

Avaliação do risco para a navegação em zonas portuárias. Avanços na constituição de um sistema de suporte à decisão.

D. R. C. B. NEVES

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

S. RODRIGUES

Física, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, srodrigues@lnec.pt

A.S. VIEIRA

Matemática, LNEC, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, asvieira@lnec.pt

J. A. SANTOS

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

C. J. E. M. FORTES

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

M. T. REIS

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

A. SIMÕES

Universidade dos Açores, LAMTEC, 9700-416 Praia da Vitória, Portugal, anabela@uac.pt

E. B. AZEVEDO

Universidade dos Açores, Terra Chã, 9701-851 Angra do Heroísmo, Portugal, edubrito@uac.pt

RESUMO

O sistema integrado para a simulação da agitação marítima em zonas portuárias e costeiras, GUIOMAR, foi desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) com base no software comercial de Informação Geográfica, ArcGIS™. Neste trabalho descreve-se a aplicação deste sistema na avaliação do risco para a navegação em zonas portuárias.

Criou-se um conjunto de procedimentos automáticos que implementam uma metodologia de avaliação do risco para a navegação, com base na altura do movimento vertical de um navio induzida pela agitação marítima incidente ao longo da sua trajectória. Nesta metodologia considera-se o grau de risco como o produto do grau atribuído à probabilidade de ocorrência de movimentos verticais que ultrapassam um limiar pré-estabelecido pelo grau atribuído às consequências dessa excedência.

A metodologia foi testada no porto da Praia da Vitória, na ilha Terceira, Açores. Assim, partindo das características da agitação marítima previstas no interior do porto com recurso aos modelos numéricos de propagação de ondas (SWAN e DREAMS), para o ano de 2009, determinaram-se as correspondentes alturas significativas dos movimentos verticais do N/M Fernão Gomes, utilizando a função de transferência definida com o modelo WAMIT, para duas trajectórias de entrada ao porto. A aplicação desta nova metodologia considerando as alturas significativas dos movimentos verticais obtidos e um limiar pré-estabelecido (0.5 m) permitiu construir mapas de risco ao longo das duas trajectórias do navio no interior do porto .

Este trabalho constitui mais um passo na criação de um sistema de suporte à decisão para a navegação portuária.

Palavras-chave: Avaliação de Risco, Navegação, Sistemas de Informação Geográfica, GUIOMAR, porto da Praia da Vitória.

1. INTRODUÇÃO

Os riscos associados à navegação no interior de portos são uma das principais preocupações para engenheiros navais e portuários. 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 condições menos favoráveis à segurança do porto ou dos navios que o frequentam. O conhecimento da agitação marítima e dos principais processos físicos e dinâmicos nas regiões costeiras e portuárias tem uma importância acrescida no correcto planeamento e gestão de intervenções costeiras e na definição de procedimentos adequados em situações de emergência. Para tal, importa simular fielmente situações reais para avaliar correctamente as intervenções a efectuar para cada caso em estudo. Neste campo, os modelos numéricos de propagação de ondas dão um contributo importante, permitindo, de forma rápida e concisa, e abrangendo domínios relativamente extensos, a simulação de cenários reais.

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, uma vez que os modelos numéricos conduzem a grandes quantidades de informação. Daí o interesse na utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), pois permitem uma análise espacial e temporal de informação correspondente a fenómenos naturais complexos através da amostra de tendências e padrões que são 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.

No LNEC tem vindo a ser desenvolvido no âmbito do projecto GUIOMAR, ZÓZIMO *et al.* (2005), ZÓZIMO *et al.* (2008), NEVES *et al.* (2009), um sistema integrado de simulação da agitação marítima em zonas costeiras e portuárias, com base no software comercial ArcGis™ e através da utilização de vários modelos numéricos de propagação e deformação de ondas num ambiente SIG. Desenvolvimentos recentes deste sistema, SANTOS *et al.* (2010), permitem a análise dos efeitos das ondas na navegação de uma dada zona portuária. Mas o objectivo final deste tipo de sistema é o de se tornar uma ferramenta de apoio à gestão de zonas costeiras e portuárias e, para tal, torna-se necessário incluir no sistema metodologias de avaliação do risco relacionadas com as diferentes actividades de uma zona portuária, como por exemplo, a navegação no seu interior.

O presente trabalho descreve os desenvolvimentos introduzidos no sistema GUIOMAR, nomeadamente, os procedimentos relacionados com a avaliação do risco para a navegação no interior de um porto, tendo em conta apenas os movimentos verticais de um navio ao longo da sua trajectória e a agitação marítima existente. Note-se que nessa avaliação de risco se considera o grau de risco como o produto do grau atribuído à probabilidade de ocorrência de movimentos verticais do navio que ultrapassam um limiar pré-estabelecido pelo grau atribuído às consequências dessa excedência. Com base nesses valores do grau de risco, o GUIOMAR permite construção de mapas de risco de forma automática.

