

# Avaliação do risco para a navegação em dois portos portugueses

Diogo Rúben Neves<sup>1</sup>, João Alfredo Santos<sup>1</sup>, Conceição Juana Fortes<sup>1</sup>, Maria Teresa Reis<sup>1</sup>, Sara Rodrigues<sup>1</sup>, Anabela Simões<sup>2</sup>, Eduardo Brito de Azevedo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal.

<sup>2</sup>LAMTEC, Universidade dos Açores, , 9700-416 Praia da Vitória, Portugal.

<sup>3</sup>Centro do Clima, Meteorologia e Mudanças Globais, Universidade dos Açores, Campus da Terra Chã, 9701-851, Angra do Heroísmo, Portugal

*email: dneves@lnec.pt, jasantos@lnec.pt, jfortes@lnec.pt, treis@lnec.pt, srodrigues@lnec.pt, anabela@uac.pt, edubrito@uac.pt*

**RESUMO:** O presente trabalho descreve a aplicação 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<sup>TM</sup>.

Naquele sistema 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 ponto de um navio provocado pela agitação incidente no navio ao longo da sua trajectória.

Estes novos procedimentos foram testados para dois portos portugueses, o porto de Sines e o porto de praia da Vitória.

**PALAVRAS – CHAVE:** Avaliação de Risco, Navegação portuária, Sistema de Informação Geográfica, GUIOMAR, Sines, Praia da Vitória.

**ABSTRACT:** This paper describes an approach on the risk assessment in port navigation using GUIOMAR, an integrated system for port and coastal engineering modelling. This system has been developed at the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC) and it is based on the commercial software, ArcGIS<sup>TM</sup>.

A set of automatic procedures was designed to implement a risk assessment methodology for port navigation that is based on the exceedance of a pre-set threshold of the wave-induced vertical movement of a ship along its trajectory inside the port.

The presented developments were tested for two Portuguese ports: the port of Sines and the port of Praia da Vitória.

**KEYWORDS:** Risk Assessment, Port Navigation, Geographical Information Systems, GUIOMAR, Sines, Praia da Vitória.

# 1. INTRODUÇÃO

Os riscos associados à navegação no interior de portos são uma das principais preocupações para as autoridades portuárias. As consequências de situações indesejadas podem ser graves quando existe manifesta falta de segurança, nomeadamente no que se refere a perdas de bens materiais, de vidas e a consequências para o meio ambiente. O exposto justifica a importância crescente do desenvolvimento de metodologias capazes de avaliar o risco neste tipo de situações.

Atendendo à natureza dos portos, o cumprimento do acima proposto leva à necessidade de integrar dados de agitação marítima medidos na proximidade do porto com resultados de modelos numéricos de forma a simular um conjunto de cenários capaz de conter as condições menos favoráveis à segurança do porto ou dos navios que o frequentam. Um melhor conhecimento das características da agitação marítima pode ser obtido utilizando modelos numéricos de propagação e deformação da agitação marítima que permitem a simulação de cenários reais.

A aplicação dos modelos numéricos é complexa e requer tempo, quer para a preparação dos dados de entrada, quer para a análise dos resultados obtidos, dado o grande volume de informação necessário e produzido por estes modelos. Daí o interesse na utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) pois permitem uma análise espacial e temporal da informação associada a fenómenos naturais complexos através da amostragem de tendências e padrões essenciais para qualquer processo rápido de tomada de decisão. Com efeito, 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.

Tem vindo a ser desenvolvido no LNEC um sistema integrado de modelação costeira e portuária, GUIOMAR, Zózimo et al. [14] e Neves et al [7], com base no software comercial ArcGis<sup>TM</sup> e que permite a utilização de vários modelos numéricos de propagação de ondas num ambiente SIG. Este sistema foi criado para apoiar a tomada de decisão na gestão de processos característicos de zonas costeiras e portuárias.

O presente trabalho descreve a metodologia introduzida no sistema GUIOMAR para avaliar o risco para a navegação no interior de um porto com base na altura do movimento vertical de um ponto 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 determinação da agitação incidente no navio utilizam-se os modelos numéricos de geração, propagação e dissipação da agitação marítima SWAN, Booij et al. [2], e DREAMS, Fortes [4], enquanto para o cálculo do movimento do navio se utiliza o modelo numérico WAMIT, Newman e Sclavounos [9].

Esta metodologia 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.

Além deste módulo, o trabalho apresenta também a aplicação do mesmo a dois portos portugueses: o porto de Sines, na costa sudoeste de Portugal continental, e o porto da Praia da Vitória, localizado na ilha Terceira do arquipélago dos Açores. Estes casos de estudo envolveram:

- (i) o cálculo do regime geral de agitação nos centros de gravidade dos troços da trajectória do navio no porto;

- (ii) o cálculo dos movimentos verticais de um ponto seleccionado do navio em cada um dos centros de gravidade;
- (iii) o cálculo do grau de risco associado à excedência de um limiar pré-estabelecido para um determinado movimento vertical, a partir da análise quantitativa da probabilidade de ocorrência e da análise qualitativa do grau de consequências.

Nas secções seguintes, apresentam-se a metodologia de avaliação do risco, os novos desenvolvimentos ao sistema GUIOMAR com a respectiva implementação dos procedimentos automáticos de avaliação de risco e os casos de estudos de aplicação do módulo desenvolvido aos portos de Sines e da Praia da Vitória.

