

Desenvolvimentos recentes do sistema GUIOMAR. Aplicação ao Caso de Sines

D. R. C. B., NEVES

Físico, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, dneves@lnec.pt

C. J. E. M. FORTES

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, jfortes@lnec.pt

R. CAPITÃO

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, rcapitao@lnec.pt

A. C. ZÓZIMO

Eng. Ambiente, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, aczozimo@lnec.pt

L. V. PINHEIRO

Eng. Civil, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, lpinheiro@lnec.pt

RESUMO

O estabelecimento de regimes de agitação marítima é fundamental nos estudos de engenharia costeira e portuária. Os modelos numéricos de propagação de ondas, quando aliados às potencialidades dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem a análise espacial e temporal de fenómenos complexos de forma rápida e concisa, produzindo assim tendências e padrões indispensáveis ao processo de tomada de decisão em termos de planeamento costeiro.

O presente trabalho descreve a aplicação do sistema integrado de modelação da agitação marítima, GUIOMAR, na definição dos regimes de agitação marítima no Porto de Sines. Para tal, utilizaram-se os registos da bóia-ondógrafo (*HS, TZ, DIR*) fora do porto, no período de 1988 a 2002, e transferiram-se esses registos para o interior do porto, utilizando dois modelos numéricos de propagação de ondas, SWAN e DREAMS, inseridos no próprio sistema GUIOMAR.

Para este efeito, foi implementado um conjunto de procedimentos no sistema, de forma a melhorar a sua utilização, nomeadamente: o acoplamento dos modelos SWAN e DREAMS, a definição interactiva das características das fronteiras dos modelos e o cálculo de matrizes de transferência para a elaboração dos regimes de agitação.

Todos estes desenvolvimentos contribuem para tornar o sistema GUIOMAR numa ferramenta mais versátil, eficiente e adequada como suporte na tomada de decisão em problemas e intervenções portuárias e costeiras.

Palavras-chave: Sistema de Informação Geográfica, Porto de Sines, GUIOMAR, Regimes de agitação marítima.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da agitação marítima e dos principais processos físicos e dinâmicos nas regiões costeiras e portuárias tem uma importância acrescida no correcto planeamento e gestão de intervenções costeiras e na definição de procedimentos adequados em situações de emergência. Para tal, é importante que se simule com probidade situações reais que permitam a avaliação correcta das intervenções a efectuar para cada caso em estudo. Neste campo, os modelos numéricos de propagação de ondas dão um contributo importante, permitindo, de forma rápida e concisa, e abrangendo domínios relativamente extensos, a simulação de cenários reais. Contudo, a sua aplicação é complexa e requer tempo, quer para a preparação dos dados de entrada, quer para a análise dos resultados obtidos, além de que os modelos numéricos conduzem a grandes quantidades de informação, obrigando a um esforço suplementar de síntese.

Assim, para que se retirem conclusões para uma tomada de decisão em relação a intervenções costeiras, é necessário que haja uma filtragem da enorme quantidade de resultados dos modelos numéricos e de dados existentes, no sentido de extrair a informação relevante para essas intervenções. Tal filtragem só é possível através de uma boa organização da informação.

As potencialidades dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são vitais no cumprimento do que foi mencionado acima porque permitem uma análise espacial e temporal da informação. Isso deve-se à grande capacidade dos SIG para organizar e interpretar grandes quantidades de dados, e para rapidamente extrair informação relevante, através de mapas de tendências e padrões, auxiliando assim as tomadas de decisão no âmbito da gestão costeira.

Para fazer face a estas necessidades foi criado no LNEC o sistema GUIOMAR (*Geo(graphical) User Interface for cOastal and MARine modeling*), Charneca *et al.* (2004), Zózimo *et al.* (2005, 2007, 2008) e Neves *et al.* (2009) construído com base no *software* comercial ArcGIS™. O sistema é composto por uma interface, construída em linguagem de programação VBA (*Visual Basic for Applications*), responsável pela ligação entre o *software* SIG e os modelos numéricos de propagação de ondas, e que permite ao utilizador executar os modelos numéricos, efectuar o pré e o pós processamento dos dados e resultados dos modelos e utilizar todas as capacidades do *software* SIG. Mais concretamente, o sistema tem três componentes principais: (i) um *software* comercial de SIG; (ii) uma *interface* responsável pela comunicação entre o utilizador e o sistema; (iii) um conjunto de 6 módulos correspondentes a diferentes modelos de propagação de ondas com diferentes domínios de aplicação.

Nesta comunicação são apresentados os mais recentes desenvolvimentos do sistema GUIOMAR: (i) o acoplamento dos modelos numéricos SWAN, Booij *et al.* (1999) e DREAMS, Fortes (2002) através da interface GUIOMAR; (ii) definição interactiva das características da fronteira do modelo DREAMS. Desta forma, a transferência de informação entre os dois modelos e a definição das características da fronteira do modelo DREAMS são efectuadas de forma automática, reduzindo a possibilidade de ocorrência de erros e facilitando a introdução de dados para os cálculos com o modelo DREAMS.

O método utilizado para testar os novos desenvolvimentos do sistema GUIOMAR foi o cálculo do regime de agitação (regime geral observado, médio e de extremos) em diversos pontos do interior do porto de Sines utilizando os registos da bóia-ondógrafo no período de 1988 a 2002 e recorrendo aos dois modelos numéricos mencionados acima (SWAN e DREAMS).

Nas próximas secções descreve-se o sistema GUIOMAR, com ênfase para os novos desenvolvimentos implementados. Seguidamente, descreve-se a aplicação do sistema ao porto de Sines na caracterização de regimes de agitação marítima.

2. SISTEMA GUIOMAR

2.1 Estrutura

O sistema GUIOMAR, como foi dito anteriormente, foi construído com recurso ao *software* comercial ArcGIS™. Este tipo de *software*, para além de permitir a construção de um sistema integrado, possibilita ao utilizador tirar partido de potencialidades de ferramentas avançadas, tais como a conversão de coordenadas e a análise espacial de dados e resultados, assim como análises numéricas apresentadas sob a forma de gráficos e tabelas. Estas características representam uma ajuda objectiva e fundamental nos processos de tomada de decisão.

Os modelos numéricos de propagação de ondas que constituem o sistema GUIOMAR foram seleccionados de modo a permitir uma abordagem diferente de acordo com o caso em estudo, tendo em atenção as características de cada modelo e o seu respectivo domínio de aplicabilidade. Neste momento, o sistema GUIOMAR alberga seis módulos/modelos: modelos baseados na equação de declive suave, DREAMS, Fortes (2002), REF/DIF 1, Dalrymple e Kirby (1991), REF/DIF S, Kirby e Ozkan (1994); modelos baseados na equação de Boussinesq, FUNWAVE 1D e 2D, Kirby *et al.* (1998); e o modelo espectral de propagação de ondas SWAN, Booij *et al.* (1999). O programa GMALHA, Pinheiro *et al.* (2006), constitui também um módulo, sendo responsável pela geração de malhas computacionais não estruturadas. Os modelos utilizados no caso de estudo deste trabalho foram os modelo DREAMS e SWAN.

