

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil

Avaliação do Risco para a Navegação Portuária. Porto da Praia da Vitória, Açores

VALENTIM MANUEL SILVA COSTA
(Licenciado em Engenharia Civil)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de
Especialização de Hidráulica

Orientadores:

Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos
Doutora Conceição Juana Espinosa Morais Fortes

Júri:

Presidente: Doutora Maria Helena Teixeira Cardoso Gamboa

Vogais:

Doutora Liliana Vieira Pinheiro
Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

Dezembro 2016

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Área Departamental de Engenharia Civil

Avaliação do Risco para a Navegação Portuária. Porto da Praia da Vitória, Açores

VALENTIM MANUEL SILVA COSTA
(Licenciado em Engenharia Civil)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de
Especialização de Hidráulica

Orientadores:

Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos
Doutora Conceição Juana Espinosa Morais Fortes

Júri:

Presidente: Doutora Maria Helena Teixeira Cardoso Gamboa

Vogais:

Doutora Liliana Vieira Pinheiro
Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos

Dezembro 2016

RESUMO

A avaliação do risco associado à navegação é cada vez mais importante devido às situações de perigo associadas à agitação marítima que podem ocorrer. Neste trabalho a avaliação do risco será realizada através do sistema SWAMS_ALERTA. Esta metodologia adota para a determinação da agitação marítima no interior do porto modelos numéricos de propagação das ondas cujos dados de entrada são a agitação marítima medida ou prevista ao largo.

A avaliação do risco para a navegação é feita com base na altura do movimento vertical de um navio ao longo da sua trajetória no porto, cuja determinação é realizada considerando linear a interação do navio com as ondas incidentes.

Esta metodologia será aplicada no porto da Praia da Vitória, pertencente à ilha Terceira dos Açores, Portugal.

Palavras-Chave: Análise de risco, Resposta de sistemas lineares, Movimentos verticais, Porto da Praia da Vitória

ABSTRACT

The evaluation of the risk associated to the navigation is important because of dangerous situations associated to the sea states that can occur. In this work the evaluation of the risk will be made through the SWAMS_ALERT systems. This methodology adopted numerical models for the propagation of waves whose input data is a sea waves characterization.

The evaluation of the risk for the navigation is based on the height of the vertical movement of the ship along its course, whose determination is based on considering as linear the interaction of the ship with the incident waves.

This methodology is applied in the Porto Praia da Vitória, pertaining to the Terceira island in the Açores, Portugal.

Keywords: Risk analysis, Response of linear systems, vertical motions, Praia da Vitória port

AGRADECIMENTOS

Desejo exprimir os meus sinceros agradecimentos às seguintes pessoas, cujo apoio considero ter sido fundamental na concretização deste trabalho.

Quero agradecer aos meus orientadores o Professor Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos, docente no ISEL e à Doutora Conceição Juana Fortes, Chefe do Núcleo de Portos e Estruturas Marítimas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, responsáveis pela orientação deste trabalho. Agradeço não só pelo incrível apoio prestado, mas também pelo acompanhamento permanente e pelos ensinamentos transmitidos ao longo deste percurso, com os quais muito aprendi.

Agradeço à administração dos Portos dos Açores, à Universidade dos Açores (Prof. Eduardo de Azevedo), à Azorina (Eng^a Conceição) e aos projetos HIDRALERTA e M&M Ships toda a informação base concedida que foi fundamental para o trabalho desenvolvido nesta dissertação.

Aos meus amigos Ricardo Bento, João Sengo, Inês Lourenço, aos quais devo uma parte deste trabalho pela companhia permanente e indispensável que demonstraram e por todo o apoio através da sua amizade, compreensão e colaboração.

A todos os colegas estagiários do LNEC, que me cruzei, por os momentos de partilha e entreaajuda.

A todos os meus amigos e familiares pela amizade e pela ajuda de ser a pessoa que sou hoje.

Um agradecimento especial para a minha mãe e o meu irmão, pelo apoio que deram em todo o meu percurso académico, que sem eles não seria possível chegar até aqui.

Por fim, a quem não me pode acompanhar...

ÍNDICE

ÍNDICE	v
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Motivação	1
1.2 - Trabalhos Anteriores.....	3
1.3 - Objetivo.....	5
1.4 - Estrutura da Dissertação	6
2 - METODOLOGIA APLICADA.....	8
2.1 - Breve descrição do sistema SWAMS_ALERTA	8
2.2 - Agitação marítima.....	9
2.2.1 - Modelos numéricos SWAN e DREAMS.....	11
2.3 - Movimentos do navio	12
2.3.1 - Resposta de sistemas lineares	12
2.3.1.1 - Método de resposta a impulso.....	12
2.3.1.2 - Método de resposta em frequência	12
2.3.2 - Resposta do navio a um estado de agitação	13
2.3.3 - Análise espectral das ondas	16
2.3.4 - Movimento do navio: modelo numérico WAMIT	18
2.3.4.1 - Frequência de encontro	21
2.3.5 - Distribuição de Rayleigh.....	22
2.4 - Avaliação do risco.....	23
3 - CASO DE ESTUDO.....	26
3.1 - Descrição geral.....	26
3.2 - Condições de aplicação.....	29
3.3 - Agitação marítima na entrada e no interior do porto	31
4 - MOVIMENTOS DO NAVIO.....	37
4.1 - Metodologia	37

4.2 - Amplitude dos movimentos do navio	37
4.3 - Determinação do espectro da agitação marítima	42
4.4 - Determinação do espectro de resposta do navio	44
4.5 - Determinação do movimento vertical do navio	45
4.6 - Resultados	45
5 - AVALIAÇÃO DO RISCO ASSOCIADO A MOVIMENTOS VERTICAIS DO NAVIO	50
5.1 - Análise da probabilidade de ocorrência	50
5.2 - Análise das consequências	53
5.3 - Grau de risco	53
6 - CONCLUSÕES	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
Anexos.....	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Evangelina, Roménia, 1968.....	2
Figura 1.2 - Naufrágio de 1947, Matosinhos, Portugal.....	2
Figura 1.3 - Monserrat B, 2002, Leixões, Portugal.....	2
Figura 1.4 Esquema da modelação de cálculo dos movimentos do navio.	6
Figura 2.1 - Esquema do sistema SWAMS_ALERTA (Pinheiro, 2016).....	9
Figura 2.2 - Propagação das ondas desde o largo até ao interior de um porto.	10
Figura 2.3 - Comparação entre o espectro P-M e JONSWAP. Adaptado de Vincent <i>et al.</i> (2002)	17
Figura 2.4 - Movimentos do navio segundo cada grau de liberdade.....	19
Figura 2.5 - Decomposição da interacção de um corpo flutuante com as ondas nos problemas de difracção e de radiação, adaptado de O.M. Faltinsen (1990).	19
Figura 2.6 - Convenção para o ângulo do rumo relativamente às ondas.	21
Figura 3.1 – Localização do Porto e baía da Praia da Vitória.....	26
Figura 3.2 – Porto da Praia da Vitória, Açores.	29
Figura 3.3 – Trajetórias e centroides dos trechos em que se dividiu a zona varrida pelo navio “N/M Fernão Gomes” na manobra de entrada no porto da Praia da Vitória.	30
Figura 3.4 – Série temporal dos valores da altura significativa (H_s), período médio (T_m) e direção de onda (DIR) para o ponto P1 de 1 de Janeiro de 1979 a 30 de Dezembro de 2013 (Lourenço 2016).....	32
Figura 3.5 – Trajeto Sul - Séries temporais das estimativas da altura significativa em P2, P3, P4 e P5.....	34
Figura 3.6 – Trajeto Sul - Séries temporais das estimativas da direção média de onda em P2, P3, P4 e P5.	34
Figura 3.7 – Trajeto Norte - Séries temporais das estimativas da altura significativa em P2, P6, P7 e P8.....	34
Figura 3.8 – Trajeto Norte - Séries temporais das estimativas da direção média de onda em P2, P6, P7 e P8.	35
Figura 4.1 - Divisão em painéis da superfície molhada do casco do navio “N/M Fernão Gomes”.	37
Figura 4.2 – Influência na amplitude do movimento vertical para o ponto A do navio “N/M Fernão Gomes” da profundidade na zona onde o navio tem ondas de popa, $\beta=0^\circ$	39