## 2. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO RISCO

A metodologia adoptada neste trabalho tem como base a definição de risco como o produto da probabilidade de ocorrência de um acontecimento adverso pelo custo das consequências desse acontecimento. Neste trabalho, o acontecimento adverso para a navegação portuária é a altura do movimento vertical de um ponto do navio em manobra exceder um patamar pré-definido ao longo da sua viagem de entrada no porto em estudo.

Para calcular esta probabilidade de ocorrência basta considerar a distribuição das alturas dos movimentos verticais calculados para uma amostra significativa de estados de agitação num dos pontos da trajetória. Embora não seja difícil estimar a probabilidade de ocorrência do acontecimento adverso, por uma questão de apresentação de resultados, é mais interessante atribuir um grau à mesma probabilidade de ocorrência, de acordo com o seu valor. Na Tabela 1 apresentam-se os graus adoptados neste trabalho para a probabilidade de ocorrência do acontecimento considerado adverso.

Tabela 1 - Probabilidade de Ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem limiares pré-estabelecidos.

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

Nesta metodologia de avaliação do risco, a tarefa mais complexa é a atribuição de custos às consequências do acontecimento adverso. Para facilitar a definição desses custos, algumas organizações têm produzido directivas que propõem a classificação do custo esperado de acordo com as consequências do acontecimento adverso para as pessoas, para o património (neste caso o navio e a sua mercadoria), para o ambiente e o ecossistema em que está inserido o porto e para a gestão portuária a nível de contratos económicos e transacções comerciais. Na Tabela 2 apresenta-se uma dessas classificações baseada nas directivas da New Zealand Maritime Safety Authority [10].

Os valores do grau de Consequências foram atribuídos de forma que o valor do risco obtido traduza a importância do mesmo 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.

Do produto do grau de Probabilidade de Ocorrência pelo grau de Consequências obtém-se o grau de Risco, Tabela 3. Esta utilização do grau de Risco tem a vantagem de ser mais compacta e de facilitar a comparação de soluções para a limitação da ocorrência do acontecimento adverso ou das suas consequências, bem como para a classificação da aceitabilidade do Risco obtido, Tabela 4.

Tabela 2 - Consequências da ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem limiares pré-estabelecidos baseado nas directivas da New Zealand Maritime Safety Authority [10]

.Descrição	Consequências (Guia de Orientação)				Grau
	Pessoas	Património	Ambiente	Gestão Portuária	
<b>Insignificantes</b>	Existe a possibilidade de ferimentos muito ligeiros	Insignificante	Impacto ambiental desprezável ( $< 10^4$ €)	Insignificante ( $< 10^4$ €)	1
<b>Reduzidas</b>	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
<b>Sérias</b>	Múltiplas lesões ligeiras ou uma única lesão grave	$10^2 - 10^3$ €	Embarcação passível de ser limitada a uma zona de segurança do porto ( $10^5 - 10^6$ €)	Má publicidade generalizada, restrições à navegação, possível encerramento parcial ( $10^5 - 10^6$ €)	5
<b>Muito Sérias</b>	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 navegação no porto durante vários dias ( $10^6 - 10^7$ €)	10
<b>Catastróficas</b>	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 considerável de comércio ( $> 10^7$ €)	25

Tabela 3 - 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

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

Grau	Descrição	Controlo do Risco (Guia de Orientação)
1 – 3	Insignificante	Risco desprezável; não é necessário levar a cabo medidas de controlo de risco.
4 – 10	Reduzido	Risco que pode ser considerado aceitável/tolerável caso se seleccionem 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.).

Para cada navio e para cada um dos troços 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 centro de gravidade de cada troço da trajectória do navio;
- Cálculo do movimento vertical de um ponto seleccionado do navio excitado pelas ondas incidentes no navio;
- Cálculo do grau de risco associado à ultrapassagem do limiar pré-estabelecido para os movimentos verticais do navio através da análise quantitativa da probabilidade de excedência desse limiar e de uma análise qualitativa das respectivas consequências.

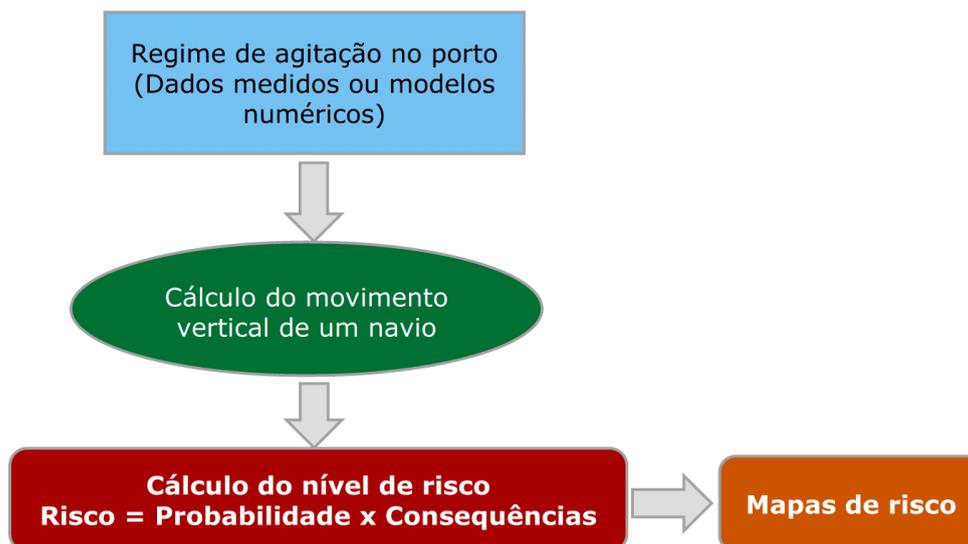


Figura 1 - Metodologia de avaliação do risco.