Esta nova metodologia foi aplicada ao porto da Praia da Vitória nos Açores, localizado na costa leste da Ilha Terceira, 38°72'N e 27°06'W. O caso de estudo envolveu: (i) o cálculo do regime

geral de agitação para vários pontos no interior do porto com o sistema GUIOMAR a partir dos resultados correspondentes ao ano de 2009 do modelo de previsão de agitação marítima WAVEWATCH III (WWIII), TOLMAN (1999); (ii) o cálculo, com o modelo WAMIT, da função resposta em termos dos movimentos verticais de um ponto seleccionado do navio; (iii) partindo desta função e do espectro da agitação marítima incidente no navio em cada uma das regiões consideradas na trajectória do navio no porto, efectuou-se o cálculo do espectro da resposta do navio e da altura significativa dos movimentos verticais do navio; (iv) o cálculo das alturas significativas do movimento vertical que excedem um determinado limiar de altura de movimento vertical do navio seleccionado e a correspondente probabilidade de excedência; (v) o cálculo do grau de risco associado à excedência de um limiar pré-estabelecido para aquele movimento vertical, a partir da análise quantitativa da probabilidade de excedência e da análise qualitativa do grau de consequências. Os resultados ilustram-se através da criação, no sistema GUIOMAR, dos mapas do risco para a navegação associado aos movimentos verticais do navio.

Nas secções seguintes, apresentam-se a metodologia de avaliação do risco, os novos desenvolvimentos no sistema GUIOMAR com a implementação dos procedimentos automáticos respectivos de avaliação de risco e o caso de estudo do porto da Praia da Vitória.

2. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO RISCO PARA A NAVEGAÇÃO

A metodologia proposta neste trabalho para a avaliação do risco para a navegação numa bacia portuária consiste em três passos fundamentais (Figura 1):

- Definição do regime de agitação marítima no interior do porto, que pode ser efectuada recorrendo a dados obtidos in situ e/ou a resultados de modelos numéricos;
- Cálculo dos movimentos verticais do navio a longo da sua trajectória;
- Cálculo do grau de risco associado à excedência 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. Estes valores do risco servem de base à construção dos mapas de risco.

O sistema GUIOMAR é utilizado no estabelecimento do regime de agitação marítima ao longo do troço da trajectória do navio e na aplicação da metodologia de avaliação de risco assim como na produção automática de mapas de risco. O cálculo dos movimentos do navio é efectuado com recurso ao modelo WAMIT, exterior ao sistema GUIOMAR.

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

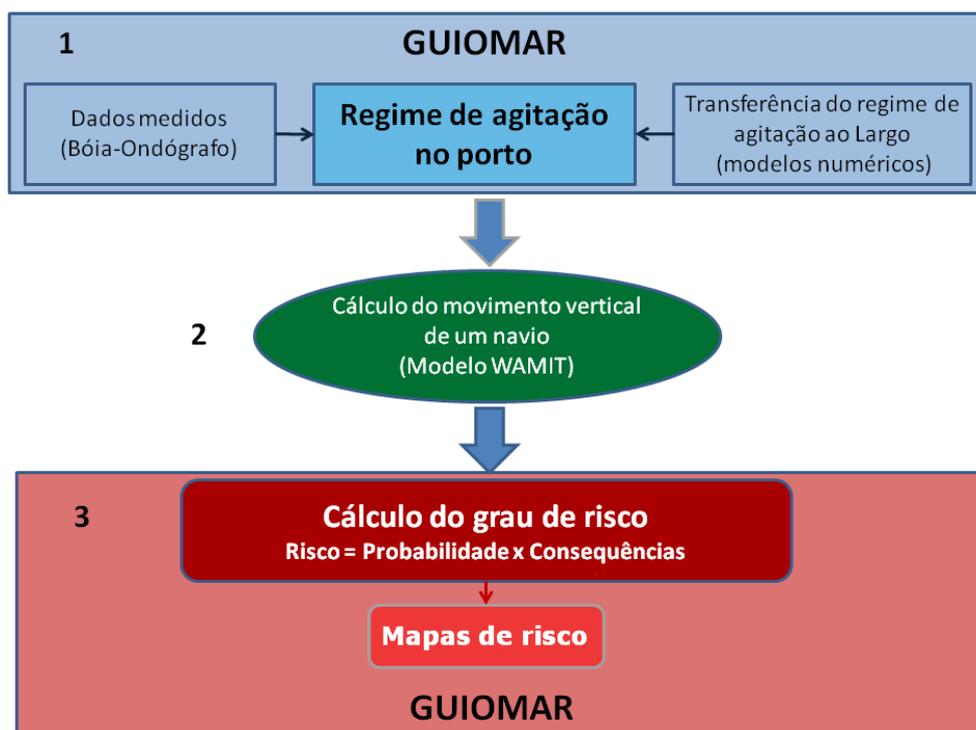


Figura 1 – Metodologia de avaliação do risco.

2.1 Regime de agitação marítima no interior do porto

O regime de agitação marítima no interior de um porto, i.e., ao longo da trajectória do navio, pode ser obtido com base em dados de agitação marítima medidos in situ (utilizando bóias-ondógrafo, por exemplo) ou ser definido com recurso a modelos numéricos de propagação de ondas. Como a primeira hipótese não é frequente, é usual a utilização de modelos numéricos que efectuam a transferência do regime de agitação marítima do largo (obtido por sua vez a partir de dados medidos ao largo ou de resultados de outros modelos numéricos aplicados a uma escala regional) para o interior do porto (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. No presente trabalho utilizou-se o modelo SWAN, BOOIJ *et al.* (1999), e o modelo DREAMS, FORTES (2002) aplicados a resultados do modelo de previsão da agitação marítima à escala regional WAVEWATCH III, TOLMAN (1999). Todo o processo de preparação de dados, execução dos modelos numéricos, visualização dos resultados e obtenção dos regimes de agitação marítima no porto está incorporado no sistema GUIOMAR, NEVES *et al.* (2009).

