



## **MODELAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA NO ESTUÁRIO DO TEJO**

Liliana Rusu, Mariana Bernardino e C. Guedes Soares

Unidade de Engenharia e Tecnologia Naval, Instituto Superior Técnico,  
Universidade Técnica de Lisboa  
Pavilhão Central, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal  
lrusu@mar.ist.utl.pt; mariana.bernardino@mar.ist.utl.pt; guedess@mar.ist.utl.pt

### **RESUMO**

Apresentam-se os resultados de um estudo da geração e propagação de ondas no estuário do Tejo, com ênfase na identificação das situações de maior agitação marítima à entrada do canal central (área Alcântara e Santa Apolónia). As simulações foram realizadas com o modelo SWAN que permite uma descrição adequada dos processos associados à geração, propagação e dissipação da agitação marítima nas zonas de profundidade limitada, como no caso de estuários e lagoas.

A aplicação do modelo foi realizada num domínio de alta resolução que alcança toda região do estuário, incluindo também a embocadura e a Barra Grande. O forçamento do modelo realizou-se com campos uniformes e variáveis de vento, considerando também a presença das marés e correntes de marés. Com base em dados estatísticos das intensidades e direcções dos ventos da estação meteorológica do Instituto Geofísico do Infante Dom Luís no intervalo 1995-2005, foram estabelecidas as condições mais relevantes para as quais foram realizadas as simulações com campos uniformes de vento. Os campos de vento variáveis foram gerados pelos modelos MM5 e REMO.

### **1. INTRODUÇÃO**

O desenvolvimento das ondas geradas pelo vento em águas profundas foi alvo de vários estudos, sendo o mais importante JONSWAP (Hasselmann et al. 1973). Em contraste, poucos estudos tiveram como objectivo a análise dos estados do mar em águas de profundidade limitada. Baseados nas medições realizadas em águas rasas (dados de Texel, Marsen e Arsløe - TMA), Bouws et al. (1985) estabeleceram a forma espectral das vagas geradas nestas condições. Resultou o espectro TMA para as águas pouco profundas, que está relacionado com o espectro de JONSWAP através de uma relação estabelecida de Kitaigorodskii et al. (1975).

Os estudos de Young e Verhagen (1996a,b), realizados num lago de batimetria uniforme e pouco profunda, tiveram uma contribuição importante para o melhor conhecimento do crescimento das ondas num espaço limitado. Os resultados mostraram que as ondas geradas nestas condições são bem representadas pelo espectro TMA. Mais recente, o domínio de estudo de Smith et al. (2001) foi o desenvolvimento de ondas num estuário da Nova Zelândia, caracterizado por uma topografia complexa, batimetria variável devido a presença das marés e uma pista bastante limitada. A presença das correntes de marés complica ainda mais o ambiente de estudo, habitualmente característico aos todos estuários.

Tendo em consideração estas variações da forma do espectro, algumas vezes importantes, os modelos de vagas da terceira geração (como é também o SWAN) apresentam a vantagem de ultrapassarem a descrição dos estados do mar através de espectros paramétricos e,



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

concentrando-se nos processos que influenciam a forma dos espectros. Estes modelos baseiam-se na integração da equação de balanço de acção da onda e descrevem a evolução do espectro em todas as cinco dimensões (tempo, espaço geográfico e de número de onda).

Gorman e Neilson (1999) utilizaram o modelo SWAN para simular a geração e transformação das ondas no mesmo estuário da Nova Zelândia. Os resultados das simulações mostraram-se bastante bons, e portanto esta validação mostra que o SWAN é um modelo apropriado para estudar as condições no estuário do Tejo.

Pretende-se, com o presente estudo, realizar a simulação da geração e propagação das ondas no estuário do Tejo, com ênfase na identificação das situações de maior agitação marítima à entrada do canal central (área Alcântara e Santa Apolónia). Dado que o modelo SWAN permite a descrição dos processos associados à geração, propagação e dissipação da agitação marítima nas zonas de profundidade limitada, como no caso de estuários e lagoas, é um modelo matemático adequado aos presentes objectivos. O modelo calcula o desenvolvimento e propagação do espectro bidimensional (frequência e direcção) dadas as condições de vento, correntes e batimetria variável, o que significa condições não estacionárias.

Estudos anteriores realizados por Vieira e Bernardino (2005) e por Santos et al. (2006) também tiveram como objectivo a modelação da agitação marítima no estuário do Tejo, mas sem considerar a variabilidade espacial das marés e vento. Também a presença das correntes de marés não foi considerada naqueles estudos.

Uma vez que é o vento o factor gerador das ondas, o presente estudo começou pela análise das intensidades e direcções dos ventos características nesta área. Deste modo estabeleceram-se as condições mais relevantes para as quais foram realizadas as simulações do modelo SWAN. Também se consideraram campos de vento variáveis gerados pelos modelos MM5 e REMO.

## **2. CARACTERÍSTICAS DO LOCAL DE ESTUDO**

### **2.1 DESCRIÇÃO DO ESTUÁRIO DO TEJO**

O estuário do Tejo é um dos maiores estuários da Europa e representa a zona de transição onde o Rio Tejo encontra o Oceano Atlântico, e é também a zona húmida mais extensa do território nacional. Tem um comprimento de aproximadamente 80 km desde o seu limite superior (perto de Muge) até à sua embocadura (perto de S. Julião da Barra-Bugio). A batimetria é bastante irregular, com uma área pouco profunda no troço superior que consiste numa delta interior. O troço central tem uma profundidade média de aproximadamente 7m, sendo a parte mais larga do estuário. A parte terminal é um canal profundo e estreito, que acaba com a embocadura do Tejo.

Devido à orientação e dimensões reduzidas no canal, a agitação marítima proveniente do largo não se propaga em geral para o interior do estuário. Em condições de temporal, no entanto, a ondulação proveniente do oceano penetra bastante longe na Barra Grande (Rusu e Guedes Soares, 2006), mas nunca chega ao troço superior e central, onde as ondas existentes são geradas pelo vento.

A maré no estuário é de tipo semidiurna regular, com valores que variam entre 4.3m – 0.1m acima do zero hidrográfico, função da posição do marégrafo. As correntes nas Barras do Tejo são praticamente só de marés, com velocidades típicas da ordem de 1 m/s. As velocidades máximas não excedem os 2.5 m/s em maré viva, e são encontradas especialmente no canal terminal, junto à embocadura. A intensidade das correntes de deriva de vento, bem como das associadas a cheia do Tejo são desprezáveis perante a intensidade das correntes de maré (Teles et al. 2003).

### **2.2 IDENTIFICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS REGIMES DE VENTO PREDOMINANTES**

Com o objectivo de identificar os regimes de vento característicos do estuário do Tejo, foram utilizadas observações obtidas na estação meteorológica do Instituto Geofísico do Infante Dom



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

Luís em Lisboa (38°43', 09°09', 77m). O anemómetro onde foram realizadas as medições encontra-se colocado no topo de uma torre com 22.8 m de altura.