O sistema GUIOMAR foi utilizado, quer no estabelecimento dos regimes de agitação marítima (dentro e fora do porto), quer na aplicação da metodologia de avaliação de risco assim como na produção automática de mapas de risco.

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

## 2.1. Regime de agitação marítima no interior do porto

O cálculo do regime de agitação marítima no interior do porto, i.e., ao longo da trajectória do navio, tem como base: a) as características da agitação marítima medidas in situ, ao largo ou na entrada do porto (o que, normalmente, é de obtenção difícil); b) a transferência do regime de agitação ao largo para o interior do porto por intermédio de um ou mais modelos numéricos de propagação de ondas (Figura 2).

A utilização de um ou mais modelos numéricos de propagação de ondas depende das características da região em estudo (por exemplo, a dimensão do respectivo domínio de cálculo) e dos fenómenos envolvidos na propagação das ondas (refracção, difracção e rebentação). No presente trabalho utilizou-se o modelo SWAN, Booij et al. [2], e o modelo DREAMS, Fortes [4].

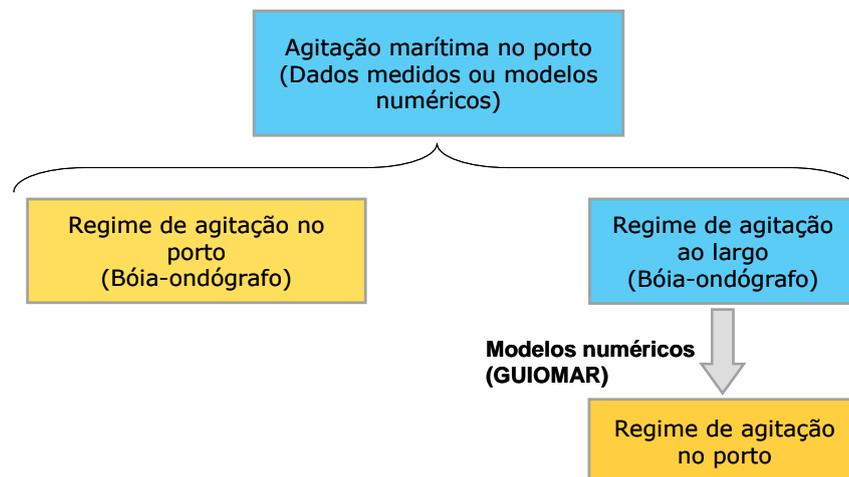


Figura 2 - Metodologia de cálculo da agitação marítima.

## 2.2. Cálculo dos movimentos do navio

Escolhido o navio cujo comportamento se pretende estudar, utiliza-se o modelo numérico WAMIT, Newman e Sclavounos [9], para determinar a resposta do navio, em termos da amplitude dos movimentos segundo cada um dos seis graus de liberdade do mesmo, Figura 3, 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 em que se assume a linearidade da interacção entre o corpo flutuante e as ondas nele incidentes.

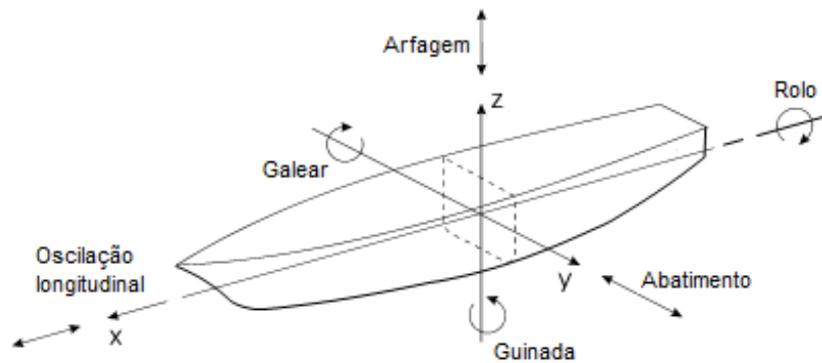


Figura 3 - Movimentos do navio considerado pelo modelo WAMIT.

Os movimentos, cujas amplitudes o modelo numérico WAMIT calcula, são os da origem do referencial baricêntrico do navio, mostrado na Figura 3. Como tal, 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. 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 que estima a amplitude 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 a velocidade de avanço do navio, nem a irregularidade da agitação marítima incidente no navio, considerando para este caso a existência de ondas regulares. Importa referir também, que foi assumido que o contorno da bacia portuária está suficientemente afastada 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 ao longo da sua trajectória de entrada no porto, basta conhecer a batimetria do porto nesse ponto, as características da ondulação aí 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 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 a dada onda.

### 2.3 Avaliação do risco

A metodologia de avaliação de risco para uma dada zona portuária implementada no sistema GUIOMAR baseia-se em cinco etapas principais (Figura 4):

- Definição dos troços onde serão calculados os movimentos de um ponto do navio;
- Definição do limiar aceitável para a amplitude do movimento vertical do navio em cada um daqueles troços;
- Desenvolvimento de uma tabela 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 troços em estudo (tal implica o conhecimento não só das condições de agitação marítima incidente no navio mas também da resposta do navio à agitação nele incidente);

- Desenvolvimento de uma tabela de consequências da ocorrência de movimentos verticais excessivos de um navio e determinação do grau de consequências para os vários troços em estudo;
- Multiplicação dos valores do grau de probabilidade de ocorrência pelos valores respectivos do grau de consequências para obter o grau de risco associado ao limiar pré-estabelecido para cada troço.



