

Avaliação do risco para a navegação em zonas portuárias utilizando o sistema de informação geográfica GUIOMAR. O caso de Sines

Diogo Rúben Neves¹, Conceição Juana Fortes¹, Maria Teresa Reis¹, João Alfredo Santos¹, Sara Rodrigues¹, Paulo Duarte Raposeiro¹

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente, dneves@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, treis@lnec.pt, jasantos@lnec.pt, srodrigues@lnec.pt, praposeiro@lnec.pt

Resumo

O presente trabalho descreve a primeira abordagem do sistema integrado de modelação da agitação marítima, GUIOMAR, na avaliação do risco para a navegação em zonas portuárias. Foi criado um conjunto de procedimentos automáticos que implementa uma metodologia de avaliação do risco para a navegação, com base na amplitude da componente vertical do movimento de um navio ao longo da sua trajectória provocado pela agitação incidente no navio. Para tal, utilizaram-se os registos do período de 1988 a 2002 da bóia-ondógrafo localizada ao largo do porto de Sines e transferiram-se esses registos para o interior do porto, utilizando dois modelos numéricos de propagação e deformação da agitação marítima (SWAN e DREAMS), inseridos no próprio sistema GUIOMAR. Com base nas condições de agitação marítima no interior do porto, o modelo numérico WAMIT foi utilizado para o cálculo dos movimentos verticais do navio. Por fim, testou-se o procedimento automático de avaliação do risco para a navegação, que considera que o grau de risco é o produto do grau atribuído à probabilidade de ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem limiares pré-estabelecidos pelo grau atribuído às consequências dessa excedência. O resultado deste trabalho consistiu na criação de mapas de risco para um troço de navegação junto ao molhe oeste do porto de Sines.

Os recentes desenvolvimentos contribuem para que o sistema GUIOMAR constitua um sistema fiável, simples e rápido de suporte à tomada de decisão em estudos costeiros e portuários.

Palavras-Chave: Avaliação de Risco, Navegação, Sistema de Informação Geográfica, Porto de Sines, GUIOMAR.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações para engenheiros navais e portuários é a segurança dos navios durante a navegação no interior do porto. As consequências podem ser elevadas quando existe manifesta falta de segurança. As perdas a nível de bens materiais, de vidas e para o ambiente são fortemente penalizadoras para as indústrias marítimas. Por estes motivos tem se tornado cada vez mais importante o desenvolvimento de metodologias capazes de inferir uma avaliação de risco para cada situação.

Dada a natureza dos portos, para cumprir o que foi mencionado acima, torna-se necessário integrar dados de agitação marítima com resultados de modelos numéricos de forma a simular cenários pouco favoráveis a condições de segurança. Os modelos numéricos de propagação e deformação da agitação marítima permitem a simulação de cenários reais potenciando um melhor conhecimento das características da agitação marítima.

Contudo, a sua aplicação é complexa e requer tempo, quer para a preparação dos dados de entrada, quer para a análise dos resultados obtidos, já que os modelos numéricos conduzem a grandes quantidades de informação. É nesse sentido que os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são uma mais-valia, permitindo uma análise espacial e temporal de informação correspondente a fenómenos naturais complexos através da amostra de tendências e padrões essenciais para qualquer processo rápido de tomada de decisão.

Em particular, os sistemas SIG têm a capacidade de facilmente produzir mapas de risco de acordo com procedimentos automáticos baseados em dados e resultados de modelos numéricos, facilitando assim o processo de tomada de decisão na gestão costeira e portuária.

Neste contexto, tem vindo a ser desenvolvido no LNEC o sistema integrado de modelação costeira e portuária, GUIOMAR (Neves *et al.* 2009a), aplicado à costa portuguesa. Este é um sistema construído com base no *software* comercial ArcGis™, permitindo a utilização de vários modelos numéricos de propagação de ondas num ambiente SIG. O objectivo que levou à sua construção foi o de apoiar a tomada de decisão na gestão de processos característicos de zonas costeiras e portuárias.

O presente trabalho descreve os novos desenvolvimentos introduzidos no sistema GUIOMAR na área da avaliação do risco para a navegação no interior de um porto. Foi constituída uma metodologia recorrendo aos modelos numéricos de geração, propagação e dissipação da agitação marítima SWAN (Booij *et al.* 1999) e DREAMS (Fortes 2002), e ao modelo numérico WAMIT (Newman e Scлавounos 1988) para o cálculo dos movimentos do navio (corpo flutuante). A metodologia de avaliação de risco (secção 4) foi concretizada através de um novo módulo no sistema GUIOMAR que aplica os procedimentos de avaliação de risco de forma automática e possibilita ao utilizador a constituição de mapas de risco pré-formatados.

Este novo módulo do sistema GUIOMAR foi aplicado ao porto de Sines, uma das entradas marítimas mais importantes para Portugal e para a Europa, localizado na costa sudoeste de Portugal continental, 37°57'N e 08°53'W.

O caso de estudo envolveu: (i) o cálculo do regime geral de agitação para vários pontos no interior do porto a partir dos dados de 1988 a 2002 da bóia-ondógrafo situada ao largo do porto de Sines (37°55'N e 08°55'W); (ii) o cálculo dos movimentos verticais de um ponto seleccionado do navio em cada uma das três regiões consideradas na trajectória do navio no porto; e (iii) cálculo do grau de risco associado à excedência de um limiar pré-estabelecido para aquele movimento vertical, a partir da análise quantitativa da probabilidade de ocorrência e da análise qualitativa do grau de consequências.

Os resultados ilustram-se através dos mapas do risco para a navegação associado aos movimentos verticais do navio.