Os dados utilizados cobrem um período de mais de 10 anos entre Janeiro de 1995 e Junho de 2005, com uma resolução horária. Os dados medidos nesta estação meteorológica são apropriados para o estudo do vento no estuário uma vez que, esta se localiza relativamente próxima do rio Tejo (Rua da Escola Politécnica), e que a altura a que se encontra colocado o anemómetro permite uma boa exposição ao vento.

Foi feita uma avaliação da qualidade dos dados identificando-se vários erros, quer nas intensidades quer nas direcções. Esses erros num total de 21 ocorrências foram corrigidos manualmente, uma vez que na sua grande maioria, consistiam em dígitos inadvertidamente introduzidos e de fácil identificação.

A identificação dos regimes de vento predominantes no estuário do Tejo foi realizada através do cálculo das distribuições conjuntas de intensidade e direcção, para cada estação do ano e para a totalidade dos valores. Foram também elaborados histogramas das intensidades e das direcções de onde sopra o vento nas diferentes situações.

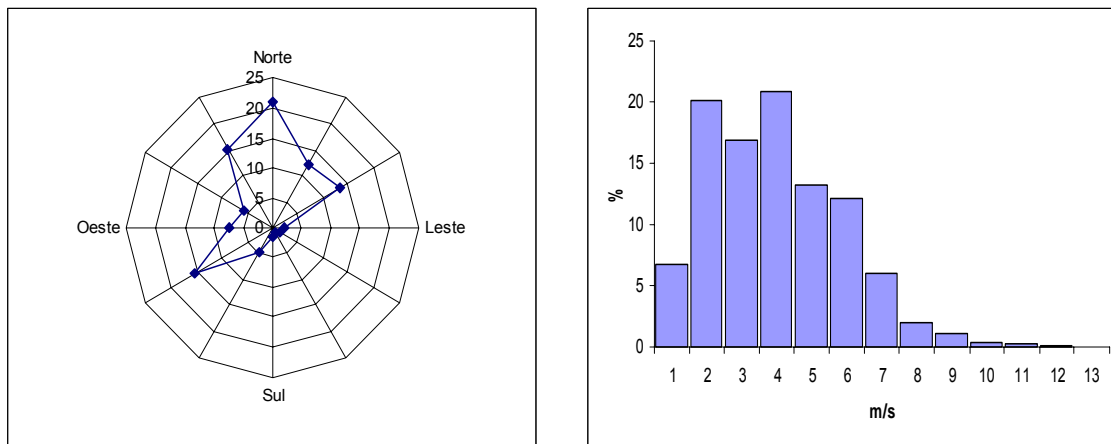


Figura 1 - Distribuição relativa das direcções e intensidades do vento observado no IGDL

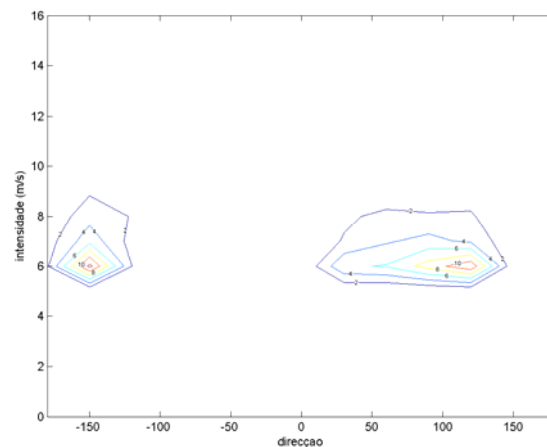


Figura 2 - Distribuição conjunta da direcção e intensidade para vento superior a 6 m/s, observado no IGDL

Observando a globalidade dos dados, verifica-se que as direcções predominantes das direcções dos ventos são o Norte, Norte – Noroeste, Leste – Nordeste e Oeste - Sudoeste,



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

como se pode observar na figura 1. Verifica-se também que mais de 70% de das ocorrências têm intensidades inferiores a 6 m/s (figura 1).

Considerando apenas os valores máximos diários, verifica-se que os rumos predominantes são o Norte – Noroeste e Oeste – Sudoeste no Verão e o Leste – Nordeste e Oeste – Sudoeste no Inverno. Considerando apenas as ocorrências superiores a 6 m/s, a distribuição conjunta representada na figura 2, mostra que são estas últimas as direcções predominantes, no caso de velocidades elevadas. Os valores extremos (superiores a 8m/s) estão principalmente associados a ventos de Oeste – Sudoeste, qualquer que seja a estação do ano.

### 2.3 SIMULAÇÃO DO VENTO NO ESTUÁRIO DO TEJO PELO MODELO MM5

O modelo MM5 é um modelo de área limitada, não hidrostático, com um sistema de coordenadas sigma, desenvolvido para simular ou prever a circulação atmosférica de mesoscala e microscala, que foi desenvolvido pela Pennsylvania State University em conjunto com o National Center for Atmospheric Research. O modelo MM5 tem capacidade de múltiplos aninhamentos a correr simultaneamente e para uma interacção de dois sentidos o relação de aninhamento deverá ser sempre de 3:1.

Este modelo foi utilizado para simular um mês de campos de vento no estuário do Tejo, nomeadamente o mês de Janeiro de 2001. O modelo foi forçado com os campos meteorológicos produzidos pelo NCEP, designados “Global final analysis FNL” que tem uma cobertura global, uma resolução de  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  e uma amostragem temporal de 6 horas. Utilizaram-se quatro domínios aninhados, de resoluções 38 km, 12.33 km, 4.1 km e 1.37 km respectivamente e a parameterização física de origem. O domínio de maior resolução tem um total de 43 por 37 pontos e cobre o estuário do Tejo.

A figura 3 representa o valor médio da intensidade do vento aos 10 m simulada pelo MM5 no domínio de maior resolução. Observam-se ventos menos intensos no estuário do que sobre o oceano e no primeiro, mais intensos, em média, na margem sul do que na margem norte, num gradiente transversal ao estuário.

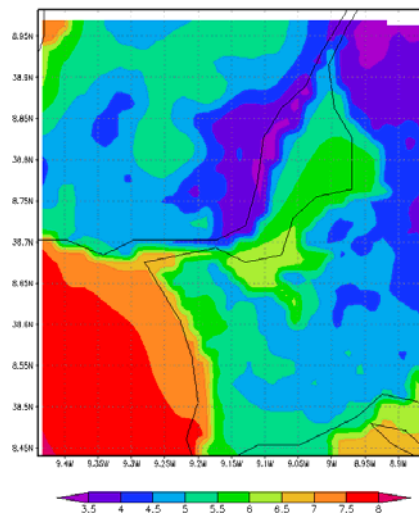


Figura 3 - Campo de vento médio simulado pelo MM5 para Janeiro de 2001.

