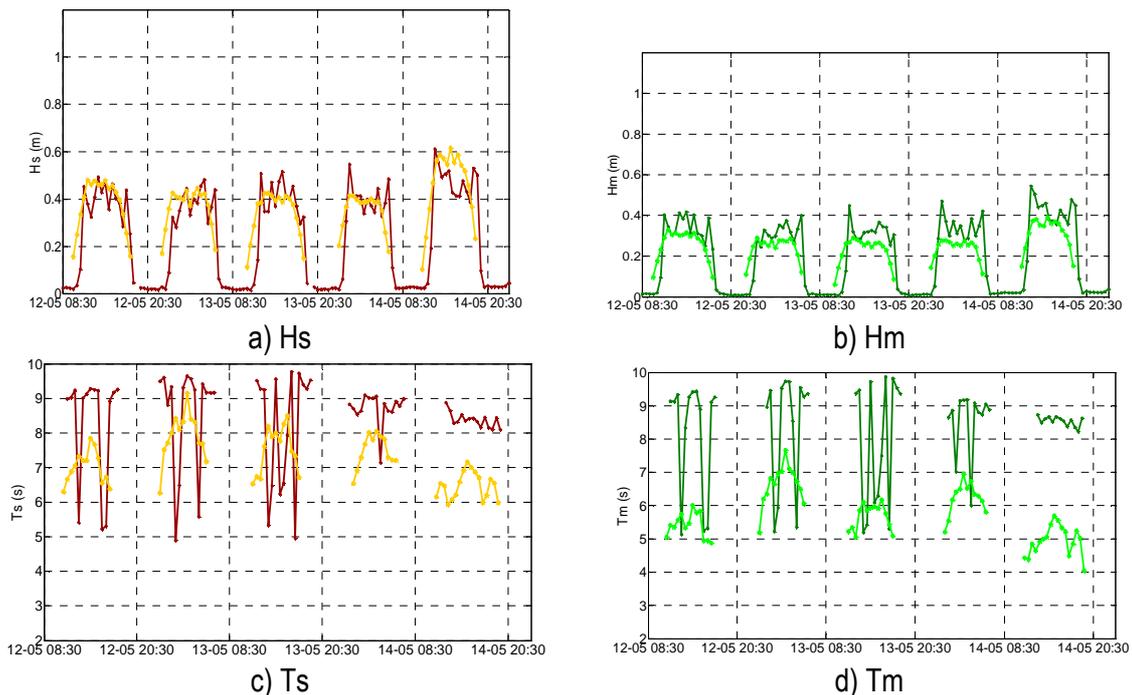
### 3.4.2 Comparação entre medições e resultados numéricos simulados com o COULWAVE

Na Fig. 14, Fig. 15 e Fig. 16 apresenta-se a comparação entre as medições efectuadas com os três transdutores e os resultados numéricos ( $H_s$ ,  $T_s$ ,  $H_m$  e  $T_m$ ) obtidos com o modelo.

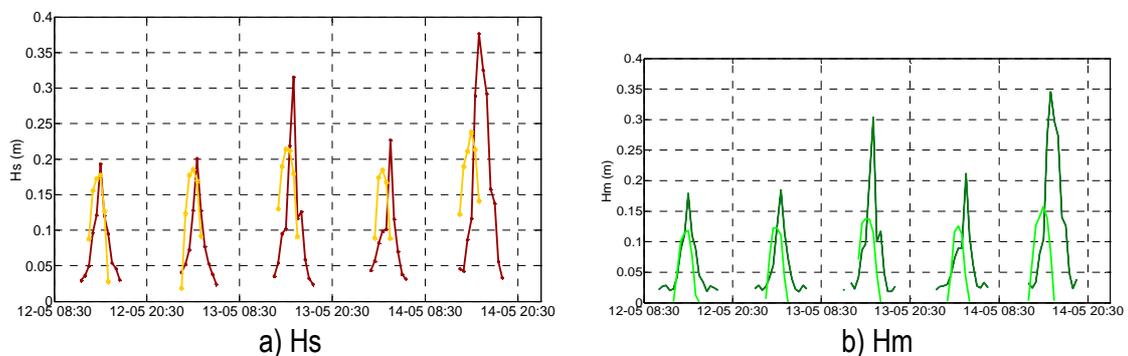


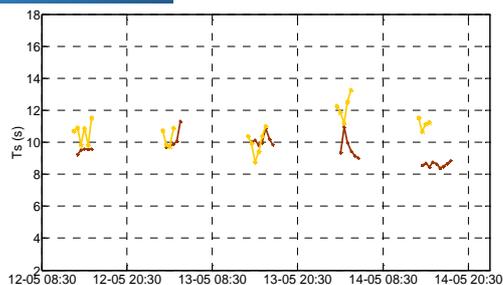


**Fig. 14 – Comparação entre as medições no sensor PT06 (castanho ou verde claros) e os resultados obtidos com o COULWAVE (castanho ou verde escuros) para: a) Altura significativa (m); b) Altura média (m); c) Período significativo (s); d) Período médio (s).**