Figura 4 - Metodologia para a avaliação de risco numa zona portuária.

## 2.4 Sistema GUIOMAR

O sistema GUIOMAR, Zózimo e Fortes [13], Zózimo et al. [14], Neves et al. [7], Neves et al. [8], é um sistema integrado para a modelação numérica em engenharia costeira e portuária, desenvolvido em linguagem de programação VBA (Visual Basic for Applications), num sistema de informação geográfica (SIG). É composto por três componentes principais:

- Um sistema de informação geográfica, e neste caso, no software comercial de SIG o ArcGIS<sup>TM</sup>;
- Um conjunto de seis módulos correspondentes a diferentes modelos de propagação e deformação da agitação marítima com diferentes domínios de aplicação;
- Uma interface gráfica (GUI), desenvolvida em 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) efectuar 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 [4], REF/DIF 1, Dalrymple e Kirby [3], REF/DIF S, Kirby e Ozkan [5]; dois modelos baseados na equação de Boussinesq, FUNWAVE 1D e 2D, Kirby et al. [6]; e o modelo espectral de geração, propagação e dissipação da agitação marítima SWAN, Booij et al. [2]. O programa GMALHA, Pinheiro et al. [12], constitui também um módulo, sendo responsável pela geração de malhas computacionais não estruturadas para os modelos numéricos e pode ser aplicado independentemente ou de forma acoplada.

A natureza modular do sistema permite ao programador efectuar de forma fácil os melhoramentos e actualizações, nomeadamente 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.

O mais recente desenvolvimento no sistema GUIOMAR envolve a construção de um novo módulo com o objectivo de produzir automaticamente mapas de risco de acordo com a metodologia apresentada na secção da metodologia de avaliação de risco. A Figura 5a representa a barra de ferramentas do sistema GUIOMAR através da qual é possível aceder à área de produção de mapas de risco.

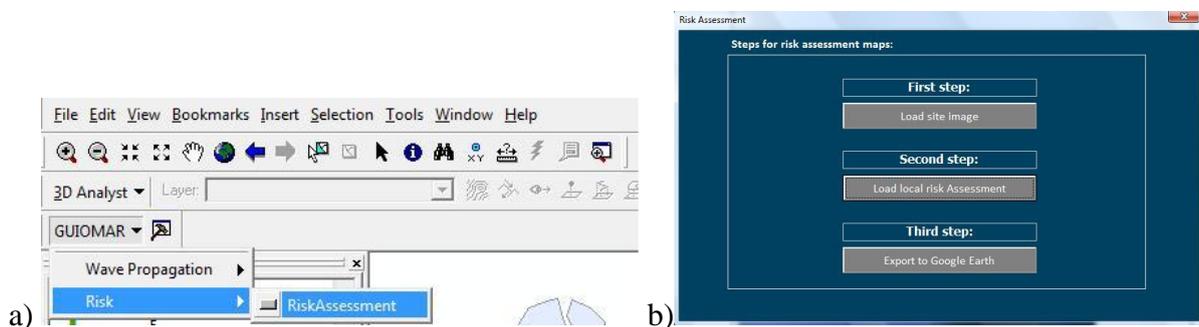


Figura 5 – a) Barra de ferramentas GUIOMAR com opção para avaliação de risco; b) Interface GUIOMAR para a criação dos mapas de risco para a navegação.

Depois de accionar a tecla “Risk assessment”, surge uma nova interface gráfica no GUIOMAR (Figura 5b) 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™:

- “Load site image” – carrega a imagem georeferenciada do local para o ambiente de trabalho do ArcGis™;
- “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;
- “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.

### 3. CASOS DE ESTUDO

Para teste dos novos desenvolvimentos do sistema GUIOMAR, utilizaram-se os portos de

Sines na costa continental Portuguesa e da Praia da Vitória na Ilha da Terceira, Açores. Tratam-se de portos com configurações, dimensões e características portuárias muito diferentes, que constituem por isso um bom teste à metodologia desenvolvida. Assim para cada um dos portos foi

- (i) Definido do regime geral de agitação nos centros de gravidade dos troços da trajectória do navio no porto;
- (ii) Calculada a altura dos movimentos verticais de um ponto seleccionado do navio em cada um dos pontos anteriores;
- (iii) Calculado o grau de risco associado à excedência de um limiar pré-estabelecido para um determinado movimento vertical, a partir da análise quantitativa da probabilidade de ocorrência e da análise qualitativa do grau de consequências.
- (iv) Construído o mapa de risco correspondente.

### 3.1. Caracterização Geral dos Portos

O porto de Sines, Figura 6 localiza-se na costa sudoeste de Portugal Continental e 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.



Figura 6 - Porto de Sines.

O segundo porto com o qual foram testados os novos desenvolvimentos na metodologia de avaliação de risco para a navegação portuária foi o porto da Praia da Vitória, localizado na costa Este da ilha Terceira, uma das nove ilhas do arquipélago dos Açores (Portugal), Figura 7. Trata-se de um pequeno porto protegido por dois molhes que definem uma bacia portuária aproximadamente rectangular com cerca de 1 km x 2 km.