Para validar os resultados do modelo, procedeu-se à comparação entre o vento simulado pelo MM5 num ponto com as mesmas coordenadas da estação meteorológica do IGDL e os valores nela medidos, durante o mesmo período e com a mesma amostragem temporal. Uma vez que altitude utilizada no modelo para este local (57.5 m) é muito inferior à observada (99.8m), procedeu-se à redução dos valores de ambas as séries temporais ao nível médio do mar, através de uma lei exponencial (Cook, 1997):

$$\frac{v}{v_{ref}} = \left( \frac{z}{z_{ref}} \right)^{\alpha} \quad \text{com } \alpha = 0.27 \quad (1)$$

As duas séries temporais foram comparadas observando-se um coeficiente de correlação entre elas de 75%. O modelo, no entanto subestima as observações, como pode ser observado no diagrama de dispersão da figura 4. Os valores reduzidos apresentam um valor médio de 3.44 m/s para as observações e 2.55 m/s para o modelo. Já em termos de desvios padrão, os valores são mais próximos (1.6 m/s para as observações e 1.5 m/s para o modelo). A raiz do erro médio quadrático tem aproximadamente a mesma ordem de grandeza dos desvios padrão (1.4 m/s). Embora a comparação seja pouco significativa em termos estatísticos, pois diz respeito a apenas um mês de dados, o nível de correlação obtido e o conhecimento das características do modelo sugere que os resultados são apropriados para representar a variabilidade espaço temporal da intensidade do vento no estuário. Em termos de valores absolutos o modelo claramente subestima a intensidade do vento, o que pode ser corrigido para eliminar o erro sistemático.

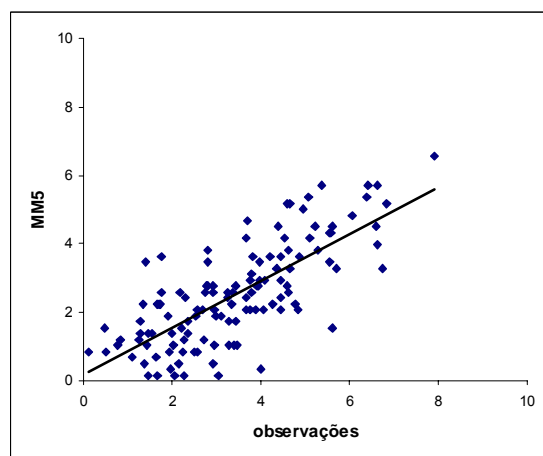


Figura 4 - Relação entre o vento medido no IGIDL e simulado pelo MM5 para o mesmo local, após redução ao nível médio do mar.

### 3. APLICAÇÃO DO MODELO SWAN

A aplicação do modelo foi realizada num domínio de alta resolução que alcança toda região do estuário, incluindo também a embocadura e a Barra Grande (figura 5). A malha é definida em coordenadas cartesianas e tem as dimensões de 41,680m por 39,560m, divididas por 240 em longitude e por 178 intervalos em latitude. A profundidade refere-se ao nível médio do mar, considerado 2.08m acima do zero hidrográfico.

Para a análise pontual dos resultados das simulações (os valores dos parâmetros das ondas) foram escolhidas oito posições distribuídas em águas de diferentes profundidades. Quatro pontos seguem a linha da costa entre Alcântara e Santa Apolónia, a outra metade fica distribuída ao longo do meio do troço central. O ponto 1 fica na maior profundidade, respectivamente de 30 m, os pontos 2, 3 e 6 na profundidade de 25 m a 20 m e 4, 5, 7 e 8 de profundidade de 14 m a 6 m.

Os cálculos numéricos do modelo SWAN realizaram-se considerando a discretização do espectro em 30 frequências espaçadas logaritmicamente desde 0.05 a 1.5 Hz, e 36 direcções igualmente espaçadas. As corridas iniciaram-se considerando o estuário em repouso e função da estabilidade dos campos forçadores do modelo (campos de vento, marés ou correntes de marés) foi escolhido o modo estacionário (caso dos campos uniformes) ou não estacionário (campos variáveis em espaço e tempo). As direcções do vento, ondas e correntes são definidas em convenção náutica.

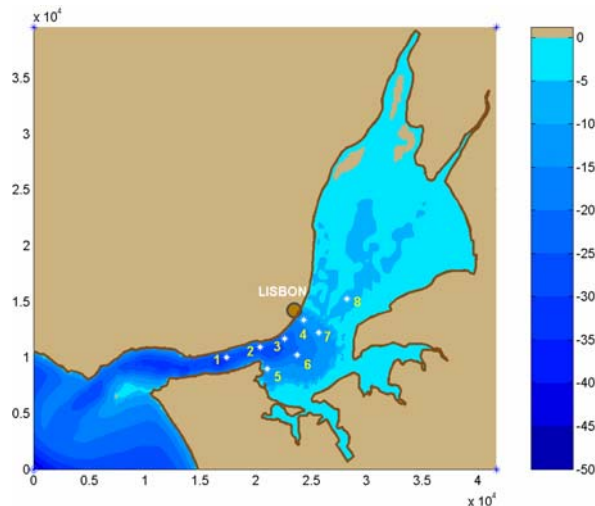


Figura 5 - A batimetria da área de estudo e a localização dos pontos de análise

Em geral foram considerados os parâmetros físicos predefinidos pelo modelo SWAN e mais realizaram-se testes de sensibilidade considerando as interações não lineares entre três ondas e a difracção.

#### 4. ESTUDOS DE AGITAÇÃO MARÍTIMA

##### 4.1 TESTES DE SENSIBILIDADE À DIRECÇÃO DO VENTO

As simulações iniciais foram efectuadas para situações idealizadas em termos de vento e altura de maré. Consideraram-se campos de vento uniformes e constante (em intensidade e direcção) durante 24 horas e o nível do mar constante, definido pelo nível médio da malha batimétrica. O objectivo destes testes foi a identificação das situações que podem gerar mais agitação marítima em todo o estuário ou em cada dum dos oito pontos considerados.

Consideraram-se as intensidades do vento de 6 m/s, 9 m/s e 12 m/s com as direcções predominantes de cada uma, consequência do estudo realizado no parágrafo 2.2. Mesmo que mais de 70% das ocorrências tenham intensidades inferiores a 6 m/s, os resultados das simulações mostram que a agitação marítima é muito baixa nestas condições.

Para os oito pontos, apresentam-se na figura 6 as alturas significativas simuladas nas condições de regimes de vento escolhidos. Nota-se com facilidade a relação entre o aumento da velocidade do vento com o aumento da altura significativa em todas as posições. Também a direcção do vento tem um papel importante, uma vez que a maior agitação marítima ocorre em situações associadas à maior pista. Em geral entre as posições 4, 6, 7 e 8 não se observa grande variação da altura significativa para a mesma intensidade e direcção do vento, ao contrário da posição 5 que fica abrigada das direcções que vem do mar. Para todas estas cinco posições, são os rumos de N e NE que têm a maior influencia. A agitação nos pontos 1, 2 e 3 situados na barra grande é mais influenciada pelos ventos que sopram da direcção do mar. O caso da velocidade do vento de 12 m/s (figura 6c) associada a direcção de 210°, produz a maior agitação marítima, quer seja nas barras quer no interior do estuário.