A interface gráfica que permite ao utilizador aceder e comunicar com o computador através do sistema GUIOMAR, foi inteiramente construída em VBA (*Visual Basic for Applications*) e permite: (i) a elaboração dos ficheiros de entrada dos modelos; (ii) a visualização automática dos dados batimétricos; (iii) a execução de diversos modelos numéricos de propagação de ondas; (iv) a visualização e análise dos resultados através do *software* SIG, o que permite visualizações 2D e 3D. A Figura 1 representa o esquema de funcionamento conceptual do sistema GUIOMAR.



Figura 1 – Estrutura do sistema GUIOMAR.

Um dos grandes objectivos do GUIOMAR é criar um sistema em que todos os ficheiros, de pré-processamento, pós-processamento e do próprio processamento dos modelos numéricos sejam manipulados dentro da interface do sistema e dentro do *software* ArcGis™. É nesse sentido que foram implementados os novos desenvolvimentos efectuados no GUIOMAR que se apresentam nas próximas secções. No restante, podem ser consultados os trabalhos de Zózimo *et al.* (2005, 2007, 2008) e Neves *et al.* (2009), por exemplo.

2.1.1 Acoplamento do modelo SWAN com o modelo DREAMS

Foi criado neste trabalho um procedimento automático desenvolvido para o sistema GUIOMAR que permite o acoplamento entre os modelos numéricos SWAN e DREAMS. Assim, para qualquer zona costeira em que se pretenda conhecer a agitação marítima, esta metodologia permite a utilização desses dois modelos de forma rápida e simples, evitando o tempo dispendido e a possibilidade de ocorrência de erros na transferência manual de informação entre modelos.

Para efectuar o acoplamento entre os modelos SWAN e DREAMS foi necessário proceder à implementação de algumas alterações em cada um dos módulos correspondentes. A metodologia seguida foi idêntica à efectuada no pacote SOPRO, Fortes *et al.* (2008).

No módulo do modelo SWAN, foi incluído um campo onde o utilizador define os pontos em que pretende obter as características da agitação marítima e que servirão de condições de agitação incidente para os cálculos com o modelo DREAMS. É importante salientar que estes pontos devem fazer parte da fronteira do domínio de cálculo do modelo DREAMS, Figura 2 (a).

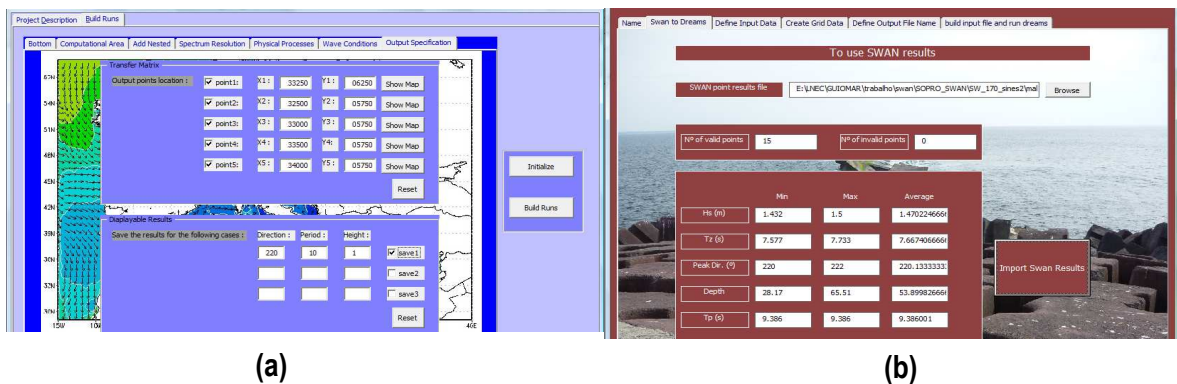


Figura 2 – Formulários para acoplamento. (a) separador de introdução das coordenadas dos pontos em que se pretende obter resultados com o modelo SWAN; (b) separador DREAMS de análise dos resultados do modelo SWAN.

Por outro lado, na interface do modelo DREAMS foi criado um novo separador, Figura 2 (b), que executa:

- Leitura do ficheiro que contém os resultados do modelo SWAN - altura significativa (*HS*), período médio (*TZ*), direcção média de pico (*DIR*), Profundidade (*DEPTH*) e período de pico (*TP*), nos pontos escolhidos pelo utilizador, i.e., nos pontos da fronteira de entrada do modelo DREAMS;
- Filtragem e aferição da qualidade dos dados, onde se indica, do ficheiro de resultados, quais os pontos que são válidos (por exemplo, se o valor do ponto for igual a -999 o ponto é considerado inválido);
- Determinação dos valores mínimos, máximos e médios de cada um dos parâmetros, obtidos nos resultados do modelo.

Com esta metodologia, é possível passar a informação necessária do modelo SWAN para o modelo DREAMS de forma automática, uma vez que os ficheiros de resultados dos pontos são pré-formatados para a interface do modelo DREAMS, bastando para isso indicar a localização dos pontos.

2.1.2 Geração interactiva de condições de fronteira

O sistema GUIOMAR foi alterado de modo a permitir a introdução das características (coeficientes de reflexão) de cada segmento da fronteira do domínio de cálculo a aplicar no modelo DREAMS. O procedimento que permite a definição interactiva dos coeficientes de reflexão da fronteira, recorrendo às ferramentas disponibilizadas pelo software ArcGis™, pode ser esquematizado em 3 passos fundamentais, Figura 3:

1. Através do programa auxiliar em FORTRAN™ *Contorno_novo_guiomar.f*, Santos et al. (2005), é construído um ficheiro, em formato de texto (*.txt), a partir da malha gerada no módulo de geração de malhas (*.grd) pelo programa GMALHA, Pinheiro *et al.* (2006), que contém 4 colunas, as duas primeiras relativas à localização x e y dos pontos da fronteira da malha, a terceira relativa ao número de identificação dos pontos, e uma quarta coluna em que todos os seus valores são zero e que será substituída pelos respectivos coeficientes de absorção da fronteira no passo 2, Figura 3.
2. Conversão dos ficheiros de texto (*.txt), criados no passo 1, em ficheiros no formato *shapefile* (*.shp). É nesta fase que o utilizador faz uso das ferramentas disponíveis no *software* e edita para os pontos da fronteira o respectivo coeficiente de absorção, Figura 3.
3. Conversão automática do ficheiro editado em *shapefile* (*.shp) para o formato de texto (*.txt), para que este último seja utilizado no programa utilitário FORTRAN™ *Fro_cond_guiomar.f*, Zózimo et al. (2005), que constrói os ficheiros de condições de fronteira (*.cond). Este ficheiro contém a informação relativa aos coeficientes de absorção das fronteiras da malha, necessários para a execução do modelo DREAMS, Figura 3.