Figura 7 – Porto de Praia da Vitória.

### 3.2. Cálculo do Regime de Agitação Marítima

Para a caracterização da agitação marítima 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. [11].

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 8: 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 (devido ao esforço computacional envolvido, o DREAMS não pode ser aplicado a grandes áreas de cálculo).

Os dados obtidos na bóia são transferidos para os pontos no interior do porto, obtendo-se o regime de agitação marítima em cada ponto. Os pontos definidos para a obtenção do regime de agitação no interior do porto através dos cálculos com o modelo DREAMS foram os pontos A, B, C, D, E, F e G (Figura 8):

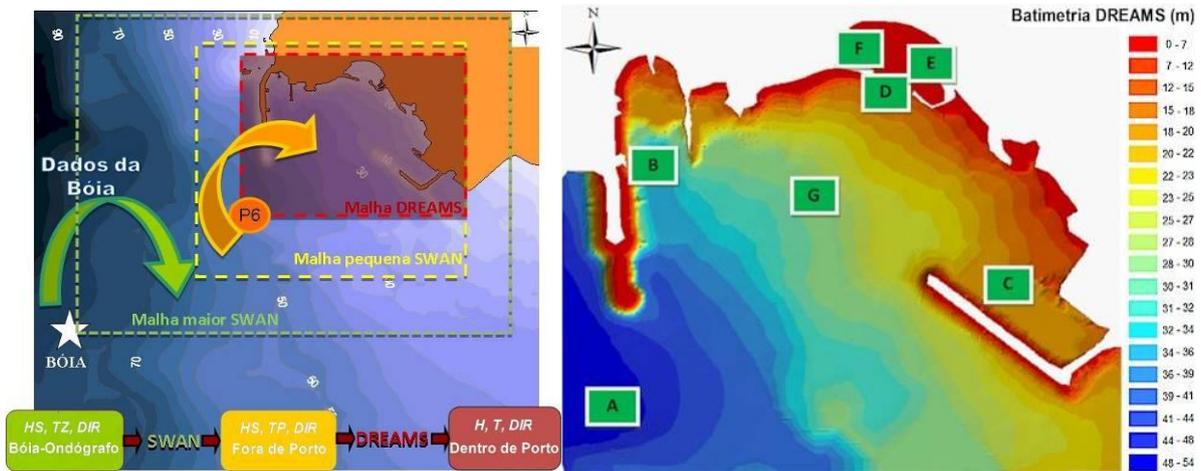


Figura 8 - Metodologia para a transferência do regime de agitação marítima do largo (bóia-ondógrafo) para o interior do porto de Sines. Batimetria com a localização dos pontos A a G no interior do porto.

No caso da definição do regime de agitação no interior do porto da Praia da Vitória foram utilizadas as previsões no nó de cálculo do modelo numérico de previsão da agitação marítima a escala oceânica WAVEWATCH III (WWIII) coincidente com o canto superior direito da Figura 9 a). Estas previsões são efectuadas com a implementação daquele modelo realizada no âmbito dos projectos CLIMAAT e MacSIMAR, Azevedo e Gonçalo [1]. Neste trabalho, o conjunto de dados utilizados perfaz um total de 1 416 valores tri-horários correspondentes a 2 meses de previsão, desde o dia 1 de Janeiro até 28 de Fevereiro de 2009.

Da mesma forma que no porto de Sines, estes valores foram transferidos para o interior do porto com recurso a dois modelos de propagação e deformação da agitação marítima, o modelo SWAN e o modelo DREAMS, Figura 9 a). A Figura 9 b) mostra os pontos correspondentes à trajectória de entrada no porto: o ponto P1 de resultados do modelo SWAN e os pontos no interior do porto, obtidos com o modelo DREAMS, P2, P3 e P4.

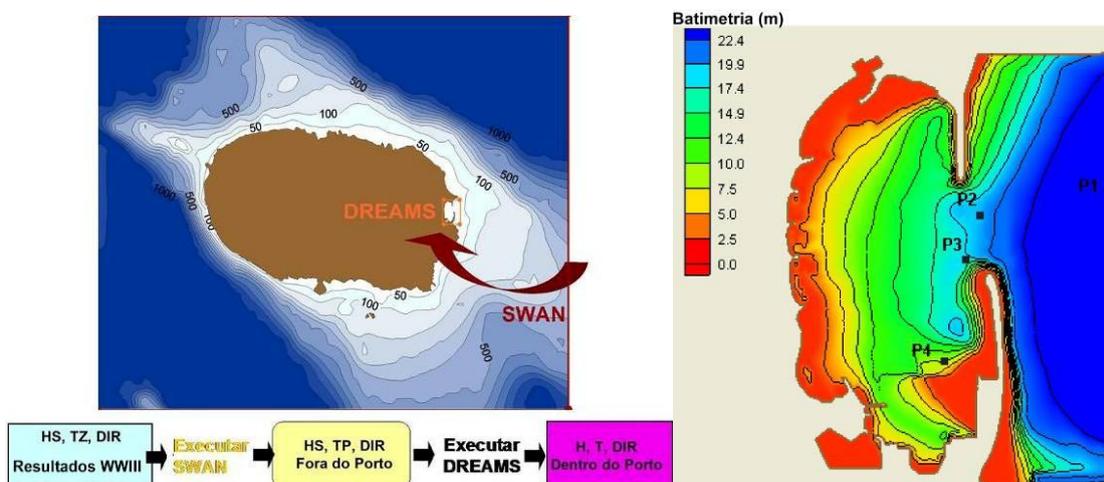


Figura 9 - Metodologia para a transferência do regime de agitação marítima do largo (bóia-ondógrafo) para o interior do porto de Praia da Vitória. Batimetria com a localização dos pontos SWAN e DREAMS (P1, P2, P3 e P4).