Figura 4.3 – Influência na amplitude do movimento vertical para o ponto A do ângulo de incidência das ondas com o navio, quando este está sobre uma zona de profundidade 10.4 m. a) β a variar entre 0° e 180° . b) β a variar entre 225° e 360°	40
Figura 4.4 – Exemplo da importância da velocidade na função resposta do navio para $DIR=90^\circ$, Profundidade=30 m, rumo do navio= 270°	42
Figura 4.5 - Espectro de agitação incidente adotado, $S(\omega)$, para $H_s=0.20$ m e $T_p=17.37$ s e $DIR=61.08^\circ$	43
Figura 4.6 – Comparação entre o espectro de agitação adotado e o espectro de agitação incidente, $S(\omega)$, para $H_s=0.20$ m e $T_p=17.37$ s e $DIR=61.08^\circ$	43
Figura 4.7 – Espectro de resposta à agitação incidente no navio, para $H_s=0.20$ m e $T_p=17.37$ s e $DIR=61.08^\circ$, no ponto P1.....	44
Figura 4.8 – Esquema para determinar o módulo de amplitude do ponto A do navio para as características da agitação marítima previstas.	46
Figura 4.9 – Exemplo da função resposta para o ponto A do navio no P1 com $DIR=61.08^\circ$. 46	
Figura 4.10 – Altura significativa dos movimentos verticais do navio no ponto A, nos pontos do trajeto Sul.	48
Figura 4.11 - Altura significativa dos movimentos verticais do navio no ponto A, nos pontos do trajeto Norte.....	49
Figura 5.1 – Mapa de risco para a navegação do “N/M Fernão Gomes” no porto da Praia da Vitória, relativamente aos movimentos verticais que excedem 1.0 m.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Probabilidade de ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem limiares pré-estabelecidos. (Santos et al. 2011)	23
Tabela 2.2 – Consequências da ocorrência de movimentos verticais excessivos de um navio baseadas nas diretivas da Maritime Safety Authority (2004) da Nova Zelândia.	24
Tabela 2.3 – Avaliação da aceitabilidade do grau de Risco obtido. Adaptado de Neves et al. (2009)	25
Tabela 3.1 – Profundidades, rumos e velocidades do navio nos centroides dos trechos em que foram divididos os percursos de entrada estudados.	30
Tabela 3.2 – Parâmetros estatísticos da agitação marítima nos pontos P1 a P8.	35
Tabela 4.1 – Exemplo dos resultados de saída do modelo numérico WAMIT para uma profundidade de 20.4 m.....	38
Tabela 4.2- Determinação do módulo de amplitude da resposta para o ponto A.	38
Tabela 4.3 - Exemplo dos resultados do espectro de resposta no ponto P1 do trajeto do navio.	47
Tabela 4.4 – Parâmetros estatísticos da altura significativa dos movimentos verticais do ponto A do navio nos pontos do Trajeto Sul.	47
Tabela 4.5 - Parâmetros estatísticos da altura significativa dos movimentos verticais do ponto A do navio nos pontos do Trajeto Norte.	47
Tabela 5.1 – Número de movimentos verticais do navio que ultrapassaram os vários limites de risco nos pontos à entrada do porto.	51
Tabela 5.2 - Número de movimentos verticais do navio que ultrapassaram os vários limites de risco nos pontos no interior do porto.....	51
Tabela 5.3 – Grau de probabilidade de ocorrência de movimentos excessivos nos pontos de entrada no porto.....	52
Tabela 5.4 - Grau de probabilidade de ocorrência de movimentos excessivos nos pontos no interior do porto.....	53
Tabela 5.5 – Grau de risco associado a movimentos verticais excessivos do navio para um limiar de 1.0 m, nos pontos de ambas as trajetórias.	54

SIMBOLOGIA

A	Amplitude de onda
a_{kj}	Coefficiente de massa adicionada segundo a coordenada generalizada k para a oscilação do corpo, de amplitude unitária, segundo a coordenada generalizada j
a_n e b_n	Coefficientes de Fourier
b_{kj}	Coefficiente de amortecimento segundo a coordenada generalizada k para a oscilação do corpo, de amplitude unitária, segundo a coordenada generalizada j
$BM AM$	Baixa-Mar de Águas Mortas
$BM AV$	Baixa-Mar de Águas Vivas
BM, min	Baixa-Mar mínima
c	Velocidade de fase da onda
C_{kj}	Elemento da matriz de restituição hidrostática
DIR	Direção média do período de pico
E	Densidade de energia por unidade de área
f	Frequência
F_k^E	Força de excitação segundo a coordenada generalizada k

g	Aceleração da gravidade
$h(t)$	Resposta do sistema
H	Altura de onda
H_s	Altura significativa
$H(\omega)$	Função resposta em frequência
k	Número de onda
m_n	Momento espectral de ordem n
m_0	Momento espectral de ordem zero
M_{kj}	Elemento da matriz de massa do navio
NM	Nível médio das marés
$PM AM$	Preia-Mar de Águas Mortas
$PM AV$	Preia-Mar de Águas Vivas
$PM, máx$	Preia-Mar superior
$S(\omega)$	Espectro de densidade de energia da agitação marítima
$S_R(\omega)$	Espectro da resposta
t	Variável tempo

T_e	Período de encontro
T_P	Período de pico
T_R	Registo de duração do tempo
T_Z ou T_m	Período médio de zero ascendente
$TEUS$	Volume de contentor 20×8 pés
U	Velocidade de avanço do navio
v_r	Velocidade relativa de encontro
VBA	Linguagem de programação Visual Basic for Applications
$x(t)$	Sinal de entrada
$y(t)$	Sinal de saída
ZH	Zero hidrográfico
β	Ângulo entre o vetor de velocidade do navio e o vetor de velocidade de propagação das ondas
γ	Parâmetro de elevação do pico
ε	Fase relativa da onda
$\eta(t)$	Elevação da superfície livre
θ_j	Fase do movimento

λ	Comprimento de onda
ξ_j	Amplitude da oscilação segundo a coordenada generalizada j
$\dot{\xi}_j$	Velocidade do movimento segundo a coordenada generalizada j
$\ddot{\xi}_j$	Aceleração do movimento segundo a coordenada generalizada j
ξ_j^a	Amplitude real do movimento oscilatório segundo a coordenada generalizada j
P	Massa volúmica da água
Σ	Coefficiente de assimetria do espectro
ω	Frequência angular
ω_e	Frequência de encontro

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Motivação

O transporte marítimo tem uma elevada importância na economia portuguesa, pois é responsável por 80% do tráfego de mercadorias internacionais nomeadamente combustível, matérias-primas, bens alimentares ou manufaturados.

A principal preocupação em portos é a segurança, o que inclui para além do navio, todo o meio envolvente, outros navios e as instalações e infraestruturas portuárias. Sempre que exista falha de segurança podem ocorrer consequências indesejáveis, levando a perdas de bens materiais, vidas e danos ambientais que penalizam a indústria marítima.

A ocorrência destes fenómenos indesejáveis provoca não apenas prejuízos económicos para os portos, mas também para as empresas de transporte marítimo que são prejudicadas com tempos de espera, caso o porto fique inativo perdendo competitividade. Apenas com um sistema portuário competitivo se constroem e atraem rotas, gerando atividades económicas.

Um dos fenómenos que mais afeta a segurança da navegação nas zonas portuárias é a agitação marítima. Com efeito, a agitação marítima pode perturbar quer as manobras de aproximação dos navios ao porto quer as atividades de carga e descarga de navios, bem como a segurança de pessoas, bens materiais, infraestruturas portuárias e embarcações presentes no interior de um porto. A título de exemplo a agitação marítima pode induzir movimentos excessivos num navio em manobra com consequências do tipo:

1. Colisão do casco no fundo – navio inoperacional (Figura 1.1);
2. Inundação do convés – naufrágio; (Figura 1.2)
3. Perda de carga transportada (Figura 1.3).



Figura 1.1 - Evangelina, Roménia, 1968.



Figura 1.2 - Naufrágio de 1947, Matosinhos, Portugal.



Figura 1.3 - Monserrat B, 2002, Leixões, Portugal.

Do exposto, constata-se que as consequências da ocorrência de movimentos excessivos do navio em manobra em zonas portuárias justificam a importância crescente do desenvolvimento de metodologias capazes de avaliar o risco deste tipo de situações.

Para esse fim, é fundamental a caracterização do acontecimento perigoso que envolve o estabelecimento de limiares para os movimentos do navio. Sendo a agitação marítima uma das causas da ocorrência de acontecimentos perigosos associados à navegação é importante uma rigorosa caracterização da agitação marítima bem como dos seus efeitos nas manobras do navio.

Assim, primeiramente é necessário simular a propagação das ondas na zona de manobra do navio, na zona de aproximação e no interior do porto, de modo a ter uma caracterização da agitação marítima na zona em estudo. De seguida, é necessário avaliar os movimentos do navio durante essas manobras, para aquelas condições de agitação marítima. Destes o movimento vertical é um dos mais importantes. Finalmente, há que avaliar o risco associado. Essa avaliação do risco passa pela definição dos limiares para movimentos verticais excessivos do navio e pelo produto do grau da probabilidade de ocorrência de valores de movimentos superiores a esse limiar pelo grau das consequências associadas a essa ultrapassagem. Com base nessa avaliação, é possível realizar mapas de risco para o apoio a decisões de entidades responsáveis na gestão de zonas costeiras e portuárias.

Em cada uma das etapas anteriores, o recurso a modelação numérica é fundamental.

1.2 - Trabalhos Anteriores

Para a avaliação do risco associado aos galgamentos e inundação em zonas costeiras e portuárias, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) tem vindo a desenvolver um sistema integrado, HIDRALERTA (Neves *et al.*, 2012; Raposeiro *et al.*, 2013; Fortes *et al.*, 2013, 2014, 2015; Poseiro *et al.*, 2013, 2014; Sabino *et al.*, 2014, 2015) que envolve a determinação da agitação marítima, e os seus efeitos em termos de galgamentos em estruturas e da avaliação do risco. Este novo sistema, seguindo a metodologia de acoplamento de modelos numéricos e metodologias de avaliação do risco foi desenvolvido na linguagem de programação Python em ambiente Unix .

No sentido de estender as funcionalidades deste sistema à previsão, alerta e avaliação do risco associado à navegação em zonas portuárias e/ou ao comportamento de navios amarrados, desenvolveu-se um novo sistema denominado SWAMS_ALERTA (Neves *et al.*, 2010, 2012; Santos *et al.*, 2011, 2013; Pinheiro *et al.*, 2013), que tem em conta essas duas vertentes.

