



## AVALIAÇÃO DO MODELO SWAN NA PREVISÃO DA AGITAÇÃO NO ESTUÁRIO DO TEJO POR COMPARAÇÃO COM DADOS MEDIDOS

Conceição Juana Fortes, Alexandre Braga Coli, Rui Capitão, João Alfredo Santos

(1) Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC  
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Tel. +351 21 844 3446, Fax. 351 21 844 3019  
E-mail: jfortes@lnec.pt, abcoli@lnec.pt, rcapitao@lnec.pt, jasantos@lnec.pt

### RESUMO

Esta comunicação ilustra a aplicação do modelo numérico de geração, propagação e dissipação da agitação marítima irregular em zonas costeiras SWAN, Booij *et al.* (1999), na previsão da geração de agitação marítima por um campo de ventos incidente numa zona confinada, e mais concretamente, no estuário do Tejo.

Primeiramente, para a obtenção de um regime de agitação marítima junto à praia do Alfeite, o modelo SWAN é aplicado para condições de vento definidas com base no regime de ventos correspondente a 6 anos, INMG (1999). Seguidamente, o mesmo modelo é aplicado com ventos observados ao longo dos dias 29 de Janeiro e 3 de Outubro de 2006. Esta análise permite uma avaliação do comportamento do modelo.

Palavras-chave – Geração de Ondas, Modelos Numéricos, Propagação da Agitação Marítima, Praias Estuarinas.

### 1. INTRODUÇÃO

A morfologia particular do estuário do Tejo, caracterizada por uma zona interior extensa de baixos fundos e alinhada com a direcção dominante dos ventos, favorece a presença de praias de areia na sua margem esquerda entre Alcochete e Alfeite. A agitação marítima nestas praias é resultante da acção de vento local, ao contrário das que se encontram na embocadura do estuário que são afectadas por ondas oceânicas.

É neste âmbito que se insere o projecto de investigação "BERNA – Evolução de praias em zonas de *fetch* restrito: análise experimental e numérica", ([http://www.dha.lnec.pt/nec/english/studies/berna/berna\\_uk.html](http://www.dha.lnec.pt/nec/english/studies/berna/berna_uk.html)) que tem como objectivo o estudo da previsão da evolução a curto e médio prazo deste tipo de praias. Um dos factores determinantes para alcançar este objectivo é a modelação não só da geração de ondas pelo vento em bacias de dimensões limitadas, mas também da propagação dessas ondas no interior do estuário até à sua rebentação na praia.

Para o estudo da previsão da evolução a curto e a médio prazo deste tipo de praias, torna-se necessário conhecer, quer a agitação marítima gerada por ondas de vento em zonas confinadas (como o estuário do Tejo), quer o modo como se efectua a propagação dessas ondas no interior do estuário até à sua rebentação na praia. Um modelo adequado para tratar este tipo de problemas é o modelo SWAN, Booij *et al.* (1999), pois é um modelo numérico de geração, propagação e dissipação da agitação marítima irregular em zonas costeiras do tipo da que se pretende estudar.

Em Santos *et al.* (2006) efectuou-se a aplicação sistemática do modelo SWAN para uma vasta gama de condições de vento e níveis de marés para analisar o comportamento do modelo a diferentes solicitações. Em Santos *et al.* (2007) executou-se o modelo para as condições de vento correspondentes: i) a medições da velocidade média e direcção no



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

período de 1954 a 1980 na estação Montijo-Base Aérea, INMG (1991); ii) ao dia 21 de Julho de 2005, data em que foram efectuadas medições das séries temporais da elevação da superfície livre na praia do Alfeite.

O trabalho efectuado nesta comunicação é a continuação dos trabalhos anteriores com o modelo SWAN aplicado a um regime de ventos estabelecido a partir de medições mais recentes efectuadas na estação meteorológica “Lisboa-Gago Coutinho”, referentes ao período de 1999 a 2004 donde resultou a definição do regime de agitação marítima próximo da praia do Alfeite. Aplicou-se também o modelo SWAN às condições de vento observadas nos dias 29 de Janeiro de 2006 e 3 de Outubro de 2006. Na primeira destas datas apenas houve observação visual da agitação marítima na praia do Alfeite enquanto que na segunda se obtiveram, com sondas resistivas e com um transdutor de pressão, várias séries temporais da elevação da superfície livre.

Assim, nas secções seguintes, ilustram-se estas aplicações do modelo SWAN na previsão da geração de agitação marítima por ventos locais. Descrevem-se, primeiramente, o modelo SWAN e o local de estudo e apresenta-se o regime de ventos. Seguidamente, apresentam-se as medições efectuadas no dia 3 de Outubro de 2006. Depois, descrevem-se os cálculos efectuados com o modelo SWAN para a caracterização da agitação marítima junto à praia do Alfeite. As simulações da agitação marítima realizadas tiveram o objectivo de cobrir as gamas de velocidade e direcção do vento presentes no regime de ventos do estuário bem como os ventos observados ao longo dos dias 29 de Janeiro de 2006 e 3 de Outubro de 2006. Esta análise permite uma razoável avaliação do comportamento do modelo.

## 2. O MODELO SWAN

O modelo SWAN - acrónimo de *Simulating WAves Nearshore* - é um modelo numérico para geração, propagação e dissipação da agitação marítima, baseado na equação para a conservação da acção de onda. O modelo SWAN propaga a agitação marítima desde o largo até próximo da costa considerando os processos físicos de refacção, difracção (embora de forma aproximada) e emolamento devido a variações do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por acção dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*), dissipação de energia devido à fricção do fundo, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão através de obstáculos. O SWAN é um modelo de domínio público (*freeware*), em constante desenvolvimento pela *Delft University of Technology* da Holanda e seus colaboradores.

O campo de ondas na zona é caracterizado pelo espectro bidimensional de densidade da acção da agitação marítima. Com esta representação, é possível a aplicação do modelo em áreas onde o crescimento da agitação marítima pela acção do vento seja notável ou onde estados de mar, ou mesmo ondulação, estejam presentes. A propagação da agitação, nos modos estacionário ou não estacionário, nos espaços geográfico e espectral, é realizada utilizando esquemas numéricos implícitos. A zona em estudo pode ser descrita com coordenadas cartesianas ou esféricas, utilizando uma malha regular.

Os dados necessários para a execução do SWAN são a malha batimétrica da zona a modelar, as malhas computacionais de diferenças finitas e as condições de agitação na fronteira de entrada do domínio, para além de um conjunto de outros parâmetros de cálculo. De entre os vários resultados obtidos pelo SWAN destacam-se a altura significativa, os períodos de pico e médio, as direcções de pico e média, a dispersão direcciona, o parâmetro de largura de banda e nível de água em qualquer ponto do domínio computacional.

### 3. PRAIA DO ALFEITE

#### 3.1 Descrição

O estuário do Tejo é um dos maiores estuários da Europa ocupando uma superfície aproximada de 320 km<sup>2</sup>, desde a embocadura até Vila Franca de Xira. A zona de interesse deste trabalho é a praia do Alfeite que se estende por cerca de 2 500 m, entre o Seixal e a Base Naval do Alfeite (Figura 1 e Figura 2).



Figura 1 – Vista aérea do estuário do Tejo (Google Earth®, 2007).



Figura 2 – Aspecto geral da praia do Alfeite, em preia-mar e em baixa-mar.

O estuário interno é caracterizado por formas de acumulação longitudinais, cortadas por canais de maré, e extensas zonas de espaiados, principalmente junto à margem esquerda, possibilitando o desenvolvimento de importantes áreas de sapal. A extensão da zona interior e o seu alinhamento à direcção dominante dos ventos na região, do quadrante norte, favorece a presença de praias de areia na sua margem esquerda entre Alcochete e Alfeite actuadas exclusivamente por ondas de geração local. O estuário do Tejo é um sistema mesotidal sujeito a uma maré com período semi-diurno sendo a amplitude média no Terreiro do Paço de 3.2 m em maré viva e 1.5 m em maré morta.

A praia do Alfeite é constituída por areia de grão médio a grosseiro, está instalada na vertente norte de uma restinga e é limitada inferiormente por um raso de maré areno-vasoso com cerca de 300 m de largura (Freire, 2003 e Freire e Andrade, 1999). A agitação que chega a esta praia é praticamente gerada por ondas de vento apenas, embora o trânsito frequente de embarcações (*ferries*) na vizinhança produz agitação apreciável também, Valente *et al.* (2006).

#### 3.2 Caracterização do regime de ventos

O regime de ventos foi estabelecido a partir de uma série de intensidade e direcção do vento cujas observações foram obtidas diariamente a cada 6 horas durante 6 anos (1999-2004) na estação meteorológica “Lisboa–Gago Coutinho” do Instituto de Meteorologia (IM).

Na Figura 3 apresenta-se o histograma de ocorrências de valores de velocidade do vento em função da direcção do vento neste local. Na Figura 4 apresenta-se distribuição conjunta dos valores de velocidade de vento e direcção.