Nas próximas secções descreve-se o sistema GUIOMAR e apresentam-se a metodologia e os resultados obtidos para o caso de estudo realizado através deste sistema.

2. SISTEMA GUIOMAR

O sistema GUIOMAR (Neves *et al.* 2009a), tal como mencionado 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 a apresentação de valores numéricos sob a forma de gráficos e tabelas. Estas características representam uma ajuda objectiva e fundamental nos processos de tomada de decisão.

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; e (iii) um conjunto de 6 módulos correspondentes a diferentes modelos de propagação e deformação da agitação marítima com diferentes domínios de aplicação.

O sistema GUIOMAR caracteriza-se pela implementação, em termos de programação do sistema, de vários procedimentos automáticos de modo a reduzir a possibilidade de ocorrência de erros e acelerar a familiarização do utilizador com os procedimentos de operação dos modelos numéricos.

Os modelos numéricos de propagação e deformação da agitação marítima que constituem o sistema GUIOMAR foram seleccionados de modo a permitir a abordagem de diferentes problemas de propagação de ondas marítimas. Neste momento, o sistema GUIOMAR alberga seis módulos/modelos: três modelos baseados na equação de declive suave, DREAMS (Fortes 2002), REF/DIF 1 (Dalrymple e Kirby 1991), REF/DIF S (Kirby e Ozkan 1994); dois modelos baseados na equação de Boussinesq, FUNWAVE 1D e 2D (Kirby *et al.* 1998); e o modelo espectral de geração, propagação e dissipação da agitação marítima SWAN (Booij *et al.* 1999). O programa GMALHA (Pinheiro *et al.* 2006a) constitui também um módulo, sendo responsável pela geração de malhas computacionais não estruturadas. Os modelos utilizados no caso de estudo deste trabalho foram o DREAMS e o SWAN.

A interface gráfica do sistema GUIOMAR que permite ao utilizador aceder e comunicar com o computador, foi inteiramente construída em VBA 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; e (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 do sistema GUIOMAR.

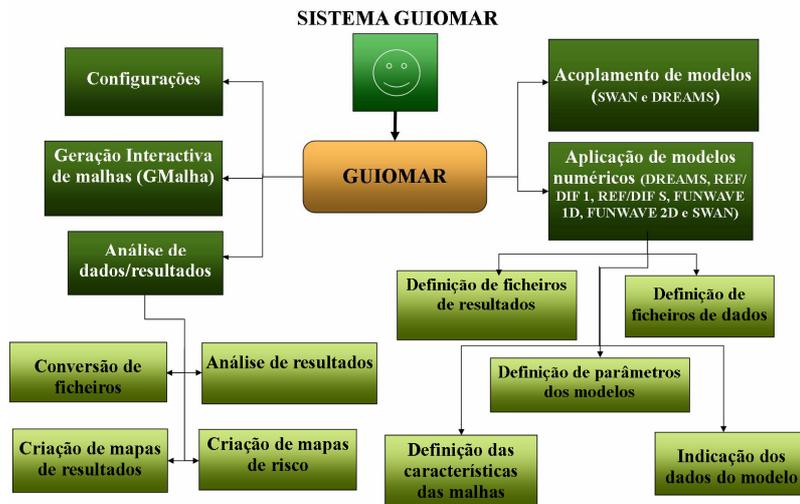


Figura 1 – Estrutura do sistema GUIOMAR.

Um dos grandes objectivos do desenvolvimento do GUIOMAR é a criação de 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 através da barra de ferramentas que o utilizador escolhe o modelo a aplicar de acordo com o estudo que deseja fazer. Uma vez seleccionado o modelo, é escolhida a directoria de trabalho para o projecto e é apresentada uma série de formulários que ajudam o utilizador a introduzir, manipular, e visualizar os dados de entrada no modelo. Posteriormente, os resultados produzidos podem ser visualizados acedendo à zona de visualização dos resultados nos formulários referentes a cada modelo. O mais recente desenvolvimento envolve a construção de um novo módulo no sistema GUIOMAR com o objectivo de produzir automaticamente mapas de risco de acordo com a metodologia apresentada da secção 4. A Figura 2 representa a barra de ferramentas do sistema GUIOMAR através da qual é possível aceder à área de produção de mapas de risco.

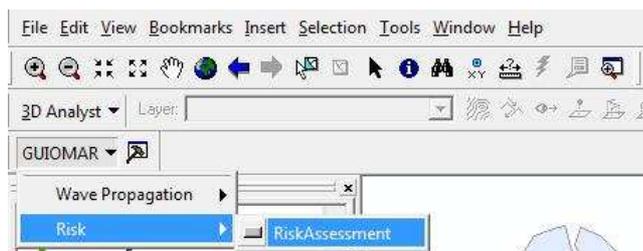


Figura 2 – Barra de ferramentas GUIOMAR com opção para avaliação de risco.

Depois de accionar a tecla “Risk assessment”, surge uma nova interface gráfica no GUIOMAR (Figura 3) capaz de, em 3 passos, construir o mapa de risco associado a movimentos verticais do navio e, se desejável, exportar os resultados de forma visível no Google Earth™.