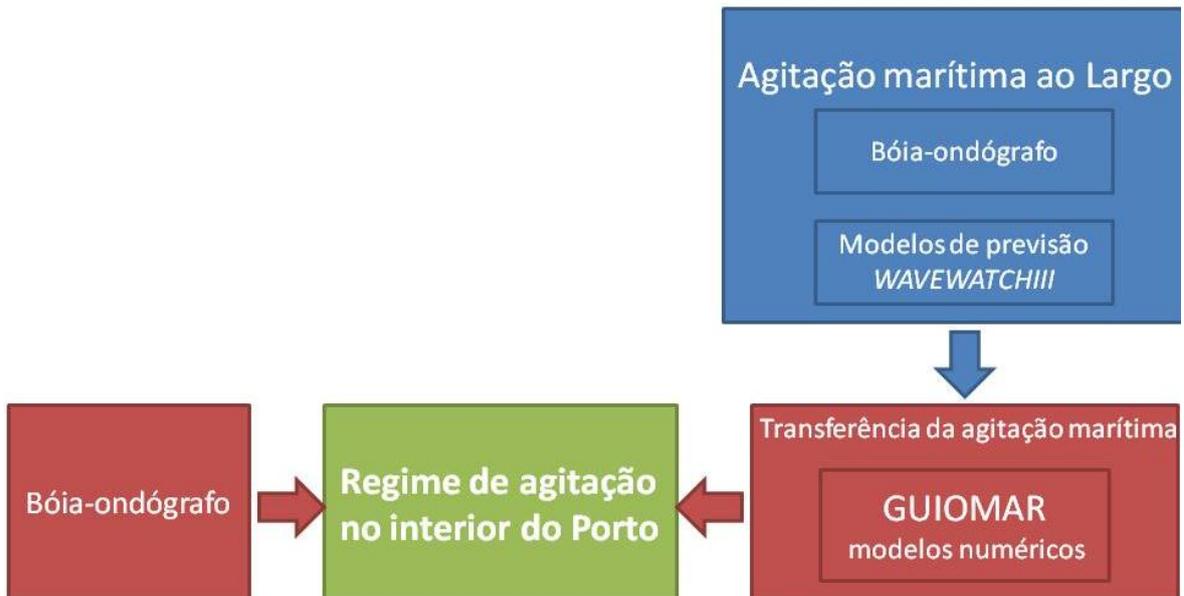


Figura 2 - Metodologia de cálculo da agitação marítima.

2.2 Cálculo dos movimentos do navio

Escolhido o navio cujo comportamento se pretende estudar, utiliza-se o modelo numérico WAMIT, NEWMAN e SCLAVOUNOS (1988), 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 as gamas expectáveis na zona em estudo de períodos de onda, profundidades e ângulos entre o eixo longitudinal do navio e o vector número de onda. Trata-se de um modelo numérico em que se assume a linearidade da interacção entre o corpo flutuante e as ondas nele incidentes.

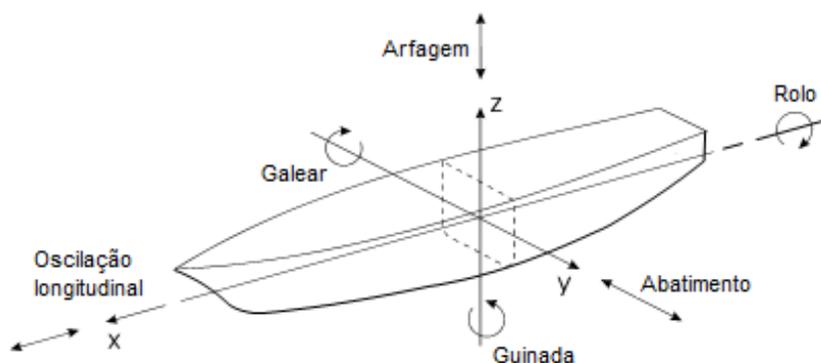


Figura 3 - Movimentos do navio considerados pelo modelo WAMIT.

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 função 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. Com esta função é possível determinar o espectro da resposta do navio a um estado de agitação irregular nele incidente cujo espectro se conhece, bem como, assumindo que este espectro é de banda estreita, determinar a altura significativa daqueles movimentos verticais.

Na abordagem preliminar aqui descrita, não se teve em conta a velocidade de avanço do navio na determinação do espectro dos movimentos verticais do navio em resultado da agitação marítima nele incidente ao longo da sua trajectória de entrada num porto. Importa referir também, que foi assumido que o contorno da bacia portuária está suficientemente afastado do navio para influenciar a resposta do mesmo.

Em resumo, em qualquer um dos baricentros dos troços em que se dividiu a zona passível de ocupação pelo navio 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 altura 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 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. Assim, o procedimento é o seguinte para avaliação de risco para uma dada zona portuária:

- (i) Definição dos troços onde serão calculados os movimentos de um ponto do navio;
- (ii) Definição do limiar aceitável para a altura do movimento vertical do navio em cada um daqueles troços;
- (iii) 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);
- (iv) 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;

- (v) 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.

Após a definição dos troços onde serão calculados os movimentos de um ponto do navio e do do limiar aceitável para a altura do movimento vertical do navio em cada um daqueles troços, o maior problema surge na definição das tabelas atrás referidas.