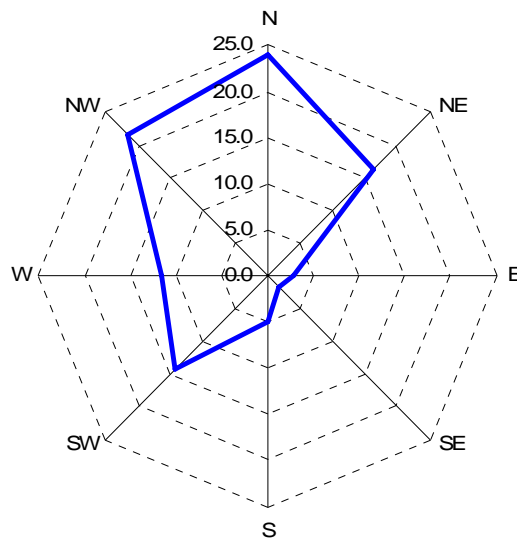


Figura 3 – Histograma de ocorrências de valores de velocidade do vento - Estação “Lisboa-Gago Coutinho”. Período de 1999 a 2004.

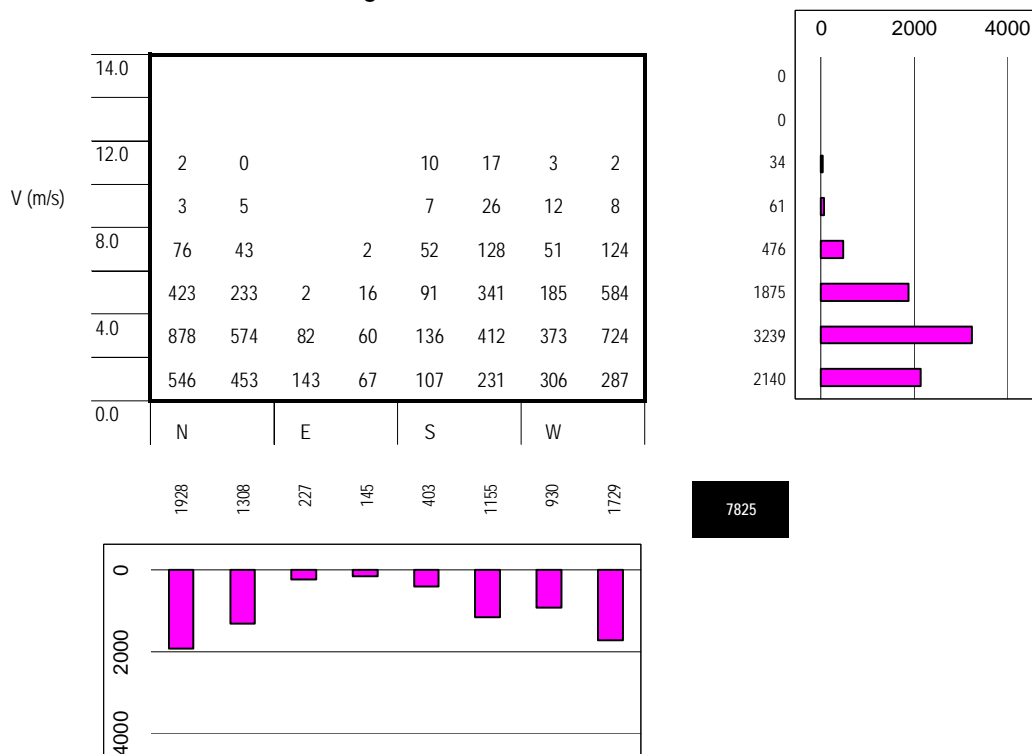


Figura 4 – Distribuição, por rumos e por velocidade, das ocorrências de valores de velocidade do vento - Estação “Lisboa-Gago Coutinho”. Período de 1999 a 2004.

Com base nos dados da estação de “Lisboa-Gago Coutinho”, verifica-se que os rumos mais frequentes, por ordem decrescente, são: N, NW, NE, SW, W, S, E, SE. As velocidades do vento estão na gama entre 0 m/s e 12 m/s, sendo as mais frequentes da gama entre 2 m/s e 4 m/s seguindo-se-lhe as classes de 0 m/s a 2 m/s e 4 m/s a 6 m/s.

### 3.3 Medições de agitação realizadas in situ

#### 3.3.1 Introdução

As campanhas de medições, realizadas no âmbito do projecto BERNA, envolveram a aquisição de dados de natureza variada, e em particular, de dados de agitação marítima. Esta aquisição de dados, sob a forma de elevações da superfície livre da água, incluiu a utilização de várias sondas resistivas e de um transdutor de pressão. Os resultados discutidos neste trabalho referem-se a medições efectuadas no local de estudo com as mencionadas sondas e transdutor no dia 3 de Outubro de 2006.

#### 3.3.2 Campanha de 3 de Outubro de 2006

No dia 3 de Outubro, foram realizadas medições com duas sondas resistivas, complementadas com medições com um transdutor de pressão tipo *mini-troll*. Ver Quadro 1 e Figura 5.

Quadro 1 – Características e localização das sondas utilizadas.

Ponto	Tipo	Latitude (WGS84)	Longitude (WGS84)
Sonda 1	Sonda Resistiva	38.654400° N	9.126130° W
	Transdutor de Pressão		
Sonda 2	Sonda Resistiva	38.654260° N	9.125740° W

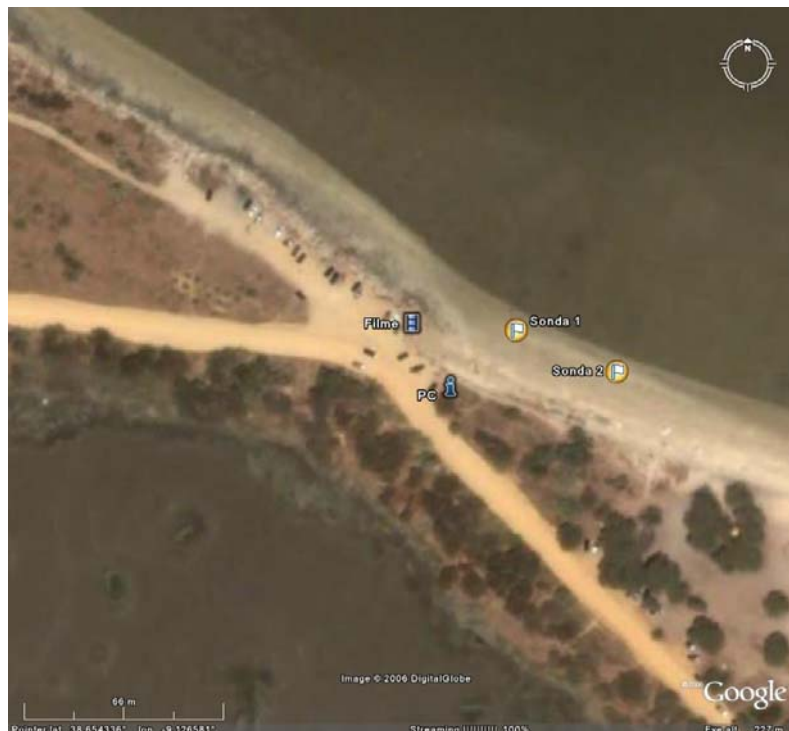


Figura 5 – Localização das sondas e transdutor de pressão (Google Earth®, 2007).

No Quadro 2 apresentam-se as características dos registos (oito no total, designados por Medição “1” a “8”), efectuados ao longo do dia 3 de Outubro de 2006. Quanto ao transdutor de pressão, ele foi colocado das 10:00:00 até às 13:53:00, o que perfaz cerca de 4 horas de aquisição.

Quadro 2 – Características dos registos realizados *in situ* - 3 de Outubro de 2006.

Medição	Nome do ficheiro	Sonda n.	Frequência	Dia	Hora inicial	Hora final	Duração:
1	Medicao_1142_5min.dat	1 e 2	25	03-10-2006	11:38:00	11:42:00	00:04:00
2	Medicao_1222_20min.dat	1 e 2	25	03-10-2006	12:02:00	12:22:00	00:20:00
3	Medicao_1246_20min.dat	1 e 2	25	03-10-2006	12:26:00	12:46:00	00:20:00
4	Medicao_1307_20min.dat	1 e 2	12.5	03-10-2006	12:47:00	13:07:00	00:20:00
5	Medicao_1329_20min.dat	1 e 2	12.5	03-10-2006	13:08:00	13:28:00	00:20:00
6	Medicao_1350_20min.dat	1 e 2	12.5	03-10-2006	13:29:00	13:49:00	00:20:00
7	Medicao_1411_20min.dat	1 e 2	12.5	03-10-2006	13:50:00	14:10:00	00:20:00
8	Medicao_1432_20min.dat	1 e 2	12.5	03-10-2006	14:11:00	14:32:00	00:21:00

Para este dia, mostra-se, a seguir, um exemplo dos resultados das medições efectuadas às 11h42m de 3 de Outubro com a Sonda 1 (Figura 6) e a Sonda 2 (Figura 7).

