



Aplicação ao Porto de Sines (Portugal) de uma nova Metodologia de Avaliação do Risco para a Navegação Portuária utilizando o Sistema de Informação Geográfica Guiomar *

Application to the Port of Sines (Portugal) of a new Tool for Risk Assessment in Port Navigation using the GIS Guiomar System

Diogo Ruben Neves ^{@,1}, Sara Rodrigues¹, Maria Teresa Reis¹,
Conceição Juana Fortes¹, João Alfredo Santos¹

RESUMO

O presente trabalho descreve a primeira utilização do sistema integrado para modelação numérica em engenharia portuária e costeira, GUIOMAR, na avaliação do risco para a navegação em zonas portuárias. Trata-se de um sistema desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) com o software comercial de Informação Geográfica, ArcGIS™.

Foi criado um conjunto de procedimentos automáticos que implementa uma metodologia de avaliação do risco para a navegação, com base na altura do movimento vertical de um navio provocado pela agitação incidente no navio ao longo da trajectória deste. A metodologia de avaliação do risco considera que o grau de risco é o produto do grau atribuído à probabilidade de ocorrência de movimentos verticais de um navio que ultrapassam um limiar pré-estabelecido pelo grau atribuído às consequências dessa excedência.

Para testar os procedimentos automáticos de avaliação do risco para a navegação, utilizaram-se os registos de agitação marítima 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), contidos no próprio sistema GUIOMAR. O modelo numérico WAMIT foi utilizado para o cálculo dos movimentos verticais de dois navios. O resultado deste trabalho consistiu na criação de mapas de risco para três trajectórias distintas de entrada no Porto de Sines: uma com destino ao terminal petrolífero, outra ao terminal multiusos e outra ao porto de pesca.

Estes desenvolvimentos no sistema GUIOMAR contribuem para que ele constitua um sistema fiável, simples e rápido de suporte à tomada de decisão em estudos portuários e costeiros.

Palavras-chave: Avaliação de Risco, Navegação, Sistemas de Informação Geográfica, GUIOMAR, Porto de Sines.

@ - Autor correspondente

¹ LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. e-mails: Neves - DNEVES@LNEC.PT; Rodrigues - srodrigues@lnecc.pt; Reis - treis@lnecc.pt; Fortes - jfortes@lnecc.pt; Santos - jasantos@lnecc.pt.

* Submissão – 7 Setembro 2010; Avaliação – 2 Outubro 2010; Recepção da versão revista – 20 Outubro 2010; Disponibilização on-line – 14 Janeiro 2011

ABSTRACT

This paper describes a first approach on the port navigation risk assessment using GUIOMAR, an integrated system for port and coastal engineering modelling developed at the National Civil Engineering Laboratory (LNEC), Portugal, using the GIS software ArcGIS™.

One of the major concerns in naval and port engineering is the navigation safety within a port. When there is an obvious lack of security, the consequences might be devastating. Losses of human lives, cargo disturbances and environmental impacts can heavily penalize the maritime industries. Consequently, it has become increasingly important to develop methodologies and tools for risk assessment in port navigation.

To assess the risk in port navigation, an integration of sea wave data near the port with numerical simulations is required, thus enabling the definition of the least favorable scenarios in terms of port navigation. A better understanding of the sea wave characteristics can be obtained using the numerical models of wave propagation and deformation that allow the simulation of relevant scenarios.

However, since numerical models lead to large amounts of information, their implementation is complex and requires time for both preparation of the input data and results analysis. It is in this aspect that Geographical Information Systems (GIS) are an asset, allowing a better understanding of spatial and temporal information associated with complex natural phenomena through the sampling of trends and patterns that are essential in any decision-making process.

In this context, the GUIOMAR system (Neves et al., 2009a,b) has been developed at the National Civil Engineering Laboratory (LNEC), Portugal, to become an integrated system for port and coastal engineering modelling in Portugal. Since this system is based on the GIS commercial software ArcGis™, it enables the application of wave propagation models using all the functionalities inherent to GIS software and will certainly help in the management of port and coastal zones.

A set of automatic procedures was designed to include a new methodology for navigation risk assessment based on the height of the wave-induced vertical movement of a ship along her trajectory. For each ship considered, the methodology can be summarized in three major steps: (i) determination of the wave regime at the gravity centers of the sections of the ship's trajectory within the port; (ii) determination of the amplitude of the vertical movements of a selected point in the ship in each of those gravity centers; and (iii) evaluation of the port navigation risk by assessing the product of the degree of probability of exceedance of a pre-set threshold for the ship's vertical movements by the degree of its consequences.

To test these new procedures, a set of sea wave records of the Sines wave-buoy from 1988 to 2002 was transferred into the Sines Port using two numerical models for sea wave propagation and deformation (SWAN and DREAMS), included in the GUIOMAR system. The numerical model WAMIT was used for estimating the wave-induced vertical movements of two ships inside the port. By applying these new procedures, automatic generation of risk maps was carried out for three different trajectories for entrance voyages into the port: one ending at the oil terminal, another at the multipurpose terminal and another at the fishing port.

These developments do contribute towards a more versatile and efficient GUIOMAR system, which results in a more adequate tool to support decision-making processes in port and coastal management.

Keywords: Risk Assessment, Navigation, Geographical Information Systems, GUIOMAR, Port of Sines.

1. INTRODUÇÃO

Uma das principais preocupações para engenheiros navais e portuários é a segurança dos navios durante a navegação no interior de um porto. As consequências podem ser graves 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 e ferramentas capazes de avaliar o risco para a navegação portuária.

Para alcançar este objectivo e dada a natureza dos portos, o conhecimento da agitação marítima e dos seus efeitos na navegação é fundamental. Neste campo, os modelos numéricos dão um contributo

importante, permitindo, de forma rápida e concisa e abrangendo domínios relativamente extensos, a simulação de cenários reais e especialmente daqueles menos favoráveis do ponto de vista da segurança. Contudo, a aplicação dos modelos numéricos é complexa e requer tempo, não só para a preparação dos dados de entrada, mas também para a análise dos resultados obtidos, já que os modelos numéricos são capazes de produzir grandes quantidades de informação. É nesta vertente que os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) são uma mais-valia, pois permitem uma análise espacial e temporal da informação associada a fenómenos naturais complexos através da amostra de tendências e padrões, essenciais em processos de tomada de decisão que se

pretendem céleres. 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 portuária e costeira.

Neste contexto, tem vindo a ser desenvolvido no LNEC um sistema integrado aplicado à costa portuguesa para modelação da agitação marítima em zonas portuárias e costeiras, GUIOMAR (Zózimo e Fortes, 2007; Zózimo *et al.*, 2008; Neves *et al.*, 2009a). 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. Tal sistema foi desenvolvido com os objectivos de facilitar a utilização de modelos de propagação da agitação marítima e de apoiar a tomada de decisão em estudos de engenharia portuária e costeira.

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 estabelecida 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 Scavounos, 1988), para o cálculo dos movimentos de um navio. A metodologia de avaliação de risco foi implementada como um novo módulo no sistema GUIOMAR, que aplica os procedimentos de avaliação de risco de forma automática e possibilita ao utilizador a elaboração 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 em vários pontos na entrada e no interior do porto a partir dos dados medidos entre 1988 e 2002 na 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 em cada um dos dois navios nos baricentros das regiões consideradas nas trajectórias respectivas de entrada no porto; e (iii)

cálculo do grau de risco associado à excedência de limiares pré-estabelecidos para um dado movimento vertical, a partir da análise quantitativa da probabilidade de ocorrência dessa excedência e da análise qualitativa das consequências da mesma. Os resultados são ilustrados através de mapas do risco para a navegação relativamente aos movimentos verticais dos navios.

2. METODOLOGIA

A metodologia de avaliação do risco para a navegação portuária consiste na combinação da probabilidade de ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem um limiar pré-estabelecido com as respectivas consequências. Para tal, é necessário primeiramente determinar para um ponto seleccionado do navio em estudo a altura do movimento vertical induzido pela agitação marítima ao longo da trajectória do navio.

Para cada navio considerado e para cada uma das regiões da trajectória do navio no interior do porto, a metodologia proposta neste trabalho consiste em três passos fundamentais (Figura 1):

- Definição do regime de agitação marítima no interior do porto. Neste trabalho, partiu-se das condições de agitação marítima medidas ao largo e recorreu-se a dois modelos numéricos de propagação de ondas: a) SWAN (Booij *et al.*, 1999); e b) DREAMS (Fortes, 2002) para a transferência dessas condições para o interior do porto;
- Cálculo do movimento vertical de um ponto seleccionado do navio utilizando o modelo numérico WAMIT (Newman & Scavounos, 1988), para a interacção de corpos flutuantes com ondas;
- Cálculo do grau de risco associado à excedência do limiar pré-estabelecido para os movimentos verticais do navio através da análise quantitativa da probabilidade desse limiar ser excedido e de uma análise qualitativa das respectivas consequências. Os resultados são ilustrados através de mapas de risco para a navegação associado aos movimentos verticais do navio.