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 trajectória. 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. No Quadro 1 apresentam-se os graus adoptados neste trabalho para a probabilidade de ocorrência do acontecimento considerado adverso.

Quadro 1 - Probabilidade de ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem limiares pré-estabelecidos.

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

Nesta metodologia de avaliação do risco, a tarefa mais complexa é a do estabelecimento da tabela de consequências, i.e., 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. No Quadro 2 apresenta-se uma dessas classificações baseada nas directivas da NEW ZEALAND MARITIME SAFETY AUTHORITY (2004).

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, Quadro 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, Quadro 4.

Quadro 2 - Consequências da ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem limiares pré-estabelecidos segundo a NEW ZEALAND MARITIME SAFETY AUTHORITY (2004).

Descrição	Consequências (Guia de Orientação)				Grau
	Pessoas	Património	Ambiente	Gestão Portuária	
Insignificantes	Existe a possibilidade de ferimentos muito ligeiros	Insignificante	Impacto ambiental desprezável (< 10 ⁴ €)	Insignificante (< 10 ⁴ €)	1
Reduzidas	Uma única lesão ligeira	10 - 10 ² €	Pequenos derramamentos de óleo devidos a movimentos operacionais (10 ⁴ - 10 ⁵ €)	Má publicidade local para o porto (10 ⁴ - 10 ⁵ €)	2
Sérias	Múltiplas lesões ligeiras ou uma única lesão grave	10 ² - 10 ³ €	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
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 navegação no porto durante vários dias (10 ⁶ - 10 ⁷ €)	10
Catastróficas	Muitas perdas de vida	> 10 ⁴ €	Derrame de petróleo grave, necessária ajuda internacional, contaminação séria, perdas 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

Quadro 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

Quadro 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 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 (e.g. eliminar a origem dos riscos, alterar a probabilidade de ocorrência e/ou as consequências, transferir o risco, etc.).
----------	--------------------	---

3. SISTEMA GUIOMAR

O sistema GUIOMAR, ZÓZIMO *et al.* (2005), ZÓZIMO *et al.* (2008), NEVES *et al.* (2009), é um sistema integrado para a simulação numérica da agitação marítima em zonas costeiras e portuárias, desenvolvido em linguagem de programação VBA (Visual Basic for Applications), num sistema de informação geográfica (SIG). É composto por três componentes principais, Figura 4:

- Um sistema de informação geográfica (SIG), e neste caso, o software comercial ArcGIS™;
- 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, 2002); REF/DIF 1 (DALRYMPLE e KIRBY, 1991); REF/DIF S (KIRBY e OZKHAN, 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.* (2006) 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.

Na Figura 4 encontra-se um resumo das funcionalidades da interface do sistema GUIOMAR.

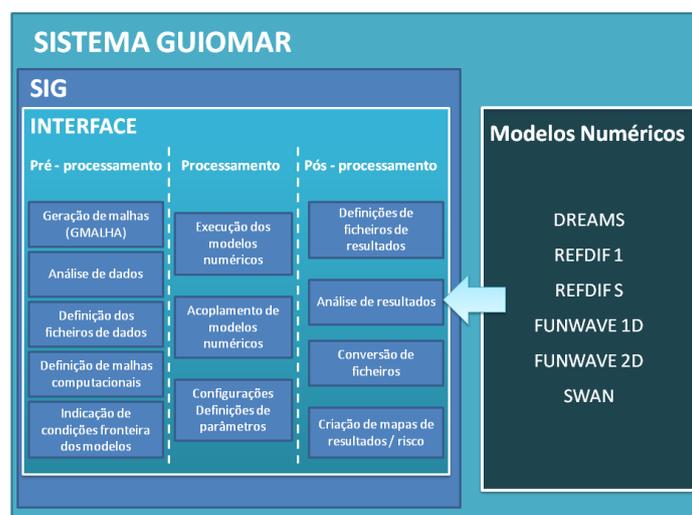


Figura 4 – Esquema do sistema GUIOMAR.

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 2.3. 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.

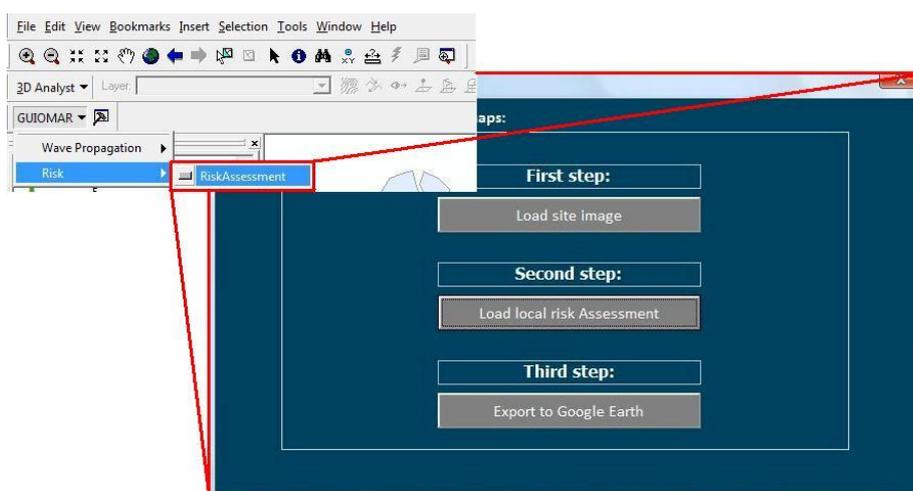


Figura 5 - Barra de ferramentas GUIOMAR com opção para avaliação de risco e Interface GUIOMAR para a criação dos mapas de risco para a navegação.