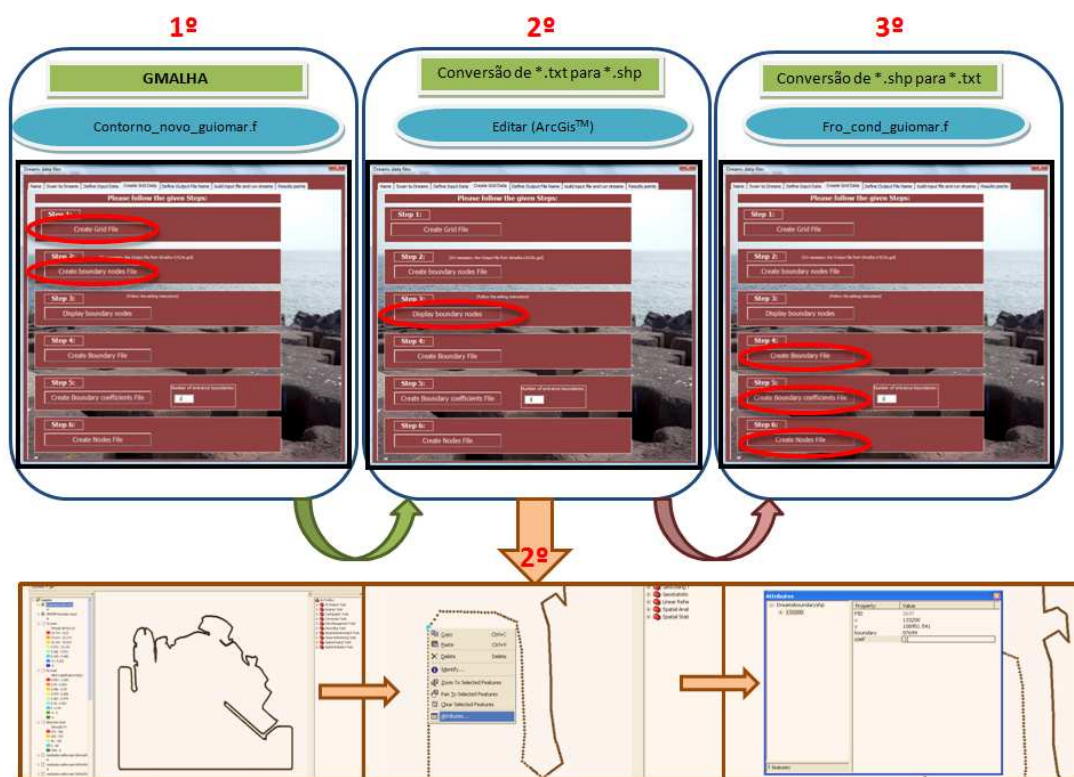


Figura 3 – Passos para a construção do ficheiro de entrada no DREAMS com a informação dos coeficientes de reflexão para cada trecho da fronteira.

Desta forma foi desenvolvido um procedimento simples, rápido e interactivo que, recorrendo às ferramentas disponibilizadas pelo ArcMap™ (componente do programa ArcGis™), permite gerar o ficheiro de condições de fronteira necessário para a execução do modelo DREAMS e que contém a informação relativa aos coeficientes de reflexão

3. CASO DE ESTUDO

3.1 Introdução

O porto de Sines, de coordenadas (37°57'N; 08°53'W) é uma das principais entradas comerciais e económicas da Península Ibérica, e é considerado um porto de extrema importância geográfica e estratégica para Portugal e Espanha, Figura 4 (a).

O objectivo deste caso de estudo foi o de testar e aplicar os dois novos desenvolvimentos do sistema GUIOMAR apresentados neste trabalho: (i) o acoplamento dos modelos SWAN e DREAMS e (ii) a geração e definição interactiva de condições de fronteira. Com estes dois desenvolvimentos, pretende-se caracterizar de forma mais rápida e eficiente o regime de agitação marítima (regime geral observado, médio e extremos) fora e dentro do porto de Sines recorrendo aos dados da bóia-ondógrafo e à utilização do sistema GUIOMAR

Assim, com base nos dados de agitação marítima na bóia-ondógrafo, procedeu-se primeiramente à caracterização dos regimes de agitação marítima (observado e médio) ao largo (i.e., na bóia-ondógrafo) do porto. Utilizando os modelos numéricos de propagação de ondas (o SWAN para a zona adjacente ao porto e o DREAMS para a zona interior do porto), por intermédio do sistema GUIOMAR efectuou-se a propagação desses dados para o interior do porto.

A metodologia seguida na definição dos regimes de agitação, quer fora quer no interior do porto, baseou-se nos trabalhos de Carvalho *et al.* (1993), Capitão *et al.* (1999), Pinheiro *et al.* (2004) e Neves *et al.* (2009). Calcularam-se: a) o regime geral, correspondente a todos os valores observados no período em estudo; b) o regime médio correspondente aos valores médios mensais, e c) o regime de extremos.

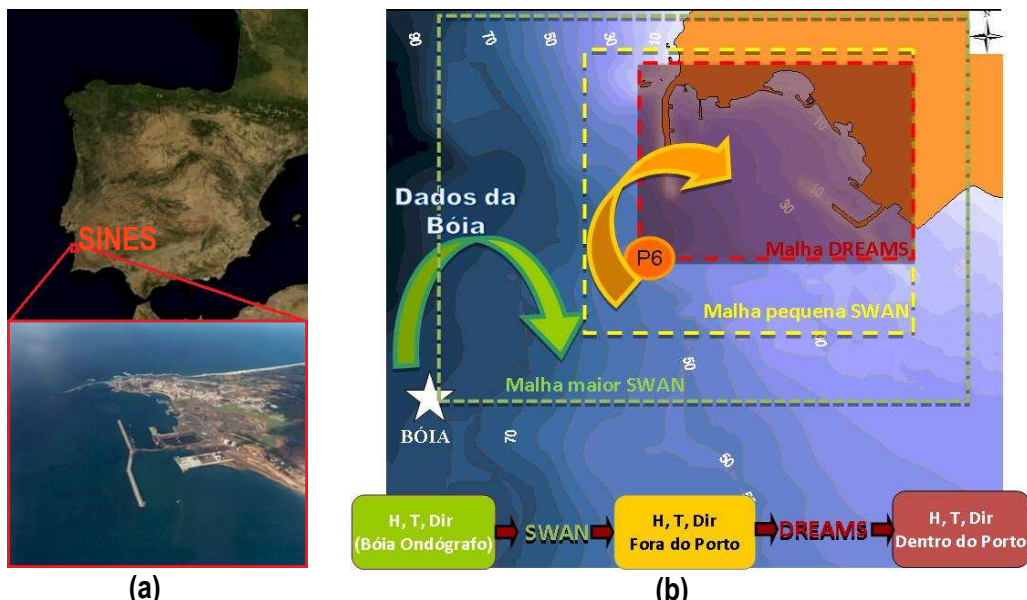


Figura 4 – (a) Porto de Sines; (b) Metodologia para a transferência do regime de agitação marítima do largo (bóia-ondógrafo) para o interior do porto.

3.2.1 Metodologia utilizada

Para a caracterização da agitação marítima no local em estudo, recorreu-se aos dados de agitação marítima da bóia-ondógrafo, designada por “Sines 1D”, localizada ao largo do porto de Sines (37°55’N e 08°55’W). O conjunto de dados utilizados perfaz um total de 32 807 registos obtidos entre Maio de 1988 e Dezembro de 2002, Pinheiro *et al.* (2008).

Estes valores foram transferidos para o interior do porto com recurso a dois modelos de propagação de ondas. Com efeito, dados os diferentes domínios de aplicabilidade de cada modelo de propagação de ondas, para a zona marítima do porto de Sines houve a necessidade de acoplar dois modelos numéricos – o modelo SWAN e o modelo DREAMS. O modelo SWAN permite a propagação das ondas desde águas profundas até junto à entrada do porto, mas não pode ser utilizado em zonas confinadas, e o modelo DREAMS permite a simulação da agitação marítima na zona interior do porto (pois, dado o esforço computacional envolvido não pode ser aplicado a grandes áreas de cálculo). Daí a necessidade de recorrer a dois modelos numéricos de propagação de ondas, Figura 4 (b).