A título exemplificativo apresenta-se para o porto de Sines na Figura 10, para o ponto D



de 12.00 m, boca de 4.42 m e calado de 1.00 m. A superfície molhada do casco foi discretizada com 534 painéis. Este navio pretende representar uma das traineiras que frequentam o porto de pesca.

Na Figura 12 apresenta-se, para os valores da razão calado/profundidade, a evolução da altura do movimento vertical de um ponto do navio (-6.14, -1.19, 0.00) (valores em metros), ponto este considerado para os cálculos no caso de estudo, com o período da onda incidente no navio quando o ângulo entre a 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 no ponto.

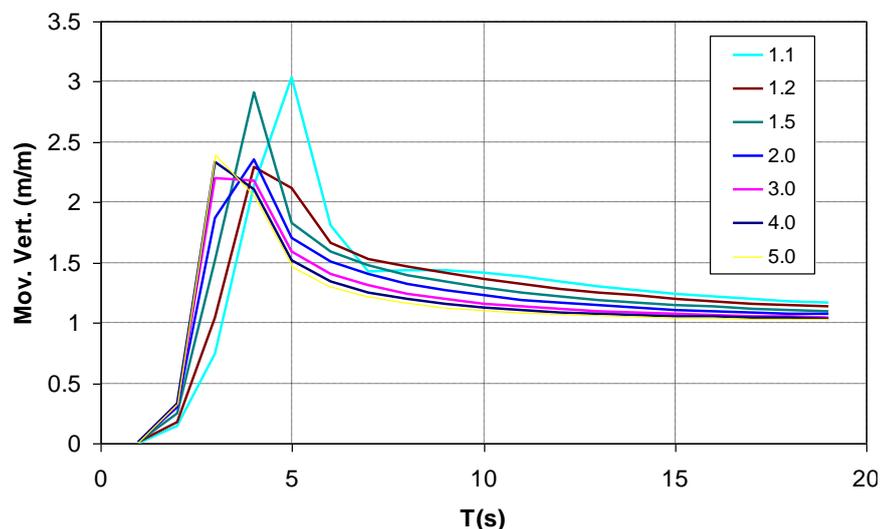


Figura 12 - Variação da altura do movimento vertical no ponto (-6.14, -1.19, 0.00) com o período da onda incidente e a razão calado/profundidade. Ângulo entre o eixo longitudinal do navio e direcção da onda incidente igual a 30°.

Interessante na figura é a resposta apreciável para valores baixos do período da onda incidente no navio (3 s 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. Ora, 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 mais utilizada neste estudo é a mais baixa da figura.

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 5 para o navio considerado e atendendo ao percurso definido. Como pode observar-se na referida tabela, o percurso determinou o ângulo a considerar entre o eixo longitudinal do navio e a direcção de propagação da onda.

Tabela 5 - Profundidades e rumos do navio nos baricentros dos troços em que foi dividido o percurso de entrada estudado para o porto de Sines.

	P6	A	G	D	F
<b>Prof. (m)</b>	<b>47.12</b>	<b>52.05</b>	<b>27.32</b>	<b>11.41</b>	<b>7.00</b>
<b>Rumo navio (°)</b>	<b>90</b>	<b>45</b>	<b>30</b>	<b>0</b>	<b>315</b>

Uma vez definida a função resposta em cada um daqueles pontos, para o cálculo da altura do movimento vertical do navio no troço da zona varrida na sua trajectória de entrada no porto apenas se torna necessário conhecer os resultados de agitação marítima obtidos com os modelos numéricos SWAN e DREAMS nos mesmos pontos, isto é, os baricentros do troço em estudo: pontos P6, A, G, D e F (Figura 13).



Figura 13 - Esquema de modelação para cálculo dos movimentos do navio no porto de Sines e localização dos pontos onde foi aplicado o modelo WAMIT (imagem Google Earth™).

No caso do porto de Praia da Vitória foram utilizados os mesmos procedimentos que no porto de Sines mas com um navio de características diferentes. Trata-se do “NM Fernão Gomes” cujo comprimento é 114.0 m, enquanto a boca é de 19.0 m e o calado de 7.0 m.

O ponto do navio considerado nos cálculos de movimento vertical do navio foi o ponto (45.5, 5.4, 0.0). A superfície molhada do casco foi discretizada com 421 painéis. Os centros de gravidades dos troços em que se dividiu o percurso de entrada no porto, são os pontos P1, P2, P3 e P4 (Figura 14). Para este navio, os períodos da ondulação incidente variaram entre 1 s e 19 s com um intervalo de 1 s.

Tabela 6 - Profundidades e rumos do navio nos baricentros dos troços em que foi dividido o percurso de entrada estudado para o porto de Praia da Vitória.