Figura 1 – Metodologia de avaliação do risco.

Figure 1 – Risk assessment methodology.

A metodologia de avaliação de risco foi implementada no GUIOMAR através de um novo módulo que aplica automaticamente os procedimentos de avaliação de risco e produz mapas de risco pré-formatados.

As secções seguintes descrevem sucintamente os procedimentos associados a cada um dos passos apresentados anteriormente.

2.1. Regime de agitação marítima no interior do porto

Para definir o regime de agitação marítima no interior do porto, são considerados os seguintes passos (Figura 2):

- Definição do regime de agitação marítima ao largo do porto (bóia-ondógrafo), em função da altura de onda significativa, HS, do período médio de zero ascendente, TZ e da direcção média, DIR;
- Cálculo da matriz de transferência das condições de agitação do largo (bóia-ondógrafo) para o interior do porto utilizando modelos numéricos de propagação de ondas;
- Uso do programa REGIMES (Pinheiro *et al.*, 2006b) e da matriz de transferência para transferir os dados do largo (bóia-ondógrafo) para os pontos localizados no interior do porto;
- Definição do regime de agitação marítima no interior do porto, em função de HS, do período de pico do espectro, TP e de DIR.

Em Neves *et al.* (2010) apresenta-se uma descrição mais detalhada destes passos.

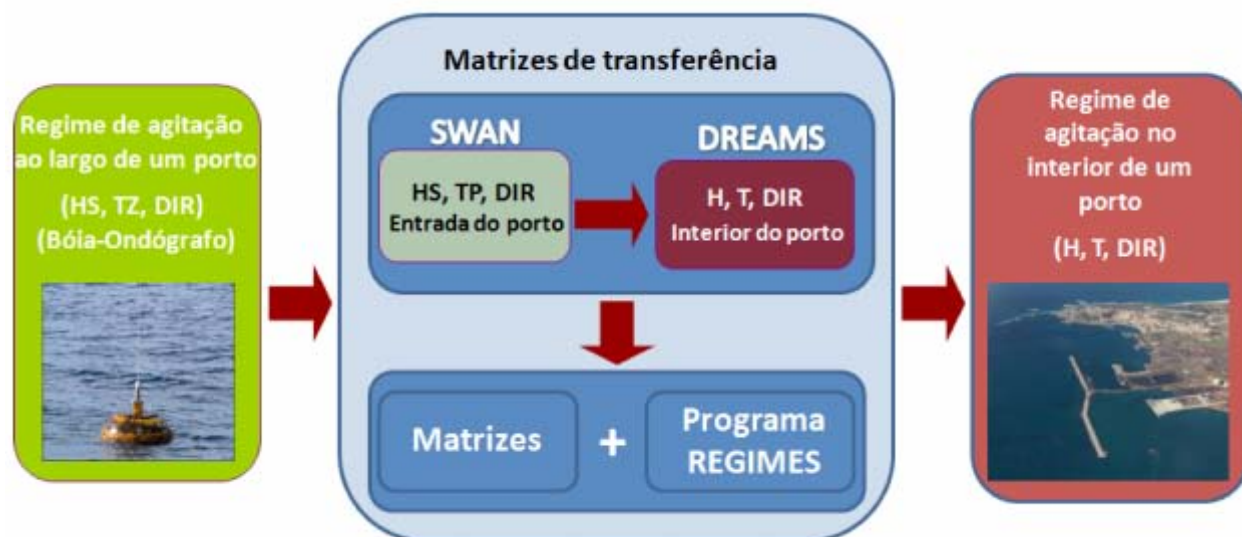


Figura 2 - Passos para a definição do regime de agitação marítima no interior de um porto.

Figure 2 - Steps to define the wave regime inside a port. 11

2.2. Cálculo dos movimentos do navio

Escolhido o navio cujo comportamento se pretende estudar, utiliza-se o modelo numérico WAMIT (Newman & Sclavounos, 1988) para determinar a matriz de transferência que estima a altura da componente vertical do movimento de um ponto do navio a partir da profundidade da zona onde o navio se desloca, do período da onda e do 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.

Em resumo, em qualquer um dos baricentros dos trechos 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 local incidente (altura, período e direcção) e o rumo do navio. Com essa informação (a altura da onda excluída) determina-se, com a matriz de transferência, a altura do movimento do ponto de interesse para uma onda incidente com altura unitária. Sendo linear a interacção entre o navio e as ondas, o produto da altura do movimento resultante da matriz de transferência pela altura correspondente da onda incidente fornece a altura do movimento para aquela onda.

2.3. Avaliação do risco

2.3.1. Metodologia

Neste artigo, a avaliação do risco para a navegação de um navio tem em conta apenas o movimento vertical de um ponto seleccionado do navio obtido dos resultados do modelo WAMIT. Desta forma, determina-se o risco para a navegação associado à excedência de um limiar pré-estabelecido para a altura daquele movimento em cada um dos trechos em que se divide 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 que foi implementada no sistema GUIOMAR baseia-se em cinco etapas principais, resumidas na Figura 3 e que se encontram descritas com algum detalhe em Neves et al. (2010).

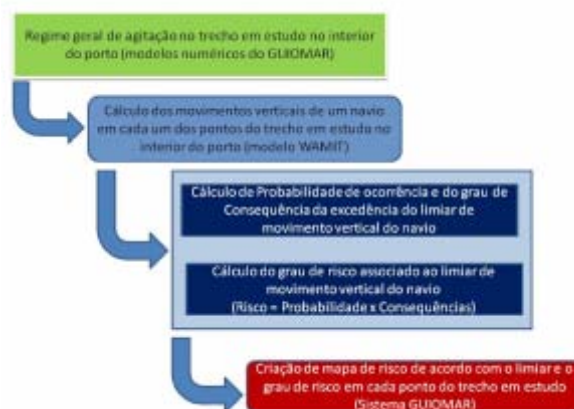


Figura 3 - Metodologia para a avaliação de risco numa zona portuária.

Figure 3 - Risk assessment methodology for port navigation

2.3.2. Probabilidade de ocorrência

Na Tabela 1 apresenta-se uma classificação preliminar da probabilidade de ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem um limiar pré-estabelecido.

Tabela 1 - Probabilidade de ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem um limiar pré-estabelecido.

Table 1 - Probability of exceedance of pre-set thresholds of the ship's vertical movements.

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

2.3.3. Consequências

Na Tabela 2 apresenta-se uma descrição preliminar das consequências da ocorrência de movimentos verticais excessivos de um navio. Esta tabela foi construída com base no guia do *New Zealand Maritime Safety Authority* (2004). A tabela foi elaborada tendo em conta as consequências para as pessoas, para o navio (tanto a nível do próprio navio, como da sua mercadoria), para o ambiente e para a gestão portuária.

Tabela 2 - Consequências da ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem um limiar pré-estabelecido.

Table 2 - Consequences of exceedance of pre-set thresholds of the ship's vertical movements.

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

Os valores do grau de consequências foram atribuídos de forma a ser possível, no cálculo do grau de risco (secção 2.3.4), ter em conta a importância do risco no que diz respeito ao seu controlo e priorização.

2.3.4. Risco

O risco é definido como o produto da probabilidade de ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem um limiar pré-estabelecido pelo valor atribuído às suas consequências. 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 (Tabela 1) e às consequências (Tabela 2). A matriz de cruzamento

destes dois graus encontra-se apresentada na Tabela 3 enquanto na Tabela 4 se descreve a avaliação da aceitabilidade do grau de risco obtido.

3. SISTEMA GUIOMAR

O sistema GUIOMAR (Zózimo & Fortes, 2007; Zózimo et al., 2008; e Neves et al., 2009a,b) é um sistema integrado para a modelação numérica em engenharia portuária e costeira, desenvolvido em linguagem de programação VBA (*Visual Basic for Applications*), num Sistema de Informação Geográfica (SIG). São três as suas componentes principais:

- i) Um sistema de informação geográfica, e neste caso, o *software* comercial de SIG o ArcGISTM;
- ii) Um conjunto de seis módulos correspondentes a diferentes modelos de propagação e deformação

da agitação marítima com diferentes domínios de aplicação;

- iii) Uma interface gráfica (GUI), desenvolvida na linguagem de programação VBA, responsável pela ligação entre o *software* SIG e os modelos numéricos de propagação de ondas, possibilitando: a) a execução dos modelos numéricos; b) o pré e pós processamento de dados e de resultados dos modelos numéricos; e c) a utilização de funcionalidades existentes no *software* SIG, tais como a análise e a visualização de dados e resultados, tanto em 2D como em 3D.