Ainda assim, o tempo de cálculo necessário para executar estes dois modelos para uma longa série de dados continua a ser um factor limitativo. O tempo de cálculo associado a cada simulação com ambos os modelos SWAN e DREAMS é de cerca de 45 minutos o que, para a totalidade dos 32 807 registos da bóia, corresponderia a vários meses para efectuar a totalidade dos cálculos. A forma de ultrapassar este problema foi a de implementar uma metodologia, Pinheiro *et al.* (2004) e Palha (2007), que consiste em transferir a agitação marítima do largo para junto à costa, recorrendo, para a zona em estudo, à(s) matriz(es) de transferência da agitação marítima, previamente construídas. Estas matrizes relacionam a agitação marítima entre dois pontos, o primeiro ao largo (admite-se que são os registos da bóia) e o segundo no interior do porto de Sines.

Nesta metodologia, simula-se *a priori* um vasto leque de condições de agitação marítima (*HS*, *TZ*, *DIR*) que englobam todas as possibilidades de ocorrência dessa agitação ao largo, mas que é em número significativamente inferior ao número de registos de agitação marítima. Com esses resultados, constrói-se uma matriz de valores que permite interpolar eficazmente quaisquer outros casos não simulados. Uma vez conhecida a matriz de transferência para a zona em estudo, para cada trio de parâmetros de agitação marítima ao largo (*HS*, *TZ*, *DIR*) obtido num dado instante, procede-se à interpolação desse trio utilizando a matriz de transferência e obtêm-se as características da agitação marítima no(s) ponto(s) em estudo. Desta forma, são transferidos os registos da bóia para os pontos no interior do porto, obtendo-se o regime de agitação marítima em cada ponto. O programa REGIMES, Pinheiro *et al.*, (2006), permite efectuar essa transferência de modo automático.

3.2.1.1 Aplicação do modelo SWAN

A Figura 5(a) mostra o domínio de cálculo e a batimetria utilizados para efectuar os cálculos com o modelo SWAN. Esta batimetria foi construída a partir de dados de batimetria do Instituto Hidrográfico, nomeadamente das cartas: PT324204 (Dezembro 2005); PT32205 (Dezembro 2005); PT426408 (Março 1995).

No modelo SWAN foram definidas 2 malhas computacionais, Figura 5(b), em que a malha principal tem uma resolução de 80 m e uma dimensão de 8 km por 8 km, cobrindo todo o domínio de cálculo. Foi definida uma malha encaixada na malha principal com resolução de 40 m e uma dimensão de 5 km por 5 km. As malhas computacionais dos modelos SWAN foram inteiramente construídas através do sistema GUIOMAR.

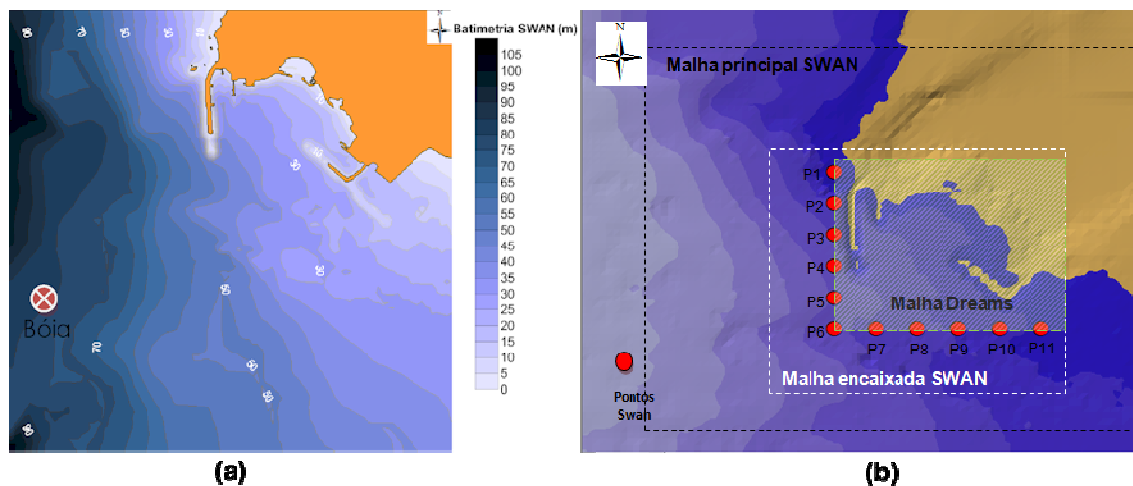


Figura 5 – Modelo SWAN. (a) Batimetria; (b) Malhas e pontos onde foram extraídos resultados.

Os cálculos a realizar com o modelo SWAN foram efectuados para uma gama de alturas significativas (HS) com uma discretização de 1 m, de 1 a 9 m, com períodos de pico (TP , admitindo $TP=1.27 \times TZ$) de 4 a 20 s com intervalos de 1 s, e com as direcções ($^\circ$) definidas por intervalos de 10° para uma gama que abrange as direcções de 180° a 360° . O número total de cálculos realizados através da matriz acima definida é de 2 906.

Para cada trio de valores (HS , TP , DIR), a agitação incidente na fronteira do domínio de cálculo do SWAN (isto é, ao largo) foi definida através de um espectro bidimensional, caracterizado por um espectro em frequência do tipo JONSWAP, com um factor de pico $\gamma=3.3$, e uma função de dispersão direccionada co-seno de potência 20. No cálculo do espectro da agitação ao longo do domínio impôs-se uma discretização em frequência com 23 intervalos de 0.04 a 1 Hz, e uma discretização em direcção de 2° , de 0° a 360° .

Os cálculos foram efectuados em regime estacionário e consideraram-se os fenómenos de difracção, atrito de fundo e o efeito da interacção entre triades de ondas (*triad wave-wave interactions*). Não se consideraram os fenómenos quer devidos a ventos, devido à pequena extensão do domínio, quer devidos às correntes, por falta de informação.

Foram definidos 11 pontos de estudo para obter resultados do modelo SWAN, Figura 5(b), cinco dos quais estão localizados na fronteira Oeste da malha do modelo DREAMS, cinco estão localizados na fronteira Sul e um é referente a um ponto de vértice da malha DREAMS.

3.2.1.2 Aplicação do modelo DREAMS

O módulo DREAMS efectua a propagação da agitação marítima desde a entrada no porto de Sines até ao seu interior, onde os fenómenos de refracção, difracção e reflexão são importantes. O domínio computacional e a batimetria considerados são apresentados na Figura 6.

O domínio computacional foi discretizado por uma malha de elementos finitos, gerada através do módulo de geração de malhas que contém o programa para a construção de malhas não estruturadas, o programa GMALHA, Pinheiro *et al.* (2006), e é constituída por 300139 elementos e 151669 nós, Figura 6.