Nas figuras 7 e 8 apresentam-se os campos da altura significativa e os vectores das direcções das ondas (setas pretas) para as direcções do vento de 210° e 60° e intensidade vento de 6 m/s e 12 m/s (setas brancas). Quando a intensidade do vento é igual a 6 m/s os campos da altura significativa são aproximadamente iguais para as duas situações (figura 7). Na parte Sul tem maior influência o vento da direcção 60°, e na parte Norte o vento da direcção 210°, tanto no canal como no interior do estuário. Quando a intensidade do vento de direcção 210° sobe para os 12 m/s aparecem as maiores alturas significativas na toda superfície do estuário. A figura 9 apresenta os mesmos parâmetros das ondas em condições de vento com intensidade de 12 m/s e direcções de 240°, 270° e 360°. Pode-se observar também que em todas as situações é a direcção do vento que condiciona a direcção da propagação das ondas.



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

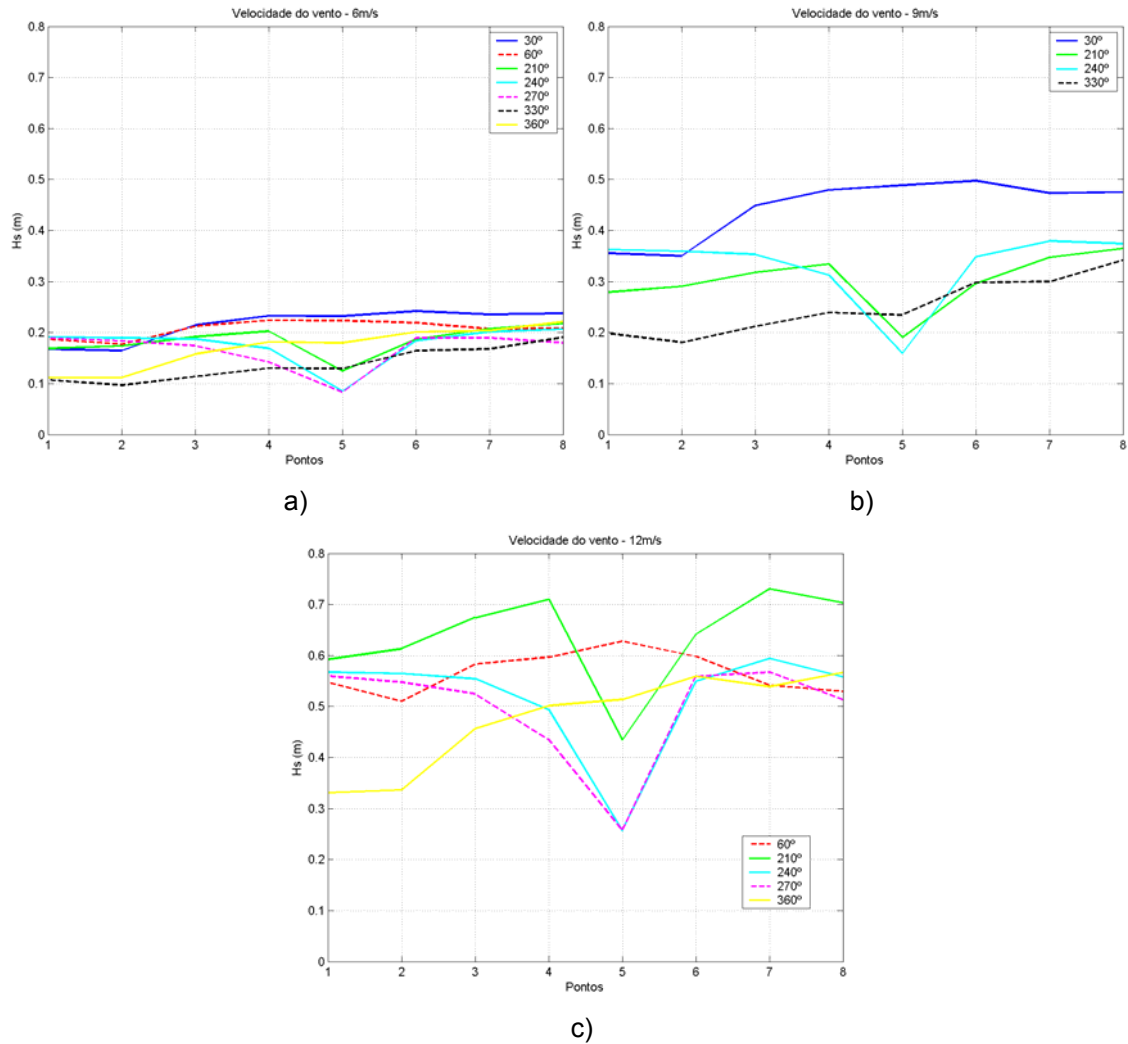


Figura 6 - A influência da direcção e intensidade do vento sobre a altura significativa das ondas nos oito pontos

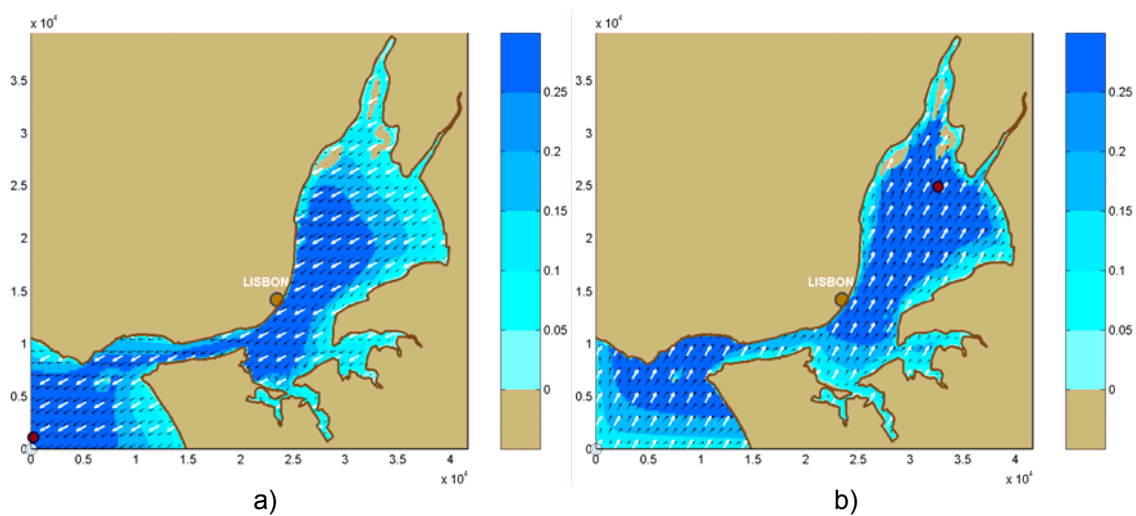


Figura 7 - Campos de altura significativa e direcção das ondas para o caso: intensidade do vento 6 m/s, a) direcção do vento 60°, b) direcção do vento 210°