Presentemente, o sistema GUIOMAR alberga seis módulos/modelos: três modelos baseados na equação de declive suave - DREAMS (Fortes, 2002), REF/DIF 1 (Dalrymple & Kirby, 1991), e REF/DIF S (Kirby & Ozkahn, 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 para os modelos numéricos e pode correr independentemente ou acoplado.

A natureza modular do sistema permite ao programador efectuar de forma fácil os melhoramentos e actualizações, tal como a inclusão de novos modelos numéricos com capacidades superiores e que simulem diferentes processos físicos. O sistema GUIOMAR caracteriza-se pela implementação, em termos de programação do sistema, de vários procedimentos automáticos para reduzir a ocorrência de erros humanos e para acelerar a familiarização do utilizador com os procedimentos de operação dos modelos numéricos.

Tabela 3 - Grau de risco.

Table 3 - Risk level.

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

Tabela 4 - Avaliação da aceitabilidade do grau de risco obtido.

Table 4 - Assessment of the acceptability of the risk level.

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	Acceptável	Risco que pode ser considerado tolerável caso se seleccione 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 (i.e. eliminar a origem dos riscos, alterar a probabilidade de ocorrência e/ou as consequências, transferir o risco, etc.).

A Figura 4 mostra a estrutura do sistema GUIOMAR.

É através da barra de ferramentas que o utilizador escolhe o modelo a aplicar de acordo com o estudo que desejar 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 e a correr o modelo numérico seleccionado. Posteriormente, os resultados

produzidos podem ser visualizados acedendo à zona de visualização dos resultados nos formulários referentes a cada modelo.

O mais recente desenvolvimento no sistema GUIOMAR consiste num módulo que produz automaticamente mapas de risco de acordo com a metodologia apresentada na secção 2.3.1. A Figura 5 representa a barra de ferramentas do sistema GUIOMAR através da qual é possível aceder à área de produção de mapas de risco.

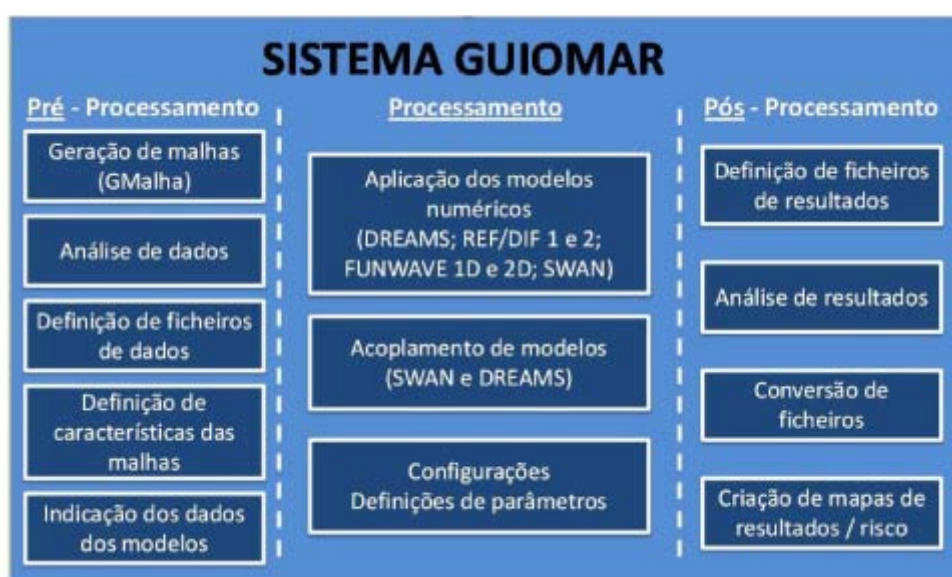


Figura 4 - Estrutura do sistema GUIOMAR.

Figure 4 - Structure of the GUIOMAR system.



Figura 5 - Barra de ferramentas GUIOMAR com opção para avaliação de risco.

Figure 5 - GUIOMAR toolbar with the Risk Assessment option

Depois de accionar a tecla “RiskAssessment”, surge uma nova interface gráfica no GUIOMAR (Figura 6) 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™:

1. “Load site image” – carrega a imagem georreferenciada 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 cuja cor reflecte o grau de risco associado a cada ponto;
3. “Export to Google Earth” – Exporta os pontos e as cores das respectivas bandeiras que sinalizam o risco em cada ponto num ficheiro (.kmz) para abrir em Google Earth™.

O ficheiro criado durante o cálculo do grau de risco conterá a localização geográfica, em coordenadas militares, de cada ponto em estudo e o valor correspondente do grau de risco.

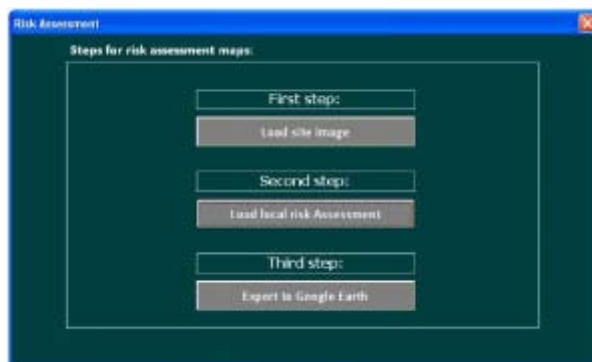


Figura 6 - Interface GUIOMAR para a criação dos mapas de risco para a navegação.

Figure 6 - GUIOMAR graphical interface for the establishment of navigation risk maps.

4. CASO DE ESTUDO

4.1. O Porto de Sines

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 7).



Figura 7 - Porto de Sines.

Figure 7 - Port of 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 (essencialmente granéis líquidos e sólidos) fazem do Porto de Sines o primeiro porto nacional em tonelagem anual movimentada.

Uma vez que se pretende avaliar o risco associado aos movimentos verticais de dois navios ao longo das suas trajectórias de entrada no Porto de Sines e como esses movimentos são causados pela agitação marítima, apresenta-se a caracterização da agitação marítima ao longo dessas trajectórias (na zona de entrada do porto e no interior do porto), bem como a resposta dos navios seleccionados à acção das ondas.

4.2. Cálculo do regime de agitação marítima no interior do Porto de Sines

4.2.1. Introdução

Para a caracterização da agitação marítima ao longo das trajectórias de entrada dos navios no Porto de Sines, 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: o modelo SWAN (Booij *et al.*, 1999) e o modelo DREAMS (Fortes, 2002). Com efeito, dados os diferentes domínios de aplicabilidade de cada modelo, houve a necessidade de acoplar estes dois modelos numéricos para a zona marítima do Porto de Sines (Figura 8).

O modelo SWAN permitiu a propagação e deformação das ondas desde águas profundas até junto à entrada do porto. Contudo, não pode ser utilizado em zonas confinadas, já que não simula correctamente as reflexões de onda provocadas pelo contorno da bacia portuária. Por este motivo, para propagar a agitação obtida à entrada do porto para o seu interior, tornou-se imperativo o uso do modelo DREAMS, que tem em conta os fenómenos

característicos das reflexões no interior de portos, mas que tem a sua utilização limitada a pequenas áreas, devido ao esforço computacional que envolve.

Ainda assim, o tempo de cálculo necessário para executar os dois modelos para uma série de 32 807 registos da bóia continua a ser um factor limitativo, demorando cada simulação com ambos os modelos cerca de 45 minutos. Para a totalidade dos registos seriam necessários vários meses para efectuar todos os cálculos.

Desta forma, seguindo a metodologia descrita na secção 2.1, após o cálculo das matrizes de transferência para cada modelo e através da aplicação do programa REGIMES, é obtido o regime de agitação no interior do Porto de Sines. Resumindo, os passos que definem o procedimento para o caso de estudo considerado são (Figura 2):

- Definição do regime de agitação marítima ao largo do porto (i.e. na bóia-ondógrafo “Sines 1D”);
- Cálculo da matriz de transferência das condições de agitação do largo (bóia-ondógrafo) para a entrada do porto utilizando o modelo SWAN;
- Cálculo da matriz de transferência das condições de agitação da entrada do porto para o interior do mesmo utilizando o modelo DREAMS;
- Uso do programa REGIMES e das matrizes de transferência para transferir os dados do largo (bóia-ondógrafo) para os pontos seleccionados na entrada e no interior do porto;
- Definição do regime de agitação marítima no interior do porto.