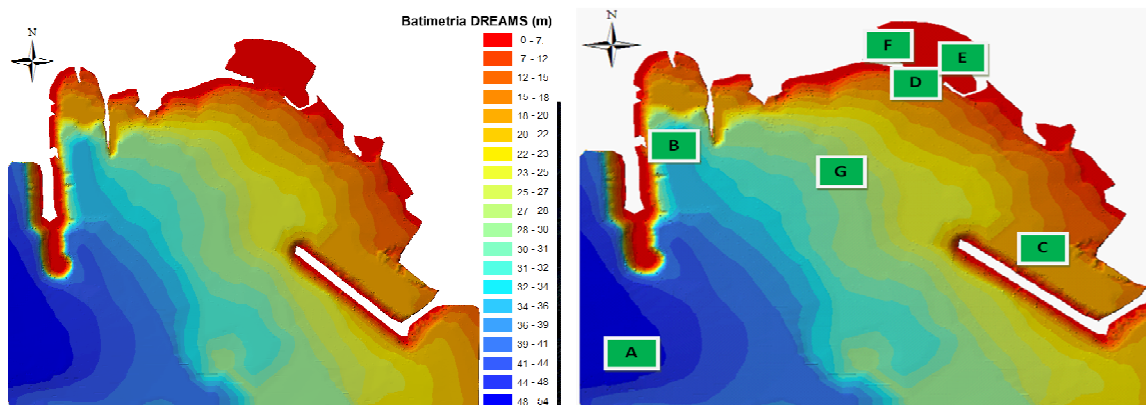


Figura 6 – Modelo DREAMS. Domínio computacional e batimetria. Localização dos pontos de A a G no interior do porto.

As fronteiras (Oeste e Sul, Figura 6) são fronteiras de entrada onde se vai impor os valores de agitação incidente. Neste caso, os valores a impor resultarão dos valores calculados pelo modelo SWAN, no ponto P6.

Nas restantes fronteiras do domínio de cálculo, correspondentes aos diferentes trechos que delimitam o porto, procedeu-se ao cálculo dos respectivos coeficientes de reflexão. O cálculo dos coeficientes de reflexão foi definido de acordo com o método de Seeling e Arens (1995), que entra em consideração com as características e a configuração da linha de costa e também com as características da onda incidente (período e altura de onda). Tal envolveu a caracterização, no local, da linha de costa e das estruturas do porto de Sines, a nível da porosidade, declive do talude, profundidade no pé do talude, número de Iribarren, entre outros. O coeficiente de reflexão foi calculado considerando um nível de maré de 2 m.

Para a construção da matriz de transferência do modelo DREAMS foram analisados os resultados do modelo SWAN no ponto exterior ao domínio, ponto P6. Cálculos preliminares mostraram que o ponto P6 é representativo da agitação que entra no porto, Neves *et al.* (2009). Os cálculos foram efectuados para períodos de onda (T) entre 5 a 20 s com 1 s de intervalo, e para as direcções de onda (DIR) entre 180° e 360° com 20° de intervalo, resultando num número total de combinações (T, DIR) de 135. Desta forma, é possível abranger todos os períodos e direcções da agitação marítima passíveis de penetrar no porto de Sines. No interior do porto, foram definidos 7 pontos (A, B, C, D, E, F e G) de análise dos resultados do modelo DREAMS, Figura 6.

Esta disposição espacial dos pontos no interior do porto permite conhecer o regime de agitação marítima desde a entrada do porto de Sines até ao pequeno porto de pesca na sua zona mais abrigada, passando pelos regimes de agitação junto aos outros molhes e no centro do porto de Sines.

3.3 Regime de agitação no interior do porto de Sines

3.3.1 Regime geral

A título de exemplo, para o ponto D (no interior do porto junto à entrada do pequeno porto de pesca e de recreio) são mostrados, na Figura 7, os histogramas gerais $HS-DIR$, onde cada gráfico inclui também as respectivas distribuições marginais e rosa de direcções.

No Quadro 1 indicam-se os valores dos parâmetros estatísticos, máximos, mínimos, médias, desvios-padrão e as gamas mais frequentes para a bóia e para cada ponto seleccionado (P6 e A a G).

Ponto D DREAMS

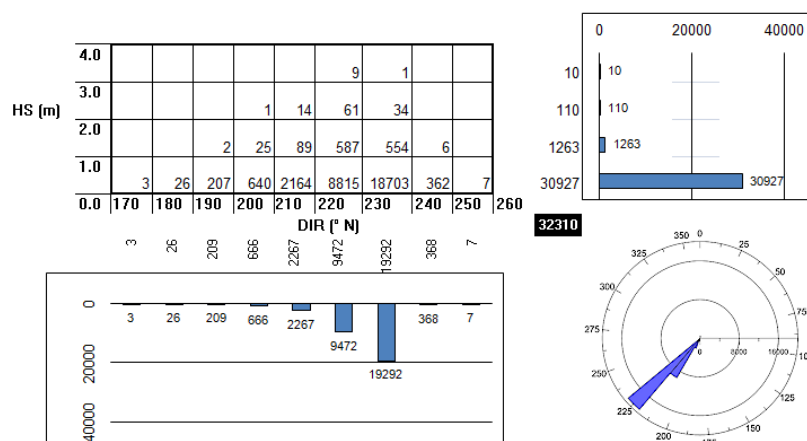


Figura 7 – Regime geral no ponto D: Histograma geral conjunto (*HS*, *DIR*) das ocorrências e respectivas distribuições marginais e rosa de direcções.

Quadro 1 - Parâmetros estatísticos dos resultados nos pontos DREAMS (A a G), no ponto P6 SWAN e para os registos da bóia-ondógrafo

Pontos	Parâmetros estatísticos	Máximo	Média	Mínimo	Desvio Padrão	Gamas mais frequentes
Bóia	<i>HS</i> (m)	7.35	1.60	0.27	0.899	[1.0 - 2.0] (48.05%)
	<i>TP</i> (s)	19.8	8.8	4.2	2.325	[6.0 - 7.0] (17.78%)
	<i>DIR</i> (°)	358	299	5	18.609	[300 - 310] (32.68%)
SWAN P6	<i>HS</i> (m)	7.04	1.49	0.27	0.811	[1.0 - 2.0] (49.02%)
	<i>TP</i> (s)	18.9	8.9	4.2	2.248	[9.0 - 10.0] (22.28%)
	<i>DIR</i> (°)	352	299	180	17.305	[300 - 310] (34.90%)
DREAMS A	<i>HS</i> (m)	8.05	1.50	0.15	0.835	[1.0-2.0] (48.60%)
	<i>TP</i> (s)	18.9	8.9	5.2	2.208	[9.0-10.0] (22.61%)
	<i>DIR</i> (°)	353	299	179	17.218	[300 - 310] (37.94%)
DREAMS B	<i>HS</i> (m)	2.20	0.17	0.01	0.204	[1.0-2.0] (98.75%)
	<i>TP</i> (s)	18.9	8.9	5.2	2.208	[9.0-10.0] (22.61%)
	<i>DIR</i> (°)	198	137	48	17.253	[140 - 150] (23.30%)
DREAMS C	<i>HS</i> (m)	2.20	0.17	0.01	0.151	[0.0-1.0] (99.59%)
	<i>TP</i> (s)	18.9	8.9	5.2	2.208	[9.0-10.0] (22.56%)
	<i>DIR</i> (°)	360	124	0	150.930	[0 - 10] (19.95%)
DREAMS D	<i>HS</i> (m)	3.83	0.31	0.01	0.327	[0.0-1.0] (95.72%)
	<i>TP</i> (s)	18.9	8.9	5.2	2.208	[9.0-10.0] (22.61%)
	<i>DIR</i> (°)	246	220	160	7.734	[220 - 230] (59.70%)
DREAMS E	<i>HS</i> (m)	2.54	0.23	0.01	0.220	[0.0-1.0] (98.83%)
	<i>TP</i> (s)	18.9	8.9	5.2	2.208	[9.0-10.0] (22.49%)
	<i>DIR</i> (°)	244	224	192	6.720	[220 - 230] (56.45%)
DREAMS F	<i>HS</i> (m)	0.98	0.05	0.01	0.058	[0.0-1.0] (100%)
	<i>TP</i> (s)	18.9	9.0	5.2	2.208	[9.0-10.0] (25.06%)
	<i>DIR</i> (°)	153	102	46	11.269	[100 - 110] (37.59%)
DREAMS G	<i>HS</i> (m)	4.28	0.44	0.01	0.380	[0.0-1.0] (91.77%)
	<i>TP</i> (s)	18.9	8.9	5.2	2.208	[9.0-10.0] (22.59%)
	<i>DIR</i> (°)	314	221	28	35.591	[240 - 250] (28.83%)

Os resultados obtidos indicam uma clara evolução do regime de agitação marítima desde o ponto A, junto à entrada do porto, até ao ponto F, na zona mais abrigada do porto (pequeno porto de pesca).