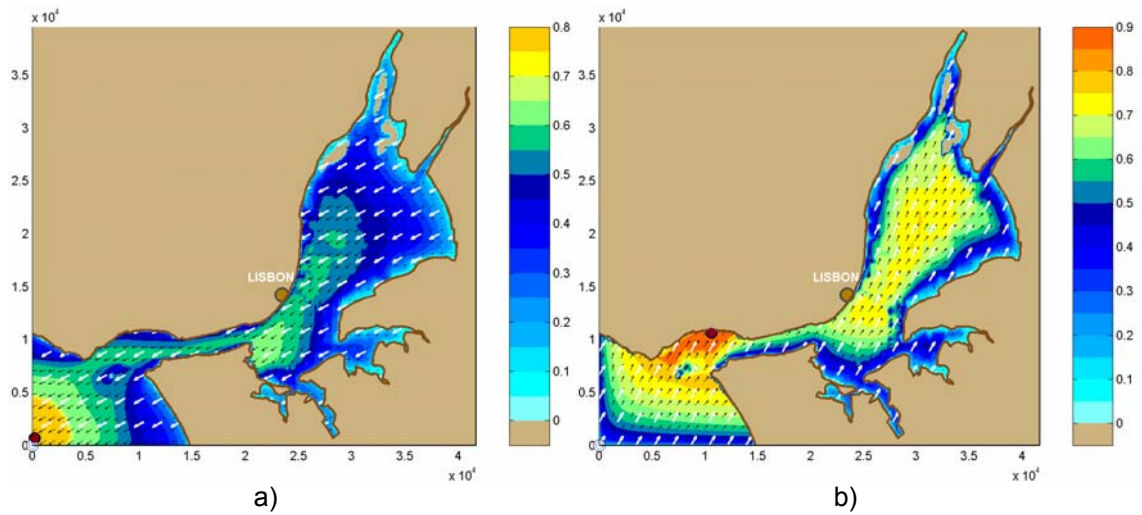


Figura 8 - Campos de altura significativa e direcção das ondas para o caso: intensidade do vento 12 m/s, a) direcção do vento 60°, b) direcção do vento 210°

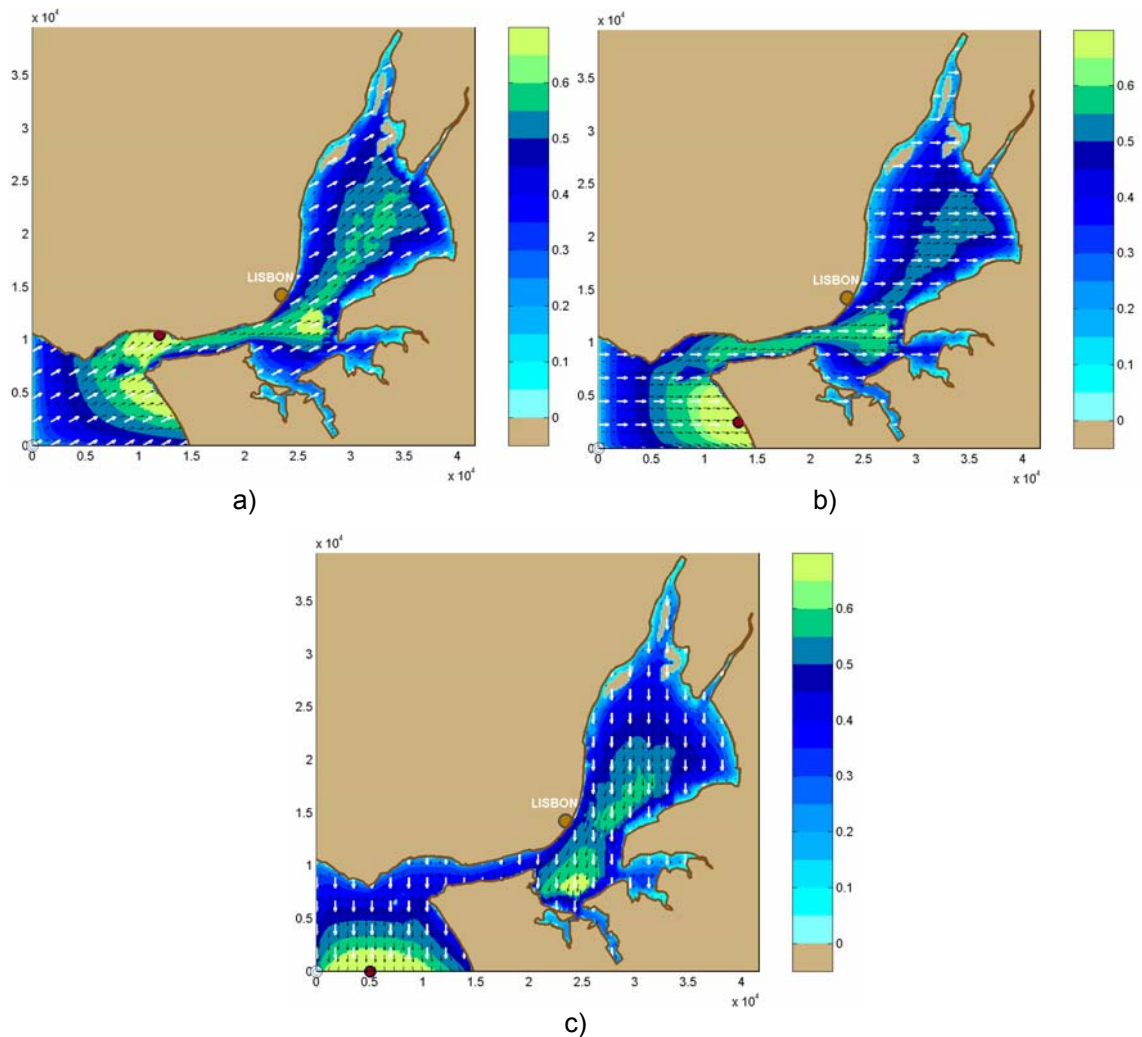


Figura 9 - Campos de altura significativa e direcção das ondas para o caso: intensidade do vento 12 m/s, a) direcção do vento 240°, b) direcção do vento 270°, c) direcção do vento 360°





## 4.2 TESTES DE SENSIBILIDADE A CORRENTES DE MARÉS

### 4.2.1 Alguns aspectos teóricos sobre as interações ondas-correntes

A interação ondas-correntes é um problema de propagação das ondas num meio móvel, não homogéneo e não isotrópico, dispersivo e dissipativo. Quando as ondas se propagam em tal meio, a cinemática e a dinâmica das partículas da água são alteradas substancialmente em comparação com a ausência da corrente. A cinemática das ondas inclui o efeito da profundidade e das correntes na relação da dispersão e a alteração do comprimento da onda devido a uma corrente com sentido oposta ou a favor ao de propagação da onda. A dinâmica das ondas trata da energia e a conservação da acção das ondas que produzem alterações dos parâmetros das ondas integrados.