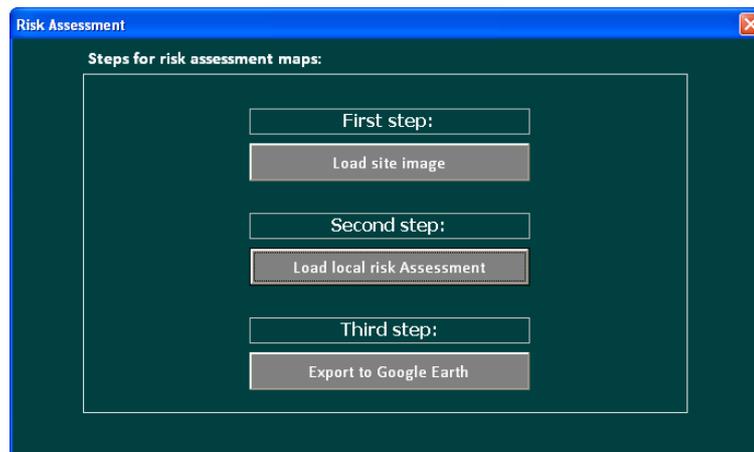


Figura 3 – Interface GUIOMAR para a criação dos mapas de risco para a navegação.

Assim o ficheiro criado durante o cálculo do grau de risco conterá a localização geográfica em coordenadas militares de cada ponto em estudo e numa terceira coluna o valor correspondente ao grau de risco.

A interface GUIOMAR, elabora em 3 passos:

1. *“Load site image”* – carrega a imagem georeferenciada do local para o ambiente de trabalho do ArcGis.
2. *“Load local risk Assessment”* – Lê o ficheiro (.txt) com o grau de risco associado a cada ponto em estudo e transforma em *shapefile* no ArcGis, atribuindo uma bandeira de determinada cor de acordo com o valor do grau de risco associado a cada ponto.
3. *“Export to Google Earth”* – Exporta os pontos e as respectivas bandeiras que sinalizam o risco em cada ponto num ficheiro para abrir em Google Earth™.

3. CASO DE ESTUDO

3.1. Caracterização Geral

Foi no porto de Sines que foram testados os novos desenvolvimentos do sistema GUIOMAR. O porto de Sines, localizado a 37°57'N e 08°53'W, é uma das principais entradas comerciais e económicas da Península Ibérica, considerando-se um porto de extrema importância geográfica e estratégica para Portugal e Espanha, Figura 4.



Figura 4 – Porto de Sines.

Neste momento, o complexo do porto de Sines é composto por várias infra-estruturas marítimas para abrigo e acostagem, tornando-o num dos poucos portos europeus de águas profundas que permitem a acostagem de navios de grande porte. Os elevados valores anuais de movimentação de mercadorias transformaram o porto de Sines no primeiro porto nacional em tonelagem anual movimentada.

Uma vez que se pretende avaliar o risco associado aos movimentos verticais de um navio ao longo da sua trajetória de entrada no porto de Sines e como esses movimentos são causados pela agitação marítima, apresenta-se a caracterização da agitação marítima ao longo dessa trajetória, na zona de entrada do porto e no interior do porto, bem como a resposta à acção das ondas do navio seleccionado.

3.2. Cálculo do Regime de Agitação Marítima

3.2.1. Metodologia

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.* (2004).

Estes valores foram transferidos para o interior do porto com recurso a dois modelos de propagação e deformação da agitação marítima. Com efeito, dados os diferentes domínios de aplicabilidade de cada modelo, para a zona marítima do porto de Sines houve a necessidade de acoplar dois modelos numéricos, Figura 5: o modelo SWAN e o modelo DREAMS. O modelo SWAN permite a propagação e deformação 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 (dado o esforço computacional envolvido não pode ser aplicado a grandes áreas de cálculo).

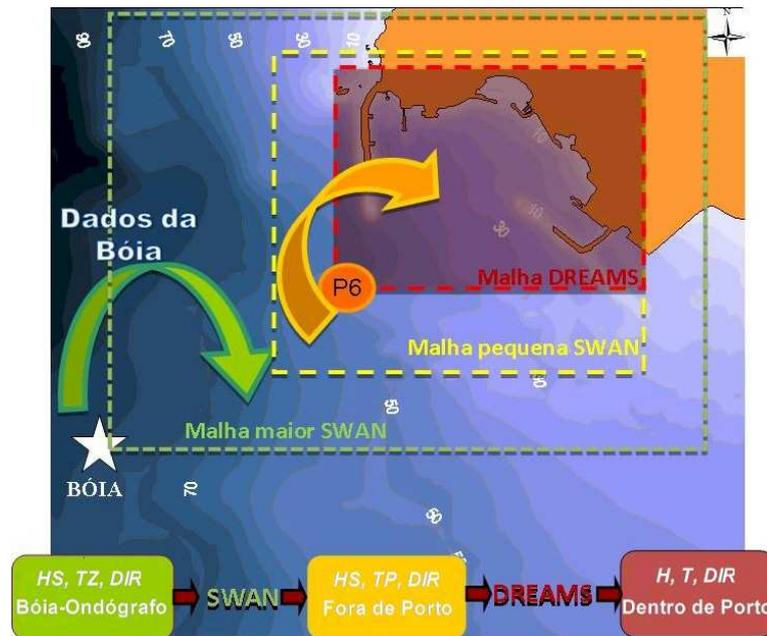


Figura 5 - Metodologia para a transferência do regime de agitação marítima do largo (bóia-ondógrafo) para o interior do porto.

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 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 implementação de 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 (altura de onda significativa, *HS*, período médio de zero ascendente, *TZ*, e direcção *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 (*HS*, *TP*, *DIR*, em que *TP* é o período de pico do espectro). 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.* (2006b), permite efectuar essa transferência de modo automático.

Em resumo, efectua-se primeiramente o cálculo das matrizes que permitem: i) a transferência da agitação marítima do largo (bóia) para a zona da entrada do porto com o modelo SWAN; e ii) a transferência da agitação marítima da zona da entrada para o interior do porto com o modelo DREAMS. Posteriormente, com o programa REGIMES e com as matrizes assim calculadas, são transferidos os

dados de agitação marítima da bóia-ondógrafo para pontos da entrada e do interior do porto. Estes aspectos são descritos seguidamente.