O sistema SWAMS_ALERTA utiliza as medições e previsões de agitação marítima para a determinação dos seus efeitos em termos de valores de movimentos verticais excessivos de um

navio em manobra no acesso a uma bacia portuária ou em termos de movimentos nos seis graus de liberdade e forças nas amarras e defensas quando o navio se encontra estacionado no cais. Para tal, o sistema recorre a modelos numéricos. A comparação destes valores com valores máximos admissíveis pré-estabelecidos permite a identificação, em tempo real, de situações de emergência e a emissão de alertas dirigidos às entidades competentes.

O sistema SWAMS_ALERTA, recorre a modelos numéricos de geração, propagação e dissipação da agitação marítima SWAN (Booij *et al.*, 1999), e DREAMS (Fortes, 2002), e ao modelo WAMIT (Newman e Sclavounos, 1988) desenvolvido no Massachusetts Institute of Technology, para o cálculo dos movimentos de um ponto do navio em manobra. O sistema aplica procedimentos de avaliação de risco (Sabino *et al.*, 2014, 2015; Lopes *et al.* 2016) de forma automática e elabora mapas de risco.

Em Neves *et al.*, 2010 descreve a primeira utilização do sistema integrado na avaliação do risco de navegação em zonas portuárias. Esta abordagem 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 sua trajetória.

Em Rodrigues *et al.*, 2011a considerou-se apenas ondas monocromáticas incidentes no navio, pois isso tornava mais simples a determinação da frequência de encontro do navio com as ondas.

Em Rodrigues *et al.* 2011b, utilizou-se os resultados da resposta de sistemas lineares para determinar o espectro da resposta - definida como a altura do movimento vertical de um ponto selecionado do navio em manobra - uma vez conhecido o espectro do estado de agitação incidente no navio, a função de resposta em frequência do navio e a velocidade de avanço deste. Com aquela abordagem, e assumindo que o espectro do estado de agitação incidente no navio era de banda estreita, foi possível determinar uma altura significativa do movimento vertical do navio, definindo-se então como acontecimento perigoso a ultrapassagem de um limiar para aquela altura significativa.

Em Oliveira (2012) estendeu-se esse procedimento de modo a avaliar a influência da velocidade de avanço do navio no espectro dos movimentos verticais do mesmo. Foi assumido que a altura do movimento vertical do navio segue uma distribuição de Rayleigh, a qual possibilita a determinação da altura significativa desse movimento vertical, bem como a probabilidade de a altura do movimento vertical do navio não exceder um limiar pré-definido e conseqüentemente

mostrar, através da análise dos resultados, a influência significativa da velocidade de avanço do navio naqueles resultados.

Em Santos *et al.* (2013) implementou-se outra metodologia baseada no valor esperado do número de vezes que é ultrapassado um limiar para a altura do movimento induzido por cada onda de um estado de agitação incidente no navio. A adoção de tal critério tem a vantagem de tornar mais fácil a associação de um custo ao mesmo pois é expeável que seja mais fácil atribuir um custo à ultrapassagem de um limiar para a altura dos movimentos do que para a ultrapassagem de um limiar para a altura significativa dos movimentos.

Estas metodologias (e o próprio SWAMS_ALERTA) foram aplicadas a um porto de pequenas dimensões, o porto da Praia da Vitória, localizado na costa Este da Ilha Terceira, Açores (Santos *et al.* 2012) e a um grande porto de águas profundas, o porto de Sines, na costa Oeste de Portugal (Neves *et al.*, 2010). Avaliou-se o risco para a navegação ao longo de várias trajetórias de entrada de um navio nesses portos e consideram-se diferentes limiares para movimentos verticais. As metodologias de risco encontram-se descritas em (Santos *et al.* 2011, Neves *et al.*, 2010, 2011).

No caso do porto da Praia da Vitória, o percurso de entrada do navio N/M Fernão Gomes foi o caso de estudo considerado e a agitação marítima incidente no navio cobriu o período de janeiro de 2009 a dezembro de 2010 (Santos *et al.* 2013). Uma vez que o período de dados de agitação marítima considerado foi de apenas 2 anos, tal é francamente insuficiente para a realização de estudos de avaliação de risco.

Nesse sentido, o presente trabalho pretende, estender o trabalho de Santos *et al.* (2013), considerando um maior período de estudo (35 anos de dados de agitação marítima).

1.3 - Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo a determinação de mapas de risco associados à ocorrência de movimentos excessivos de um navio em manobra no acesso ao porto da Praia da Vitória, Terceira, Açores. Este trabalho surge na sequência de trabalhos anteriores (Santos *et al.* 2013), considerando agora um período de dados de agitação marítima francamente superior (35 anos).

A metodologia para a avaliação do risco de navegação associado aos movimentos verticais de um navio consiste em quatro passos fundamentais (Santos, 2011), Figura 1.4:

- Definição do regime de agitação no interior do porto, partindo-se das características de agitação marítima medidas ou estimadas ao largo: altura significativa, H_s , período, T , e direção média, DIR . Recorre-se a dois modelos numéricos de propagação de ondas, SWAN (Booij *et al.*, 1999) e DREAMS (Fortes, 2002);
- Interação de corpos flutuantes com ondas, para calcular o movimento vertical de um determinado navio utilizando o modelo numérico WAMIT (Newman & Scлавounos, 1988);
- Determinação do grau de risco devido à excedência do limiar pré-estabelecido para os movimentos verticais;
- Construção dos mapas de risco de navegação associado aos movimentos verticais do navio.

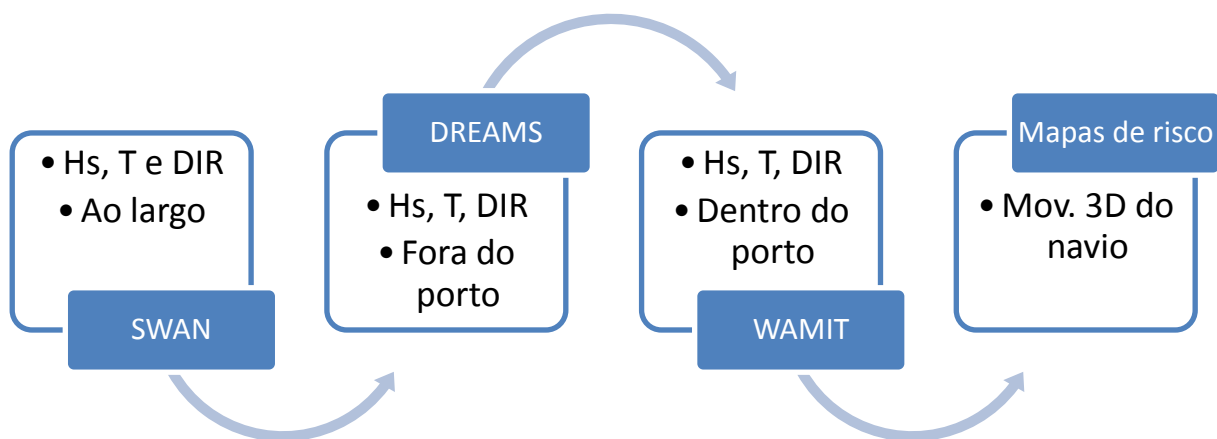


Figura 1.4 Esquema da modelação de cálculo dos movimentos do navio.

1.4 - Estrutura da Dissertação

O trabalho desenvolve-se em 6 capítulos. No Capítulo 1, é feita a introdução e o enquadramento geral do trabalho bem como trabalhos já desenvolvidos e os objetivos a que o trabalho se propõe.

No Capítulo 2 a metodologia aplicada ao longo do trabalho para as diversas fases deste. Neste capítulo são descritos os modelos numéricos responsáveis pela caracterização da agitação marítima, SWAN e DREAMS, bem como o modelo WAMIT, utilizado para o estudo da resposta de um ponto do navio em termos de amplitude dos movimentos verticais num determinado ponto da sua trajetória. No final deste capítulo, são descritos os processos de avaliação de risco utilizados neste trabalho.

No Capítulo 3 é feita a descrição do caso de estudo. É apresentado o porto em estudo, Porto da Praia da Vitória, na ilha Terceira, nos Açores, bem como todos os resultados previstos acerca da agitação marítima para todos os pontos que definem as trajetórias do navio no porto.

No capítulo 4 é feito o estudo da resposta do navio a um determinado estado de agitação, quando este percorre dois trajetos de entrada no porto. Neste capítulo é descrita a metodologia de cálculo utilizada para a determinação dos movimentos verticais do navio sujeito a um estado de agitação previsto nele incidente.

No capítulo 5 é determinada a probabilidade de os movimentos verticais excederem limiares pré estabelecidos, sendo também avaliado o risco associado aos movimentos verticais do navio.

A dissertação termina, no Capítulo 6, com a apresentação das conclusões do trabalho realizado e das perspetivas de desenvolvimento das metodologias utilizadas, bem como algumas recomendações para estudos futuros.

2 - METODOLOGIA APLICADA

2.1 - Breve descrição do sistema SWAMS_ALERTA

O sistema SWAMS_ALERTA (Neves *et al.*, 2010, 2012; Santos *et al.*, 2011, 2013; Pinheiro *et al.*, 2013) é um sistema de previsão e alerta de situações de emergência e de avaliação de risco associado à navegação em zonas portuárias. O sistema começa com os valores ao largo de medições e previsões de agitação marítima para a determinação dos efeitos desta em termos de valores de movimentos verticais excessivos de um navio em manobra no acesso a uma bacia portuária ou em termos de movimentos nos seis graus de liberdade e forças nas amarras e defensas quando o navio se encontra estacionado no cais. Está a ser desenvolvido um protótipo para a zona do porto e baía da Praia da Vitória, Terceira, Açores. Este sistema é uma extensão do HIDRALERTA (Neves *et al.*, 2012; Raposeiro *et al.*, 2013; Fortes *et al.*, 2013, 2014, 2015; Poseiro *et al.*, 2013, 2014; Sabino *et al.*, 2014, 2015), atualmente em funcionamento, para a previsão (a 72 horas), alerta e avaliação do risco associado ao galgamento e inundação de zonas portuárias e costeiras.