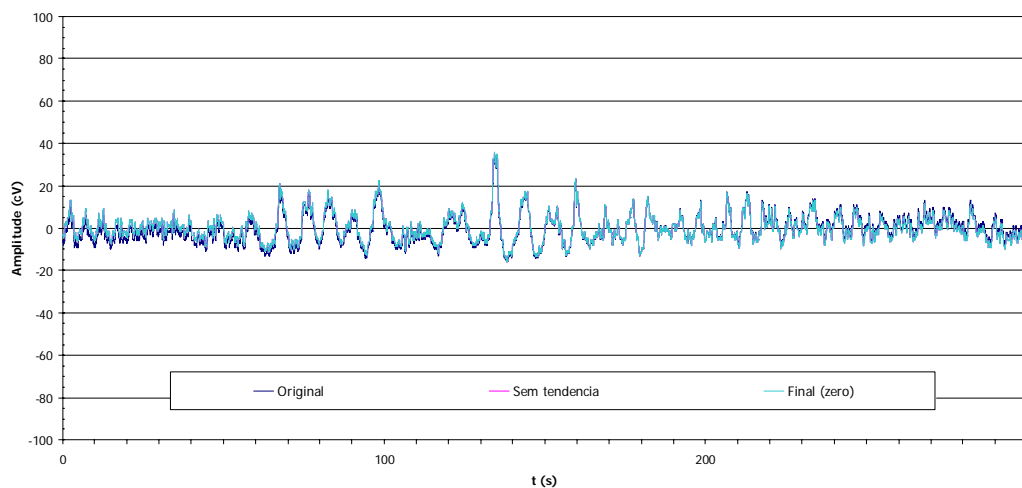


Figura 6 – Medições às 11:42 h de 3 de Outubro (Sonda 1).

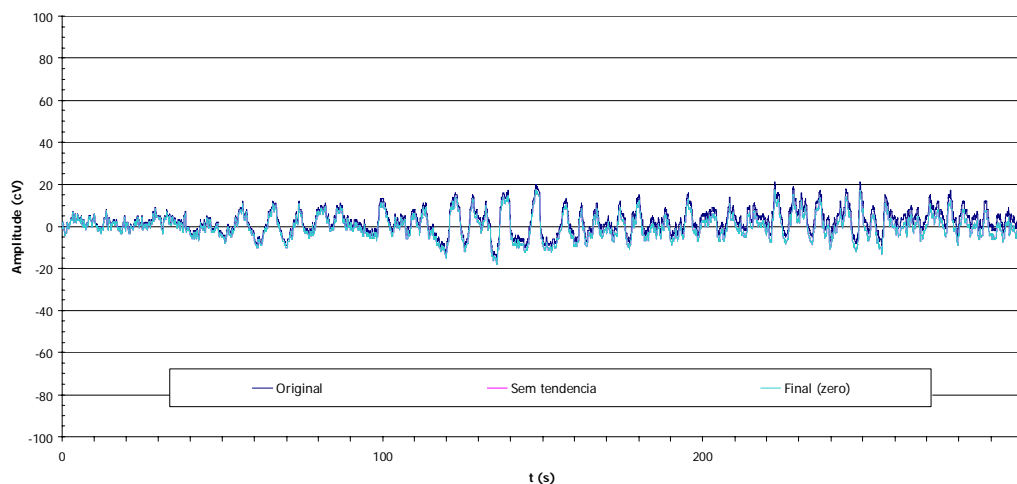


Figura 7 – Medições às 11:42 h 3 de Outubro (Sonda 2).

Na Figura 8, na Figura 9 e na Figura 10 mostram-se, para os oito registos efectuados (de características mencionadas no Quadro 2), os resultados em termos dos parâmetros de registo altura significativa (HS), período médio (TZ) e período de pico (TP), respectivamente.

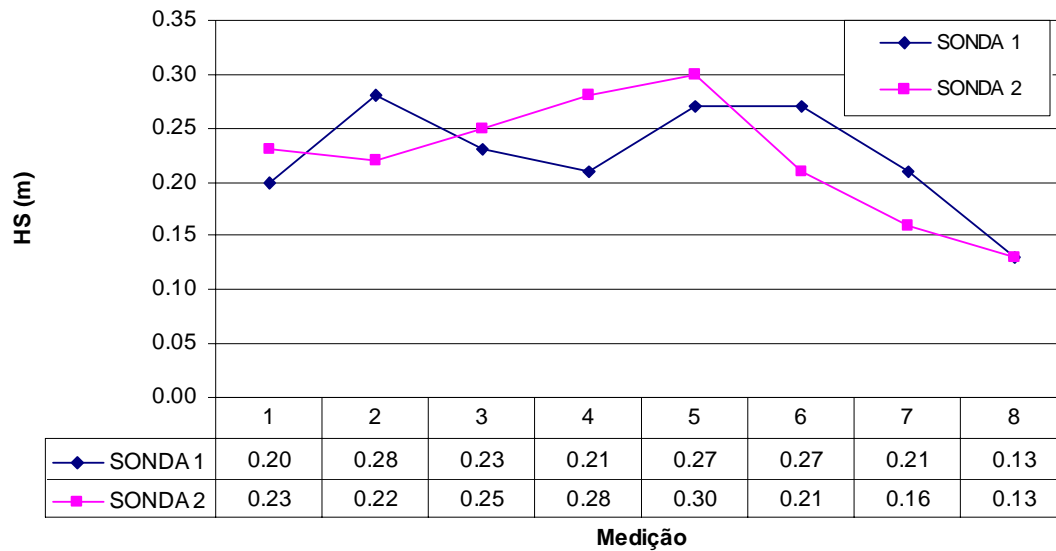


Figura 8 – Comparação das medições de HS.

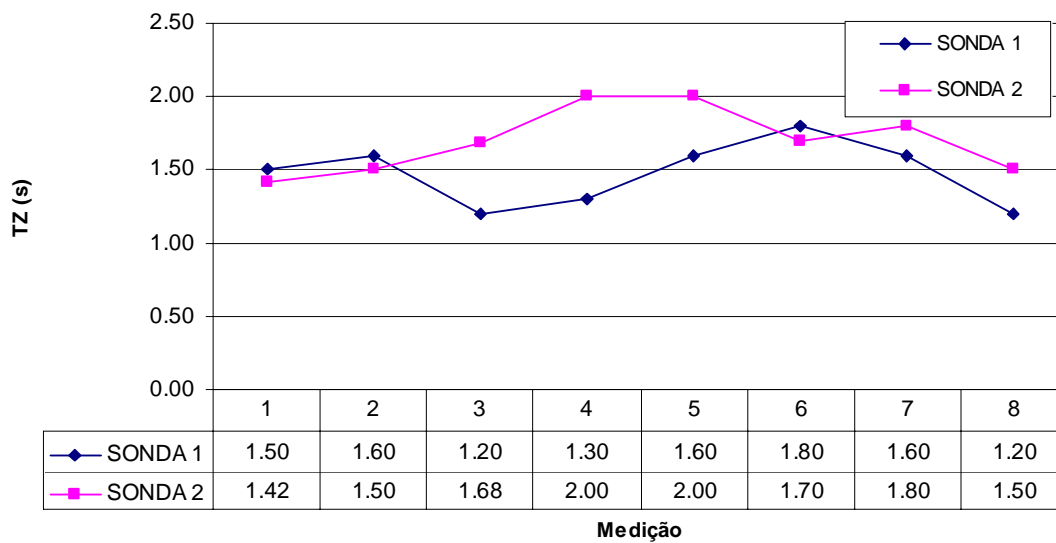


Figura 9 – Comparação das medições de TZ.