3.2.2. Transferência da agitação marítima para a entrada do porto de Sines

A Figura 6(a) mostra o domínio de cálculo e a batimetria utilizados para efectuar os cálculos com o modelo SWAN. A batimetria foi construída a partir de dados de batimetria do Instituto Hidrográfico, nomeadamente das cartas PT324204 (Dezembro 2005), PT32205 (Dezembro 2005) e PT426408 (Março 1995).

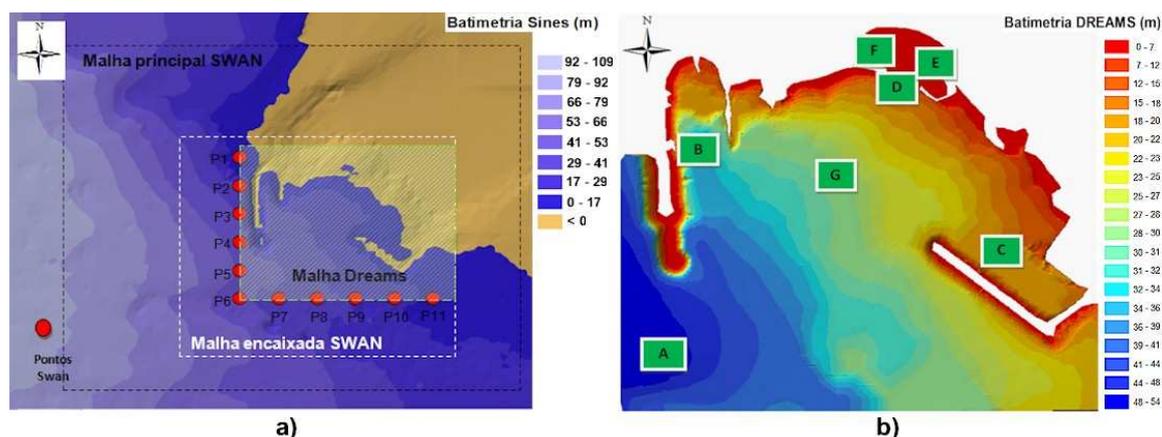


Figura 6 – (a) Batimetria SWAN com os pontos de extracção de resultados e malhas computacionais; (b) Batimetria DREAMS com a localização dos pontos A a G no interior do porto.

Para o modelo SWAN foram definidas 2 malhas computacionais, 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 do modelo SWAN foram inteiramente construídas através do sistema GUIOMAR.

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 , em que TP foi obtido assumindo um espectro de JONSWAP e $TP=1.27 \cdot TZ$) de 4 a 20 s com intervalos de 1 s, e com as direcções (DIR) 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 direccional 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 tríades 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 6(a): cinco 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. A matriz de transferência neste ponto de vértice, o ponto P6, foi a utilizada nos cálculos subsequentes.

3.2.3. Transferência da agitação marítima para o interior do porto de Sines

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

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.* (2006a), e é constituída por 300 139 elementos e 151 669 nós.

As fronteiras (Oeste e Sul, Figura 6(b)) 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, pois cálculos preliminares mostraram que o ponto P6 é representativo da agitação que entra no porto, Neves *et al.* (2009b).

Nas restantes fronteiras do domínio de cálculo, correspondentes aos diferentes trechos que delimitam o porto, procedeu-se ao cálculo dos respectivos coeficientes de reflexão de acordo com o método de Seeling e Arens (1995).

Para a construção da matriz de transferência do modelo DREAMS foram analisados os resultados do modelo SWAN no ponto exterior ao domínio, ponto P6. Os cálculos foram efectuados para períodos de onda regular (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 135 combinações (T, DIR). 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(b).

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 porto de pesca na sua zona mais abrigada, passando pelos regimes de agitação junto aos outros molhes e no centro do porto de Sines.

Após os cálculos atrás indicados, foram calculadas as matrizes de transferência em cada um desses 7 pontos (A a G) e mais concretamente para o caso em estudo nos pontos A e B.

3.2.4. Regimes de agitação no interior do porto de Sines

A aplicação do programa REGIMES aos dados de agitação na bóia de Sines conjuntamente com as matrizes atrás determinadas permite a sua transferência para cada um dos pontos na entrada e no interior do porto e aí estabelecer os respectivos regimes de agitação.

A título de exemplo, mostram-se na Figura 7 para o ponto B (no interior do porto, junto ao molhe Oeste) os histogramas gerais $HS-DIR$, onde cada gráfico inclui também as respectivas distribuições marginais e rosa de direcções.

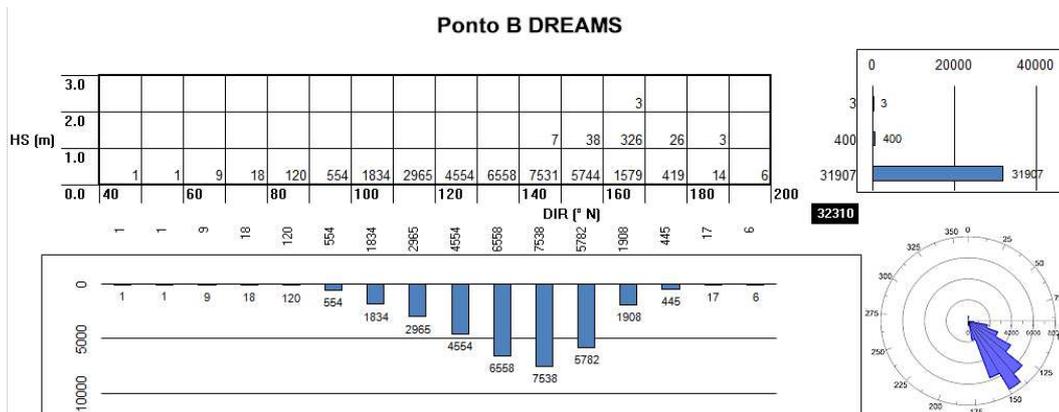


Figura 7 – Regime geral no ponto B: Histograma geral conjunto (*HS*, *DIR*) das ocorrências e respectivas distribuições marginais e rosa de direcções.