A comparação destes valores com valores máximos admissíveis pré-estabelecidos permite:

- a identificação, antecipada, de situações de emergência e a emissão de alertas dirigidos às entidades competentes sempre que se preveja estar em causa a segurança de pessoas, bens ou atividades desenvolvidas;
- a construção de mapas de risco, considerando séries temporais longas de previsão da agitação marítima ou cenários pré-definidos associados a mudanças climáticas e/ou a eventos extremos.

O sistema é constituído por quatro módulos: I – Características da agitação marítima; II – Navegação em zonas portuárias; III – Avaliação do risco e IV – Sistema de alerta, Figura 2.1. O sistema está a ser desenvolvido de em linguagem Python.

Nos pontos seguintes descrevem-se apenas os módulos que permitem a previsão da agitação marítima (módulo I), os efeitos a agitação marítima na manobra de navios (parte do módulo II) e a metodologia de avaliação do risco (módulo III).

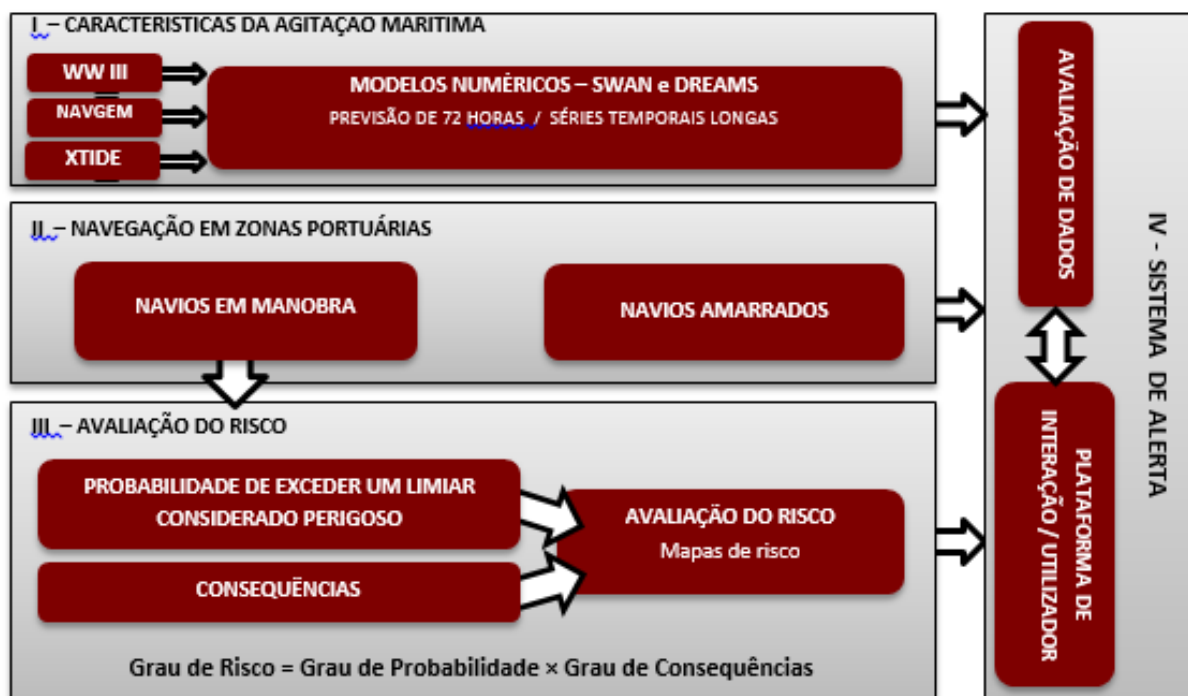


Figura 2.1 - Esquema do sistema SWAMS_ALERTA (Pinheiro, 2016).

2.2 - Agitação marítima

O conhecimento das características da agitação marítima tem uma grande relevância para a análise das condições de navegabilidade nos trajetos utilizados pelos navios na entrada e no interior de portos. Para esta caracterização são utilizados dispositivos de medição da agitação marítima que permitem obter dados num dado local apenas. Na maioria das situações, tais dispositivos encontram-se longe da área de estudo, recorrendo-se, por isso, frequentemente, ao uso de modelos numéricos de propagação de onda para a caracterização da agitação marítima numa área de estudo mais abrangente.

Devido à ausência de um único modelo capaz de simular, de uma forma eficiente a propagação das características da agitação marítima para uma vasta área (desde o largo até à costa), são usados vários modelos tomando em consideração todos os fenómenos importantes para essa propagação, Figura 2.2.

Estes modelos partem de um conjunto de dados monitorizados ou estimativas obtidas com outros modelos a uma escala regional, fazendo a sua transposição para uma escala mais local, a zona em estudo que, no presente trabalho, é o interior do porto.



Figura 2.2 - Propagação das ondas desde o largo até ao interior de um porto.

Consideraram-se os seguintes modelos para a previsão de agitação marítima e propagação dessas previsões para junto à costa ou para o interior de zonas portuárias: o modelo de previsão da agitação marítima à escala regional, WAM (WAMDI Group, 1988), o modelo espectral não linear de geração e propagação de ondas em zonas costeiras, SWAN (Booij *et al.*, 1999), e o modelo linear de propagação de ondas em zonas portuárias, DREAMS (Fortes, 2002). Os dados necessários ao modelo SWAN são dados de vento disponibilizados através do modelo NAVGEM (Whitcomb, 2012) e os dados de agitação marítima fornecidos pelo modelo WAM.

O modelo WAM (WAMDI Group 1988) é um modelo de terceira geração. Este modelo global permite prever a agitação marítima em todo o mundo, na costa ou ao largo, sendo que representa melhor fenómenos de maiores profundidades. Este modelo fornece estimativas da altura, período e direção em pontos ao largo da zona em estudo. A previsão das características da agitação marítima à escala regional poderia ter sido realizada pelo modelo WAVEWATCHIII (Tolman, 1999), conhecido por WWIII. A razão da escolha do modelo WAM deve-se ao facto de ser um estudo de um período extenso, 35 anos, pelo que existe mais informação no modelo WAM que no modelo WWIII.

Com base nessas estimativas, efetua-se a propagação de ondas desde o largo (ponto onde são obtidos os resultados do modelo WAM) até à zona em frente ao porto, com o modelo SWAN, *Simulating Waves Nearshore*. Trata-se de um modelo numérico de agitação marítima, de

terceira geração, desenvolvido na Delft University of Technology e que, com base na equação de balanço da ação de onda, modela as ondas do mar, no que concerne à sua geração e propagação e à dissipação da energia (Booji *et al.*, 1999). Para o interior do porto, utiliza-se o modelo de elementos finitos da equação de declive suave, DREAMS (Fortes, 2002).

Descreve-se em maior pormenor estes dois últimos modelos.

2.2.1 - Modelos numéricos SWAN e DREAMS

O modelo SWAN- *Simulating WAVes Nearshore* (Booji *et al.*, 1999), é um modelo para geração, propagação e dissipação de agitação marítima baseado na equação para a conservação da ação da onda, Booj *et al.* 1999. É um modelo espectral, isto é, para todas as direções e frequências o modelo calcula a evolução dos estados de agitação gerados pelo vento, em regiões costeiras, em águas pouco profundas e na presença de correntes.

Este modelo propaga a agitação marítima desde o largo até próximo da costa, na zona da entrada do porto. Este modelo considera os processos físicos de refração, difração, empolamento devido à variação do fundo e presença de correntes, crescimento de onda por ação do vento, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade, dissipação de energia devido ao atrito de fundo, bloqueio e reflexão por correntes opostas e transmissão.

Como dados de entrada este modelo requer a malha com a batimetria da zona a modelar e as condições de agitação na fronteira de entrada. Os resultados obtidos, em qualquer ponto do domínio, são a altura significativa da onda (H_s), o período médio (T_z) e de pico (T_p), a direção média (DIR) e de pico e a dispersão direcional.

O modelo DREAMS (Fortes, 2002) é uma ferramenta numérica de propagação e dissipação de ondas regulares em zonas portuárias e abrigadas. Este modelo é baseado na equação elíptica de declive suave, que descreve os efeitos combinados da refração e difração de ondas monocromáticas propagando-se em fundos de declive suave característicos de portos, baías e zonas costeiras.

Este modelo utiliza uma malha de elementos finitos na discretização do domínio em estudo e requer como dados de entrada as características das ondas incidentes (período e direção de onda) e a altura de maré. Os resultados obtidos são os índices de agitação (H/H_0), relação entre a altura de onda no ponto do domínio de cálculo, H , e a altura da onda à entrada do porto, H_0 ,

direção de propagação de onda e o campo de velocidades horizontais na superfície livre e as linhas representativas das cristas das ondas.

2.3 - Movimentos do navio

2.3.1 - Resposta de sistemas lineares

Como referido, os modelos SWAN e DREAMS permitem obter em cada ponto da zona de estudo as características da agitação marítima. Este conhecimento pode ser utilizado em várias situações, uma das quais a que se cinge este trabalho: a capacidade de prever os movimentos verticais de um navio.