Seguidamente, são apresentadas as condições para as quais os modelos foram aplicados, as suas matrizes de transferência e o regime de agitação nos pontos considerados.

4.2.2. Regime de agitação ao largo

A Figura 9 apresenta o regime geral observado na bóia-ondógrafo de Sines baseado no total de 32 807 registos obtidos entre Maio de 1988 e Dezembro de 2002.

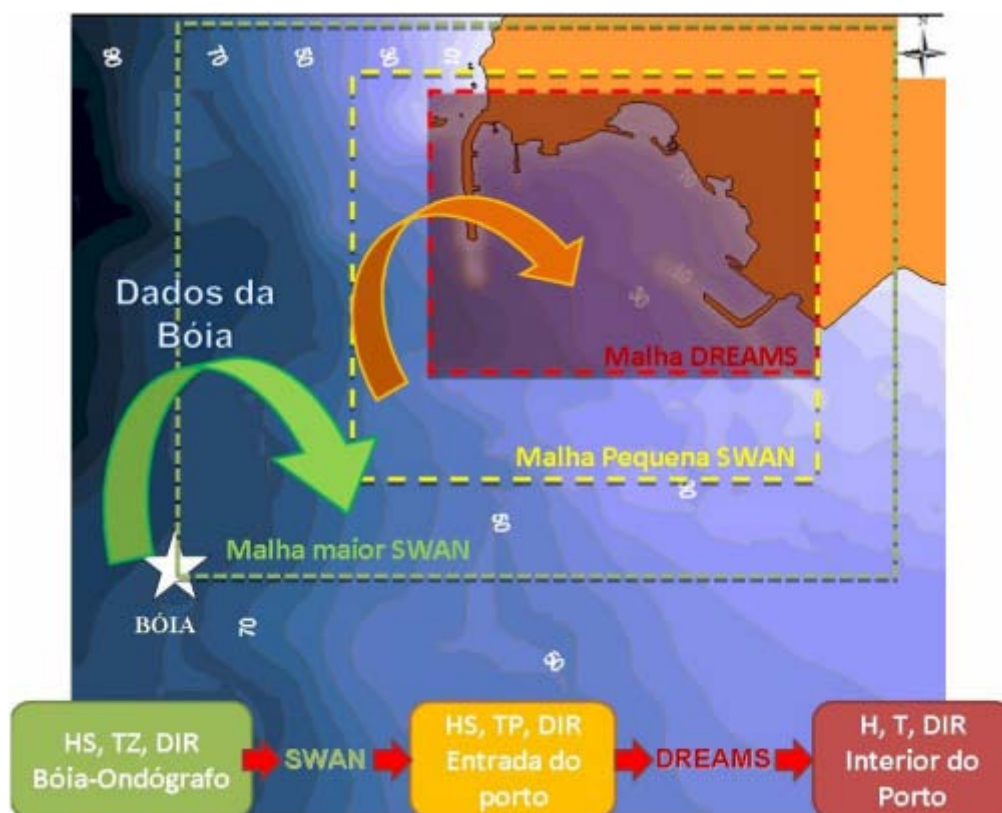


Figura 8 - Metodologia para a transferência do regime de agitação marítima do largo (bóia-ondógrafo Sines-1D) para o interior do Porto de Sines.

Figure 8 - Methodology to transfer the wave regime from offshore (wave-buoy Sines 1D) into the Port of Sines.

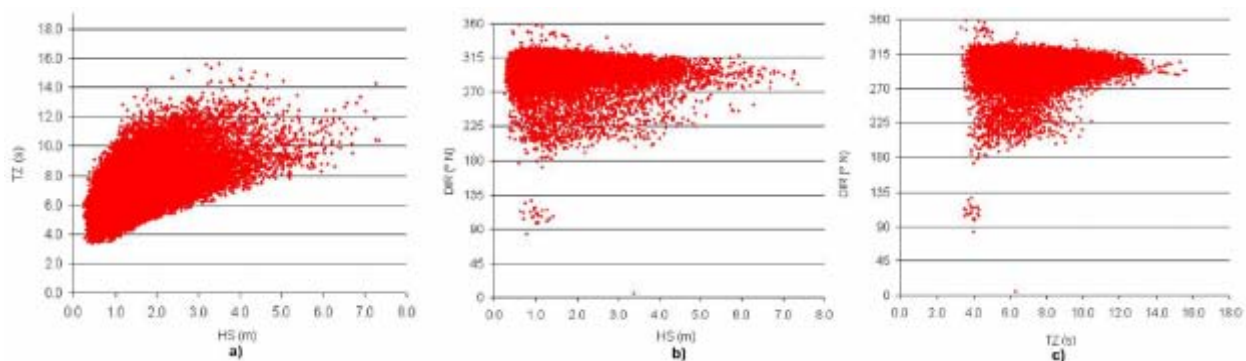


Figura 9 - Regime geral observado. Relações HS-TZ, HS-DIR e TZ-DIR dos registos na bóia-ondógrafo de Sines (Maio-1988 a Dez-2002).

Figure 9 - Wave regime. HS-TZ, HS-DIR e TZ-DIR relation diagrams from the Sines wave-buoy records (from May-1988 to Dec-2002).

A Tabela 5 apresenta os valores estatísticos dos máximos, médias, mínimos, desvios padrões e gamas mais frequentes dos parâmetros de altura significativa (HS), período médio (TZ), período de pico (TP) (transformado de TZ, onde TP é 1.27 de TZ) e direcção média (DIR) das ondas.

Com base na tabela e nas figuras acima apresentadas, verifica-se que na bóia de Sines: (i) as alturas de onda significativas variam entre os 0.27 m e 7.35 m, sendo o intervalo de 1.0 m a 2.0 m aquele que regista os valores mais frequentes (48.05%); (ii) os períodos médios apresentam valores entre 3.3 s e 15.6 s, sendo os valores no intervalo de 5.0 s a 6.0 s os mais frequentes (23.37%); (iii) os períodos de pico apresentam valores entre 4.2 s e 19.8 s, sendo os valores no intervalo de 6.0 s a 7.0 s os mais frequentes (17.78%); (iv) os valores representativos das direcções médias de onda apresentam valores entre 5° e 358° sendo as direcções mais frequentes compreendidas entre 300° e 310° (32.68%), constatando-se uma grande predominância (99.96%) das direcções de Noroeste.

4.2.3. Matriz de transferência SWAN

A Figura 10(a) mostra o domínio de cálculo e a batimetria utilizados para efectuar os cálculos com o modelo SWAN (versão 40.72AB). 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).

Para o modelo SWAN foram definidas 2 malhas computacionais, tendo a malha principal uma dimensão de 8 km por 8 km, cobrindo todo o

domínio de cálculo com uma resolução de 80 m, e uma segunda 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.

Para definir a matriz de transferência das condições de agitação do largo (bóia-ondógrafo) para a entrada do porto, o modelo SWAN foi executado 2906 vezes, para cada uma das condições de agitação ao largo resultantes da combinação de: i) 9 valores da altura significativa, de 1 m a 9 m, com uma discretização de 1 m; ii) 17 valores do período de pico, de 4 s a 20 s, com intervalos de 1 s (em que os períodos de pico TP foram obtidos assumindo um espectro de JONSWAP e $TP=1.27 \cdot TZ$); e iii) 18 valores da direcção da onda, de 180° a 360°, com intervalos de 10°.

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 Hz a 1 Hz, e uma discretização em direcção de 2°, de 0° a 360° (180 intervalos).

Os cálculos foram efectuados em regime estacionário e consideraram-se os fenómenos de atrito de fundo, difracção, empolamento, rebentação devida à influência do fundo e à declividade da onda, e efeito da interacção entre tríades de ondas (*triad wave-wave*

Tabela 5 - Valores máximos, médios, mínimos, desvios padrões e gamas mais frequentes de HS, TZ, TP e DIR da bóia-ondógrafo de Sines (Maio-1988 a Dez-2002).

Table 5 - Sea wave statistical parameters of HS, TZ, TP and DIR recorded at the Sines wave-buoy (from May-1988 to Dec-2002).

Local \ Parâmetros Estatísticos	Máximo	Média	Mínimo	Desvio Padrão	Gama mais Frequente	
Bóia	HS (m)	7.35	1.60	0.27	0.90	[1.0 - 2.0] (48.05%)
	TZ (s)	15.6	7.0	3.3	1.8	[5.0 - 6.0] (23.37%)
	TP (s)	19.8	8.8	4.2	2.3	[6.0 - 7.0] (17.78%)
	DIR (°)	358	299	5	18	[300 - 310] (32.68%)

interactions). Não se consideraram os fenómenos devidos à presença do vento (dada a pequena extensão do domínio) e de correntes (por falta de informação).