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

4. CASO DE ESTUDO

Para testar a nova metodologia de avaliação do risco com recurso aos sistemas GUIOMAR, utilizou-se o caso do porto da Praia da Vitória na ilha Terceira, Açores. O caso de estudo envolveu:

- (i) Escolha do navio Fernão Gomes como navio-tipo bem como das duas trajectórias do navio no interior da bacia portuária;
- (ii) Cálculo do regime geral de agitação marítima no interior do porto (e mais especificamente ao longo das trajectórias do navio), utilizando os modelos numéricos de geração, propagação e dissipação da agitação marítima SWAN, (BOOIJ *et al.*, 1999) e DREAMS, (FORTES, 2002), a partir dos resultados do modelo de previsão de agitação marítima WAVEWATCH III (WWIII), TOLMAN (1999) correspondentes ao ano de 2009.
- (iii) Cálculo dos movimentos verticais de um ponto do navio “Fernão Gomes”, com o modelo numérico WAMIT, NEWMAN e SCLAVOUNOS (1988) em cada uma das duas regiões consideradas na trajectória do navio no porto;
- (iv) Definição de dois limiares aceitáveis para a altura do movimento vertical do navio “Fernão Gomes” em cada um daqueles troços;
- (v) Determinação do grau de probabilidade de ocorrência de movimentos verticais que excederam os limites pré-fixados para os dois troços em estudo;
- (vi) Determinação do grau de consequências para os dois troços em estudo da excedência dos limiares fixados para os movimentos verticais;
- (vii) 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
- (viii) Construção dos mapas do risco para a navegação associado aos movimentos verticais do navio.

4.1 Caracterização geral do porto

O porto da Praia da Vitória localiza-se na costa Este da ilha Terceira, uma das nove ilhas do arquipélago dos Açores (Portugal), Figura 6. Trata-se de um pequeno porto protegido por dois molhes que definem uma baía aproximadamente rectangular com cerca de 1 km x 2 km.



Figura 6 - porto da Praia da Vitória

4.2 Regime de agitação marítima

Para a 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 à escala oceânica WAVEWATCH III (WWIII) coincidente com o canto superior direito da Figura 7 a). Estas previsões são efectuadas com a implementação daquele modelo realizada no âmbito dos projectos CLIMAAT e MacSIMAR, AZEVEDO e GONÇALO (2005). Neste trabalho, o conjunto de dados utilizados perfaz um total de 8760 valores horários correspondentes a 1 ano de previsão, desde o dia 1 de Janeiro de 2009 até 1 de Janeiro de 2010.

Os resultados das previsões do ano 2009 do modelo WWIII ao largo 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 7 a). Assim, obtiveram-se primeiramente os valores da agitação marítima no ponto P1 (exterior ao porto) com o modelo SWAN, e posteriormente com o modelo DREAMS os correspondentes valores nos pontos P2 a P6 no interior do porto, Figura 7 b). Note-se que estes pontos correspondem às duas trajectórias de entrada no porto previamente seleccionadas: uma trajectória em direcção ao molhe Norte e outra em direcção ao molhe Sul.

A título de exemplo apresenta-se na Figura 8 o regime de agitação obtido no ponto P1.

Quadro 5 - Parâmetros estatísticos da agitação marítima ao largo, no ponto SWAN (P1) e nos pontos DREAMS (P2 a P6).

Pontos \ Parâmetros estatísticos		Máximo	Média	Mínimo	Desvio Padrão	Gama mais frequente
LARGO	HS (m)	6.96	2.28	0.65	1.12	[1.0 - 2.0] (44.54%)
	TP (s)	25.00	11.19	4.26	2.27	[11.0 - 12.0] (23.70%)
	DIR (°)	360.0	286.6	0.2	73.4	[340 - 350.0] (18.58%)
P1	HS (m)	3.77	0.85	0.07	0.54	[0.0 - 1.0] (69.18%)
	TP (s)	16.69	9.19	2.45	2.48	[10.0 - 11.0] (17.28%)
	DIR (°)	352.5	47.5	7.5	54.4	[20.0 - 30.0] (47.48%)
P2	HS (m)	4.19	0.28	0.01	0.48	[0.0-1.0] (92.76%)
	TP (s)	16.69	9.49	4.06	2.17	[10.0-11.0] (18.17%)
	DIR (°)	154.2	71.2	24.9	31.0	[40 - 50] (27.81%)
P3	HS (m)	7.86	0.31	0.01	0.67	[0.0-1.0] (92.23%)
	TP (s)	16.69	9.49	4.06	2.17	[10.0-11.0] (18.17%)
	DIR (°)	105.9	46.5	13.3	12.9	[40- 50] (34.58%)
P4	HS (m)	2.94	0.09	0.01	0.19	[0.0-1.0] (99.66%)
	TP (s)	16.69	9.49	4.06	2.17	[10.0-11.0] (18.17%)
	DIR (°)	297.3	221.5	50.2	48.4	[240 - 250] (27.94%)
P5	HS (m)	1.69	0.12	0.01	0.24	[0.0-1.0] (97.85%)
	TP (s)	16.69	9.49	4.06	2.17	[10.0-11.0] (18.17%)
	DIR (°)	162.4	106.2	81.0	13.6	[110 - 120] (38.36%)
P6	HS (m)	0.49	0.03	0.01	0.05	[0.0-1.0] (100%)
	TP (s)	16.69	9.49	4.06	2.17	[10.0-11.0] (18.17%)
	DIR (°)	356.5	110.7	36.80	83.3	[170 - 180] (17.21%)