Para esse efeito, Cummings (1962) propõe considerar como linear o sistema formado pelo corpo flutuante (navio) e pelas ondas incidentes. O sistema é considerado linear se ao ser excitado na entrada com um sinal sinusoidal apresentar uma resposta estacionária sinusoidal com a mesma frequência.

A caracterização da resposta de um sistema linear pode ser realizada no domínio do tempo (Método de resposta a impulso) ou no domínio da frequência (Método de resposta em frequência).

2.3.1.1 - Método de resposta a impulso

Um dos métodos para caracterizar o funcionamento de um sistema consiste em medir a resposta $h(t)$ do sistema, ao longo do tempo, a uma solicitação do tipo impulso.

Conhecendo a resposta ao impulso pode-se determinar a resposta final do sistema a uma entrada $x(t)$ através do integral de convolução de $x(t)$ com $h(t)$.

$$y(t) = x(t)h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (1)$$

Esta equação cumpre o princípio da sobreposição válido para sistemas lineares.

2.3.1.2 - Método de resposta em frequência

A resposta em frequência de um sistema é definida como a resposta em regime estacionário do sistema a uma entrada do tipo sinusoidal. Assim, para qualquer frequência, a função de resposta

em frequência fornece a relação entre a amplitude da resposta e a amplitude de excitação bem como a diferença de fase.

Designa-se de $X(\omega)$ a transformada de Fourier direta de $x(t)$.

A resposta do sistema, $h(t)$, na perspectiva de domínio do tempo, traduz a medição as características dinâmicas de um sistema ao longo do tempo até que o equilíbrio estacionário esteja estabelecido. Numa perspectiva de domínio da frequência, pensa-se no sistema como um filtro, o qual transmite seletivamente certas componentes de frequência e suprime outras, $H(\omega)$ (designada de transformada de Fourier de $h(t)$).

Aplicando a equação (1) e sendo a transformada de Fourier de um integral de convolução igual ao produto das transformadas de Fourier das funções envolvidas,

$$y(t) = x(t)h(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \rightarrow Y(\omega) = H(\omega)X(\omega) \quad (2)$$

Sendo $X(\omega)$ e $Y(\omega)$ a transformada de Fourier, respetivamente, do sinal de entrada e de saída e $H(\omega)$ a função de resposta em frequência do sistema. A transformada de Fourier do sinal de saída é o resultado da multiplicação da transformada de Fourier do sinal de entrada pela resposta em frequência do sistema, assim algumas componentes de frequência podem ser ampliadas ou atenuadas em amplitude, isto é, por norma a forma da onda de saída é diferente da forma da onda de entrada.

2.3.2 - Resposta do navio a um estado de agitação

A interação do sistema corpo flutuante, com as ondas nele incidente pode ser considerada linear, assim sendo, a determinação da amplitude do movimento vertical em qualquer ponto selecionado no casco do navio pode ser realizada utilizando os resultados no domínio da frequência.

Uma forma de representar o sinal de entrada atuante no navio, é através da densidade espectral de energia, que descreve a distribuição da energia de um sinal pelas várias frequências que o compõem.

O espectro para a agitação marítima, pode ser obtido a partir da oscilação sinusoidal da superfície livre, $\eta(t)$.

$$\eta(t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (3)$$

Em que, $H/2$ é a amplitude, ω é a frequência da onda, t simboliza o tempo, x o ponto do espaço na direção de propagação de onda e k o número de onda.

Considerando $x = 0$ e recorrendo às series de Fourier, a elevação da superfície do mar é dada por:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N A_n \cos(n\omega t + \varepsilon n) \quad (4)$$

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^N (a_n \cos(n\omega t) + b_n \text{sen}(n\omega t)) \quad (5)$$

Onde N é o número de componentes de Fourier, ε a fase relativa, a_n e b_n são os coeficientes de Fourier dados por:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T \eta(t) \cos(n\omega t) dt \quad (6)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T \eta(t) \text{sen}(n\omega t) dt \quad (7)$$

A energia total da onda por unidade de área é dada por:

$$E = \frac{1}{2} \rho g \int_{-\infty}^{+\infty} [\eta(t)]^2 dt \quad (8)$$

Em que ρ é a massa volúmica do fluido e g a aceleração da gravidade.

Generalizando a equação (5) tem-se:

$$\eta(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [a(\omega) \cos(\omega t) + b(\omega) \text{sen}(\omega t)] d\omega \quad (9)$$

Então a equação (8) pode ser escrita da seguinte forma:

$$E = \frac{1}{2\pi} \rho g \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(t) \left[\int_{-\infty}^{+\infty} [a(\omega) \cos(\omega t) + b(\omega) \text{sen}(\omega t)] d\omega \right] dt \quad (10)$$

$$E = \frac{1}{2\pi} \rho g \int_{-\infty}^{+\infty} [a(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(t) \cos(\omega t) dt + b(\omega) \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(t) \text{sen}(\omega t) dt] d\omega \quad (11)$$

$$E = \frac{1}{2\pi} \rho g \int_{-\infty}^{+\infty} [a^2(\omega) + b^2(\omega)] d\omega \quad (12)$$

$$E = \frac{1}{2\pi} \rho g \int_{-\infty}^{+\infty} A^2(\omega) d\omega \quad (13)$$

Igualando as equações (8) e (13), obtemos a igualdade do Teorema de Parseval:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} [\eta(t)]^2 dt = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} [A(\omega)]^2 d\omega \quad (14)$$

Calculando $\overline{[\eta(t)]^2}$, valor médio quadrático da elevação da superfície livre para uma determinada duração T_R , tem-se:

$$\overline{[\eta(t)]^2} = \frac{1}{T_R} \int_{-\infty}^{+\infty} [\eta(t)]^2 dt = \frac{1}{\pi T_R} \int_{-\infty}^{+\infty} [A(\omega)]^2 d\omega \quad (15)$$

Assim podemos obter a densidade de energia por unidade de área do registo de duração T_R ,

$$\overline{E} = \frac{1}{2} \rho g \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{A^2(\omega)}{\pi T_R} d\omega \quad (16)$$

e a densidade espectral de energia por,

$$S(\omega) = \frac{A^2(\omega)}{\pi T_R} \quad (17)$$

O integral da curva definida por $S(\omega)$, proporciona o cálculo da energia total do sistema de onda.

$$E = \frac{1}{2} \rho g \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) d\omega \quad (18)$$

A densidade espectral de energia descreve a distribuição da energia de um sinal ao longo da frequência. Se $x(t)$ é um sinal de energia finita, o espectro de densidade de energia do sinal $S(\omega)$ é o quadrado do módulo da Transformada de Fourier do sinal. (Rodrigues, 2010)

$$S(\omega) = \frac{1}{\pi T_R} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 = \frac{1}{\pi T_R} X(\omega) X^*(\omega) \quad (19)$$

Onde ω é a frequência angular, $X(\omega)$ a transformada de Fourier de $x(t)$ e $X^*(\omega)$ o conjugado complexo.

Tendo em conta esta equação, e recordando que, se o sistema linear for excitado com uma entrada representada por um espectro de densidade de energia, terá como saída um espectro da resposta de densidade espectral da energia, $S_R(\omega)$, (Rodrigues, 2010).

$$S_R(\omega) = \frac{1}{\pi T_R} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} y(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 = \frac{1}{\pi T_R} Y(\omega) Y^*(\omega) \quad (20)$$

Atendendo à equação (2), o espectro da resposta pode escrever-se:

$$S_R(\omega) = \frac{1}{\pi T_R} H(\omega) X(\omega) H^*(\omega) X^*(\omega) = |H(\omega)|^2 S(\omega) \quad (21)$$

Assim é possível determinar o espectro da resposta do movimento desse ponto, $S_R(\omega)$, a partir do espectro da agitação incidente no navio, $S(\omega)$, e da função de resposta em frequência de um determinado ponto selecionado no navio (em termos da amplitude da oscilação desse ponto no navio), $H(\omega)$, nos pontos que definem a sua trajetória.

2.3.3 - Análise espectral das ondas

A análise espectral determina a distribuição da energia das ondas e as estatísticas médias para cada frequência através da conversão dos registos das séries temporais num espectro de ondas, isto é uma transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência utilizando a análise de Fourier. Esta transformação permite compreender quais as frequências com quantidades significativas de energia.

Os modelos de espectros foram desenvolvidos baseados em análises teóricas juntamente com ajustes empíricos. Estes modelos são baseados em vários parâmetros, tais como, altura de onda, período de onda e de fatores de forma que variam consoante a velocidade do vento e o comprimento do fetch (zona de ação do vento).

Dos vários modelos de espectros existentes, os que se destacam para a caracterização do mar são o espectro de Pierson-Moskowitz (1964), que é mais simples tendo apenas dois parâmetros, e o espectro JONSWAP (Hasselmann et al., 1973), que já possui cinco parâmetros.

O espectro de Pierson-Moskowitz (P-M) representa estados de agitação totalmente desenvolvidos no oceano, tendo como a seguinte expressão:

$$S(\omega) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} \omega^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \quad (22)$$

Onde $\alpha = 8.10 \times 10^{-3}$ e $\omega_p = (2\pi)^{-1} \left(\frac{4\beta}{5} \right)^{\frac{1}{4}} g U_{19.5}^{-1}$, sendo $\beta = 0.74$ e $U_{19.5}$ a velocidade do vento a uma altura de 19.5 metros.