Foram definidos 11 pontos de estudo para obter resultados do modelo SWAN (Figura 10a): cinco (pontos P1 a P5) localizados na fronteira Oeste da malha do modelo DREAMS; cinco (pontos P7 a P11) localizados na fronteira Sul; e um (ponto P6) refere-se a um ponto de vértice da malha DREAMS, localizado à entrada do porto. A matriz de transferência no ponto P6 foi a utilizada nos cálculos subsequentes, uma vez que cálculos preliminares mostraram que o regime de agitação neste ponto é representativo do regime de agitação à entrada do porto (Neves et al., 2009b).

4.2.4. Matriz de transferência DREAMS

O modelo DREAMS efectuou a propagação da agitação marítima desde a entrada do 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 10 (b).

O domínio computacional foi discretizado por uma malha de elementos finitos com 300 139 elementos e 151 669 nós que foi gerada através do módulo de geração de malhas não-estruturadas

GMALHA (Pinheiro et al., 2006a).

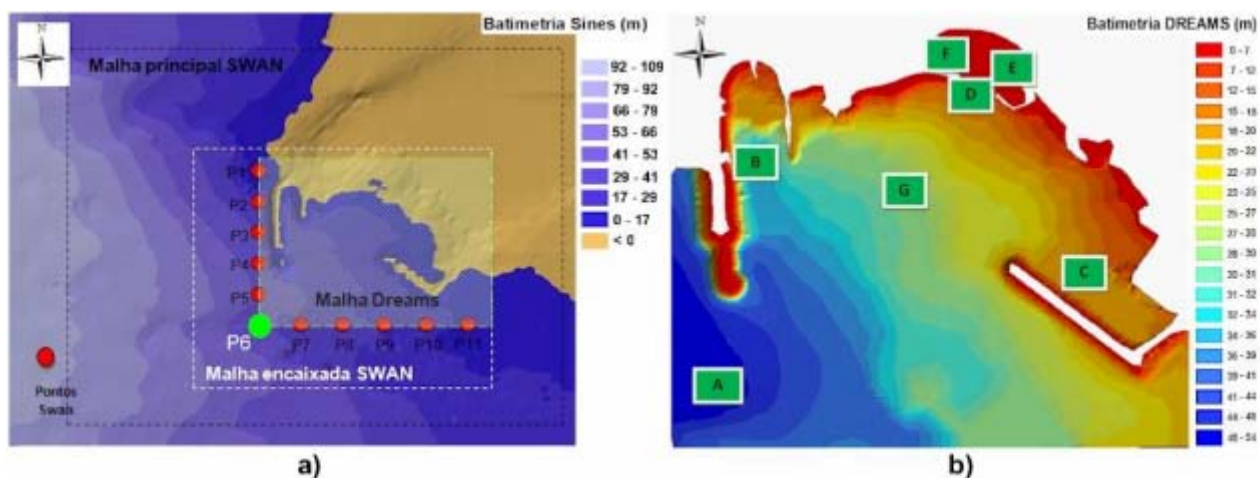
As fronteiras (Oeste e Sul, Figura 10b) são fronteiras de entrada onde se impuseram os valores de agitação incidente que, neste caso, resultaram dos valores calculados pelo modelo SWAN no ponto P6. Nas restantes fronteiras do domínio de cálculo, correspondentes aos diferentes trechos que delimitam o porto, procedeu-se ao cálculo dos respectivos coeficientes de reflexão de acordo com o método de Seeling e Arens (1995).

Os cálculos foram efectuados considerando ondas regulares com períodos (T) entre 5 s e 20 s, com 1 s de intervalo, e com 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 porto foram definidos 7 pontos (A, B, C, D, E, F e G) de análise dos resultados do modelo DREAMS (Figura 10b), localizados na entrada (ponto A) e no interior do porto (pontos B a G). A disposição espacial dos pontos permitiu conhecer o regime de agitação marítima desde a entrada do Porto de Sines (ponto A) até ao porto de pesca e à praia de Sines na zona mais abrigada do porto (pontos D, E F), passando pelas áreas junto aos molhes Oeste e Leste

Figura 10 - (a) Batimetria SWAN com os pontos de extracção de resultados e malhas computacionais; (b) Batimetria DREAMS com a localização dos pontos A a G na entrada e no interior do porto.

Figure 10 - (a) SWAN bathymetry, computational meshes and results points; (b) DREAMS bathymetry with the location of points A to G at the entrance and inside the port.



(pontos B e C, respectivamente) e pelo centro da bacia portuária (ponto G). A matriz de transferência DREAMS foi definida para cada um destes pontos.

4.2.5. Regime de agitação no interior do porto

A aplicação do programa REGIMES aos dados de agitação na bóia de Sines, conjuntamente com as duas matrizes de transferência atrás determinadas, permitiu a transferência dos 32 807 registos da bóia 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 11 para o ponto D (à entrada do porto de pesca) o histograma geral conjunto HS-DIR, as respectivas distribuições marginais e a rosa de direcções.

Na Tabela 6 indicam-se os valores dos parâmetros estatísticos (máximo, média, mínimo, desvio-padrão e gama mais frequente) do estado de agitação marítima na bóia e em cada ponto seleccionado (P6 e A a G).

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, os valores apresentam um máximo de 8.05 m (média igual a 1.5 m) no ponto A, enquanto que à entrada do porto de pesca (ponto D) o máximo reduz para 3.83 m (média de 0.31 m). Devido às estruturas de protecção do porto de pesca, a altura significativa atinge, no ponto E, valores da ordem dos 2.5 m (média de 0.23 m) e no ponto F, valores 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, na entrada do porto, ponto A, não há grande variação da direcção da onda face à direcção da onda na bóia

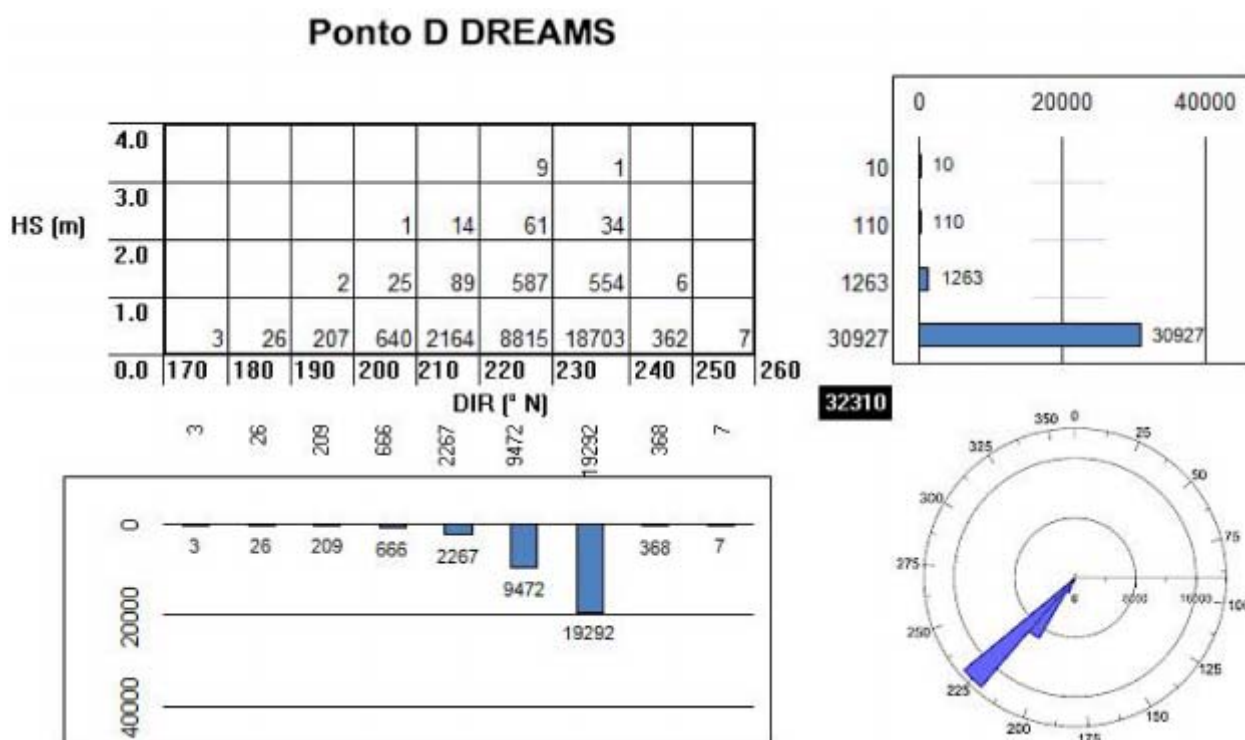


Figura 11 - Regime geral no ponto D: Histograma geral conjunto (HS, DIR) das ocorrências, respectivas distribuições marginais e rosa de direcções.