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

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

Pontos \ Parâmetros Estatísticos		Máximo	Média	Mínimo	Desvio Padrão	Gama mais Frequente
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 (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 porto de pesca. A partir daí, devido à protecção do porto de pesca (ponto F), os valores de HS são inferiores a 1 m (média de 0.05 m). As zonas abrigadas pelos molhes Oeste e Leste também apresentam valores máximos de altura significativa bastante 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 porto de pesca, ponto A, a direcção média é já de 219° , e no porto de pesca, ponto F, a direcção média é de 102° , enquanto junto à praia de Sines, do lado oposto ao porto de pesca, a rotação é feita no sentido oposto, atingido uma direcção média de 224° .

3.3. Cálculo dos Movimentos do Navio

Escolhido o navio cujo comportamento se pretende estudar, utilizou-se o modelo numérico WAMIT (Newman e Sclavounos 1988) para determinar a resposta do navio, em termos da amplitude dos movimentos segundo cada um dos seis graus de liberdade do mesmo, Figura 8, para uma gama de períodos de onda, profundidades e ângulos entre o eixo longitudinal do navio e o vector número de onda expectável na zona em estudo. Trata-se de um modelo numérico que resolve as equações integrais para os potenciais lineares associados à interacção entre um corpo flutuante e as ondas nele incidentes quando o corpo flutuante está numa região não limitada horizontalmente.

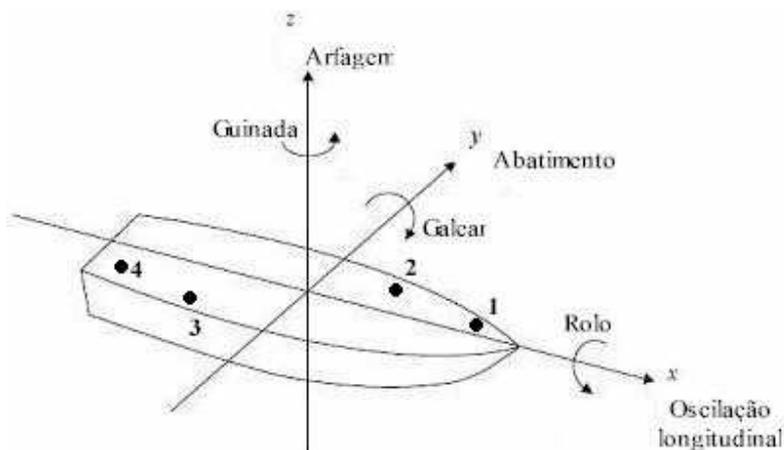


Figura 8 – Movimentos do navio considerado pelo modelo WAMIT e pontos de estudo (1, 2, 3 e 4).

Os movimentos, cujas amplitudes o modelo numérico WAMIT calcula, são os da origem do referencial baricêntrico do navio, mostrado na Figura 8. Por isso, para se obter a amplitude do movimento vertical de qualquer ponto do navio, é necessário avaliar a componente vertical do produto externo do vector velocidade de rotação pelo vector de posição desse ponto do navio em relação à origem do referencial baricêntrico já mencionado. Importa referir que as componentes do vector velocidade de rotação são grandezas complexas pois, para além do módulo da velocidade de rotação em torno de cada um dos eixos, importa conhecer também a fase da mesma velocidade.

No fim deste procedimento, resulta uma matriz de transferência entre a amplitude da componente vertical

do movimento de um ponto do navio e a profundidade da zona onde o navio se desloca, o período e o ângulo entre o eixo longitudinal do navio e o vector número de onda da onda incidente no navio.

Na abordagem preliminar que aqui se descreve, não se levou em conta nem a velocidade de avanço do navio, nem o facto de se ter agitação marítima incidente no navio, em vez de ondas regulares. Além disso, assumiu-se que o contorno do porto está suficientemente afastado do navio para influenciar a resposta do mesmo.

Em resumo, em qualquer um dos baricentros dos troços em que se dividiu a zona passível de ocupação pelo navio em estudo na sua trajectória de entrada no porto, basta conhecer a batimetria do porto nesse ponto, as características da ondulação aí incidente (altura, período e rumo) e o rumo do navio. Com essa informação (a altura da onda excluída) determina-se, com a matriz de transferência, a amplitude do movimento do ponto de interesse para uma onda incidente com amplitude unitária. Como se considera linear a interacção entre o navio e as ondas, basta multiplicar o valor da amplitude do movimento resultante da matriz de transferência pela amplitude correspondente da onda incidente para se obter a amplitude do movimento para aquela onda.

O navio em estudo tem um deslocamento de 122 714 kg, 236 m de comprimento, 43 m de boca e 14.1 m de calado. Considerou-se um ponto no interior do navio com as seguintes coordenadas (-106.2, -15.2, 0), ponto 4 na Figura 8.

Foram efectuados cálculos com o modelo WAMIT para períodos de onda regular (T) entre 6 a 19 s com 1 s de intervalo, para as direcções de onda (DIR) entre 0° e 360° , com 15° de intervalo, e nove valores da profundidade ($PROF$) correspondentes razões calado / profundidade entre 1.1 e 5.0, resultando num número total de 3 024 combinações (T , DIR , $PROF$).