O espectro JONSWAP (JOint North Sea Wave Project), desenvolvido através de medições efetuadas no Mar do Norte durante os anos de 1968 e 1969 com o objetivo de conhecer o processo da formação das ondas geradas pelo vento. Esses resultados foram utilizados para estabelecer fórmulas de previsão da altura significativa e do período de onda, considerando a velocidade do vento constante e limitando o comprimento do fetch. Este espectro é representado pela seguinte expressão:

$$S(\omega) = \alpha g^2 (2\pi)^{-4} \omega^{-5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{-4}\right] \gamma \exp[-(\omega - \omega_p)^2 2\sigma^2 \omega_p^2] \quad (23)$$

Onde $\gamma = 3.3$ e $\sigma = \begin{cases} \sigma_a = 0.07 & \text{para } \omega \leq \omega_p \\ \sigma_b = 0.09 & \text{para } \omega > \omega_p \end{cases}$, onde ω_p é a frequência de pico, σ é o coeficiente que traduz a assimetria do espectro e γ é o parâmetro de pico que representa a razão entre a energia espectral máxima do espectro com a correspondente do espectro P-M, como traduz a Figura 2.3, onde mostra que o espectro JONSWAP é semelhante ao P-M, sendo o pico do espectro mais elevado.

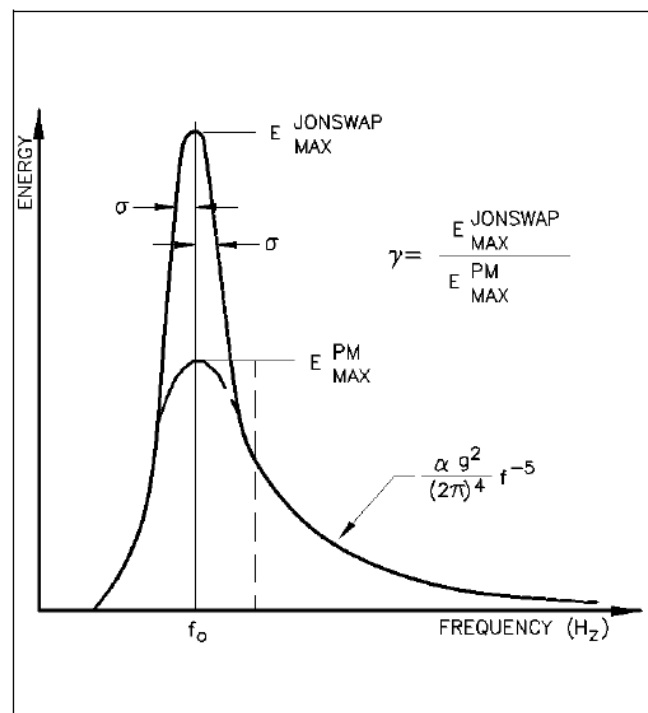


Figura 2.3 - Comparação entre o espectro P-M e JONSWAP. Adaptado de Vincent *et al.* (2002)

Para a determinação da caracterização da agitação marítima incidente no navio neste estudo, foi considerado o espectro JONSWAP, mas com uma reparametrização da expressão realizada por Goda (1985) para se adequar a casos práticos. Goda propõe uma expressão para o espectro

JONSWAP em função da altura significativa das ondas, H_S , e do período de pico, T_p , tendo a expressão ficado com a seguinte forma:

$$S(\omega) = B_j H_S^2 T_p^{-4} (f)^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} (T_p f)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[-\frac{(T_p f - 1)^2}{2\sigma^2} \right]} \quad (24)$$

Simplificando f que traduz a frequência linear para $f = \frac{\omega}{2\pi}$, resulta:

$$S(\omega) = B_j H_S^2 T_p^{-4} \left(\frac{\omega}{2\pi} \right)^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right]} \quad (25)$$

Em que,

$$\beta_j = \frac{0.0624}{0.230 + 0.0336\gamma - 0.185(1.9 + \gamma)^{-1}} [1.094 - 0.01915 \ln \gamma] \quad (26)$$

O período de pico, T_p , que corresponde ao pico de energia de um espectro, está relacionado com o período médio, T_m , através das seguintes expressões em função do espectro usado (Le Méhauté & Hanes (1990)).

$$T_p = 1.4 T_m (P - M) \quad (27)$$

$$T_p = 1.28 T_m \text{ (JONSWAP)} \quad (28)$$

Importa referir que nesta análise não se leva em conta a distribuição direcional da energia associada ao estado de agitação. Isto é, assume-se que, em cada ponto onde se estimaram as características da agitação incidente, as ondas têm apenas o rumo estimado pelo modelo numérico.

2.3.4 - Movimento do navio: modelo numérico WAMIT

O modelo WAMIT, Newman e Sclavounos (1988), desenvolvido no *Massachusetts Institute of Technology* é utilizado para determinar a resposta de um navio em termos das amplitudes dos movimentos segundo os seus graus de liberdade para as condições de agitação marítima nele incidente nos diversos pontos de cálculo ao longo da sua trajetória no acesso ao porto. Este modelo numérico assume a linearidade da interação entre o corpo flutuante e as ondas nele incidente.

O navio é considerado um corpo rígido, tendo seis graus de liberdade, três translações segundo cada eixo de coordenadas (avanço - “surge”, abatimento - “sway”, arfagem - “heave”) e três rotações em torno dos mesmos eixos (balanço - “roll”, cabeceio - “pitch”, guinada - “yaw”). (Figura 2.4)

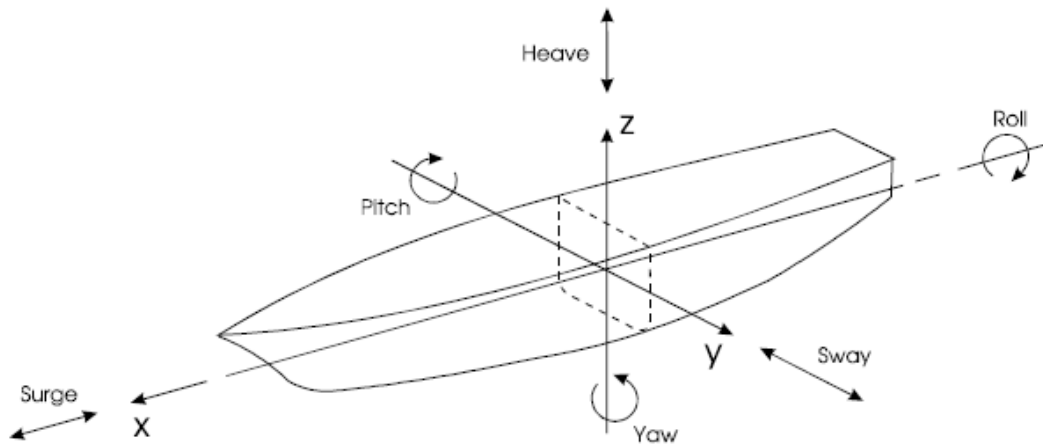


Figura 2.4 - Movimentos do navio segundo cada grau de liberdade.

Este modelo vai ser usado para determinar a resposta do navio, em termos da altura dos movimentos segundo cada um dos seis graus de liberdade do navio, para uma gama de períodos de onda, profundidades e ângulos entre o eixo longitudinal do navio e o vetor número de onda expectável na zona em estudo. Uma vez que o modelo numérico assume a linearidade da interação entre o corpo flutuante e as ondas nele incidentes, é possível decompor aquela interação em dois problemas mais simples: os chamados problemas de difração e de radiação, Figura 2.5.

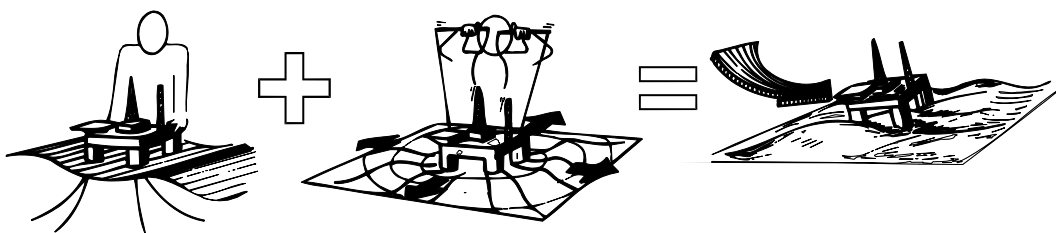


Figura 2.5 - Decomposição da interação de um corpo flutuante com as ondas nos problemas de difração e de radiação, adaptado de O.M. FALTINSEN (1990).

No problema de difração determinam-se as forças exercidas pelas ondas incidentes no navio imobilizado na sua posição média, enquanto no problema de radiação se determinam as forças necessárias para deslocar o navio em águas de outra forma paradas.

As equações diferenciais do movimento estacionário do navio livre escrevem-se da forma seguinte:

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{kj} + a_{kj})\ddot{\xi}_j + b_{kj}\dot{\xi}_j + C_{kj}\xi_j] = F_k^E \quad k = 1, \dots, 6 \quad (29)$$

em que M_{kj} e C_{kj} são, respetivamente, as matrizes de massas e de restituição hidrostática do navio, a_{kj} e b_{kj} são os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento, e F_k^E designa a força de excitação devida às ondas (associadas ao problema de difração) segundo a coordenada generalizada k para ondas monocromáticas de amplitude unitária e frequência ω cujo vetor número de onda faz um ângulo β com o eixo longitudinal do navio. ξ_j representa a amplitude da oscilação segundo a coordenada j , eixo baricêntrico do navio, enquanto $\dot{\xi}_j$ e $\ddot{\xi}_j$ designam, respetivamente, a velocidade e a aceleração da mesma oscilação.