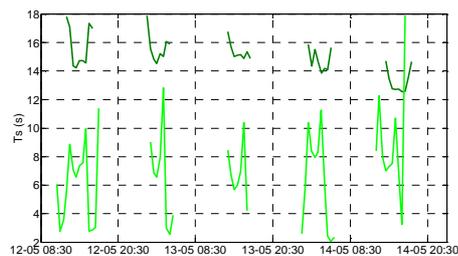


**Fig. 15 - Comparação entre as medições no sensor PT01 (castanho ou verde claros) e os resultados obtidos com o COULWAVE (castanho ou verde escuros) para: a) Altura significativa (m); b) Altura média (m); c) Período significativo (s); d) Período médio (s). (Os períodos superiores a 10 s foram excluídos).**





c) Ts



d) Tm

**Fig. 16 - Comparação entre as medições no sensor PT02 (castanho ou verde claros) e os resultados obtidos com o COULWAVE (castanho ou verde escuros) para: a) Altura significativa (m); b) Altura média (m); c) Período significativo (s); d) Período médio (s). (Os períodos superiores a 18 s foram excluídos).**

A Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam os valores dos parâmetros estatísticos calculados entre os valores de Hs e Ts, respectivamente, numéricos e medidos nos três sensores, PT06, PT01 e PT02. Os parâmetros considerados foram (i) o desvio (BIAS), (ii) o erro médio quadrático (RMSE) e (iii) o índice de concordância (IC), este último dado por:

$$IC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (1)$$

onde  $x_i$  são os valores experimentais (referência),  $y_i$  são os valores obtidos pelo modelo,  $\bar{x}$  é a média do valor experimental e  $n$  é o número de pontos. O índice de concordância IC varia de zero a um, correspondendo o último a uma maior concordância dos valores numéricos com os valores experimentais.

Nesta análise estatística, foram excluídos os períodos de 30 min que apresentavam valores irrealistas de Hs e Ts nos valores medidos e/ou numéricos, bem como os valores referentes aos períodos de maré baixa.

**Tabela 3 – Valores de BIAS, RMSE e IC para a Hs nos sensores PT06, PT01 e PT02.**

Sondas	BIAS (m)	RMSE (m)	IC
PT06	0.008	0.011	1.00
PT01	-0.036	0.130	0.94
PT02	0.128	0.146	0.60

**Tabela 4 – Valores de BIAS, RMSE e IC para Ts nos sensores PT06, PT01 e PT02.**

Sondas	BIAS (s)	RMSE (s)	IC
PT06	-0.001	0.019	1.00
PT01	1.038	1.886	0.93
PT02	9.653	8.941	0.47

A análise da Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16, Tabela 3 e Tabela 4 permite retirar algumas conclusões quanto ao comportamento do modelo COULWAVE na simulação da agitação marítima durante os dias 12 a 14 de Maio de 2010, nos pontos PT06, PT01 e PT02.

Assim, para o ponto PT06, Fig. 14, Tabela 3 e Tabela 4, verifica-se que:

- O andamento dos valores numéricos ( $H_s$ ,  $H_m$ ,  $T_s$  e  $T_m$ ) neste ponto é muito semelhante ao correspondente dos valores medidos. Com efeito, quer para  $H_s$  quer para  $H_m$ , ambos mostram que a agitação marítima não variou significativamente nos dias 12 a 13 de Maio (média de ~0.2 m para  $H_s$  (medido e numérico) e 0.13 m (medido) e 0.20 m (numérico) para  $H_m$ ). Após este período, verifica-se um aumento dos valores da altura de onda (média de ~0.28 m para  $H_s$  (medido e numérico) e 0.18 m (medido) e 0.28 m (numérico) para  $H_m$ ), que atinge o máximo no dia 14 de Maio às 13h30. No que diz respeito ao valores de  $T_s$  e  $T_m$ , existe também uma grande semelhança de andamento entre os valores medidos e numéricos. Este comportamento era esperado uma vez que as características da agitação marítima, em termos de  $H_s$  e  $T_s$  medidas *in situ*, foram as impostas no modelo numérico.
- Em termos absolutos, verifica-se que a altura e o período significativos do registo simulado coincidem quase exactamente com os dos medidos, como seria de esperar. Este comportamento é confirmado pelos valores estatísticos: O valor de BIAS e RMSE são muito baixos enquanto que o valor de IC é praticamente 1. Relativamente aos valores médios  $H_m$  e  $T_m$ , as diferenças são um pouco maiores, uma vez que no modelo foi imposta uma onda monocromática ( $H_s \sim H_m$  e  $T_s \sim T_m$ ), algo que não acontece na Natureza.