Na Figura 9 apresentam-se os gráficos, para uma profundidade de 42.0 m (aproximadamente o triplo do calado do navio), da variação com o período e o ângulo entre o eixo longitudinal do navio e o vector número de onda da amplitude da componente vertical do movimento do ponto do navio anteriormente indicado. É evidente nos gráficos da Figura 9, um por quadrante, que ondas quase transversais ao navio (ângulos entre o eixo longitudinal do navio e o vector número de onda entre 45° e 135° e entre 225° e 315°) são as que originam maiores amplitudes da componente vertical do movimento do ponto de interesse. Nessa gama de ângulos, é a rotação em torno do eixo x (rolo) e o baixo valor do momento de inércia do navio em relação a esse eixo a causa dessa grande amplitude.

Na Figura 10 apresenta-se para o ângulo entre o eixo longitudinal do navio e o número de onda da onda incidente de 30° a evolução da amplitude da componente vertical do movimento do ponto 4 com a profundidade da zona onde o navio está. Pode verificar-se, nessa figura, que o aumento da profundidade implica a convergência da amplitude do movimento para um valor constante.

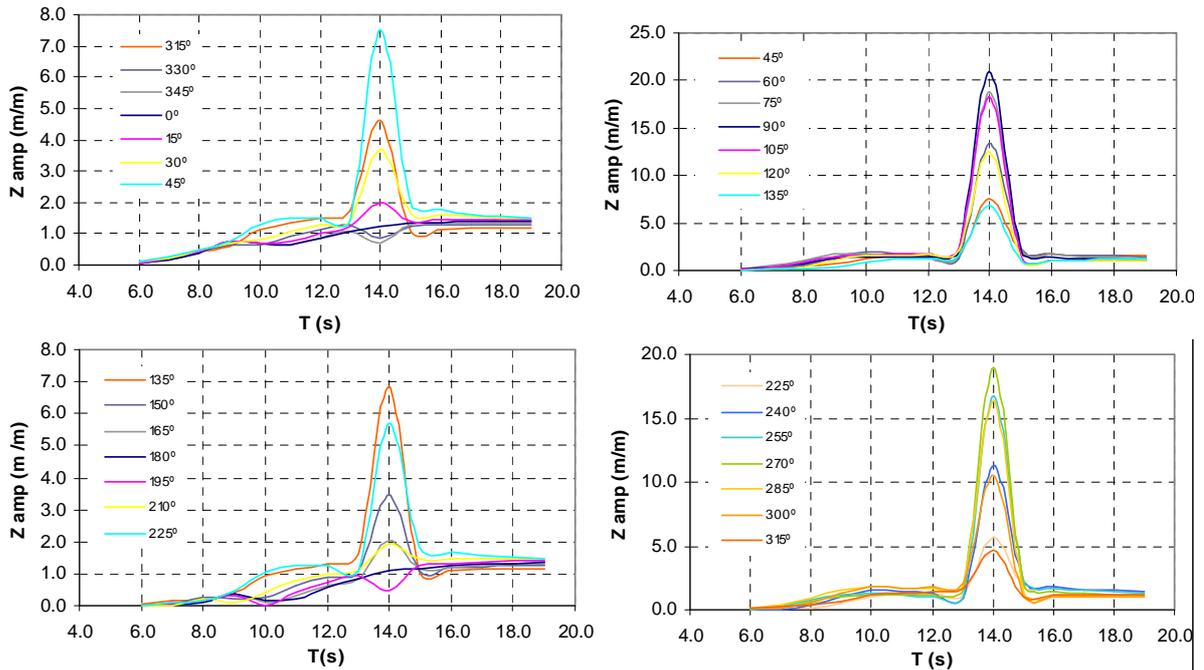


Figura 9 – Variação da amplitude da componente vertical do movimento do ponto 4 do navio com o período da onda incidente e o ângulo entre o eixo longitudinal do navio e o número de onda da onda incidente quando o navio está sobre zona com 42 m de profundidade.

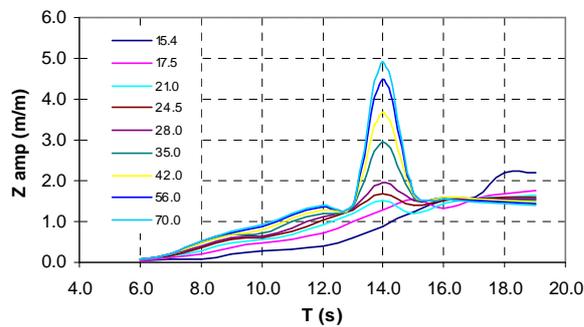


Figura 10 – Variação da amplitude da componente vertical do movimento do ponto 4 do navio com o período da onda incidente a profundidade da zona onde o navio está para ângulo entre o eixo longitudinal do navio e o número de onda da onda incidente de 30°.

Em resumo, para o cálculo da amplitude do movimento vertical do navio em cada trecho, é necessário conhecer os resultados de agitação marítima obtidos com os modelos numéricos SWAN e DREAMS nos baricentros dos trechos da zona varrida pelo navio na sua trajectória de entrada no porto: pontos P6, A e B, Figura 11.



Figura 11 – Esquema de modelação para cálculo dos movimentos do navio e localização dos pontos onde foi aplicado o modelo WAMIT (imagem Google Earth™).

4. AVALIAÇÃO DE RISCO

4.1. Metodologia

Para o caso em estudo, a avaliação do risco para a navegação tem em conta apenas o movimento vertical de um ponto do navio obtido dos resultados do modelo WAMIT. Desta forma, poder-se-á averiguar qualitativamente o risco para a navegação associado à excedência de um limiar pré-estabelecido para a amplitude daquele movimento em cada um dos troços em que se dividiu a área do porto varrida pelo navio na sua trajectória de entrada no porto.