As soluções das equações diferenciais lineares de segunda ordem, equação (29), são movimentos do tipo harmónico:

$$\xi_j(t) = \text{Re}\{\xi_j^A(\omega)e^{i\omega t}\} = |\xi_j^A| \cos(\omega t + \theta_j) \quad (30)$$

onde ξ_j^A é a amplitude complexa do movimento oscilatório e θ_j é a fase do movimento em relação à passagem da onda na posição do centro de gravidade do navio (i.e. o atraso da resposta no tempo). De acordo com a equação anterior, a função de transferência de resposta do sistema é dada pela amplitude do movimento do navio, sendo

$$H_j(\omega) = |\xi_j^A(\omega)| \quad (31)$$

Os movimentos calculados pelo WAMIT são referidos ao referencial baricêntrico do navio. Para obter a amplitude do movimento vertical do navio será necessário avaliar a componente vertical do produto vetorial do vetor velocidade de rotação pelo vetor posição do ponto em relação à origem do referencial baricêntrico do navio. Sendo as componentes do vetor velocidade de rotação de magnitudes complexas, pois além do módulo da velocidade de rotação em torno de cada eixo, é importante saber a fase da mesma velocidade, para obter aquela amplitude é necessário realizar a seguinte operação, (Oliveira, 2012):

$$\xi_j(X', t) = \text{Re}\{\xi_3^A + y'\xi_4^A - x'\xi_5^A\}e^{i\omega t} \quad (32)$$

Onde:

ξ_3^A , ξ_4^A e ξ_5^A , simbolizam as amplitudes complexas dos movimentos dos graus de liberdade 3, 4 e 5 respectivamente e x' e y' as coordenadas do ponto do navio em relação à origem do referencial baricêntrico do navio.

2.3.4.1 - Frequência de encontro

Se o navio tem uma velocidade de avanço não nula, no cálculo do espectro da resposta em frequência de onda incidente no navio deve ser substituída pela frequência de encontro, isto é, a frequência com que o navio encontra as ondas.

A frequência de encontro, ω_e , depende da velocidade das ondas, c , da velocidade do navio, U , e do ângulo que o vetor velocidade do navio faz com o vetor velocidade de propagação das ondas, definido por β . A convenção usada para o ângulo é de zero graus para ondas de popa, isto é, quando o navio viaja na mesma direção da propagação das ondas incidentes no navio. (Figura 2.6)

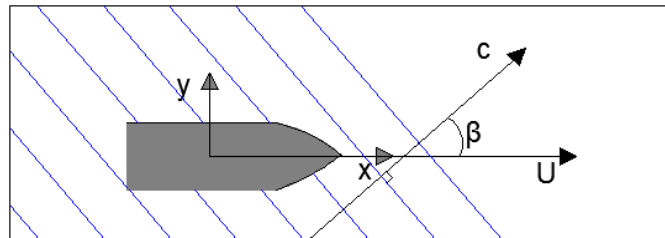


Figura 2.6 - Convenção para o ângulo do rumo relativamente às ondas.

A velocidade relativa de encontro, v_r , determina-se subtraindo à velocidade de propagação das ondas a componente da velocidade de avanço do navio segundo o vetor velocidade de propagação. Resulta a expressão:

$$v_r = c - U\cos\beta \quad (33)$$

O período de encontro é calculado pela expressão:

$$T_e = \frac{\lambda}{c - U \cos \beta} \quad (34)$$

Assim a frequência de encontro $\omega_e = 2\pi/T_e$ é dada por

$$\omega_e = \frac{2\pi}{\lambda} (c - U \cos \beta) \quad (35)$$

Simplificando a frequência de encontro, a expressão fica:

$$\omega_e = \omega - kU \cos \beta \quad (36)$$

Em que $k = \frac{\omega^2}{g} \frac{1}{\tanh kh}$, resultante da relação de dispersão, depende da frequência angular da onda e da profundidade da zona sobre a qual a onda se propaga.

A determinação do ângulo, β , que faz o vetor da direção de propagação de onda (*DIR*) com o vetor do rumo do navio no ponto onde este se localiza sobre a trajetória no porto, foi efetuada tendo em conta a seguinte expressão:

$$\beta = \text{Rumo do navio} - (\text{Rumo da onda} + 180^\circ) \quad (37)$$

2.3.5 - Distribuição de Rayleigh

Admitindo que os espectros da agitação incidente e de resposta do navio são ambos de banda estreita, as alturas de onda nas séries temporais do estado de agitação incidente, e do movimento vertical do navio seguem uma distribuição de Rayleigh.

Existem vários parâmetros da série temporal que podem relacionar-se com os momentos espectrais de ordem n , m_n .

$$m_n = \int_0^\infty \omega^n S(\omega) d\omega \quad (38)$$

Em particular, o momento de ordem zero, m_0 , representa toda a área sob a curva do espectro de onda/resposta do navio. Deste valor podemos obter a altura significativa de onda, utilizando o espectro da caracterização da agitação marítima, ou a altura do movimento vertical do navio, utilizando o espectro da resposta do navio as ondas incidentes.

Assim, é possível determinar a altura significativa dos movimentos verticais do navio, H_{navio} , para um registo cuja distribuição segue a distribuição de Rayleigh, a partir do espectro da resposta do mesmo:

$$H_{\text{navio}} \approx 4\sqrt{m_0} \quad (39)$$

2.4 - Avaliação do risco

A metodologia adotada 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 dá-se quando a altura do movimento vertical de um ponto do navio em manobra excede um patamar pré-definido num dado ponto do trajeto 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 valor da mesma. Na Tabela 2.1 apresentam-se os graus adotados neste trabalho para a probabilidade de ocorrência de acontecimento considerado adverso.

Tabela 2.1 – Probabilidade de ocorrência de movimentos verticais de um navio que excedem limiares pré-estabelecidos. (Santos et al. 2011)

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 atribuição de custos às consequências do acontecimento adverso. Para facilitar a definição desses custos, algumas organizações têm produzido diretivas 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 transações comerciais. Na Tabela 2.2 apresenta-se uma dessas classificações baseada (Neves, 2010) nas diretivas da *Maritime Safety Authority* (2004) da Nova Zelândia.

Tabela 2.2 – Consequências da ocorrência de movimentos verticais excessivos de um navio baseadas nas diretivas da Maritime Safety Authority (2004) da Nova Zelândia.

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 afetando 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

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.

Do produto do grau de Probabilidade de Ocorrência pelo grau de Consequências obtém-se o grau de Risco. 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, conforme descrito na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Avaliação da aceitabilidade do grau de Risco obtido. Adaptado de Neves et al. (2009)

Grau de Risco	Descrição	Controlo do Risco (Guia de Orientação)
1 – 3	Insignificante	Risco desprezável; não é preciso levar a cabo medidas de controlo de risco.
4 – 10	Reduzido	Risco que pode ser considerado aceitável/tolerável caso se selecione 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 um dos trechos da trajetória do navio no interior do porto, a metodologia proposta neste trabalho consiste em três passos fundamentais:

- Definição do regime de agitação marítima no centro de gravidade de cada trecho da trajetória do navio;
- Cálculo do movimento vertical de um ponto selecionado 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 respetivas consequências.

3 - CASO DE ESTUDO

3.1 - Descrição geral

O porto e a baía da Praia da Vitória localizam-se na costa Este da ilha Terceira, uma das nove ilhas do arquipélago dos Açores, Portugal, integrando o grupo central, Figura 3.1. A baía, limitada a norte pela Ponta da Má Merenda e a sul pela Ponta do Espírito Santo, tem cerca de 2400 m de comprimento e 1100 m de largura máxima. A linha de costa da baía caracteriza-se pela existência de uma defesa frontal aderente com cerca de 1 km de comprimento e de um campo de cinco esporões na zona central que enraízam na defesa frontal. Existem algumas praias ao longo da baía, onde se destaca a Praia Grande, no lado norte. Junto a esta praia encontra-se uma marina com cerca de 210 postos de amarração, cais de receção e infraestruturas de apoio.



Figura 3.1 – Localização do Porto e baía da Praia da Vitória.

Enraizado na Ponta da Má Merenda e com a direção norte-sul, encontra-se o chamado quebra-mar norte, com 560 m de comprimento, destinado a dar abrigo às instalações portuárias de apoio à Base Aérea das Lajes.

O quebra-mar sul, com cerca de 1300 m de comprimento e um traçado curvo, encontra-se enraizado no lado sul da baía, para abrigar o Cais 12 e as instalações portuárias dos setores comercial e das pescas do porto da Praia da Vitória.

O porto da Praia da Vitória, constitui a maior estrutura portuária dos Açores, e a segunda a nível de movimento de navios e de mercadorias atrás do porto de Ponta Delgada. Movimenta navios de carga contentorizada, de granéis líquidos e sólidos, de carga geral e de passageiros, sendo plataforma de ligação dos navios de passageiros inter-ilhas. Este porto constitui também uma plataforma de distribuição de mercadorias para o resto das ilhas do grupo central, Graciosa, S. Jorge, Pico e Faial.

Em 2014 o porto da Praia da Vitória recebeu 565 navios e embarcações, movimentando um total superior a 504 mil toneladas de mercadorias. Do movimento de mercadorias distribuído por os vários tipos de mercadorias, salienta-se 249 365 toneladas de mercadoria contentorizada, 20 068 TEUS, 81 170 toneladas de granéis líquidos, 125 236 toneladas de granéis sólidos, 48 336 toneladas carga geral, 32 749 passageiros inter-ilhas e 4 764 passageiros de navios de cruzeiro.