Figure 11 - Wave regime at point D: joint histogram (HS, DIR) and its marginal distributions. Wave direction rose.

(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 D), a direcção média é de 220°, no porto de pesca (ponto F), a direcção média é de 102°, enquanto junto à praia de Sines (ponto E), a rotação é feita no sentido oposto, atingido uma direcção média de 224°.

4.3. Cálculo dos movimentos dos navios

Foram determinadas as respostas de dois navios em termos de altura da oscilação vertical de um ponto

seleccionado em cada navio, para diversos valores dos períodos da onda regular incidente no navio e para 25 valores do ângulo entre o eixo longitudinal do navio e a direcção de propagação da onda igualmente espaçados entre 0° e 360° e para 7 valores da razão calado/profundidade, entre 1.1 e 5.0 (para valores daquela razão superiores a 5.0 pode assumir-se que a resposta do navio não varia com a profundidade). A altura da onda incidente foi sempre igual a 1.00 m.

O primeiro navio (“navio pequeno”) tem um deslocamento de 38.9 m³, um comprimento de 12.00 m, boca de 4.42 m e calado de 1.00 m. A superfície molhada do casco foi discretizada com 534

Tabela 6 - Parâmetros estatísticos da agitação marítima na bóia-ondógrafo, no ponto SWAN (P6) e nos pontos DREAMS (A a G).

Table 6 - Sea wave statistical parameters for the wave buoy location and for points P6 and A to G.

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

painéis. Este navio pretendia representar uma das traineiras que frequentam o porto de pesca. Os centros de gravidades dos trechos em que se dividiu o percurso de entrada deste navio, o percurso 3, são os pontos P6, A, G, D e F. Para este navio os períodos da ondulação incidente variaram entre 1 s e 19 s com um intervalo de 1 s.

Na Figura 12 apresentam-se, para os valores da razão calado/profundidade mencionados anteriormente, a evolução da altura do movimento vertical de um ponto na linha de água do navio (-6.14, -1.19, 0.00) – valores em metros – com o período da onda incidente no navio quando o ângulo entre esta onda e o eixo longitudinal do navio é igual a 30°. Importa referir que, embora não ilustrado neste artigo, se verificou serem as ondas quase de través (ângulos entre a direcção da onda incidente no navio e o eixo longitudinal do mesmo entre 45° e 135° ou entre 225° e 315°) aquelas que produzem maiores alturas do movimento vertical do ponto – alturas iguais a 9 vezes a altura da onda incidente para ondas de través, ângulo de 90°, quando a razão calado/profundidade é 1.5.

Interessante na figura é a resposta apreciável para valores baixos do período da onda incidente no navio (3 a 5 s) e o acompanhar da onda pelo navio para os períodos mais elevados (acima de 15 s). Embora os valores apresentados na figura possam parecer exagerados, ultrapassando em alguns casos metade da profundidade da zona onde o navio está, importa não esquecer que estes são valores para uma onda cuja altura é 1 m. Para alguns dos valores de profundidade considerados, isso seria uma altura de onda exagerada, senão impossível. Além disso, para este navio cujo calado é 1 m, a viagem de entrada do navio no Porto de Sines é sempre realizada sobre regiões cuja profundidade ultrapassa cinco vezes o calado do navio, pelo que a curva de resposta do navio utilizada na maior parte dos casos é a mais baixa da figura.

O segundo navio (“navio grande”) tem um deslocamento de 119 222 m³, um comprimento de 245.04 m, boca de 43.00 m e calado de 14.1 m. Este navio, cuja superfície molhada do casco foi discretizada com 3732 painéis, pretendia representar um dos grandes navios graneleiros que frequentam o terminal petrolífero ou o terminal multi-usos do Porto de Sines. Assim ele foi utilizado em dois percursos de

entrada no Porto de Sines: percurso 1 junto ao molhe Oeste (pontos P6, A e B) e percurso 2 representativo de um movimento para o molhe Leste (pontos P6, A, G e C).

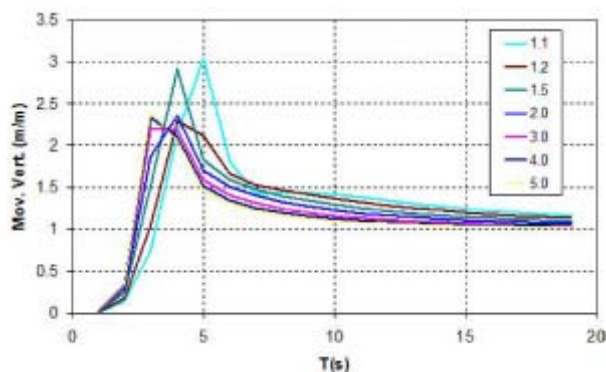


Figura 12 - Variação da altura do movimento vertical do ponto (-6.14, -1.19, 0.00) do “navio pequeno” com o período da onda incidente e a razão calado/profundidade. Ângulo entre o eixo longitudinal do navio e direcção da onda incidente igual a 30°.

Figure 12 - Variation of point (-6.14, -1.19, 0.00) vertical motion height of the “small ship” with the period of the incident wave and draught/depth ratio. 30° angle between the ship’s longitudinal axis and the wave number vector of the incident wave.

A função resposta deste navio foi determinada para um conjunto de períodos entre 6 s e 20 s com um intervalo de 1 s. A Figura 13 mostra, para valores da razão calado/profundidade entre 1.1 e 5.0, a evolução da altura do movimento vertical cujas coordenadas são (-106.20, -15.19, 0.00). Como se trata de um navio com dimensões substancialmente maiores do que o anterior, até ao período de 20 s não se observa a resposta quase hidrostática do navio à ondulação nele incidente. Tal ocorre apenas para períodos maiores do que 20 s.

Embora tenham sido testados outros pontos no casco do navio para determinação das respostas correspondentes às ondas incidentes no navio, não se observaram diferenças substanciais nas funções resposta, razão pela qual tais resultados não são aqui apresentados.

Determinada a função resposta para as gamas de profundidades, períodos e ângulos já mencionados,

procedeu-se ao cálculo da função resposta em cada um dos pontos da Tabela 7 para cada um dos navios e atendendo ao percurso correspondente. Como pode observar-se no referido quadro, o percurso determinou o ângulo a considerar entre o eixo longitudinal do navio e a direcção de propagação da onda. Neste cálculo assumiu-se uma variação linear entre os pontos de definição da função resposta de cada navio.

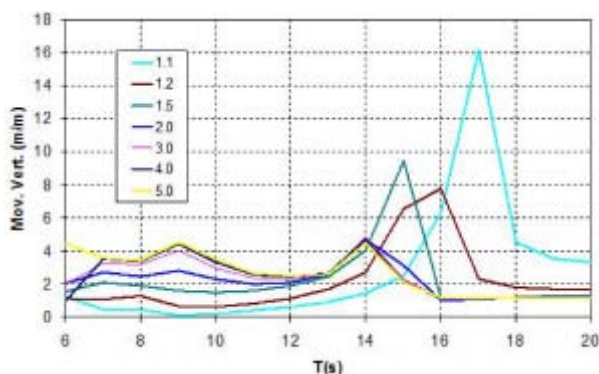


Figura 13 - Variação da altura do movimento vertical do ponto (-106.20, -15.19, 0.00) do “navio grande” com o período da onda incidente e a razão calado/profundidade. Ângulo entre o eixo longitudinal do navio e direcção da onda incidente igual a 330°.

Figure 13 - Variation of point (-106.20, -15.19, 0.00) vertical motion height of the “big ship” with the period of the incident wave and draught/depth ratio. 330° angle between the ship’s longitudinal axis and the wave number vector of the incident wave.

Uma vez definidas as funções resposta para cada navio em cada um daqueles pontos, para o cálculo da altura do movimento vertical dos navios em cada trecho da zona varrida pelo mesmo nas suas trajectórias de entrada no porto, é necessário conhecer apenas os resultados de agitação marítima obtidos com os modelos numéricos SWAN e DREAMS nos mesmos pontos, isto é, os baricentros daqueles trechos: pontos P6, A, B, C, D, F e G (Figura 14).