A metodologia de avaliação de risco para uma dada zona portuária em estudo baseia-se assim em cinco etapas principais:

- Definição dos troços onde serão calculados os movimentos de um ponto do navio a partir dos resultados do modelo WAMIT (tal implica o conhecimento das condições de agitação marítima nos baricentros desses troços);
- Definição de limiares aceitáveis para a amplitude do movimento vertical do navio;
- Desenvolvimento de um quadro de Probabilidade de Ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem os limiares pré-estabelecidos e determinação do grau de Probabilidade de Ocorrência para os vários limiares e troços em estudo;
- Desenvolvimento de um quadro de Consequências da ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem os limiares pré-estabelecidos e determinação do grau de Consequências para os vários limiares e troços em estudo;

- Multiplicação do valor do grau de Probabilidade de Ocorrência pelo valor do grau de Consequências associados a cada limiar pré-estabelecido e a cada trecho, para obter o grau de Risco.

4.1.1. Probabilidade de ocorrência:

No Quadro 2 apresenta-se uma classificação preliminar da Probabilidade de Ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem limiares pré-estabelecidos.

Quadro 2 – Probabilidade de Ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem limiares pré-estabelecidos.

Descrição	Probabilidade de Ocorrência (Guia de Orientação)	Grau
Improvável	0 – 1%	1
Raro	1 – 10%	2
Ocasional	10 – 25%	3
Provável	25 – 50%	4
Frequente	> 50%	5

4.1.2. Consequências:

No Quadro 3 apresenta-se uma descrição das Consequências da ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem limiares pré-estabelecidos. Este quadro foi construído com base no guia do *New Zealand Maritime Safety Authority* (2004). O quadro foi elaborado tendo em conta as consequências para as pessoas, para o património relativo aos bens materiais do navio (tanto a nível do próprio navio, como da sua mercadoria), para o ambiente e ecossistema em que está inserido o porto e para a gestão portuária a nível de contratos económicos e transacções comerciais.

Os valores do grau de Consequências foram atribuídos de forma a ser possível, no cálculo do grau de Risco (secção 4.1.3), ter em conta a importância do risco no que diz respeito ao seu controle e priorização. Por exemplo, é importante distinguir entre um evento com elevado grau de Probabilidade de Ocorrência mas com grau de Consequências baixo e um evento com baixo grau de Probabilidade de Ocorrência mas com grau de Consequências muito elevado.

Quadro 3 – Consequências da ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem limiares pré-estabelecidos.

Descrição	Consequências (Guia de Orientação)				Grau
	Pessoas	Património	Ambiente	Gestão Portuária	
Insignificantes	Existe a possibilidade de ferimentos muito ligeiros	Insignificante	Impacto ambiental desprezável ($< 10^4$ €)	Insignificante ($< 10^4$ €)	1
Reduzidas	Uma única lesão ligeira	$10 - 10^2$ €	Pequenos derramamentos de óleo devidos a movimentos operacionais ($10^4 - 10^5$ €)	Má publicidade local para o porto ($10^4 - 10^5$ €)	2
Sérias	Múltiplas lesões ligeiras ou uma única lesão grave	$10^2 - 10^3$ €	Enbarcação passível de ser limitada a uma zona de segurança do porto ($10^5 - 10^6$ €)	Má publicidade generalizada, restrições à navegação, possível encerramento parcial ($10^5 - 10^6$ €)	5
Muito Sérias	Muitas lesões graves ou uma perda de vida	$10^3 - 10^4$ €	Esperados episódios de poluição dentro e fora do porto com potenciais perdas irrecuperáveis para o ambiente ($10^6 - 10^7$ €)	Má publicidade a nível nacional, encerramento temporário do canal de navegação afectando navegação no porto durante vários dias ($10^6 - 10^7$ €)	10
Catastróficas	Muitas perdas de vida	$> 10^4$ €	Derrame de petróleo grave, necessária ajuda internacional, contaminação séria, perdas irrecuperáveis para o ambiente ($> 10^7$ €)	Má publicidade Internacional, encerramento do porto, navegação interrompida durante um longo período, perda considerável de comércio ($> 10^7$ €)	25

4.1.3. Risco:

Risco é o produto da Probabilidade de Ocorrência de um evento adverso pelo valor atribuído às suas Consequências. Assim, no âmbito da metodologia aqui apresentada, faz-se apenas uma avaliação qualitativa do risco para a navegação, resultando o grau de Risco do produto dos graus atribuídos à Probabilidade de Ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem limiares pré-estabelecidos (Quadro 2) e às Consequências dessa excedência (Quadro 3). A matriz de cruzamento destes dois graus encontra-se apresentada no Quadro 4 enquanto no Quadro 5 se descreve a avaliação da aceitabilidade do grau de Risco obtido.

Quadro 4 – Grau de Risco.

GRAU DE RISCO		Consequências				
		1	2	5	10	25
Probabilidade de Ocorrência	1	1	2	5	10	25
	2	2	4	10	20	50
	3	3	6	15	30	75
	4	4	8	20	40	100
	5	5	10	25	50	125

Quadro 5 – Avaliação da aceitabilidade do grau de Risco obtido.