4.3 Movimentos do navio

Uma vez conhecidas as características da agitação marítima na posição do navio, é possível avaliar o espectro do movimento vertical do navio ao longo da sua trajectória de entrada num porto. Assume-se que a agitação marítima nele incidente pode ser caracterizada por um espectro JONSWAP com a altura significativa, HS, e o período de pico, TP, dados pelos modelos numéricos para propagação de ondas. Assim, é possível determinar a altura significativa do movimento vertical do navio a partir do conhecimento daquele espectro de resposta.

Para o porto da Praia da Vitória foi estudado como exemplo o navio “NM Fernão Gomes” com um comprimento de 114 m, uma boca de 19 m e um calado de 7 m. A superfície molhada do casco foi discretizada com 421 painéis.

Ao longo da trajectória dos dois percursos de entrada do navio no porto da Praia da Vitória, a faixa que pode ser ocupada pelo navio é dividida num conjunto de troços em cujos centróides se irão observar o movimento vertical de um ponto do navio. No caso do “N/M Fernão Gomes” escolheu-se um ponto cujas coordenadas no referencial do navio são (45.5, 5.4, 0.0). Os centróides de cada um dos troços em que se dividiram os dois percursos de entrada no porto, correspondem aos pontos P1, P2, P3 e P4 para o percurso 1, e aos pontos P1, P2, P5 e P6 para o percurso 2 (Figura 9) e nesses pontos são determinadas as características das ondas incidentes.

No Quadro 6 encontram-se a profundidade e o rumo do navio nos pontos que definem a trajectória de entrada no porto. Como existe uma variação da profundidade é necessário calcular as

funções de resposta em frequência correspondentes a cada um dos centróides em que foi dividido o percurso.

Quadro 6 – Profundidades e rumos do navio nos baricentros dos troços em que foram divididos os percursos de entrada estudados para o porto da Praia da Vitória.

	Percurso 1				Percurso 2			
	P1	P2	P3	P4	P1	P2	P5	P6
Prof. (m)	37.90	19.72	17.93	8.89	37.90	19.72	12.51	12.02
Rumo navio (°)	270°	255°	225°	180°	270°	270°	315°	0°

Consoante o percurso assim varia o rumo e a profundidade ao longo da trajectória (Figura 9). No percurso 1 a direcção varia dos 270° no ponto P1 até 180° no ponto P4, sendo igual a 255° e 225° nos pontos P2 e P3, respectivamente, enquanto no percurso 2 o navio segue em direcção ao molhe norte variando dos 270° no ponto P1 até 0° no ponto P6, passando com orientação de 270° no ponto P2 e 315° no ponto P5. 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, 8.89 m no ponto P4, 12.51 m no ponto P5 e 12.02 m no ponto P6.

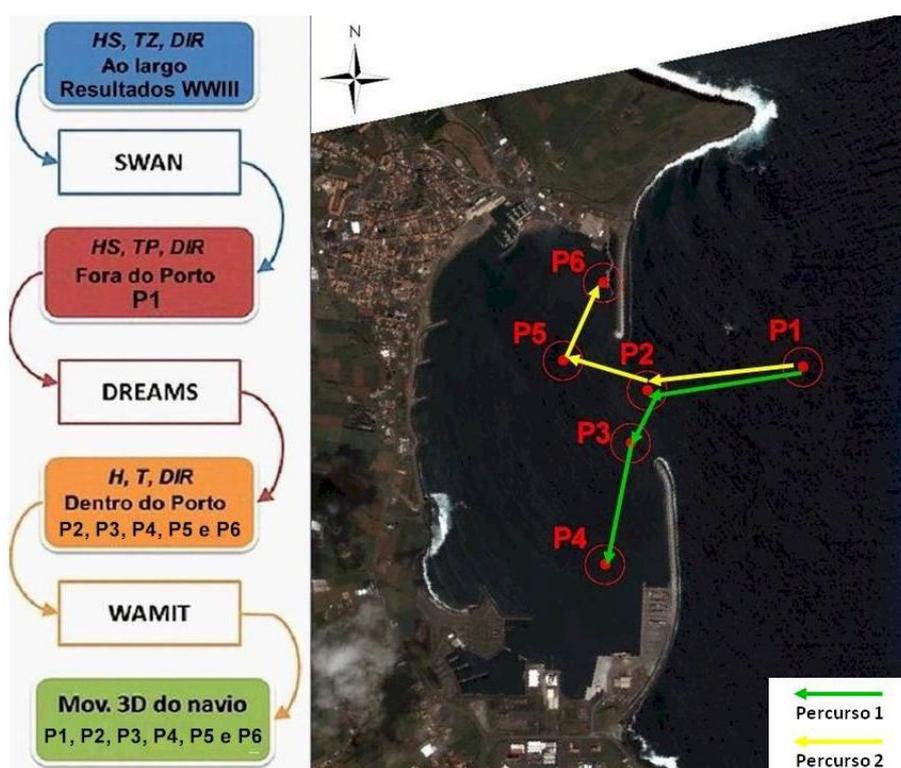


Figura 9 - Esquema de modelação para cálculo dos movimentos do navio no porto da Praia da Vitória e localização dos pontos onde foi aplicado o modelo WAMIT (imagem Google Earth™).