Longuet-Higgins e Stewart (1960, 1964) apresentaram pela primeira vez a equação correcta da energia para o caso da sobreposição das ondas com uma corrente variável, provando a existência da transferência da energia entre ondas e correntes. Bretherton e Garret (1968) introduziram o conceito da acção das ondas e mais tarde Christoffersen e Jonsson (1980) mostraram como introduzir a dissipação na equação de conservação da acção das ondas. Jonsson (1990) realiza uma revisão das interações ondas-correntes. Huang et al. (1972) descreveram a transformação da forma do espectro das ondas na presença das correntes, mas sem considerar o efeito de rebentação induzido por uma corrente oposta. Hedges et al. (1981, 1985) modificou o modelo teórico de Huang et al. (1972) considerando este efeito.

Hedges et al. (1985) e Nwogu (1993) trouxeram um suporte experimental às formulações teóricas. Mais recente, os estudos de Guedes Soares et al. (2000) e Guedes Soares e Pablo (2006) confirmaram o facto que a propagação das ondas na presença das correntes produzem diferenças na distribuição da energia espectral das ondas. Para estados do mar com corrente a favor observa-se uma diminuição de energia, o contrário acontecendo para estados do mar com uma corrente oposta.

A frequência total de uma onda que se propaga na presença de uma corrente com a velocidade  $\vec{U}$  é definida pela expressão

$$\omega = \sigma + \vec{k} \cdot \vec{U}. \quad (2)$$

Habitualmente  $\omega$  é a frequência observada ou absoluta e  $\sigma$  é a frequência relativa ou intrínseca, cuja dependência funcional de  $\vec{k}$  (numero de onda) é conhecida pelo nome da *relação da dispersão*

$$\sigma = \sqrt{gk \cdot \tanh kh}. \quad (3)$$

Quando as ondas se propagam num campo de corrente não estacionário e não uniforme  $\vec{U}(\vec{x}, t)$ , a frequência relativa pode variar em espaço e tempo. Neste caso a energia da onda não se conserva. Num meio em movimento só a acção da onda  $N = \hat{\psi}(\vec{k}, \vec{x}, t)/\sigma$  é conservada. Se a dissipação, geração e as interações onda-onda são desprezáveis, a conservação da acção da onda reduz-se a

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\hat{\psi}}{\sigma} \right) + \nabla_h \left[ (\vec{C}_g + \vec{U}) \frac{\hat{\psi}}{\sigma} \right] = 0. \quad (4)$$

Da equação anterior resulta que a taxa local de variação da acção de onda é equilibrada pela divergência do fluxo de acção, uma quantidade que flui relativamente ao meio em movimento com a velocidade absoluta do grupo  $C_g$

$$C_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{\partial \sigma}{\partial k} + \vec{U} \cdot \frac{\vec{k}}{|\vec{k}|} > 0. \quad (5)$$

A velocidade absoluta do grupo  $C_g$  define a direcção do raio da onda. A velocidade local de grupo  $\partial \sigma / \partial k$  está associada com a normal à frente da onda. Em condições extremas quando

$\partial\sigma/\partial k = -\bar{U} \cdot \bar{k}/|\bar{k}|$ , a componente espectral não pode propagar-se muito longe na direcção oposta da corrente. Teoricamente, a densidade espectral de energia local  $\hat{S}(\omega, \theta, \bar{x})$  tende para infinito. Usualmente, neste caso de propagação, as ondas mostram a tendência para encurtar ou aumentar a altura e o declive. Esta situação corresponde ao fenómeno de rebentação que ocorre associado a um valor limite da corrente.

A refacção das ondas por uma corrente é governada pela lei de Snell:  $k \cdot \sin \beta = \text{constante}$ , onde  $\beta$  é o ângulo entre a direcção da onda e a normal à direcção da corrente

$$\frac{\sin \beta_2}{\sin \beta_1} = \frac{L_2}{L_1} \quad (10)$$

(Jonsson, 1990). Neste caso, os valores  $\beta_1$  e  $L_1$  representam o ângulo incidente e o comprimento da onda no primeiro regime da corrente ( $U_1$ ),  $\beta_2$  e  $L_2$  sendo os parâmetros para o segundo regime da corrente, respectivamente ( $U_2$ ).

#### 4.2.2. Resultados das simulações realizadas na presença das correntes

Nesta secção apresentam-se os resultados das simulações realizadas com o modelo SWAN em condições semelhantes às apresentadas no parágrafo 4.1, mas consideram-se agora também a presença das marés e correntes de marés, e vento constante de intensidade 12 m/s e de direcção 210°. Para melhor observar os efeitos induzidos pela interacção ondas-correntes, uma vez que há uma variação bastante elevada não só entre a máxima e mínima das marés (até aproximadamente 4 m), mas também ao longo do estuário, fizeram-se inicialmente simulações considerando apenas os campos das marés (figura 10). De seguida fizeram-se as simulações considerando também a presença das correntes (figura 11).

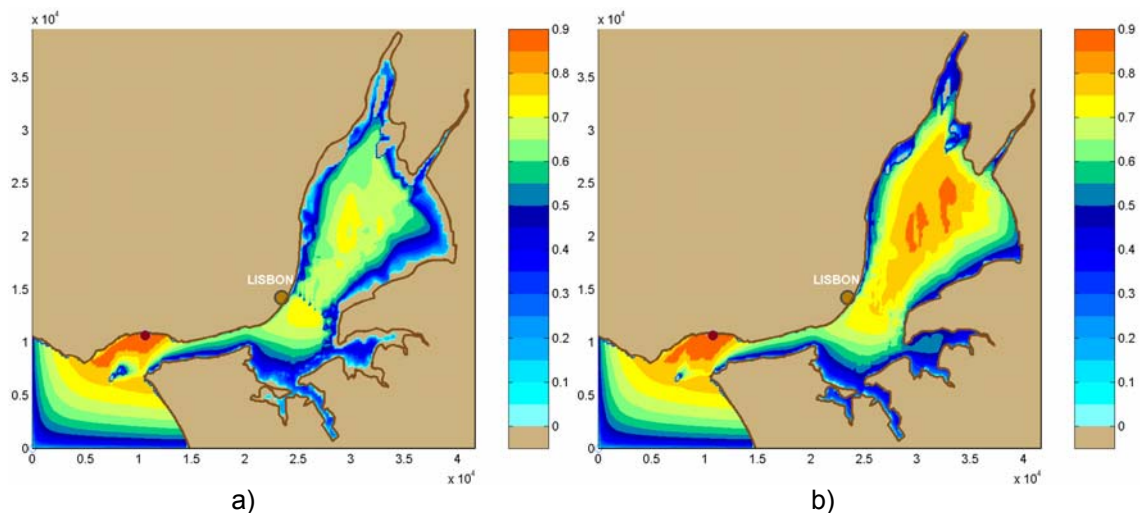


Figura 10 – Campos de altura significativa das ondas para:  
a) baixa-mar, b) preia-mar

A análise dos resultados das simulações mostra um aumento de aproximadamente 0.1-0.15 m da altura significativa na área da embocadura do estuário do Tejo (figura 11a) devido a presença de uma corrente oposta que chega à intensidade máxima de 1.76 m/s. Pelo contrário na presença de uma corrente a favor (intensidade máxima de 1.6 m/s), produz-se uma diminuição da altura significativa de aproximadamente 0.3 m (figura 11b).