De facto, em termos de altura significativa, *HS*, os valores apresentam um máximo no ponto A de 8.05 m (média igual a 1.5 m), passando por um máximo de 3.83 m (média de 0.31 m) à entrada do pequeno porto de pesca. A partir daí, devido à protecção do pequeno porto de pesca

(ponto F), os valores de *HS* são inferiores a 1 m (média de 0.05 m). As zonas abrigadas pelos molhes a Oeste e a Leste também apresentam valores máximos de altura significativa bastante mais reduzidos relativamente ao ponto A, apenas um pouco acima dos 2 m.

Em relação às direcções da onda, os resultados mostram uma rotação das cristas das ondas ao longo do seu percurso desde a entrada no porto de Sines até aos pontos seleccionados. Como seria de esperar, à entrada do porto, no ponto A, não há grande variação da direcção da onda face à direcção de onda incidente (a média da direcção é de 299°). No entanto, junto aos molhes Oeste e Leste (pontos B e C) existe uma clara alteração da direcção das ondas incidentes, que depende da localização dos mesmos. Junto à entrada do pequeno porto de pesca, ponto A, a direcção média é já de 219°, e no pequeno porto de pesca, ponto F, a direcção média é de 102°, enquanto junto à praia de Sines, do lado oposto ao pequeno porto de pesca, a rotação é feita no sentido oposto, atingido uma direcção média de 224°.

3.3.2 Regime médio

Para a definição do regime médio no interior do porto de Sines foram calculadas as médias mensais correspondentes aos valores de alturas significativas (*HS*), períodos de pico (*TP*) e direcções (*DIR*) na bóia-ondógrafo de Sines, no ponto P6 (SWAN) e nos pontos A a G (DREAMS) para o período de Maio de 1988 a Dezembro de 2002. Na Figura 8 apresentam-se os valores das médias mensais.

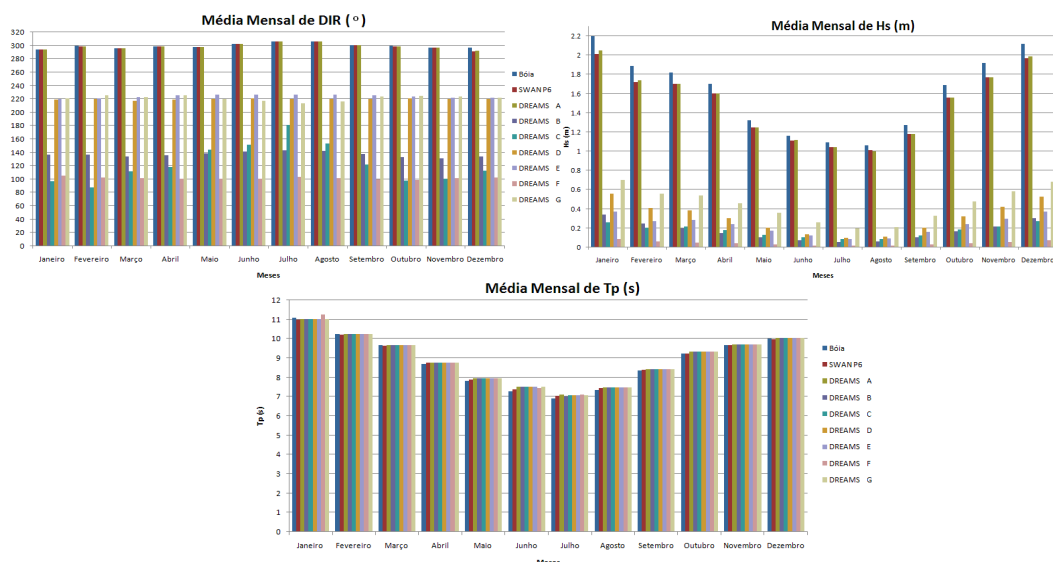


Figura 8 - Regime médio. Valores médios mensais de *HS*, *TP* e *DIR* na bóia-ondógrafo de Sines e nos pontos P6 (SWAN) e A a G (DREAMS) (Maio 1988 a Dezembro 2002).

Relativamente às direcções médias, verifica-se que a bóia-ondógrafo apresenta valores de agitação marítima proveniente de Noroeste. São registados valores médios de direcção de onda de 306° em Agosto, no Verão, e de 294.5° em Janeiro, no Inverno. A direcção média de onda nos pontos B, C, D, E, F e G é fortemente influenciada pela sua localização dentro do porto. Os pontos D, E e G, que estão localizados frontalmente à entrada no porto, apresentam direcções médias próximas dos 220°, enquanto que nos pontos B e F há uma rotação na direcção da onda para Este, com direcções médias próximas de 137° no ponto B, e de 100° no ponto F. O inverso passa-se com o ponto C que, dada a sua localização, é caracterizado por ondas com direcção de Oeste com valores médios de direcção de onda próximos de 150°.

Para as alturas significativas (*HS*) verifica-se uma clara diferença entre os meses de Inverno e de Verão, sendo que a bóia é o local que apresenta valores mais elevados de *HS* enquanto o ponto F, na zona mais abrigada do porto, é aquele que apresenta valores mais baixos. Com efeito, em Janeiro, o mês de Inverno com os valores mais elevados de *HS*, a bóia regista valores médios de 2.2 m, e no ponto F os valores médios são de 0.09 m, e em Agosto, o mês de Verão com os valores mais baixos de *HS*, a bóia regista valores médios de 1.06 m, e no ponto F os valores médios são de 0.02 m.

O mesmo se passa para as médias mensais do período de pico (*TP*), em que os meses de Verão são caracterizados por valores baixos de *TP* e os meses de Inverno por valores máximos de *TP*. Esta diferença ocorre devido à variação sazonal do clima de agitação marítima junto a Portugal Continental, caracterizado por um regime mais ameno, de alturas e períodos de onda baixos, nos meses de Verão, contrastando com os meses de Inverno, caracterizados por um mar mais agitado, muitas vezes influenciado por forças atmosféricas, caracterizado por alturas e períodos de onda elevados.

3.3.3 Regime de extremos

O regime de extremos foi definido através da obtenção de uma amostra de extremos de acordo com o método dos máximos anuais dos Invernos marítimos. Para tal, considerando o período de registos disponível, foram primeiramente calculados os valores máximos por Inverno marítimo (de Outubro de um ano civil a Março do ano seguinte) da altura significativa de onda, Capitão *et al.* (1999). Os histogramas relativos aos máximos anuais de *HS* por cada Inverno marítimo de Maio de 1988 a Dezembro de 2002 são apresentados na Figura 9.