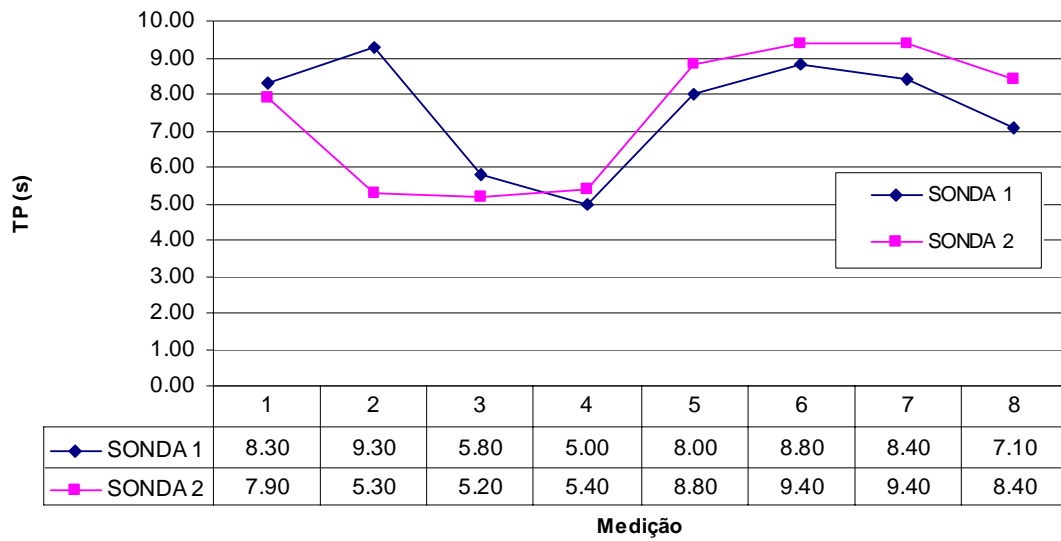


Figura 10 – Comparação das medições de TP

Os parâmetros representados nas figuras anteriores foram calculados com base na utilização do Módulo 7, de análise espectral de sinais, incluído no pacote de software SAM cuja interface se apresenta na Figura 11. Nesta figura mostra-se o resultado da análise espectral realizada ao registo da medição do transdutor de pressão *mini-troll*, depois de retirada a componente da maré, podendo retirar-se os seguintes parâmetros: HS=0.13 m, TZ=4.50 s e TP=8.72 s. Notar, neste caso, que estes parâmetros se referem a um registo com uma duração de 4 horas pelo que representa diversos estados de mar e não um único estado de mar estacionário.

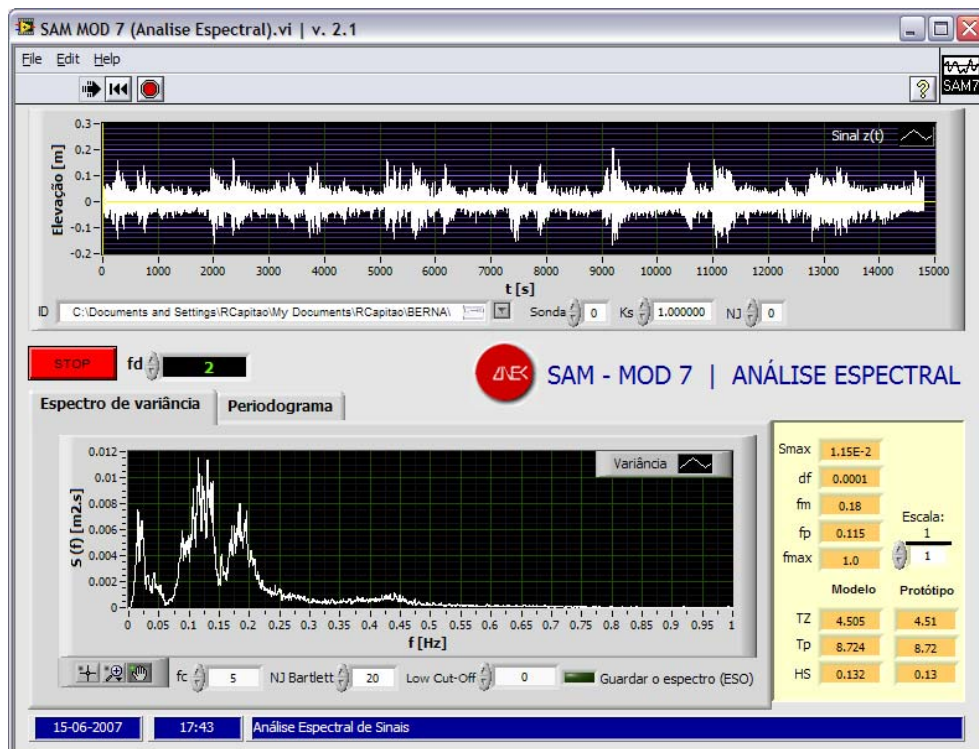


Figura 11 – Análise das medições efectuadas com o transdutor de pressão *mini-troll*





A análise espectral dos sinais obtidos tanto com as sondas resistivas como do transdutor de pressão em cada um dos registos anteriores permitiu a identificação das principais características da agitação marítima no local para esses períodos. Em geral, verifica-se que, não praticando qualquer alisamento temporal nos sinais iniciais e um alisamento espectral fraco no espectro obtido:

- ▶ O espectro da agitação na zona em estudo tem geralmente um único pico, embora possa ocorrer um pico secundário. O mais intenso destes picos (para frequências de pico  $f_p$  à volta de 0.12 Hz,  $T_p \sim 8$  s) refere-se à agitação marítima preponderante. O outro pico que pode ocorrer, por vezes importante, tem como frequência cerca de 0.18 Hz - 0.20 Hz e período de cerca de 5 s. Observa-se por vezes ainda uma componente de longo período ( $\sim 40$  s a 50 s) resultante provavelmente de passagens de embarcações na vizinhança do local de recolha dos dados durante o período de observação.
- ▶ As alturas significativas registadas ao longo dos diversos períodos de medição variam entre 0.13 m a 0.30 m. De qualquer modo, verifica-se que a agitação é pouco pronunciada neste local, sendo a variabilidade mencionada também influenciada pela passagem das embarcações no estuário. A altura de onda significativa obtida com o transdutor de pressão, com base nos dados coligidos por este instrumento ao longo de 4 horas foi de 0.13 m. Como já referido, estes parâmetros foram obtidos de um registo representando diversos estados de mar e não um único estado de mar estacionário.
- ▶ Os períodos médios TZ, calculados através dos momentos dos espectros, apresentam geralmente valores baixos (de 1.2 s a 2.0 s). Com o transdutor de pressão obteve-se o valor de 4.5 s.
- ▶ Os períodos médios TP, calculados através dos momentos dos espectros, apresentam valores de 5.0 s a 9.4 s. Com o transdutor de pressão obteve-se o valor de 8.7 s.

Da análise destes resultados, parece claro que os estados de mar obtidos a partir das medições efectuadas não se mantêm constantes ao longo do mesmo dia. Da observação directa do mar, verifica-se que algumas variações nas características da agitação marítima no local da recolha dos dados poderão ser devidas ao frequente atravessamento do estuário por barcos de passageiros (*catamarans*).

## **4. APLICAÇÃO DO MODELO SWAN**

### **4.1 Discretização do domínio de cálculo**

O domínio de cálculo do modelo SWAN foi discretizado através de duas malhas rectangulares, uma que cobre toda a região do estuário do Tejo, incluindo a sua embocadura e a zona marítima adjacente, e outra menor, encaixada na primeira, que contém a região próxima à praia do Alfeite, Figura 12.

A malha maior (global) possui as dimensões 42 km por 40.2 km, e é composta de unidades quadrangulares de 300 m de lado. A malha menor (encaixada) foi definida com uma resolução de 60 m, cobrindo um quadrado de 9 km por 9 km. Na malha encaixada foi definido um ponto P1 onde se extraíram resultados das execuções do SWAN (Figura 12).

A execução do SWAN inicia-se na malha global considerando o estuário em repouso e introduzindo um campo de ventos uniforme sobre todo o domínio. Os resultados deste domínio permitem definir as condições de fronteira da malha encaixada. Nesta malha e com as mesmas condições de vento, executa-se novamente o SWAN, para determinar a agitação marítima na praia do Alfeite.

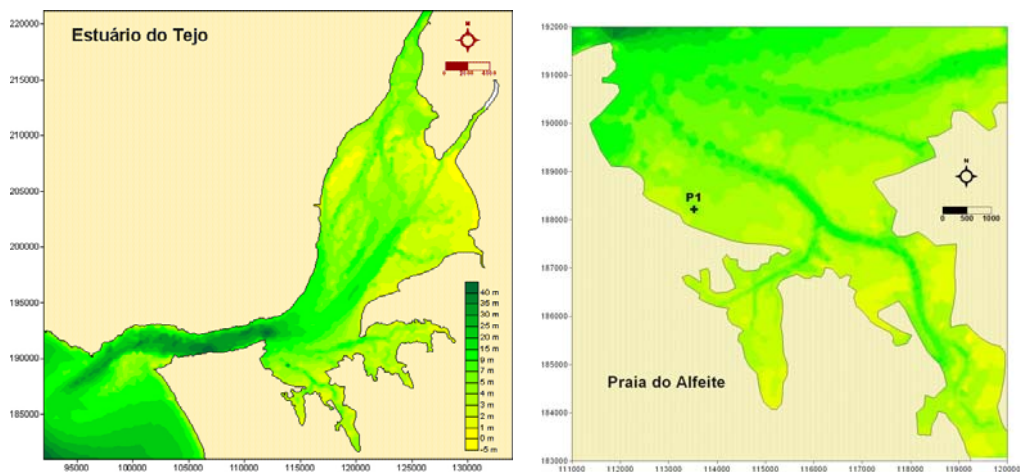


Figura 12 – Definição das malhas global e encaixada do modelo SWAN e localização dos pontos próximos da praia do Alfeite para a obtenção dos resultados.