4.4. Avaliação de risco usando o sistema GUIOMAR

Para ilustrar e testar a metodologia apresentada na secção 2.3.1, foram definidos, a título de exemplo, os limiares de 0.5 m e 1 m para a altura do movimento vertical dos dois navios considerados e avaliado o risco de estes limiares serem excedidos, considerando a probabilidade de ocorrência e as consequências de tais eventos nos pontos dos três percursos em estudo: percurso 1 nos pontos P6, A e B; percurso 2 nos pontos P6, A, G e C; e percurso 3 nos pontos P6, A, G, D e F (Tabela 8). A Tabela 8 mostra que:

Para o navio grande:

- o Excepto nos pontos B e G, a probabilidade de ocorrência de movimentos superiores a 0.5 m ou a 1.0 m nos diferentes trechos é semelhante, conduzindo ao mesmo grau de probabilidade;
- o Como seria de esperar, as consequências associadas à ocorrência desses limiares são diferentes, sendo mais graves para o caso de 1 m;

Tabela 7 - Profundidades e rumos dos navios nos baricentros dos trechos em que se dividiu cada um dos percursos de entrada estudados.

Table 7 - Depths and directions at the ship’s gravity centres in each stretch according to the ship’s journey at each studied entry routes.

	P6			A			B	C	D	F	G	
Prof. (m)	47.12			52.05			31.36	22.00	11.41	7.00	27.32	
Rumo navio (°)	90			45			0	135	0	315	90	30
Percurso	1	2	3	1	2	3	1	2	3	3	2	3

- o Os valores do grau de risco associado ao limiar de 1 m nos diferentes trechos do percurso 1 e 2 são maiores do que no caso do limiar de 0.5 m. Existem por isso para esse limiar trechos (B, G e C) em que o grau de risco corresponde a um risco inaceitável, o que não se verifica para o limiar de 0.5 m.

Para o navio pequeno:

- o O grau de risco associado ao limiar de 1 m é mais grave do que o associado ao limiar de 0.5 m. Com efeito, apesar de para o limiar de 1 m, o grau de probabilidade de ocorrência ser menor ou igual ao do limiar de 0.5 m, o grau associado às consequências é mais grave, o que contribui para um maior grau de risco;
- o No entanto, mesmo para o limiar de 1 m,

apenas num trecho (Ponto D) se verifica um risco inaceitável (grau 50).

Comparando os dois navios, nos pontos comuns percorridos pelos dois (P6, A e G), verifica-se que nos pontos P6 e A não existem diferenças relevantes entre os dois navios, mas tendo em atenção o ponto G verifica-se, comparando o percurso 2 com o percurso 3, que a probabilidade de excedência dos limiares no navio grande (percurso 2) é superior à do navio pequeno (percurso 3), o que induz naturalmente a um grau de risco acrescido para o navio grande.

Na Figura 15 apresentam-se os mapas de risco criados a partir do módulo de construção de mapas de risco do sistema integrado GUIOMAR para os casos considerados. Nesta figura, a cor das bandeiras representa a cor associada a cada grau de risco (Tabela 8).



Figura 14 - Esquema de modelação para cálculo dos movimentos dos navios e localização dos pontos onde foi aplicado o modelo WAMIT (imagem Google Earth™).

Figure 14 - Modelling scheme for the evaluation of the ship movements and location of the points where the WAMIT model was applied (Google Earth™ image).

Tabela 8 - Avaliação do risco de ocorrência de movimentos verticais de dois navios que excedem os limiares pré-estabelecidos de 0.5 m e de 1 m.

Table 8 - Risk assessment associated with vertical movements of the two ships that exceed the pre-set thresholds of 0.5 m and 1.0 m.

Percorso	Pontos	Limiar de 1 m			Limiar de 0.5 m		
		Probabilidade	Consequências	Risco	Probabilidade	Consequências	Risco
Percorso 1 (Navio grande)	P6	Frequente (> 50%) Grau 5	Reduzidas Grau 2	Aceitável Grau 10	Frequente (> 50%) Grau 5	Insignificantes Grau 1	Aceitável Grau 5
	A	Frequente (> 50%) Grau 5	Sérias Grau 5	Indesejável Grau 25	Frequente (> 50%) Grau 5	Insignificantes Grau 1	Aceitável Grau 5
	B	Raro (1-10%) Grau 2	Catastróficas Grau 25	Inaceitável Grau 50	Ocasional (10-25%) Grau 3	Muito sérias Grau 10	Indesejável Grau 30
Percorso 2 (Navio grande)	P6	Frequente (> 50%) Grau 5	Reduzidas Grau 2	Aceitável Grau 10	Frequente (> 50%) Grau 5	Insignificantes Grau 1	Aceitável Grau 5
	A	Frequente (> 50%) Grau 5	Sérias Grau 5	Indesejável Grau 25	Frequente (> 50%) Grau 5	Insignificantes Grau 1	Aceitável Grau 5
	G	Provável (25-50%) Grau 4	Muito sérias Grau 10	Inaceitável Grau 40	Frequente (> 50%) Grau 5	Sérias Grau 5	Indesejável Grau 25
	C	Raro (1-10%) Grau 2	Catastróficas Grau 25	Inaceitável Grau 50	Raro (1-10%) Grau 2	Muito sérias Grau 10	Indesejável Grau 20
Percorso 3 (Navio pequeno)	P6	Frequente (> 50%) Grau 5	Reduzidas Grau 2	Aceitável Grau 10	Frequente (> 50%) Grau 5	Insignificantes Grau 1	Aceitável Grau 5
	A	Frequente (> 50%) Grau 5	Sérias Grau 5	Indesejável Grau 25	Frequente (> 50%) Grau 5	Reduzidas Grau 2	Aceitável Grau 10
	G	Raro (1-10%) Grau 2	Muito sérias Grau 10	Indesejável Grau 20	Provável (25-50%) Grau 4	Sérias Grau 5	Indesejável Grau 20
	D	Raro (1-10%) Grau 2	Catastróficas Grau 25	Inaceitável Grau 50	Ocasional (10-25%) Grau 3	Muito sérias Grau 10	Indesejável Grau 30
	F	Improvável (< 1%) Grau 1	Catastróficas Grau 25	Indesejável Grau 25	Improvável (< 1%) Grau 1	Catastróficas Grau 25	Indesejável Grau 25