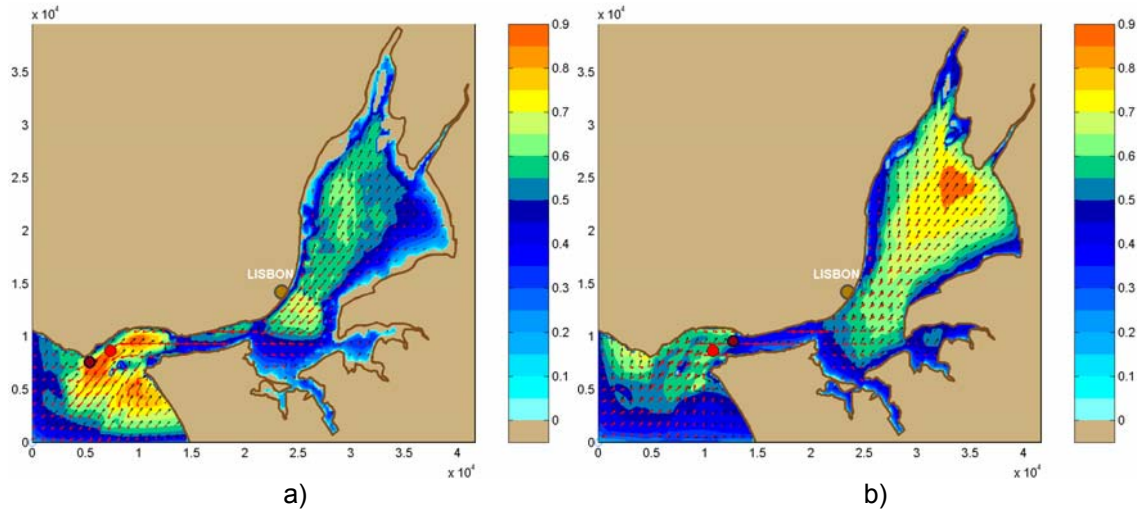


Figura 11 – Intensidade e direcção (setas pretas) da altura significativa da onda e direcção da corrente (setas vermelhas) de: a) vazante, b) enchente

### 4.3 TESTES DE SENSIBILIDADE AOS CAMPOS DE VENTO

Utilizando campos de vento que representam melhor a realidade influi na intensidade dos resultados dos modelos de agitação. Em geral, um campo de vento de maior resolução pode representar melhor a realidade. Nas simulações que seguem utilizaram-se campos de vento provenientes do modelo MM5, apresentado no paragrafo 2.3, e do modelo REMO, produzidos no âmbito do projecto Europeu HIPOCAS (Guedes Soares et al. 2002). Os últimos têm uma resolução espacial de 0.5° e temporal de 1 hora. Realizaram-se 9 dias de simulações no início do mês de Janeiro 2001, utilizando os dois campos de vento com uma resolução temporal de 6 h, visto que é esta a resolução temporal dos campos que foram produzidos pelo modelo MM5.

Na figura 11 apresentam-se os campos de altura significativa simulados pelo modelo SWAN utilizando campos de vento do modelo MM5 (figura 11a) em 2 de Janeiro de 2001 as 00 horas, e os simulados utilizando campos de vento produzidos pelo modelo REMO para a mesma data (figura 11b). Observam-se semelhanças entre os dois campos de altura significativa das ondas, no entanto devido ao facto dos campos de vento do modelo MM5 tomarem valores elevados (atinge um máximo de 11.67m/s em comparação com o máximo de 9.96 m/s do REMO), estes produzem nalgumas áreas agitação marítima mais intensa.

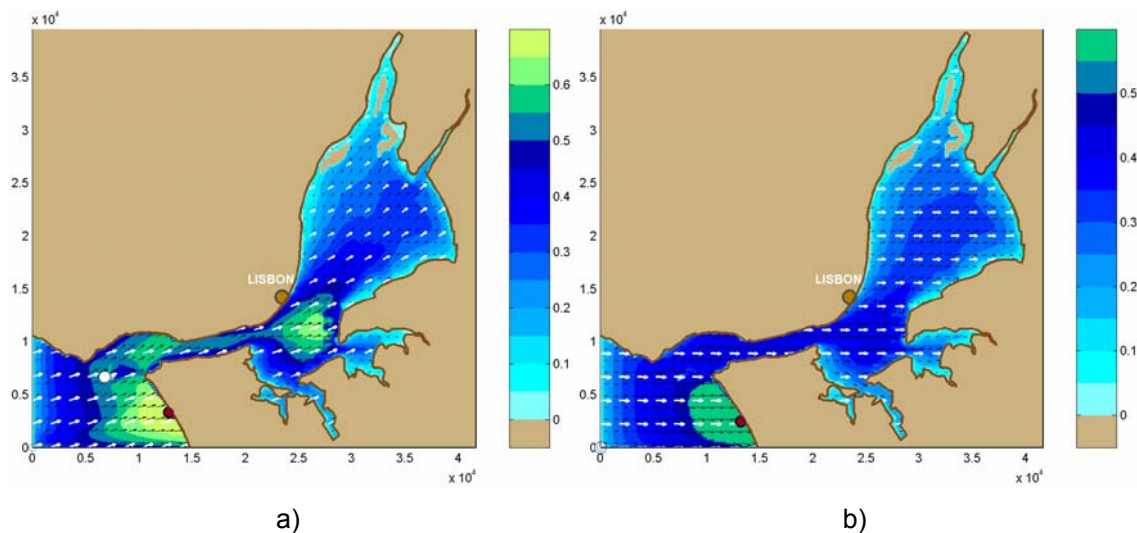


Figura 11 – Campos de altura significativa, direcção das ondas e vento, 2001/01/02h00, campos de vento produzidos pelo: a) modelo MM5; b) modelo REMO



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

O valor máximo do campo da altura significativa atinge no primeiro caso 0.69 m, e no segundo apenas 0.53 m. A figura 12 apresenta as alturas significativas simuladas pelo modelo SWAN no ponto 8.

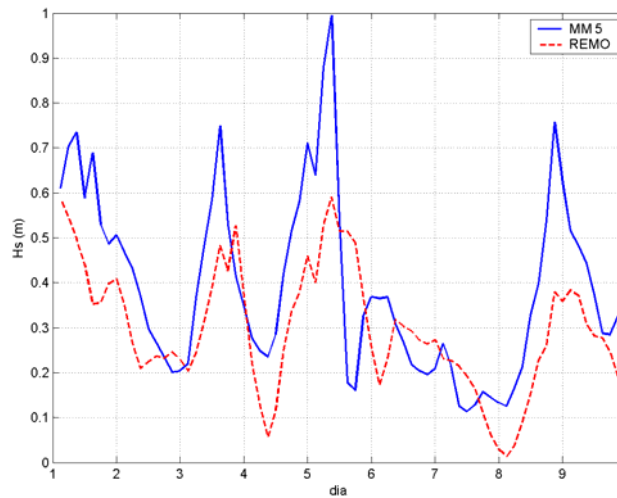


Figura 12 - Comparação entre as alturas significativas simulados de modelo SWAN no ponto 8, utilizando campos de vento produzidos pelos modelos MM5 e REMO

### 5. ANALISE DOS RESULTADOS

Os resultados das simulações realizadas em diferentes condições mostraram que para a intensidade mais elevada do vento (12 m/s) a maior agitação marítima no estuário (tanto nas barras como no interior) é gerada pelos ventos de Sul-Sudoeste (210°). No caso da intensidade mais moderada (6 – 9 m/s), os ventos das direcções Norte-nordeste (30°) e Leste-Nordeste (60°) produzem maior agitação marítima no interior do estuário.