## 4.2 Condições de cálculo

Após alguns testes de utilização do modelo SWAN quanto à geometria e definição das malhas, do espectro direccional e dos pontos de colecta de dados, procedeu-se à sua execução considerando apenas o vento como variável forçadora do sistema.

A execução do SWAN no estuário do Tejo e a caracterização da agitação na zona adjacente à praia do Alfeite foram realizadas para as seguintes condições:

- Regime de ventos (6 anos) definido a partir das medições efectuadas pelo Instituto de Meteorologia na estação meteorológica “Lisboa-Gago Coutinho”, no período de 1999 a 2004, ver secção 3.2;
- Ventos medidos no dia 29 de Janeiro e 3 de Outubro de 2006.

Para os cálculos do SWAN, o espectro direccional foi definido a partir da discretização de um espectro em frequência contendo 21 intervalos, de 0.070 Hz a 2.0 Hz, com distribuição logarítmica e de uma discretização em direcção cobrindo os 360°, dividida em 144 intervalos ( $\Delta\Theta = 2.5^\circ$ ). Todas as execuções, com a versão 40.41 do SWAN, foram realizadas em modo estacionário, sem a presença de correntes ou agitação marítima proveniente da barra do Tejo.

Os fenómenos físicos incluídos nas execuções foram a geração, a refacção, a difracção, o empolamento e a rebentação por influência do fundo e do excesso de declividade (*whitecapping*). Foram consideradas também as interacções entre triades de ondas (*triad wave-wave interactions*) e a geração de harmónicas (*frequency shifting*). Neste trabalho, não foram consideradas as correntes de maré nem a variação do nível de água no interior no Estuário do Tejo, isto é, a altura de maré não variou ao longo do domínio de cálculo.

## 4.3 Regime de agitação marítima com base no regime de ventos obtido na estação meteorológica “Lisboa-Gago Coutinho”

Para a obtenção do regime de agitação marítima na praia do Alfeite utilizaram-se os dados de ventos (7825 valores) medidos na estação meteorológica “Lisboa-Gago Coutinho”, no período de 1999 a 2004, Figura 3 e Figura 4.

No entanto, como a determinação com o modelo SWAN das características da agitação marítima correspondentes a 7825 pares de valores de intensidade e direcção do



vento seria impraticável do ponto de vista do esforço computacional, optou-se pela construção de uma matriz de transferência entre as condições de vento constantes no estuário e a agitação marítima no ponto P1 em frente à praia do Alfeite. Esta matriz de transferência foi construída da seguinte forma:

- ❖ Definiu-se o conjunto de condições de vento (intensidade e direcção) que cobrem a gama de direcções e velocidades do regime de ventos;
- ❖ Para cada uma dessas condições, aplicou-se o modelo SWAN e obtiveram-se as características da agitação marítima (H, T e  $\Theta$ ) no ponto P1 em frente à praia do Alfeite;
- ❖ Efectuou-se a compilação das características da agitação (H, T e  $\Theta$ ) obtidas para o conjunto de condições de vento, no ponto P1. Definiu-se, assim, a matriz de transferência correspondente.

Uma vez definida a matriz de transferência, foram realizadas interpolações correspondentes às 7825 medições de ventos existentes, e, assim, obtidas as características da agitação marítima no ponto P1, definindo deste modo o regime de agitação marítima correspondente.

Nestes cálculos, os níveis de água considerados correspondem aos níveis de preia-mar e de baixa-mar: +3.8 m ZH e +0.6 m ZH, respectivamente.

Os resultados do SWAN, em qualquer ponto do domínio e, mais concretamente no ponto P1 da Figura 5, foram a altura significativa de onda (HS), os períodos médio (TZ) e de pico (TP), a direcção média ( $\Theta_m$ ) e de pico ( $\Theta$ ), o comprimento de onda (L), o nível de água ( $\eta$ ) e a dispersão direccional.

Os resultados obtidos naquele ponto em frente à praia do Alfeite para os níveis de preia-mar e baixa-mar, Figura 13 e Figura 14, foram utilizados para o cálculo do regime de agitação marítima em frente à praia.

Da Figura 13 e da Figura 14, pode-se constatar que:

#### Preia-Mar

- As alturas de onda significativas variam entre 0.0 m e 0.7 m, em que as classes entre 0.0 m e 0.3 m são as com maior frequência e a que regista o maior número de ocorrências é a de 0.0 m e 0.1 m. Em geral, as alturas de onda maiores estão associadas a maiores períodos;
- Os períodos de zero ascendente podem atingir valores até 3 s. As classes mais frequentes são entre 0.0 s e 1.5 s sendo a que regista o maior número de ocorrências a de 0.5 s e 1.0 s;
- As direcções de onda mais frequentes, por ordem decrescente, são: N, NE, SW, NW, W, S, E, SE. Em geral, os períodos de onda acima de 1.5 s estão associados às direcções de N e NW (com maior *fetch*). Da mesma forma alturas de onda superiores a 0.3 m estão associadas a direcções de onda de N e NE.

#### Baixa-Mar

- As alturas de onda significativas variam entre 0.0 m e 0.4 m, em que as classes entre 0.0 m e 0.2 m são as com maior frequência e a que regista o maior número de ocorrências é a de 0.0 m e 0.1 m. Em geral, as alturas de onda maiores estão associadas a maiores períodos;
- Os períodos de zero ascendente podem atingir valores até 1.5 s. As classes mais frequentes são entre 0.0 s e 1.0 s sendo a que regista o maior número de ocorrências a de 0.5 s e 1.0 s;
- As direcções de onda mais frequentes, por ordem decrescente, são: N, NE, NW, SW, W, S, SE, E. Em geral, os períodos de onda acima de 1.5 s estão associados às direcções de N e NW (com maior *fetch*). Da mesma forma, alturas de onda superiores a 0.3 m estão associadas a direcções de onda de N e NE.

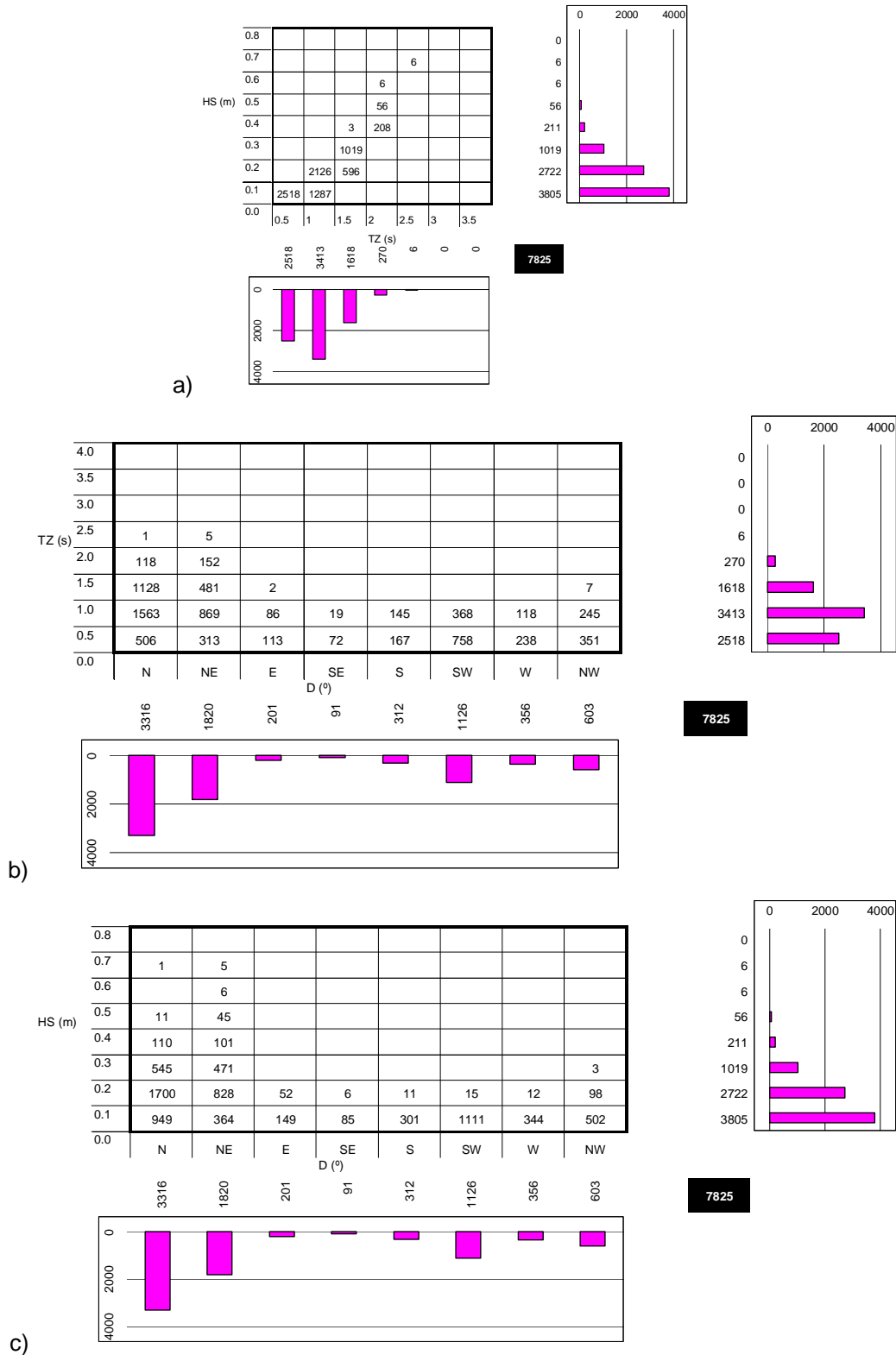


Figura 13 - Regime de agitação marítima em frente à praia do Alfeite. Relações a) H-TZ; b) D-H e c) D-TZ. Nível de maré de preia-mar: +3.8 m ZH.