Grau	Descrição	Controlo do Risco (Guia de Orientação)
1 – 3	Insignificante	Risco desprezável; não é preciso levar a cabo medidas de controlo de risco.
4 – 10	Reduzido	Risco que pode ser considerado aceitável/tolerável case se seleccionere um conjunto de medidas para o seu controlo.
15 – 30	Indesejável	Risco que deve ser evitado se for razoável em termos práticos; requer uma investigação detalhada e análise de custo-benefício; é essencial a monitorização.
40 – 125	Inaceitável	Risco intolerável; tem que se proceder ao controlo do risco (e.g. eliminar a origem dos riscos, alterar a probabilidade de ocorrência e/ou as consequências, transferir o risco, etc.).

4.2. Aplicação no Sistema GUIOMAR

Para testar a metodologia apresentada na secção 4, foi definido a título de exemplo um limiar de 1 m para a amplitude do movimento vertical do navio e avaliado o risco de este limiar ser excedido, considerando a probabilidade de ocorrência e as consequências de tal evento nos três pontos em estudo: pontos P6, A e B (Quadro 6). O quadro mostra que o risco nos pontos P6 e A é indesejável e no ponto B é inaceitável.

Quadro 6 – Avaliação do risco de ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem o limiar pré-estabelecido de 1 m.

Pontos	Probabilidade de Ocorrência	Consequências	Risco (Probabilidade x Consequências)
P6	Ocasional (10-25%): Grau 3	Sérias: Grau 5	Indesejável: Grau 15
A	Ocasional (10-25%): Grau 3	Muito Sérias: Grau 10	Indesejável: Grau 30
B	Ocasional (10-25%): Grau 3	Catastróficas: Grau 25	Inaceitável: Grau 75

Na Figura 12 apresenta-se o mapa de risco criado a partir do módulo de construção de mapas de risco do sistema integrado GUIOMAR para o caso considerado. Nesta figura, a cor das bandeiras representa a cor associada a cada grau de risco (Quadro 6).



Figura 12 – Mapa de risco para a navegação relativamente a movimentos verticais que excedem 1 m.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Neste artigo, apresentaram-se desenvolvimentos recentes no sistema GUIOMAR que consistiram num conjunto de procedimentos automáticos de implementação de uma metodologia de avaliação do risco para a navegação portuária. Recorrendo a dados da bóia-ondógrafo situada ao largo do porto de Sines e aos modelos SWAN e DREAMS, foi definido o regime de agitação marítima em vários pontos no interior do porto. Para verificar o efeito da agitação marítima num navio seleccionado foi utilizado o modelo WAMIT. Foi por fim estabelecido o procedimento automático de avaliação do risco considerando que o grau de risco é o produto do grau atribuído à probabilidade de ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem limiares pré-estabelecidos pelo grau atribuído às consequências dessa excedência.

Este aperfeiçoamento do sistema GUIOMAR é mais um passo na implementação de uma metodologia de avaliação do risco para a navegação em zonas portuárias recorrendo à simulação de cenários com base em dados reais de agitação marítima.

No teste desta nova funcionalidade com o exemplo do porto de Sines, confirmou-se que o sistema GUIOMAR permite a realização de estudos de forma interactiva e amigável. Um sistema com a natureza do acima descrito constitui pois uma ferramenta importante para os estudos de segurança elaborados pelas autoridades portuárias.

A melhoria do sistema GUIOMAR constitui uma aposta de futuro, podendo-se referir a extensão do módulo de avaliação de risco para a avaliação do risco de inundação e galgamento de estruturas portuárias ou até de operações de acostagem, carga e descarga de navios. Também está previsto o acoplamento entre os outros modelos que constituem o pacote de calculo numérico do sistema GUIOMAR, incluindo a verificação com dados reais, e a melhoria da visualização automática e interactiva dos dados e resultados dos modelos e dos mapas de risco.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o financiamento concedido através dos projectos PTDC/AMB/67450/2006, PTDC/ECM/67411/2006 e PTDC/ECM/73145/2006.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOOIJ, N.; RIS, R.C.; HOLTHUIJSEN, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *J. Geophysical Research*, 104, C4, pp. 7649-7666.
- 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 em zonas portuárias. Análise pelo método dos elementos finitos*. Tese de doutoramento, Engenharia Mecânica, IST.
- 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.E.M. (2009a). GUIOMAR: Geo(graphical) User Interface for cOastal and MARine Modeling. Supported Decision System. *Journal of Coastal Research, SI 56 (Proc. 10th International Coastal Symposium)*, pp.1542–1546.
- NEVES, D.R.C.B.; ZÓZIMO, A.C.; PINHEIRO, L.V.; FORTES, C.J. (2009b). GUIOMAR: desenvolvimentos recentes e aplicação ao caso de Sines. *Proc. 6^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Funchal, Outubro.
- NEWMAN, J.N.; SCLAVOUNOS, P.D. (1988). The computation of wave loads on large offshore structures. *Proc. Boss 88*, Norway, pp. 1-19.
- NEW ZEALAND MARITIME SAFETY AUTHORITY (2004). *New Zealand Port & Harbour Marine Safety Code*.
- PALHA, A.C. (2007). pyMOIA – Previsão, em tempo real, da agitação marítima em zonas portuárias. *Proc. 5^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, 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. (2006a). Sobre um gerador de malhas de elementos finitos com densidade local condicionada à batimetria para modelos de propagação de ondas em zonas portuárias. *Proc. I Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica*, Lisboa, 8 e 9 de Junho.
- PINHEIRO, L.V.; FORTES, C.J.E.M.; SANTOS, J.A.; NEVES, M.G. (2006b). Caracterização de regimes de agitação marítima utilizando a ferramenta SOPRO. *Proc. 8^o Congresso da Água*, Figueira da Foz.
- SEELING, W.N.; ARENS, J.P. (1995). Wave reflection and energy dissipation by coastal structures. in *Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures*, ed. N. Kobayashi, ASCE, pp. 28-55.