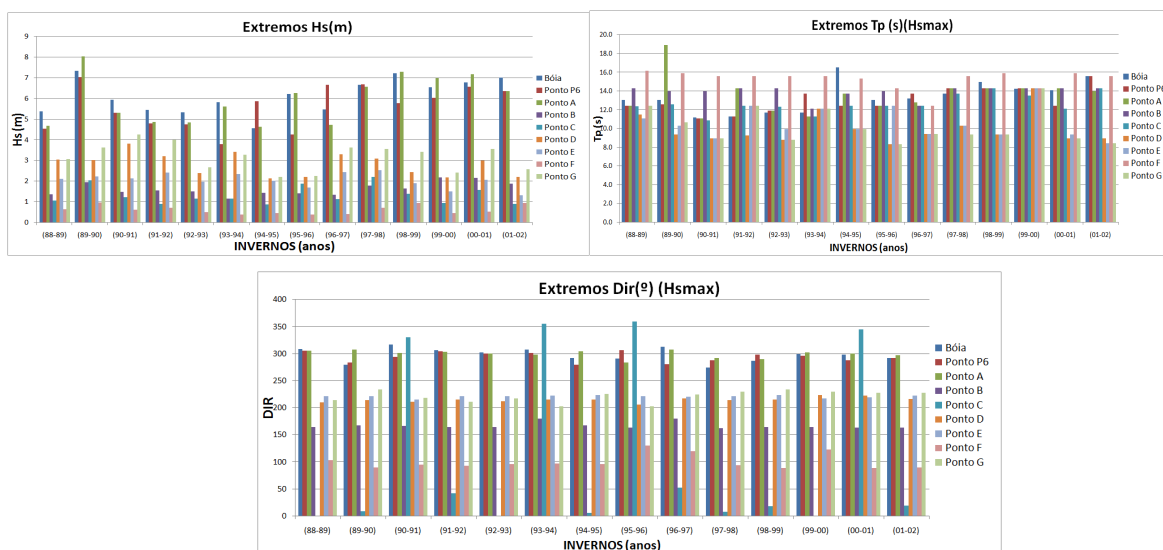


Figura 9 – Valores extremos de *HS* e *TP* e *DIR* associados a eventos de máximos de *HS* em Invernos marítimos.

Para o cálculo dos valores extremos de agitação marítima para um período de retorno de 5 a 100 anos foi estudada a adaptabilidade de diversas distribuições de probabilidade à amostra de extremos mostrada acima. Para isso, foi utilizado o programa ADAPTA, Carvalho e Capitão (1991), que permite testar a adaptabilidade à amostra de extremos das distribuições consideradas neste estudo, as distribuições de Gumbel, Fréchet e Weibull.

A qualidade do ajuste da distribuição à amostra de extremos foi avaliada tendo em conta três parâmetros estatísticos, Carvalho e Capitão (1991): o coeficiente de correlação da recta dos mínimos quadrados, *r*, o erro padrão das estimativas, *e*, e o valor do teste de Kolmogorov-Smirnov,

d. Após a escolha da função de distribuição mais adequada para cada ponto em estudo, mediante a utilização do critério do parâmetro combinado, c , Carvalho e Capitão (1991), foi efectuada a extrapolação das alturas de onda significativa para os períodos de retorno de 5, 10, 25, 50 e 100 anos.

Escolhida a distribuição de probabilidade e efectuados os cálculos de extrapolação dos valores de HS para os períodos de retorno considerados, foram relacionadas as direcções e períodos com as alturas de onda extrapoladas através da utilização de diagramas de dispersão com os valores máximos mensais de HS com os períodos TP e direcções DIR associados aos eventos de máximos mensais de HS . A gama de períodos e direcções associada às alturas de onda foi considerada como o conjunto de valores presentes entre o máximo e mínimo dos máximos de altura significativa mensal, Pinheiro *et al.* (2004).

Na Figura 10 apresenta-se um quadro com as características dos extremos de alturas de onda significativa obtidos, por extrapolação, para os vários pontos em estudo e as gamas de períodos e direcções associadas considerando o conjunto de todos os registos.

Regime de extremos resumido porto de Sines				
T (ano)	HS (m)	TP (s)	Θ (°)	
5	6.98	6 a 18	240 a 330	Boia
10	7.35	6 a 18	240 a 330	
25	7.71	6 a 18	240 a 330	
50	7.93	6 a 18	240 a 330	
100	8.12	6 a 18	240 a 330	
5	6.67	7 a 17	200 a 330	Ponto P6
10	7.16	7 a 17	200 a 330	
25	7.65	7 a 17	200 a 330	
50	7.95	7 a 17	200 a 330	
100	8.21	7 a 17	200 a 330	
5	7.08	7 a 16	200 a 320	Ponto A
10	7.93	7 a 16	200 a 320	
25	9.00	7 a 16	200 a 320	
50	9.79	7 a 16	200 a 320	
100	10.58	7 a 16	200 a 320	
5	1.94	5 a 15	100 a 180	Ponto B
10	2.17	5 a 15	100 a 180	
25	2.46	5 a 15	100 a 180	
50	2.68	5 a 15	100 a 180	
100	2.89	5 a 15	100 a 180	
5	1.70	6 a 15	300 a 50	Ponto C
10	2.14	6 a 15	300 a 50	
25	2.84	6 a 15	300 a 50	
50	3.51	6 a 15	300 a 50	
100	4.33	6 a 15	300 a 50	

Regime de extremos resumido porto de Sines				
T (ano)	HS (m)	TP (s)	Θ (°)	
5	3.39	6 a 17	205 a 230	Ponto D
10	3.64	6 a 17	205 a 230	
25	3.91	6 a 17	205 a 230	
50	4.07	6 a 17	205 a 230	
100	4.21	6 a 17	205 a 230	
5	2.44	5 a 16	220 a 230	Ponto E
10	2.61	5 a 16	220 a 230	
25	2.79	5 a 16	220 a 230	
50	2.90	5 a 16	220 a 230	
100	2.99	5 a 16	220 a 230	
5	0.82	5 a 17	80 a 130	Ponto F
10	1.04	5 a 17	80 a 130	
25	1.41	5 a 17	80 a 130	
50	1.76	5 a 17	80 a 130	
100	2.20	5 a 17	80 a 130	
5	3.86	5 a 15	180 a 280	Ponto G
10	4.18	5 a 15	180 a 280	
25	4.50	5 a 15	180 a 280	
50	4.70	5 a 15	180 a 280	
100	4.87	5 a 15	180 a 280	

Figura 10 – Regime de extremos. Extremos de HS e direcções e períodos associados aos valores extrapolados de HS .

O regime de extremos calculado indica que no ponto A, junto ao molhe Oeste, e para um período de retorno de 100 anos, existe um extremo máximo na zona em estudo de 10.58 m. No interior do porto verifica-se que, para o mesmo período de retorno, o ponto G indica o valor mais elevado, 4.87 m, enquanto que o ponto F indica o valor mais baixo, 2.20 m. Verifica-se que na zona do pequeno porto do pesca e de recreio, pontos E e F, juntamente com a zona abrigada do molhe Oeste, ponto B, não está prevista, para os períodos de retorno considerados, a ocorrência de um extremo de altura significativa acima dos 3 m.