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

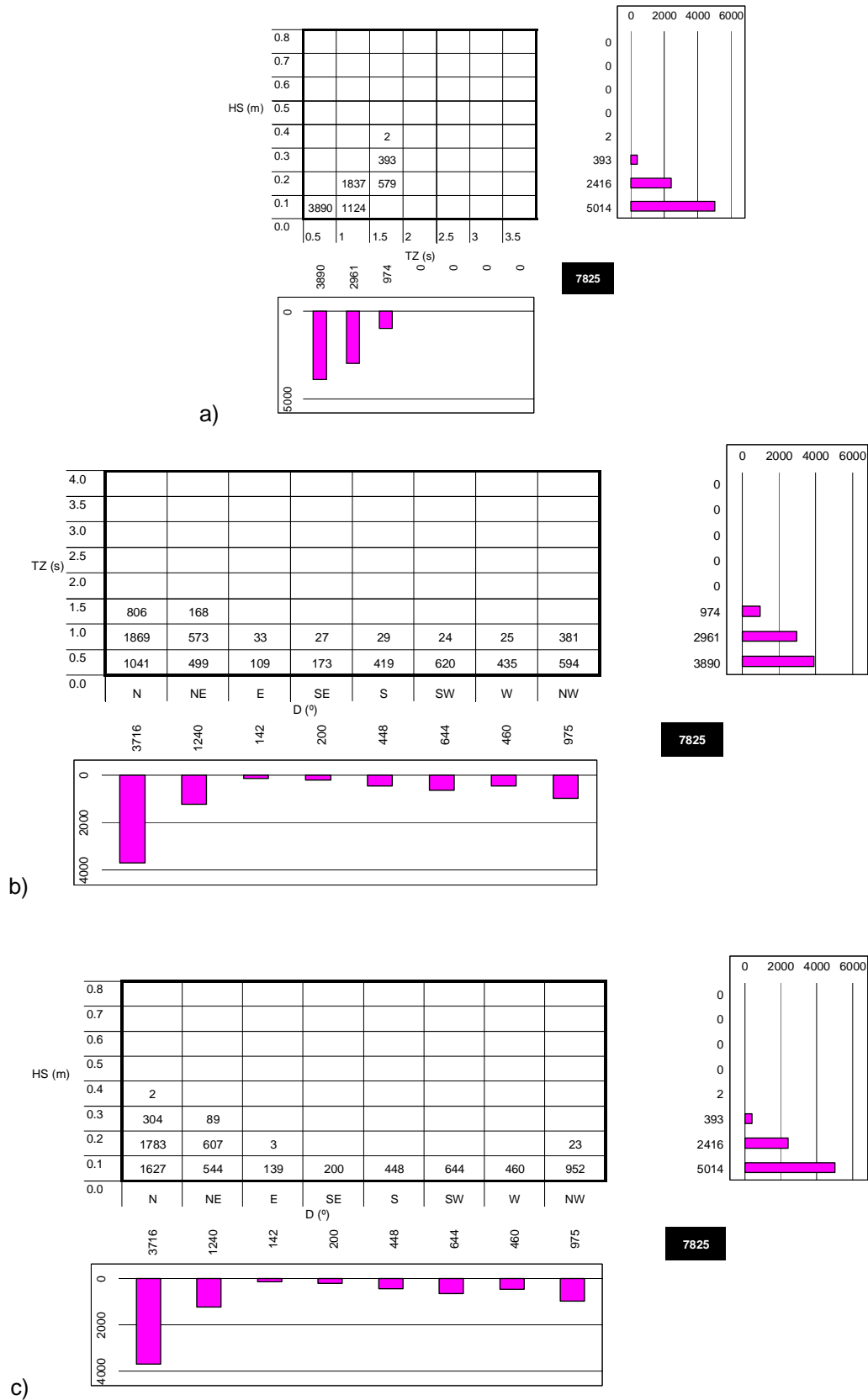


Figura 14 - Regime de agitação marítima em frente à praia do Alfeite. Relações a) H-TZ; b) D-H e c) D-TZ. Nível de maré de baixa-mar: +0.6 m ZH

#### 4.4 Dia 29 de Janeiro de 2006

Um caso interessante de aplicação do modelo SWAN correspondeu à simulação da situação de temporal verificada no dia 29 de Janeiro de 2006, com vento de grande intensidade soprando ao longo da maior dimensão do estuário (10.8 m/s e NE). Note-se que neste dia as condições de vento foram bastante intensas para além de se ter verificado a queda de neve em Lisboa, facto que não ocorria há 30 anos. Nesse dia, procedeu-se à observação visual da agitação marítima apresentando-se na Figura 15 um aspecto do estado do mar observado na praia nesse dia. A altura de onda estimada foi de cerca de 1 m.



Figura 15 – Situação de temporal na praia do Alfeite em 29 de Janeiro de 2006.

Com os dados de intensidade e direcção do vento obtidos do Instituto de Meteorologia, executou-se o modelo SWAN do mesmo modo já referido no item anterior e com a inclusão dos mesmos fenómenos físicos. O nível de maré considerado foi de +3.8 m ZH, correspondente ao valor de praia-mar desse dia.

Os resultados do modelo SWAN (Figura 16) mostram a possibilidade de ocorrência de ondas com altura significativa máxima de 1 metro em frente à praia do Alfeite, que é muito semelhante à estimada visualmente, Figura 15.

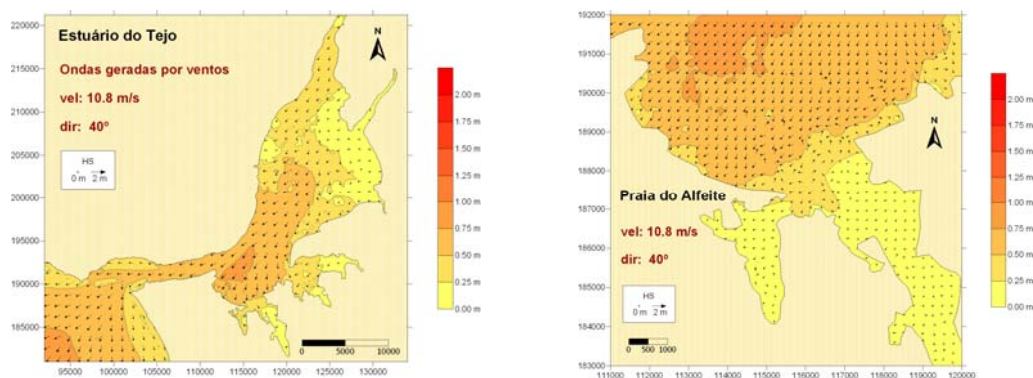


Figura 16 - Resultados do modelo SWAN para as condições de ventos do dia 29 de Janeiro de 2006.

#### 4.5 3 de Outubro de 2006

O modelo SWAN foi aplicado para as condições de vento verificada ao longo do dia 3 de Outubro. O objectivo é comparar os resultados numéricos com os parâmetros dos estados de agitação medidos *in situ* nessa data, secção 3.3.2, Figura 6 e Figura 7.

Assim, para as condições de vento (intensidade e direcção) indicadas em <http://www.wunderground.com/history/airport/LPPT/2006/10/03/DailyHistory.html>, das 09:00 às 18:00, na estação “Lisboa-Aeroporto”, com intervalo de 30 minutos, Quadro 3, efectuaram-se cálculos com o modelo SWAN, na estação denominada por Lisboa-Aeroporto. Os níveis de maré foram os correspondentes ao nível médio e ao nível de preia-mar.

Quadro 3 – Resumo das condições de vento (intensidade e direcção) indicadas em <http://www.wunderground.com/history/airport/LPPT/2006/10/03/DailyHistory.html>, das 09:00 às 18:00, com intervalo de 30 minutos, no dia 3 de Outubro de 2006.