Determinada a função resposta dos movimentos do navio nos pontos que definem a trajectória do navio, pode analisar-se as respostas do navio para qualquer estado de agitação regular ou irregular.

Embora seja razoável utilizar diferentes valores de limiar para a altura do movimento vertical do ponto seleccionado no navio de acordo com os troços em que se divide as faixas da trajectória de entrada do navio, para este exemplo de aplicação foi utilizado o mesmo valor de 0.5 m como limiar para a altura significativa do movimento vertical do ponto seleccionado nos pontos correspondentes aos percursos 1 e 2, de forma a facilitar a análise.

Assim, considerando os valores previstos de HS, TP e DIR nos pontos P1 a P6 correspondentes ao percurso 1 e 2 no dia 21 de Novembro de 2009 às 01:00, ou seja, (0.94 m, 11.14 s, 23°), (0.15 m, 11.14 s, 44°), (0.16 m, 11.14 s, 33°), (0.10 m, 11.14 s, 196°), (0.03 m, 11.14 s, 90°) e (0.2 m, 11.14s, 169°), obtêm-se para a altura significativa do movimento vertical do navio respectivamente, 1.38 m, 0.20 m, 0.18 m, 0.10 m, 0.04 m e 0.01 m. Isto significa que se o limiar for excedido é emitida uma mensagem de aviso, neste caso para o ponto P1.

Repetindo o procedimento para a série temporal toda da altura significativa e direcções nos pontos P1 a P6, para o período de 1 de Janeiro de 2009 a 1 de Janeiro de 2010, e usando uma abordagem em frequência – tendo em conta que o número total dos dados de previsão da agitação não é o mesmo para todos os pontos (8760 valores para P1, 8332 para P2, P3, P4, P5 e P6) – tem-se o valor esperado da probabilidade quando a altura significativa do ponto (45,5, 5,4, 0.0) excede o movimento vertical de 0.5 m. Como seria expectável, os valores diminuem de 82% fora do porto, no ponto P1, para 2% no ponto P4, dentro do porto, sendo 14% e 12% nos pontos P2 e P3, no percurso 1, e no percurso 2 para 0% no ponto P6, dentro do porto, sendo 6% no ponto P5.

4.4 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 do navio considerado para o risco associado à ultrapassagem desse limiar, considerando a probabilidade de ocorrência e as consequências de tais eventos nos pontos dos dois percursos em estudo no porto da Praia da Vitória (P1, P2, P3, P4, P5 e P6).

Com base nos resultados apresentados em 4.2 e 4.3 para o ano de 2009 e para cada ponto do percurso do navio, determinam-se os valores das alturas dos movimentos verticais que excedem o limiar estabelecido e a correspondente probabilidade de ocorrência de tal excedência para o ano de 2009. A consulta do Quadro 1 permite associar a cada ponto da trajectória o grau de probabilidade. Da mesma forma, o Quadro 2 permite saber o grau de consequências da excedência desse limite. A multiplicação desses dois valores para cada ponto permite identificar o grau de risco e caracterizá-lo de acordo com o Quadro 3. No Quadro 7 apresentam-se os resultados obtidos para todos os pontos dos percursos 1 e 2.

Quadro 7 – Percursos 1 e 2 - 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 da Praia da Vitória

Porto da Praia da Vitória	
	Percurso 1
	Percurso 2

Pontos	Probabilidade	Consequências	Risco	Pontos	Probabilidade	Consequências	Risco
P1	Frequente (>50%) Grau 5	Reduzidas Grau 2	Reduzido Grau 10	P1	Frequente (>50%) Grau 5	Reduzidas Grau 2	Reduzido Grau 10
P2	Ocasional (10-25%) Grau 3	Sérias Grau 5	Indesejável Grau 15	P2	Ocasional (10-25%) Grau 3	Sérias Grau 5	Indesejável Grau 15
P3	Ocasional (10-25%) Grau 3	Muito sérias Grau 10	Indesejável Grau 30	P5	Raro (1-10%) Grau 2	Catastróficas Grau 25	Inaceitável Grau 50
P4	Raro (1-10%) Grau 2	Catastróficas Grau 25	Inaceitável Grau 50	P6	Improvável (0-1%) Grau 1	Catastróficas Grau 25	Indesejável Grau 25

Na Figura 10 apresentam-se os mapas do risco associados à ultrapassagem do limiar de 0.5 m de movimento vertical do navio para o porto da Praia da Vitória, para os dois percursos, 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 (Quadro 7).