4. CONCLUSÕES

Neste artigo apresentaram-se os desenvolvimentos mais recentes do sistema GUIOMAR, que consistiram no acoplamento dos modelos SWAN e DREAMS e na definição interactiva das condições de fronteira para o modelo DREAMS. Estes aperfeiçoamentos permitem, através de

processos interactivos, e de forma praticamente automática, a modelação da propagação da agitação marítima em regiões de grande dimensão desde o largo até ao interior de bacias portuárias, como é o caso do porto de Sines.

Para testar os desenvolvimentos efectuados no sistema GUIOMAR, foi realizado um estudo do regime de agitação marítima (geral observado, médio e de extremos) para vários pontos localizados na zona interior do porto de Sines. Assim, foi efectuada a transferência dos registos da bóia-ondógrafo (*HS, TZ, DIR*), localizada em Sines, no período de Maio de 1988 a Dezembro de 2002, para pontos na entrada e no interior da bacia portuária, recorrendo às matrizes de transferência obtidas com base num conjunto de cálculos efectuados com os modelos SWAN e DREAMS incluídos no sistema GUIOMAR. Seguidamente, definiu-se para cada ponto os regimes observado, médio e de extremos de acordo com a metodologia descrita em Carvalho *et al.* (1993), Capitão *et al.* (1999) e Pinheiro *et al.* (2004).

O trabalho desenvolvido veio confirmar as vantagens da utilização do sistema GUIOMAR, que são as de permitir a utilização simplificada de modelos de agitação marítima, nomeadamente no que se refere à construção, manipulação e visualização de dados e resultados dos modelos numéricos. Como desenvolvimentos futuros está prevista a inclusão dos procedimentos relativos ao programa REGIMES através da interface do sistema GUIOMAR e uma extensão do sistema para situações de emergência em zonas portuárias, com a construção automática de mapas de risco. Com efeito, este sistema permite aceder, numa mesma aplicação, tanto às ferramentas de visualização, como de edição de dados, o que possibilita uma manipulação de dados e resultados muito mais facilitada.

O trabalho aqui descrito veio contribuir positivamente para a constituição de um sistema cada vez mais fiável e robusto que permite, de forma fácil e acessível, uma decisão mais sustentada em estudos de engenharia e em situações de emergência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a autorização concedida pela Administração do Porto de Sines, S.A. para realizar os estudos de caracterização da linha de costa e estruturas do porto. Agradecem ainda à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através dos projectos PTDC/AMB/67450/2006 e PTDC/ECM/73145/2006 e da bolsa SFRH/BD/18183/2004.

5. BIBLIOGRAFIA

BOOIJ, N., RIS, R.C., HOLTHUIJSEN, L.H. (1999). "A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation", *J. Geographical Research*, C4, 104, 7649-7666.

CAPITÃO, R., FORTES, C.J.E.M., CARVALHO, M.M.; COVAS, J.A. (1999). "Definição de Regimes de Agitação Marítima - Casos de Estudo", 1^{as} *JPECP*, AIPCN-PIANC, pp. 31-45. Porto, Novembro.

CARVALHO, M., CAPITÃO, R., (1991). "Ajustamento gráfico de distribuições" Relatório 250/90 NPP. Lisboa, Outubro de 1990.

CARVALHO M., COVAS, J.; REIS, M.T., FORTES, J.C.E.M., CAPITÃO, R. (1993). "Passagem ao Largo da Agitação Marítima em Sines" Relatório 217/93-NPP. Lisboa, Setembro.

CHARNECA, N., ZÓZIMO, A.C., FORTES, C.J.E.M. (2004). "Aplicação de uma ferramenta SIG em estudos de propagação de ondas marítimas", *in Proc. VII Congresso da Água*, Lisboa.

DALRYMPLE, R.A., KIRBY, J.T. (1991). "REF/DIF 1. Version 2.3 Documentation Manual. Combined Refraction/Diffraction Model" CACR Report n.º 91-2, University of Delaware, Janeiro.

FORTES, C.J.E.M. (2002). "Transformações não-lineares de ondas marítimas em zonas portuárias. Análise pelo método dos Elementos Finitos", Tese de doutoramento, IST/DEM.

FORTES, C.J.E.M., PINHEIRO, L.V., SANTOS, J.A. (2008). "A acoplagem de modelos numéricos no pacote SOPRO", in *Proc. 9.º Congresso da Água*, 2 a 4 de Abril.

KIRBY, J.T., OZKAHN, H.T. (1994). "REF/DIF S Version 1.1 Documentation and Users Manual", CACR Report n.º 94-04, University of Delaware.

KIRBY, J.T., WEI, G., CHEN, Q., KENNEDY, A.B., DALRYMPLE, R.A. (1998). "FUNWAVE 1.0 – Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model Documentation and User's Manual", Research Report No.CACR-98-06, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware.

NEVES, D.R.C.B, ZÓZIMO, A.C., PINHEIRO, L.V., FORTES, C.J, (2009). "GUIOMAR: Geo(graphical) User Interface for cOastal and MARine Modeling. Supported Decision System", in *Proc. ICS*, Lisboa, Abril 2009

PALHA, A.C. (2007). "pyMOIA – Previsão, em tempo real, da agitação marítima em zonas portuárias", in *Proc. 5as JPECP*, Lisboa, 11 e 12 de Outubro.

PINHEIRO, L.V., COLI, A. B.; CAPITÃO, R.; SANTOS, J. A. (2004). "Caracterização da Agitação Marítima no Molhe oeste do Porto de Sines. Regime de extremos e eventos notáveis", Relatório 370/04- NPE, Lisboa, Novembro.

PINHEIRO, L.V., FERNANDES, J.L.M., FORTES, C.J.E.M. (2006). "Sobre um gerador de malhas de elementos finitos com densidade local condicionada à batimetria para modelos de propagação de ondas em zonas portuárias", in *Proc. I CNMNMFT*, Lisboa, 8 e 9 de Junho.

SANTOS, J. A., FORTES, C:J:E:M., PINHEIRO, L:V., ZÓZIMO, A.C., SANTOS, A:V. (2005). "Programa FORTRAN - Contorno_novo_guiomar.f". Relatório 01/2005, LNEC.

SEELING, W.N., ARENS, J.P. (1995). "Wave reflection and energy dissipation by coastal structures, in *Wave forces on inclined and vertical wall structures*", Edit.N. Koboyashi, ASCE, 1995, pp. 28-55.

ZÓZIMO, A.C., GONÇALVES, A., FORTES, C.J.E.M., CHARNECA, N. (2005). "Ferramenta SIG para modelos de propagação de ondas. Desenvolvimentos preliminares", in *Proc. 7.ºSILUSBA*, Évora.

ZÓZIMO, A.C., FORTES, C.J.E.M. (2007). "Estado Actual e Desenvolvimentos futuros do sistema integrado de apoio à tomada de decisão em engenharia costeira: GUIOMAR", *Tecnologias da Água*, n.º 52, edição IV, Outubro/Dezembro, pp. 54-65.

ZÓZIMO, A.C., FORTES, C.J.E.M., NEVES, D.R.C.B. (2008). GUIOMAR: "Geographical User Interface for cOastal and MARine modeling. Recent developments and assessment of potential geographical errors", in *Proc. Med Days of Coastal and Port Eng.*, Palermo, 7 a 9 de Outubro.