Hora	Condições	Vento	
		Velocidade (m/s)	Direcção
09:00	Partly Cloudy	3.08	WNW
09:30	Partly Cloudy	3.08	WNW
10:00	Partly Cloudy	2.06	W
10:30	Partly Cloudy	3.08	WNW
11:00	Partly Cloudy	4.11	W
11:30	Partly Cloudy	4.11	W
12:00	Mostly Cloudy	4.11	WNW
12:30	Mostly Cloudy	4.65	WNW
13:00	Scattered Clouds	4.11	WNW
13:30	Mostly Cloudy	4.65	W
14:00	Scattered Clouds	6.17	W
14:30	Scattered Clouds	6.70	W
15:00	Scattered Clouds	6.70	W
15:30	Scattered Clouds	6.17	NW
16:00	Partly Cloudy	7.20	W
16:30	Mostly Cloudy	6.70	W
17:00	Mostly Cloudy	5.68	W
17:30	Mostly Cloudy	6.17	W
18:00	Mostly Cloudy	5.68	W

Na Figura 17 apresentam-se os resultados numéricos obtidos com o modelo SWAN para uma das condições de vento verificadas no dia 3 de Outubro, quer em todo o estuário do Tejo, quer na zona adjacente à praia do Alfeite.

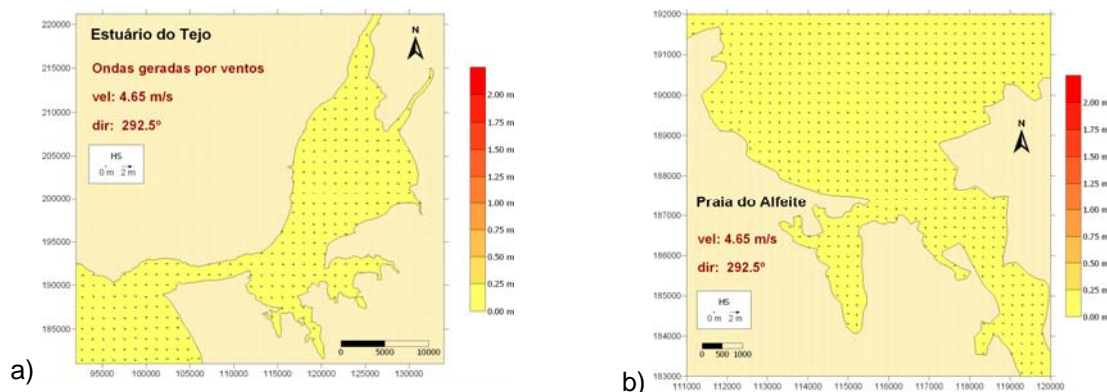


Figura 17 – Altura significativa e direcção média da agitação marítima obtidas com o modelo SWAN para vento com velocidade ( $U_{10}$ ) de 4.65 m/s e rumo de NW: a) estuário do Tejo; b) praia do Alfeite.

Os valores da altura significativa, período e direcção de pico obtidos no ponto P1, calculados com o modelo numérico SWAN para as características de vento já referidas, são apresentados no Quadro 4, para os níveis de maré médio e de preia-mar. Neste caso, só se apresentam os valores correspondentes ao período em que houve medições, das 11:30 às 14:30.

Quadro 4 – Características da agitação marítima no ponto P1 para as condições de vento (intensidade e direcção) das 11:30 às 14:30 no dia 3 de Outubro de 2006, para os níveis de maré de +2.2 m ZH e de +3.8 m ZH.

Hora	Condições	Vento		Nível de Maré 2.2 m ZH			Nível de Maré 3.8 m ZH			
		Velocidade (m/s)	Direcção	Prof (m)	HS (m)	TP (s)	DP (°)	HS (m)	TP (s)	DP (°)
11:00	Partly Cloudy	4.11	W	2.60	0.060	1.11	318.8	0.060	1.11	318.8
11:30	Partly Cloudy	4.11	W	2.60	0.060	1.11	318.8	0.060	1.1	318.8
12:00	Mostly Cloudy	4.11	WNW	2.60	0.088	1.30	343.8	0.088	1.3	343.8
12:30	Mostly Cloudy	4.65	WNW	2.60	0.101	1.30	343.8	0.102	1.3	346.3
13:00	Scattered Clouds	4.11	WNW	2.60	0.088	1.30	343.8	0.088	1.3	343.8
13:30	Mostly Cloudy	4.65	W	2.60	0.069	1.11	323.8	0.069	1.1	321.3
14:00	Scattered Clouds	6.17	W	2.60	0.095	1.30	326.3	0.096	1.3	326.3
14:30	Scattered Clouds	6.70	W	2.60	0.104	1.53	326.3	0.105	1.5	328.8

Na Figura 18 e na Figura 19 apresenta-se a comparação dos resultados medidos e calculados pelo SWAN ao longo desse dia.

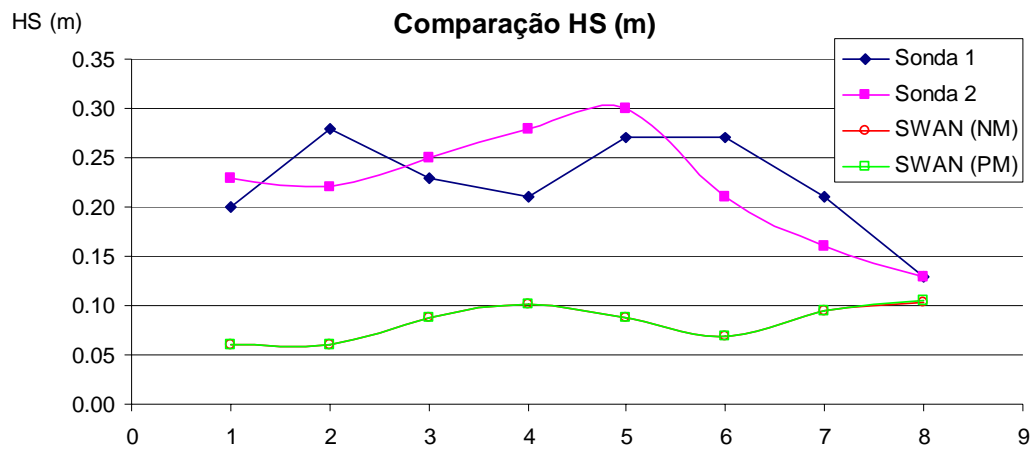


Figura 18 – Comparação entre medições e resultados numéricos de HS.



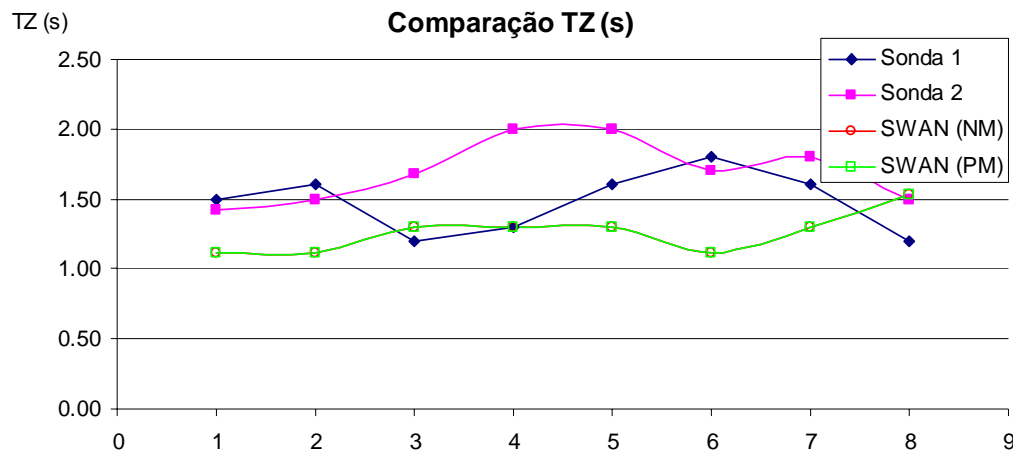


Figura 19 – Comparação entre medições e resultados numéricos TZ.

Das figuras anteriores, pode verificar-se que os resultados numéricos, em termos de alturas de onda significativa, são inferiores às medições efectuadas com as sondas resistivas e da mesma ordem de grandeza que o *mini-troll* ( $HS = 0.13$  m, ver 3.3.2). Importa referir que os cálculos efectuados com base nas medições realizadas com o *mini-troll* correspondem a um período de cerca de 4 horas e não de 20 minutos como no caso das sondas resistivas.

Para estas direcções de vento (WNW e W) e velocidades reduzidas, não se verifica uma influência significativa do nível de maré nos valores de altura de onda calculados com o modelo SWAN. Em relação aos períodos de zero ascendente, verifica-se que os resultados numéricos são razoavelmente semelhantes às medições.