A presença das correntes de marés influencia a agitação marítima do estuário devido às interacções ondas-correntes. Na embocadura do estuário aparece a maior variação da agitação marítima (de aproximadamente 0.4 m) entre preia-mar e baixa-mar. Observa-se que a corrente de enchente diminui a altura significativa das ondas, enquanto que a corrente de vazante aumenta-a.

As simulações em que foram consideradas as interacções não lineares entre três ondas não revelaram alterações significativas na agitação marítima. Isto pode ser explicado pelo facto de em geral as ondas terem períodos baixos, e também do facto deste tipo de interacção se tornar importante em situações de ondas elevadas em comparação com a profundidade. Também nos casos estudados a difracção não teve influência importante.

### 6. RECONHECIMENTO

A primeira autora foi financiada pela Fundação para a Ciência e Tecnologia através de uma bolsa de doutoramento com a referência SFRH/BD/13176/2003.

### 7. REFERÊNCIAS

Bouws, E., Gunther, H., Rosenthal, W., Vincent, C.L., 1985: Similarity of the wind wave spectrum in finite depth water. 1. Spectral form. *Journal of Geophysical Research*, 90, 975-986.

Bretherton, F.P., and Garrett, C.J.R., 1968: Wavetrains in Inhomogeneous Moving Media, *Proceedings of the Royal Society, England, Series A, Vol. 302, No. 1471, January*, pp. 529-554.

Christoffersen, J.B., and Jonsson, I.G., 1980: A note on wave action conservation in a dissipative current wave motion, *Appl. Ocean Res.*, 2, pp. 179-182.



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

- Cook, N.J., 1997: The Deaves and Harris ABL model applied to heterogeneous terrain. *Journal of wind engineering and Industrial aerodynamics*, 66, pp. 197-214.
- Gorman, R., and Neilson, C., 1999: Modelling shallow water wave generation and transformation in an intertidal estuary, *Coastal Engineering*, 36, pp. 197-217.
- Guedes Soares, C., Rodriguez, G. R., Cavaco, P., e Ferrer, L., 2000: Experimental study on the interaction of wave spectra and currents, *Proceedings of the ETCE/OMAE Joint Conference Energy for the New Millennium*, ASME, paper OMAE 2000/S&R-6133.
- Guedes Soares, C., Weisse, R., Carretero, J.C., and Alvarez, E., 2002: A 40 years Hindcast of Wind, Sea Level and Waves in European Waters, *Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, ASME Paper OMAE2002-SR8604.
- Guedes Soares, C., and de Pablo, H., 2006: Experimental study of the transformation of wave spectra by a uniform current, *Ocean Engineering*, 33, pp. 293-310.
- Hasselmann, K., Barnett, T.P., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D.E., Enke, K., Ewing, J.A., Gienapp, H., Hasselmann, D.E., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D.J., Richter, K., Sell, W., Walden, H., 1973: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint North Sea wave project (JONSWAP). *Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Supplement A 8*, pp. 1-95.
- Hedges, T.S., 1981: Some Effects of Currents on Wave Spectra, *Proceedings of the First Indian Conference in Ocean Engineering*, vol. 1., Indian Institute of Technology, Madras, pp. 30-35.
- Hedges, S.T., Anastasiou, K., and Gabriel, D., 1985: Interaction of random waves and currents, *J. Waterway, Port, Coastal Ocean Eng.*, ASCE 111 (2), pp. 275-288.
- Huang, N.E., Chen, D.T., Tung, C.C., and Smith, J.R., 1972: Interactions between Steady Non-Uniform Currents and Gravity Waves with Applications for Current Measurements, *J. Phys. Ocenogr.*, Vol. 2, pp. 420-431.
- Jonsson, I.G., 1990: Wave-current interactions, In: Le Mehaute, B., Hanes, D.M. Eds., *The Sea*, Chap. 3, Vol. 9, Part A.
- Kitaigorodskii, S.A., Krasitskii, V.P., Zaslavskii, M.M., 1975: On Phillips' theory of equilibrium range in the spectra of wind-generated gravity waves. *Journal of Physical Oceanography*, 5, pp. 410-420.
- Longuet-Higgins, M.S., and Stewart, R.W. 1960: Changes in the form of short gravity waves on long waves and tidal currents, *Journal of Fluid Mechanics*, 8, pp. 565-583.
- Longuet-Higgins, M.S., and Stewart, R.W., 1964: Radiation stresses in water waves; a physical discussion with applications, *Deep Sea Res.*, 11, 529-562.
- Nwogu, O., 1993: Effect of Steady Currents on Directional Wave Spectra, *12<sup>th</sup> Int. Conf: on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, Vol. 1, pp.25-32.
- Rusu, L. e Guedes Soares, C. 2006: Simulações de alta resolução com o modelo SWAN à Entrada do estuário do Tejo, *X Jornadas Técnicas de Engenharia Naval*, Lisboa, Portugal, 21-22 de Novembro, 17p.
- Santos, J., Capitão, R., Coli, A.B., Fortes, C.J., e Freire, P., 2006: Previsão da agitação marítima no estuário do Tejo utilizando o modelo SWAN, *8<sup>o</sup> Congresso da Água*, Figueira da Foz, Portugal, 13-17 de Março, APRH, 15p.
- Smith, M, Stevens, C, Gorman, R., J. McGregor, and Neilson, C., 2001: Wind-wave development across a large shallow intertidal estuary: a case study of Manukau Harbour, New Zealand, *New Zealand Journal of marine and Freshwater Research*, 35, pp. 985-1000.
- Teles, M., Barata, A., e Charbonnier, C., 2003: A agitação marítima como factor determinante do equilíbrio morfodinâmico da região das Barras do Tejo, *3<sup>as</sup> Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Aveiro, Portugal, 13-14 de Novembro, Ed. CD, 16p.



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

Vieira, F., e Bernardino, M., 2005: Estudo da geração e propagação de condições extremas de agitação marítima no estuário do Tejo, 4<sup>as</sup> *Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária*, Angra do Heroísmo, Portugal, 20-21 de Outubro, Ed. CD, 16p.

Young, I.R., Verhagen, L.A., 1996a: The growth of fetch limited waves in water of finite depth: Part 1. Total energy and peak frequency. *Coastal Engineering*, 29, pp. 47–78.

Young, I.R., Verhagen, L.A., 1996b: The growth of fetch limited waves in water of finite depth: Part 2. Spectral evolution. *Coastal Engineering*, 29, pp. 79–99.