Para os dois pontos mais próximos da costa, PT01 e PT02, Fig. 15 e Fig. 16, Tabela 3 e Tabela 4, verifica-se que:

- Em termos de  $H_s$  e  $H_m$ :
  - A simulação numérica conduziu a valores de alturas de onda,  $H_s$  e  $H_m$ , com o mesmo tipo de andamento dos valores medidos, bem como a mesma ordem de grandeza. A descontinuidade dos registos concomitante com os períodos de maré mais baixa está também presente nos registos de alturas (e períodos) simulados.
  - No entanto, as diferenças agora encontradas entre resultados numéricos e medidos são um pouco superiores às observadas no ponto PT06. Em geral, verifica-se uma tendência do modelo numérico de sobrestimação em relação aos valores medidos, associada a um desfasamento ocasional, o que é evidenciado nos valores negativos de BIAS, Tabela 3. Estas diferenças são mais notórias no ponto PT02 que no ponto PT01, uma vez que PT02 está a menor profundidade. Note-se que, nestes dois pontos, os efeitos da rebentação e de fenómenos não-lineares são bem mais importantes, principalmente para o ponto PT02.
  - Os valores estatísticos calculados de BIAS e RMSE, Tabela 3, são razoavelmente baixos (entre 0.01 e 0.3) e IC é próximo de 1, relativamente aos valores medidos, sendo que o modelo revela maior dificuldade em calcular  $H_s$  no sensor PT01. Este facto está um pouco em desacordo com o que foi dito atrás mas é o resultado da forma como se efectuou o cálculo destes parâmetros estatísticos: foram excluídos os valores irrealistas de  $H_s$  e  $T_s$  nos valores medidos ou numéricos, e todos os valores registados durante os períodos de maré mais baixa, o que no caso do PT02 envolveu um maior número de pontos excluídos do que em PT01.

- Em termos de  $T_s$  e  $T_m$ :
  - Ao contrário das alturas de onda, o andamento dos valores numéricos dos períodos de onda não é tão semelhante ao andamento dos valores medidos (particularmente no caso dos períodos médios), apesar da principal tendência estar presente e pontualmente os valores simulados de períodos significativos concordarem razoavelmente com os medidos.
  - Apesar dos valores demasiado elevados de BIAS e RMSE calculados para os  $T_s$  registados em PT01 e PT02, Tabela 4, resultantes da sobre e subestimação, respectivamente, dos resultados numéricos relativamente aos medidos, os valores obtidos para estas posições possuem um índice de concordância ainda bastante próximo de 1, sugerindo a capacidade do modelo de pelo menos simular a tendência principal dos resultados. Tal como para o caso das alturas de onda, estes valores estatísticos têm de ser vistos com algum cuidado, uma vez que, como referido, o facto de os valores escolhidos para a análise estatística já excluírem à partida os valores de  $T_s$  correspondentes aos períodos de maré mais baixa e valores considerados irrealistas faz diminuir muito a amostra, principalmente no caso do sensor PT02. Tal situação tenderá a aumentar o índice de concordância e, como tal, a possivelmente mascarar um eventual IC mais baixo do que o calculado.

Em resumo, do exposto, é possível concluir que o modelo tem uma maior capacidade de reproduzir as alturas de onda do que os períodos de onda, especialmente no caso dos dois sensores PT01 e PT02. Para o sensor PT06, localizado em maiores profundidades, os resultados obtidos são bastante promissores, uma vez que os valores de BIAS e RMSE aí obtidos estão muito próximos dos óptimos.

As diferenças observadas entre valores numéricos e medidos (estes últimos, em geral, inferiores) podem estar relacionadas com o facto de a direcção das ondas imposta ser normal à batimetria (o que agrava as condições de agitação nos sensores junto à linha de costa) não correspondendo à direcção das ondas que efectivamente chegam à praia da Cornélia.