Existem no entanto algumas diferenças entre resultados numéricos e medições. Para estas diferenças, contribuem os seguintes factores:

#### 1. Resultados numéricos:

- As medições de vento utilizadas nos cálculos com o modelo SWAN são referentes à estação de Lisboa-Aeroporto e não foram efectuadas na praia do Alfeite, que é a zona de interesse;
- Não foram consideradas correntes de maré nas corridas do modelo;
- Admitiu-se um campo de ventos uniforme ao longo de todo o estuário, não se incluindo quaisquer variações devidas a rajadas de vento;
- A difracção do modelo SWAN é introduzida de forma simplificada, o que pode levar a aproximações dos resultados em zonas onde este fenómeno é mais significativo.
- O modelo não considera as ondas geradas pelas embarcações que se deslocavam próximo da zona de estudo.

#### 2. Medições:

- As séries temporais obtidas com as sondas resistivas são pequenas;
- As características físicas das sondas resistivas não são as mais adequadas para medições *in situ*, em água salgada e com sedimentos em suspensão variáveis;
- Devido à referida inadequação do equipamento às condições do local, houve importantes dificuldades de calibração das sondas;
- As reduzidas portabilidade e estabilidade das sondas resistivas dificultaram a sua colocação adequada, principalmente durante os períodos de preia-mar.



## 5. CONCLUSÕES

Tendo em vista a caracterização da agitação marítima na praia do Alfeite, uma praia no interior do estuário do Tejo, descreveram-se nesta comunicação as medições efectuadas no dia 3 de Outubro de 2006 assim como a utilização do modelo numérico SWAN para simular a geração de agitação marítima pelo vento no interior do estuário do Tejo.

A análise espectral dos sinais obtidos em diversos períodos do dia 3 de Outubro de 2006, tanto com as sondas resistivas como com um transdutor de pressão, permitiu a identificação das principais características da agitação marítima no local para esses períodos. Em geral, verifica-se que:

- ▶ O espectro da agitação na zona em estudo tem geralmente um único pico, mas por vezes tem um pico secundário. O mais intenso destes picos (para frequências de pico  $f_p$  à volta de 0.12 Hz,  $T_p \sim 8$  s) refere-se à agitação marítima preponderante. O outro pico, por vezes importante, tem frequência de 0.18 Hz - 0.20 Hz e período de cerca de 5 s. Observa-se por vezes ainda uma componente de longo período ( $\sim 40$  s a 50 s) resultante provavelmente de passagens de embarcações na vizinhança do local de recolha dos dados durante o período de observação.
- ▶ As alturas significativas registadas ao longo dos diversos períodos de medição variam entre 0.13 m e 0.30 m. Assim, a agitação é pouco pronunciada neste local, sendo a variabilidade mencionada também resultado da passagem das embarcações no estuário. A altura de onda significativa obtida com o transdutor de pressão foi de 0.13 m.
- ▶ Os períodos médios TZ, calculados através dos momentos dos espectros, apresentam geralmente valores muito baixos (de 1.2 s a 2.0 s). Com o transdutor de pressão obteve-se o valor de 4.5 s.
- ▶ Os períodos de pico TP, calculados através dos momentos dos espectros, apresentam valores de 5.0 s a 9.4 s. Com o transdutor de pressão obteve-se o valor de 8.7 s.

Da análise das medições, resulta que os estados de mar obtidos não se mantêm constantes ao longo do mesmo dia. Esta variação pode dever-se à variação do vento ao longo do dia bem como ao frequente atravessamento do estuário por barcos de passageiros (catamarans), cujo efeito não foi retirado dos sinais analisados.

O modelo SWAN foi aplicado a um regime de ventos estabelecido a partir de medições efectuadas pela estação meteorológica "Lisboa-Gago Coutinho" de 1999 a 2004, para condições de preia-mar e baixa-mar. Esta aplicação permitiu a definição do regime de agitação próximo da praia do Alfeite. Aplicou-se também o modelo SWAN às condições de vento observadas nos 29 de Janeiro e 3 de Outubro de 2006, datas em que houve observação (qualitativa e quantitativa) da agitação marítima na praia do Alfeite.

O regime de agitação marítima no ponto seleccionado frente à praia do Alfeite caracteriza-se por: a) alturas de onda significativas entre 0.0 m e 0.7 m em preia-mar e 0.0 m e 0.4 m em baixa-mar, sendo as mais frequentes as das classes entre 0.0 m e 0.3 m em preia-mar e 0.0 m e 0.2 m em baixa-mar; b) períodos de zero ascendente até 3 s em preia-mar e 1.5 s em baixa-mar, sendo os valores mais frequentes os das classes entre 0.0 s e 1.5 s em preia-mar e 0.0 s e 1.0 s em baixa-mar; c) direcções de onda mais frequentes, por ordem decrescente, de N, NE, SW, NW, W, S, E, SE em preia-mar e N, NE, NW, SW, W, S, SE, E em baixa-mar. Verifica-se também o nível de maré influencia nas alturas de onda e períodos gerados. Quanto maior o nível de maré maiores as alturas e os períodos gerados, principalmente para as direcções com maior *fetch*. Verifica-se também que para qualquer dos valores do nível de maré, as alturas de onda maiores estão associadas a maiores períodos e às direcções de N e NW. Com efeito, a estas direcções estão associados, em geral, os períodos de onda acima de 1.5 s e alturas de onda superiores a 0.3 m para o nível de preia-mar.

Realizaram-se também simulações com velocidades do vento semelhantes às observadas nos dias 29 de Janeiro de 2006 e 3 de Outubro de 2006. No caso do dia 29 de Janeiro de 2006, os resultados do modelo SWAN mostram a possibilidade de ocorrência de



ondas com altura significativa máxima de 1 metro em frente à praia do Alfeite, que é muito semelhante à estimada visualmente.

No caso do dia 3 de Outubro de 2006, os resultados obtidos com o modelo numérico apresentam algumas diferenças em relação aos valores medidos naquela zona. Tal pode dever-se ao facto de nas corridas do modelo numérico não terem sido consideradas correntes de maré e assumir-se um campo de ventos uniforme ao longo de todo o estuário, não se incluindo quaisquer variações devidas a rajadas. Estes factores serão considerados nos cálculos a realizar brevemente. Importa referir também que o modelo SWAN não considera as ondas geradas pelas embarcações que se deslocavam próximo da zona de estudo. Por último, note-se que as medições de ventos utilizadas nos cálculos do SWAN foram efectuadas na estação de “Lisboa–Aeroporto” e não na região em estudo.

Como nota final, importa referir que as medições experimentais alcançadas neste trabalho têm carácter preliminar uma vez que as metodologias, tanto experimentais como numéricas, requerem ainda alguns aperfeiçoamentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem a Carlos Galvão e a Ana Passarinho pela ajuda nas medições realizadas e a Branca Branco pela ajuda na revisão do texto. Os autores agradecem também à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através de:

- ❖ Projecto POCTI/CTA/45431/2002 – “BERNA – Evolução de praias em zonas de *fetch* restrito: análise experimental e numérica”;
- ❖ Bolsa de doutoramento SFRH/BD/12488/2003;
- ❖ Projecto POCTI/CTA/48065/2002.

## **BIBLIOGRAFIA**

- Booij, N, Ris, R.C.; Holthuijsen, LH (1999) - A Third-generation Wave Model for Coastal Regions, Part I, Model Description and Validation, J. Geophysical Research, 104 (C4), pp. 7649-7666.
- Freire, P. (2003) – *Evolução Morfo-Sedimentar de Margens Estuarinas*. Estuário do Tejo, Portugal. Tese de Doutoramento apresentada à Universidade de Lisboa, LNEC, TPI 28, 380 pp.
- Freire, P.; Andrade, C. (1999) – *Wind-Induced Sand Transport in Tagus Estuarine Beaches. First Results*. Aquatic Ecology, 33, pp. 225-233.
- INMG (1991, 1999) - *O Clima de Portugal*. Fascículo XLIX, Volume 2 – 2<sup>a</sup> região. Lisboa.
- Santos, J. A., Capitão, R., Coli, A. B., Fortes, C. J., Freire, P. (2006) – *Previsão da agitação marítima no estuário do Tejo utilizando o modelo SWAN*, Comunicação apresentada ao 8<sup>o</sup> Congresso da Água (APRH), Figueira da Foz.
- Santos, J. A., Coli, A. B., Capitão, R., Fortes, C. J. (2007) – *Wave forecast at the Tagus estuary by using the SWAN model*, Comunicação apresentada ao ISOPE 2007, Lisboa, Julho.
- Valente, C., Freire, P., Taborda, R., 2006. Evolução morfológica da praia estuarina do Alfeite à Mesoescala. Livro de Resumos do VII Congresso Nacional de Geologia, 29 de Junho a 13 de Julho de 2006, Pólo de Estremoz da Universidade de Évora. Volume II: 437-440.