	P1	P2	P3	P4
<b>Prof. (m)</b>	<b>37.90</b>	<b>19.72</b>	<b>17.93</b>	<b>8.89</b>
<b>Rumo navio (°)</b>	<b>270°</b>	<b>180°</b>	<b>255°</b>	<b>225°</b>

A direcção do navio (Tabela 6) varia desde os 270° no ponto P1 até 180° no ponto P4, sendo igual a 255° e 225° nos pontos P2 e P3, respectivamente. Quanto às profundidades nos mesmos pontos, tem-se 37.90 m no ponto P1, 19.72 m no ponto P2, 17.93 m no ponto P3 e 8.89 m no ponto P4.

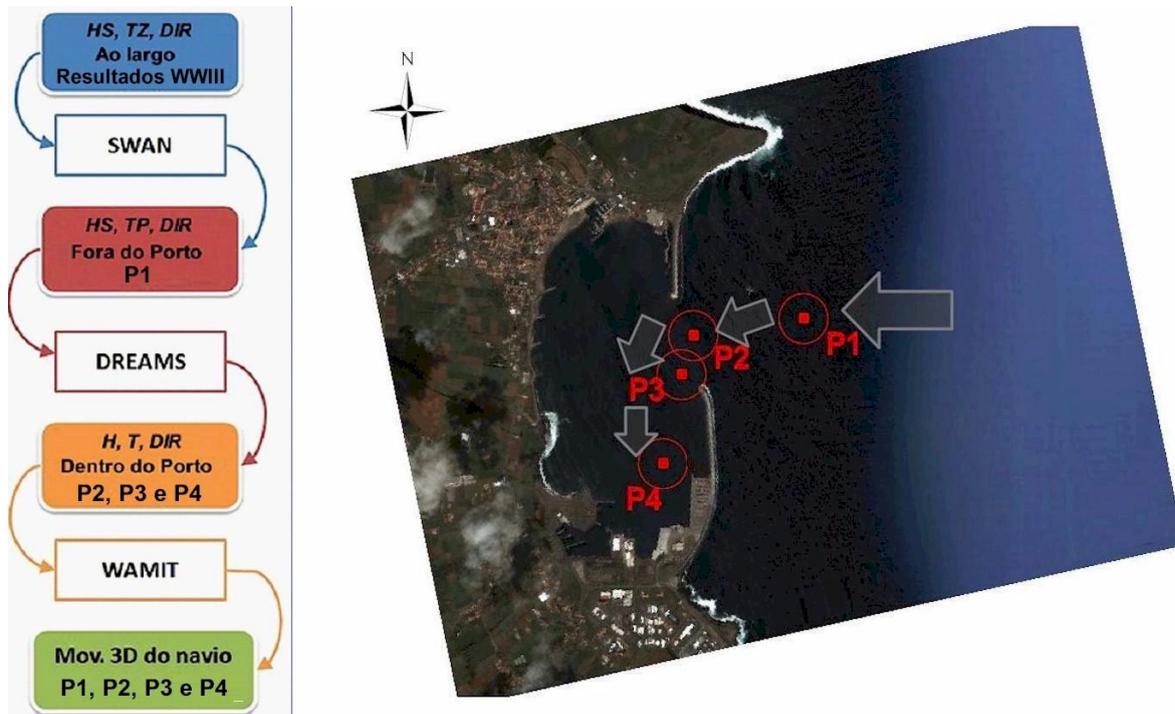


Figura 14 - Esquema de modelação para cálculo dos movimentos do navio no porto de Praia da Vitória e localização dos pontos onde foi aplicado o modelo WAMIT (imagem Google Earth<sup>TM</sup>).

### 3.4. Avaliação de risco

Para ilustrar e testar a metodologia de avaliação de risco apresentada anteriormente, foi definido, a título de exemplo, o limiar de 0.5 m para a altura do movimento vertical dos dois navios considerados para cada um dos portos e avaliado o risco associado à ultrapassagem desse limiar, considerando a probabilidade de ocorrência e as consequências de tais eventos nos pontos do percurso em estudo para Sines (P6, A, G, D e F) e para os pontos do percurso em estudo para a Praia da Vitória (P1, P2, P3 e P4) (Tabela 7).

Tabela 7 - Avaliação do risco associado à ocorrência de movimentos verticais que excedem o limiar pré-estabelecido de 0.5 m para os navios e percursos nos casos de estudo do porto de Sines e de Praia da Vitória

Porto de Sines				Porto de Praia da Vitória			
Pontos	Probabilidade	Consequências	Risco	Pontos	Probabilidade	Consequências	Risco
P6	Frequente (> 50%) Grau 5	Insignificantes Grau 1	Aceitável Grau 5	P1	Ocasional (10-25%) Grau 3	Sérias Grau 5	Indesejável Grau 15
A	Frequente (> 50%) Grau 5	Reduzidas Grau 2	Aceitável Grau 10	P2	Remota (1-10%) Grau 2	Sérias Grau 5	Aceitável Grau 10
G	Provável (25-50%) Grau 4	Sérias Grau 5	Indesejável Grau 20	P3	Remota (1-10%) Grau 2	Muito sérias Grau 10	Indesejável Grau 20
D	Ocasional (10-25%) Grau 3	Muito sérias Grau 10	Indesejável Grau 30	P4	Improvável (0-1%) Grau 1	Catastróficas Grau 25	Indesejável Grau 25
F	Improvável (< 1%) Grau 1	Catastróficas Grau 25	Indesejável Grau 25				

Na Figura 15 apresentam-se os mapas do risco associados à ultrapassagem do limiar de 0.5m de movimento vertical do navio para Sines e para Praia da Vitória criados 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 (Tabela 7).