É também importante lembrar as limitações quer do próprio modelo numérico (que apenas foi corrido em 1D), quer dos equipamentos de medição, já referidas na secção 2. Relativamente às limitações do COULWAVE, note-se que a aplicação do modelo em inclinações de fundo da ordem de  $1/6$  se torna muito exigente para o modelo, pois as equações base são integradas no pressuposto de fundos de inclinação suave. Além disso, fenómenos como a rebentação são incluídos no modelo através da adição de um termo de viscosidade turbulenta à equação original, que depende de um conjunto de parâmetros relacionados com o início, fim e duração da rebentação. Estes parâmetros têm de ser calibrados para cada caso de estudo e condição de agitação, sendo assim uma limitação do modelo numérico. No presente trabalho os parâmetros da rebentação foram considerados constantes para todas as condições de agitação incidente.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste trabalho, descreveu-se e analisou-se a aplicação do modelo COULWAVE às condições de agitação registadas num sensor de pressão posicionado à profundidade de 9.4 m (NMM) durante o período de 12 a 14 de Maio de 2010, na praia da Cornélia, Costa da Caparica. Estas medições decorreram durante a 2ª campanha do projecto BRISA, de 11 a 14 de Maio de 2010, que teve como objectivos a aquisição de dados hidrodinâmicos e morfológicos para posteriores testes e validações de modelos numéricos e a melhoria do conhecimento da dinâmica da rebentação e a sua influência no transporte de sedimentos e na morfodinâmica da praia em estudo.

A comparação dos resultados numéricos com as medições efectuadas por sensores de pressão localizados ao longo do perfil da praia na zona de rebentação sugere que o modelo simula razoavelmente a evolução da onda desde a posição mais ao largo até à praia. Em geral, o modelo consegue simular bastante bem o andamento e a ordem de grandeza dos valores medidos principalmente em termos de alturas de onda. No caso dos períodos, as diferenças são maiores.

É de notar a existência de diferenças por vezes significativas entre os valores medidos e os valores estimados pelo modelo numérico, principalmente nas zonas menos profundas. Estas diferenças estão relacionadas com as condições de agitação impostas (agitação regular, direcção normal às batimétricas, parâmetros de rebentação), com as limitações do próprio modelo (modelo integrado em profundidade) e com os erros dos próprios instrumentos de medição.

A imposição de condições de agitação mais próximas da realidade, bem como uma análise de sensibilidade aos parâmetros de rebentação intrínsecos do modelo, será objecto de trabalho futuro, o que permitirá certamente melhorar os resultados numéricos. Além disso, a comparação de resultados numéricos (além das alturas de onda, também as velocidades) com outras medições efectuadas por equipamentos na praia, deverá também permitir confirmar o desempenho do modelo.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito dos projecto de investigação “Interacção entre a rebentação das ondas e o transporte de areias” (PTDC/ECM/67411/2006) e dos projectos PTDC/AMB/67450/2006 e PTDC/ECM/73145/2006, financiados pela FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal.

## BIBLIOGRAFIA

- BEZERRA, M.; FERREIRA, O. (2010). “Relatório de campo – Universidade do Algarve. Projecto BRISA – Campanha Costa da Caparica (Praia da Saúde) (11 a 15 de Maio de 2010)” Junho.
- FORTES, C.J.E.M.; CAPITÃO, R. (2009). “Relatório da Campanha BRISA I à praia de Faro. 26 a 28 de Março de 2009”. Relatório BRISA 1/2009. Maio.
- KENNEDY, A.B., Q. CHEN, J.T. KIRBY, DALRYMPLE, R.A. (2000). “Boussinesq Modeling of Wave Transformation, Breaking and Runup I: 1D”. *J. of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, **126** (1): 39-47.
- KIRBY, J.M., WEI, G., CHEN, Q., KENNEDY, A.B., DALRYMPLE, R.A. (1998). “Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model, Documentation and User’s Manual”, CACR-98-06, Center for Applied Coastal Research, Dep. Civil Engineering., Univ. Delaware, Newark.
- LYNETT, P.; LIU PL-F. (2002). “Modelling wave generation, evolution and interaction with Depth-Integrated, Dispersive Wave equations”. COULWAVE Code Manual. Cornell Univ. Long Inter. Wave Modelling Package.
- WEI, G.; KIRBY, J.T. (1995). „A time-dependent numerical code for extended Boussinesq equations”. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **120**: 251-261.
- WEI, G., KIRBY, J. T., GRILLI, S. T., and SUBRAMANYA, R. (1995). “A fully nonlinear Boussinesq model for surface waves. Part I. Highly nonlinear unsteady waves”. *Journal of Fluid Mechanics* **294**: 71 - 92.