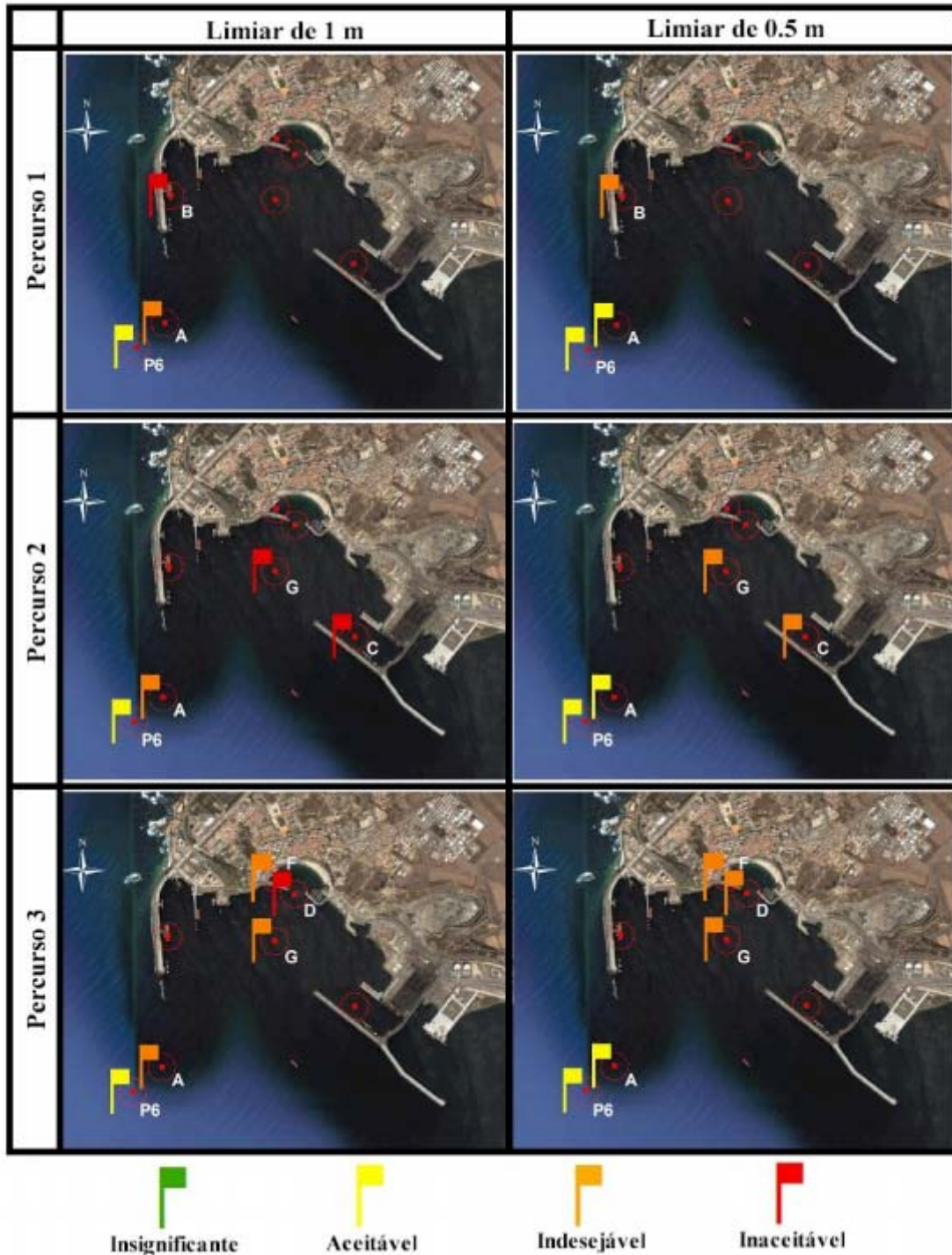


Figura 15 - Mapas de riscos para a navegação no Porto de Sines (pontos P6, A, B, C, D, F e G), representativos dos 3 percursos, relativamente a movimentos verticais de dois navios que excedem 0.5 m e 1 m.

Figure 15 - Sines port risk maps for port navigation (points P6, A, B, C, D, F and G), representative of the 3 stretches that may be swept in the ships journey, with respect to the vertical motions of the two ships that exceed 0.5 m and 1 m.

5. CONCLUSÕES E FUTUROS DESENVOLVIMENTOS

Neste artigo, apresentam-se os desenvolvimentos recentes do sistema GUIOMAR, que é um sistema integrado de modelação da agitação marítima em zonas portuárias e costeiras, desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Tais desenvolvimentos consistem num conjunto de procedimentos automáticos de implementação de uma metodologia de avaliação do risco para a navegação portuária. Para ilustrar e testar estes desenvolvimentos, recorreu-se a dados da bóia-onógrafa situada ao largo do Porto de Sines e aos modelos de propagação das ondas SWAN e DREAMS, incluídos no sistema GUIOMAR, para definir o regime de agitação marítima em vários pontos na entrada e no interior do porto. Para verificar o efeito da agitação marítima em dois navios seleccionados, foi utilizado o modelo WAMIT. Analisou-se o efeito da agitação incidente nos navios, na altura da componente vertical do movimento dos mesmos ao longo de três trajectórias de entrada no porto: uma com destino ao terminal petrolífero, outra ao terminal de usos múltiplos e outra ao porto de pesca. Por fim, foi estabelecido o procedimento automático de avaliação do risco para a navegação e de criação de mapas de risco considerando que o grau de risco é o produto do grau atribuído à probabilidade de ocorrência de movimentos verticais do navio que excedem um limiar pré-estabelecido 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 numérica de cenários com base em dados reais de agitação marítima. Desta forma, o sistema GUIOMAR permite, a partir de uma condição de agitação ao largo, avaliar em tempo real o risco associado para a navegação no interior do porto, informação fundamental para o planeamento dos investimentos portuários.

No teste desta nova funcionalidade com o exemplo do Porto de Sines, confirmou-se a capacidade do sistema GUIOMAR para realizar 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 ocorrência de galgamentos de estruturas portuárias e do risco inerente a operações de acostagem, carga e descarga de navios. Pretende-se também que o sistema GUIOMAR seja uma ferramenta de apoio ao ordenamento e gestão sustentável da zona costeira, pelo que se considera fundamental implementar a metodologia de avaliação de risco à inundações de zonas costeiras que tem vindo a ser desenvolvida pelo Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas (NPE) do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em colaboração com o Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente (DCEA) da Faculdade de Ciências e Tecnologias (FCT) da Universidade Nova de Lisboa (UNL) (Raposeiro *et al.*, 2010). O objectivo final deste trabalho consiste na construção de um sistema de previsão e alerta de inundações em zonas costeiras e portuárias, de modo a maximizar a segurança destas zonas.

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.

BIBLIOGRAFIA

- Booij, N.; Ris, R.C.; Holthuijsen, L.H. (1999) - A third-generation wave model for coastal regions. Part I - Model description and validation. *Journal of Geophysical Research*, 104(C4):7649-7666. (<http://dx.doi.org/10.1029/98JC02622>).
- Dalrymple, R.A.; Kirby, J.T. (1991) - *REF/DIF 1. Version 2.3 Documentation Manual. Combined Refraction/Diffraction Model*. 102 p., Research Report CACR-91-02, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, Newark, USA.
- Fortes, C.J.E.M. (2002) - *Transformações não lineares de ondas em zonas portuárias. Análise pelo método dos elementos finitos*. 345 p., Dissertação de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal. (ISBN: 972491949-8)

- Kirby, J.T.; Ozkahn, H.T. (1994) - *REF/DIFS Version 1.1 Documentation and Users Manual*. 128 p., Research Report No. CACR-94-04. Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, Newark, USA.
- Kirby, J.T.; Wei, G.; Chen, Q.; Kennedy, A.B.; Dalrymple, R.A. (1998) - *FUNWAVE 1.0 Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model Documentation and Users Manual*. 80 p., Research Report No. CACR-98-06, Center for Applied Coastal Research, University of Delaware, Newark, USA.
- Neves, D.R.C.B.; Fortes, C.J.E.M.; Santos, J.A.; Reis, M.T.; Rodrigues, S. (2010) Avaliação do risco para a navegação utilizando o sistema GUIOMAR. O caso do Porto de Sines. *Proceedings 2º Congresso Internacional e 6º Encontro Nacional de Riscos*, Associação Portuguesa de Riscos, Prevenção e Segurança, Coimbra, Portugal.
- Neves, D.R.C.B.; Zóximo, A.C.; Pinheiro, L.V.; Fortes, C.J. (2009b) - GUIOMAR: desenvolvimentos recentes e aplicação ao caso de Sines. *Proc. 6ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, PIANC - Permanent International Association of Navigation Congresses, Funchal, Madeira, Portugal. (CD-Rom).
- Neves, D.R.C.B.; Zóximo, 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*, SI56:15421546.
- New Zealand Maritime Safety Authority (2004) - *New Zealand Port and Harbour Marine Safety Code*. 37 p., Maritime Safety Authority of New Zealand, Wellington, Nova Zelândia. (disponível em <http://www.maritimenz.govt.nz/Publications-and-forms/Commercial-operations/Ports-and-harbours/NZ-port-harbour-marine-safety-code.pdf>).
- Newman, J.N.; Sclavounos, P.D. (1988) - The computation of wave loads on large offshore structures. *Proceedings International Conference on Behaviour of Offshore Structures (Boss 88)*, pp.1-19, Trondheim, Noruega. (Disponível em <http://www.wamit.com/Publications/boss88.pdf>).
- 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. *Proceedings I Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica*, Universidade Nova de Lisboa, Monte de Caparica, Lisboa, Portugal. (CD-Rom).
- 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 LNEC 370/04 - NPE, 35 p., Lisboa, Portugal. (não publicado).
- 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. *Proceedings 8º Congresso da Água*, APRH Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, Figueira da Foz, Portugal. (CD-Rom).
- Raposeiro, P.D.; Reis, M.T.; Fortes, C.J.E.M.; Ferreira, J.C. (2010) - Análise de cotas de inundação na praia de Vale do Lobo. *Proceedings 10º Congresso da Água*, APRH Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, Alvor, Portugal. (CD-Rom).
- Seeling, W.N.; Arens, J.P. (1995) - Wave reflection and energy dissipation by coastal structures. In: Koboyashi, N. (ed.), *Wave Forces on Inclined and Vertical Wall Structures*, pp.28-55, ASCE American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA. (ISBN:0784400806).
- Zóximo, 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. *Revista Tecnologias da Água*, 52:54-65, Lisboa, Portugal.
- Zóximo, 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. *Proceedings Mediterranean Days of Coastal and Port Engineering*, PIANC - Permanent International Association of Navigation Congresses, Palermo, Italy. (CD-Rom).