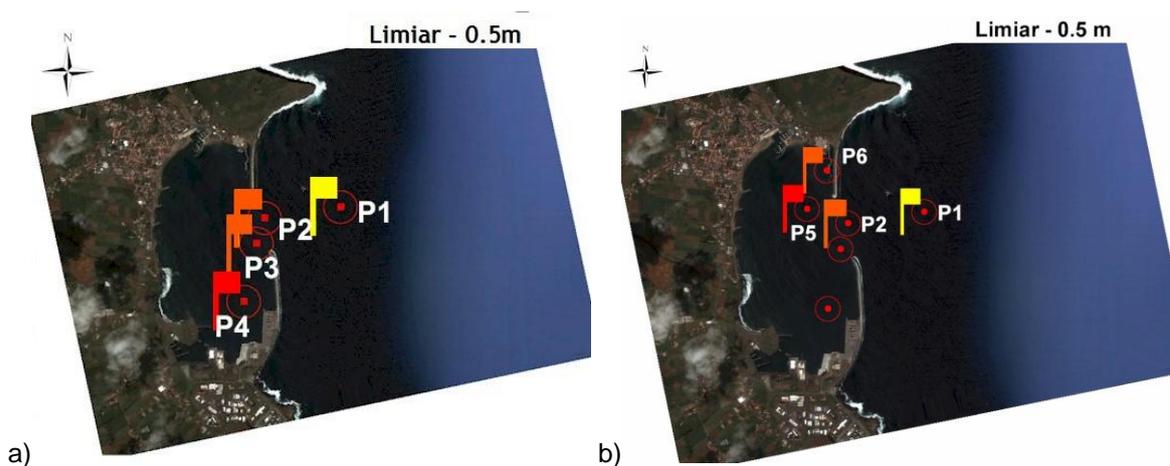


Figura 10 - Mapa de risco para a navegação no porto da Praia da Vitória relativamente a movimentos verticais que excedem 0.5 m: (a) representativos do percurso 1; (b) representativos do percurso 2

Através da Figura 10 e do Quadro 7, verifica-se que, segundo a classificação adoptada para o grau de risco associado à navegação, para os dois percursos, o ponto P1 apresenta um risco reduzido (cor amarela), enquanto em todos os outros pontos verificamos que o risco está classificado como sendo indesejável (cor laranja) ou nos pontos P4 e P5 classificado como inaceitável (cor vermelha).

Contudo é necessário referir que os valores obtidos para o grau de risco estão sujeitos a uma avaliação subjectiva do nível de consequências, que para este trabalho, como exemplo da metodologia para avaliação de risco, foram adoptados valores de grau de consequências para excedência do limiar de 0.5 m de altura de movimento vertical do navio aleatórios. Num trabalho

futuro torna-se imperativo realizar um estudo cuidadoso do nível de consequências para a excedência de um determinado limiar pré-estabelecido de altura do movimento vertical do navio.

5. CONCLUSÕES

Nesta comunicação, 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 LNEC. Tais desenvolvimentos consistem num conjunto de procedimentos automáticos que implementam uma metodologia de avaliação do risco para a navegação portuária. Para ilustrar e testar estes desenvolvimentos, utilizou-se como caso de estudo o porto da Praia da Vitória, na ilha Terceira, no arquipélago do Açores.

Assim, recorreram-se a resultados do ano de 2009 do modelo de previsão de agitação WAVEWATCH III para caracterizar a ondulação ao largo do porto da Praia da Vitória e aos modelos de propagação das ondas SWAN e DREAMS, incluídos no sistema GUIOMAR, para transferir esses resultados do largo para a entrada e interior do porto, e deste modo aí definir os respectivos regimes de agitação marítima. Com base nesses valores da agitação marítima, utilizou-se o modelo WAMIT para determinar as alturas da componente vertical do movimento de um navio pré-seleccionado ao longo de duas trajectórias de entrada no porto: uma com destino ao molhe Norte e outra orientada para atracagem no molhe Sul. Por fim, recorrendo ao GUIOMAR e considerando um limite pré-estabelecido para os movimentos verticais desse navio, determinaram-se os graus associados quer à probabilidade de ocorrência de movimentos verticais do navio que excedem esse limiar, quer às consequências dessa excedência, e finalmente o grau de risco, com base no qual foram efectuados os mapas de risco.

O exemplo aqui apresentado confirmou a capacidade do sistema GUIOMAR para realizar estudos de avaliação do risco para a navegação no interior de um porto, de forma interactiva e amigável. As metodologias agora implementadas no sistema GUIOMAR constituem mais um passo no sentido de o afirmar como um sistema de apoio à gestão portuária. Nesse sentido, 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 constituem trabalho futuro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a autorização concedida pela Administração do porto da Praia da Vitória para realizar os estudos de caracterização da linha de costa e estruturas do porto. Agradecem ainda à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento concedido através dos projectos PTDC/AMB/67450/2006 e PTDC/ECM/73145/2006.

BIBLIOGRAFIA

AZEVEDO, E. B; V. GONÇALO (2005). "O projecto CLIMAAT e o seu contributo para a monitorização e caracterização da agitação marítima no arquipélago dos Açores". *Proc. 4as JPECP*, Angra do Heroísmo, 20 e 21 de Outubro.

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

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

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

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

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

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

NEWMAN, J.N.; SCLAVOUNOS, P.D. (1988). “The computation of wave loads on large offshore structures.” *Proc. Boss 88*, Norway, pp. 1-19.

NEW ZEALAND MARITIME SAFETY AUTHORITY (2004). New Zealand Port & Harbour Marine Safety Code.

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

SANTOS, J.A.; RODRIGUES, S.; PINHEIRO, L.; NEVES, D.R.; FORTES, C.J.E.M.; REIS, M.T.; SIMÕES, A.; AZEVEDO, E.B. (2010). “Managing wave-induced risks in port operations.” *Special Issue of the Journal of Coastal Conservation* (no prelo).

TOLMAN, H.L. (1999). “User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18.” *NOAA / NWS / NCEP / OMB technical note 166*, 110 pp.

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

ZÓZIMO, A.C.; FORTES, C.J.E.M.; 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.