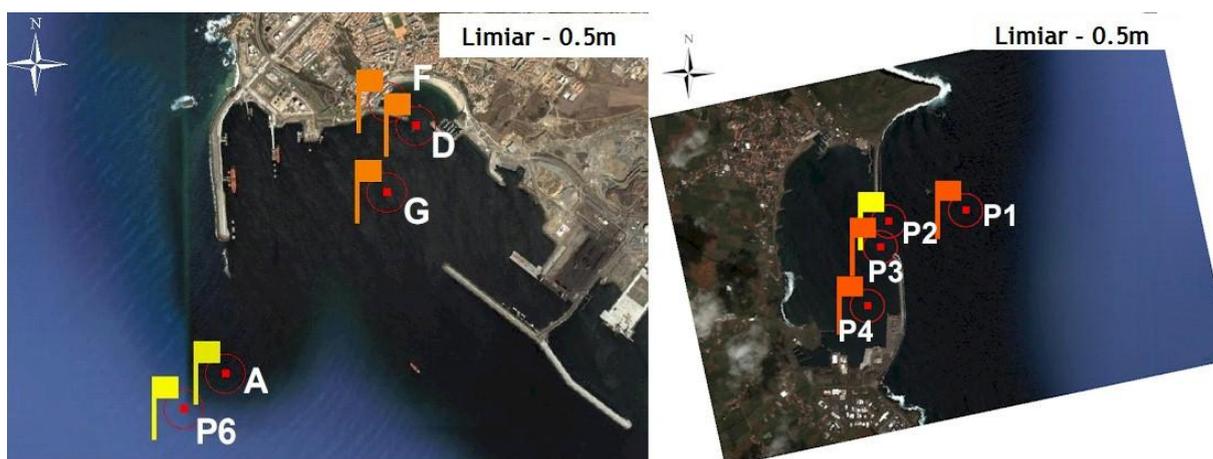


Figura 15 – Mapa de risco para a navegação no Porto de Sines (pontos P6, A, G, D e F) à direita e à esquerda o mapa de risco para a navegação no porto de Praia da Vitória, representativos do percurso considerado em cada um dos portos, relativamente a movimentos verticais que excedem 0.5 m.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste artigo, apresentaram-se os 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 às previsões do modelo de escala regional WAVEWATCH III na proximidade de Praia da Vitória e aos modelos SWAN e DREAMS, foi definido o regime de agitação marítima em vários pontos no interior de cada porto. Para verificar o efeito da agitação marítima em cada um dos navios seleccionados para cada porto foi utilizado o modelo WAMIT. Foi implementado um 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 um passo fundamental 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 ou resultados de modelos de previsão de agitação marítima.

No teste desta nova funcionalidade com os exemplos dos portos de Sines e da Praia da Vitória, 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.

Mais especificamente os casos de estudos confirmaram a vasta aplicabilidade da metodologia de avaliação de risco para a navegação visto que se provou a possibilidade da sua implementação a portos de características portuárias, dimensões e configurações bastante distintas, tendo por base dados de agitação marítima obtidos quer *in situ* quer por modelação numérica.

A melhoria do sistema GUIOMAR constitui uma aposta de futuro, podendo-se referir a extensão do módulo construído no presente trabalho 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 cálculo 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. Da mesma forma os autores agradecem a colaboração operacional da Administração do Porto de Sines e a Administração dos Portos da Terceira e Graciosa, bem como a utilização de dados e meios decorrentes da implementação dos projectos CLIMAAT e MacSIMAR (FEDER-INTERREG\_IIIB, Mac/2.3/A3, 03/Mac/2.3/A5; FEDER-MAC-Mac/1/A089)

## REFERÊNCIAS

- [1] AZEVEDO, E. B e V. GONÇALO (2005). - O projecto CLIMAAT e o seu contributo para a monitorização e caracterização da agitação marítima no arquipélago dos Açores - 4ªS Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro de 2005.
- [2] 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.

- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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. 6ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*, Funchal, Outubro.
- [9] NEWMAN, J.N.; SCLAVOUNOS, P.D. (1988). “The computation of wave loads on large offshore structures.” *Proc. Boss 88, Norway*, pp. 1-19.
- [10] NEW ZEALAND MARITIME SAFETY AUTHORITY (2004). *New Zealand Port & Harbour Marine Safety Code*.
- [11] 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.
- [12] PINHEIRO, L.V.; FERNANDES, J.L.M.; FORTES, C.J.E.M. (2006). “Sobre um gerador de malhas de elementos finitos com densidade local condicionada à batimetria para modelos de propagação de ondas em zonas portuárias.” *Proc. I Conferência Nacional de Métodos Numéricos em Mecânica dos Fluidos e Termodinâmica*, Lisboa, 8 e 9 de Junho.
- [13] ZÓZIMO, A.C.; FORTES, C.J.E.M. (2007). “Estado Actual e Desenvolvimentos futuros do sistema integrado de apoio à tomada de decisão em engenharia costeira: GUIOMAR”, *Tecnologias da Água*, n.º 52, edição IV, Outubro/Dezembro, pp. 54-65.
- [14] ZÓZIMO, A.C.; FORTES, C.J.E.M.; NEVES, D.R.C.B. (2008). “GUIOMAR: Geographical User Interface for cOastal and MARine modeling. Recent developments and assessment of potential geographical errors”, in *Proc. Med Days of Coastal and Port Eng.*, Palermo, 7 a 9 de Outubro.