O porto da Praia da Vitória apresenta vários cais e estruturas de atracagem que oferecem condições de manobra de trabalho e de abastecimento (água, eletricidade e combustível). Os cais apresentam as seguintes configurações:

- 150 metros de cais com cota de fundo a -7 metros (ZH), podendo operar navios até 120 metros;
- 200 metros de cais com cota de fundo a -10 metros (ZH), podendo operar navios até 150 metros;
- 350 metros de cais com cota de fundo a -12 metros (ZH), podendo operar navios até 270 metros.

Para além dos cais de atracação o porto da Praia da Vitória tem ainda três terminais de operações especiais, designadamente um terminal cimenteiro onde atracam navios até 110 metros com uma cota de fundo de -7 metros (ZH), um terminal de trasfega para o parque de combustível da ilha Terceira e um terminal dedicado ao tráfego local de mercadorias não contentorizadas. No interior da bacia portuária existe ainda um núcleo de pesca, o qual é servido por 345 metros de cais com cota de fundo a -6 metros (ZH), e 230 metros de cais com cota a -4 metros (ZH).

Utilizando a informação disponível em Neves et al. (2012), que se baseou em estudos efetuados anteriormente para o porto da Praia da Vitória pelas empresas de consultoria (CONSULMAR/Eng. Morim de Oliveira, 2005; WW, 2007), o regime médio de agitação ao largo do grupo central dos Açores pode caracterizar-se da seguinte forma:

- Predominância dos rumos compreendidos entre N e W, direções para as quais o porto da Praia da Vitória se encontra bastante abrigado. Provêm do quadrante N e o W cerca de 65% dos estados de agitação, enquanto a frequência do quadrante entre o NE e o SE, de onde provêm as ondas que mais atingem diretamente o porto, é de apenas 10%;
- Os escalões mais frequentes das alturas significativas dos estados de agitação são de 1m a 2m e de 2m a 3m, com percentagens de ocorrência de cerca de 30% cada, seguindo-se o escalão de 3m a 4m com percentagem da ordem de 15%. A percentagem de ondas com alturas significativas superiores a 5m é da ordem dos 10%. Existe uma variabilidade sazonal da altura significativa das ondas ao largo, sendo os meses de inverno aqueles em que ocorrem as alturas significativas mais elevadas;
- Os períodos mais frequentes são de 5s a 9s, com percentagens de ocorrência de 75%. A frequência de ondas com períodos superiores a 11s é muito reduzida, 2,5%.

As marés são do tipo semidiurno regular, sendo os seguintes os seus valores característicos no porto da Praia da Vitória:

- PM máx.- +1.88m (ZH)
- PM AV- +1.64m (ZH)
- PM AM- +1.30m (ZH)
- NM- +1.00m (ZH)
- BM AM- +0.71m (ZH)
- BM AV- +0.34m (ZH)
- BM min.- +0.20m (ZH)

Estes valores têm como base os valores característicos para o porto de Angra do Heroísmo apresentados no Roteiro da Costa de Portugal do Instituto Hidrográfico (único local da Ilha Terceira para onde há previsões das marés) e a relação entre as amplitudes nestes dois locais, segundo a mesma publicação.

3.2 - Condições de aplicação

O objetivo deste trabalho é a avaliação do risco associado a movimentos verticais excessivos de um navio em manobra num porto, neste caso o porto da Praia da Vitória, Açores, Figura 3.2. Para este caso prático foi escolhido o navio “N/M Fernão Gomes” e dois trajetos de entrada no porto da Praia da Vitória.

Ambos os trajetos começam em frente à entrada do porto, no ponto P1 da Figura 3.3, e num deles o navio dirige-se para sul, terminando o seu percurso em frente ao cais 12 do porto da Praia da Vitória (Trajeto Sul), ponto P5 da Figura 3.3, enquanto noutro termina em frente ao terminal de combustíveis da Base Aérea nº. 4 (Trajeto Norte), ponto P8 da Figura 3.3. Em vez de se determinar a probabilidade de ocorrência em todos os pontos ao longo daqueles trajetos, consideraram-se apenas os centroides dos trechos em que se dividiu cada uma das etapas do percurso do navio em direção ao interior do porto.

Na Figura 3.3 apresentam-se os pontos considerados e na Tabela 3.1 listam-se as profundidades, rumos e velocidades em cada um dos pontos identificados.



Figura 3.2 – Porto da Praia da Vitória, Açores.

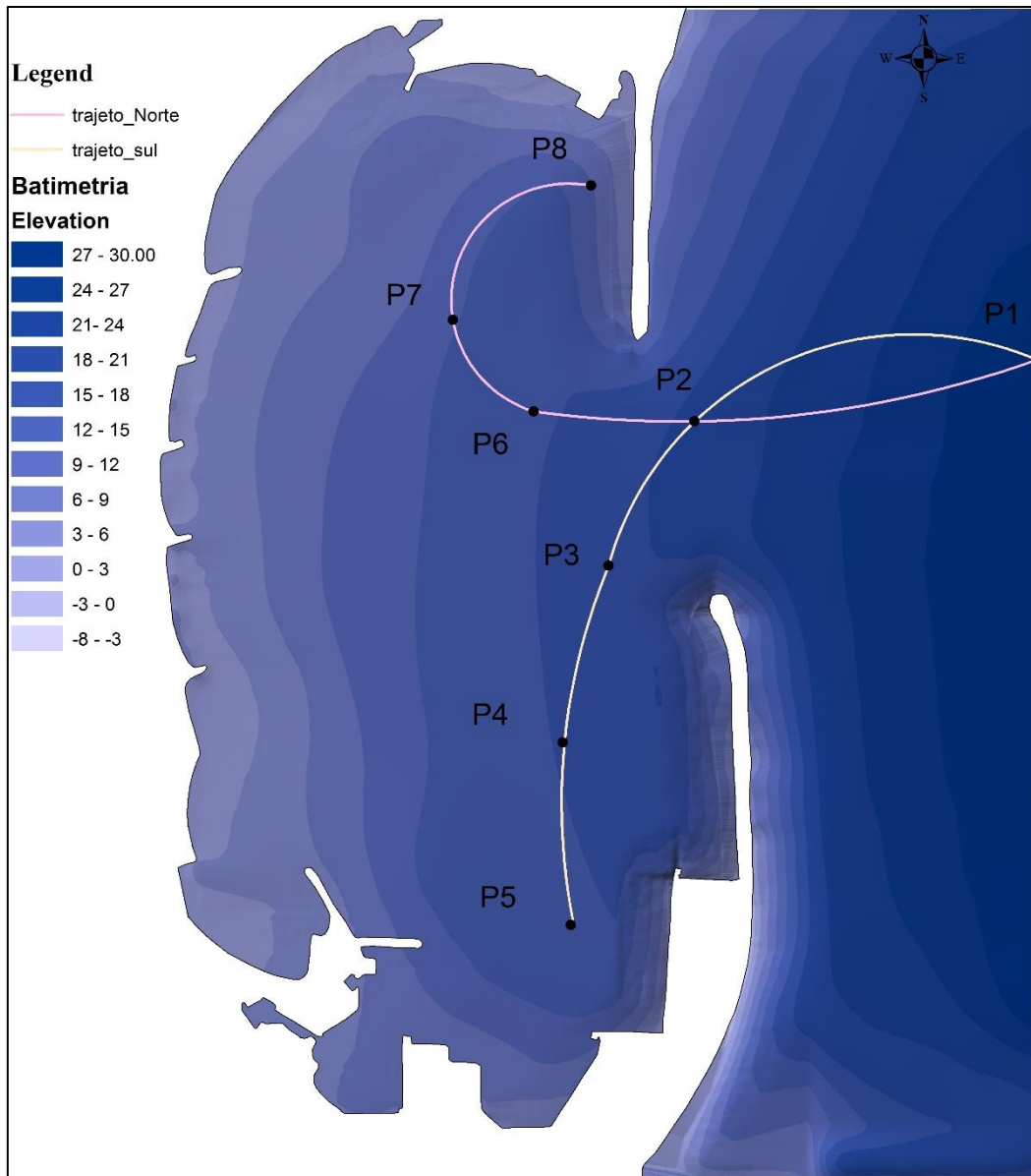


Figura 3.3 – Trajetórias e centroides dos trechos em que se dividiu a zona varrida pelo navio “N/M Fernão Gomes” na manobra de entrada no porto da Praia da Vitória.

Tabela 3.1 – Profundidades, rumos e velocidades do navio nos centroides dos trechos em que foram divididos os percursos de entrada estudados.

	Trajeto Sul					Trajeto Norte			
	P1	P2	P3	P4	P5	P2	P6	P7	P8
Profundidade (m)	30.00	18.59	17.26	14.86	13.34	18.59	14.10	11.16	8.50
Rumo do navio (°)	270	255	225	180	180	270	315	0	0
Velocidade (m/s)	2	2	1.5	0.75	0.1	2	1.5	0.75	0.1

3.3 - Agitação marítima na entrada e no interior do porto

Para a determinação dos movimentos verticais de um navio em navegação, como foi dito anteriormente foram estabelecidos apenas alguns pontos sobre o percurso de manobra do navio. Os dois trajetos, Figura 3.3, são definidos no total por oito pontos (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7 e P8), sendo o trajeto Sul definido pelos pontos P1, P2, P3, P4 e P5 e o trajeto Norte definido pelos pontos P1, P2, P6, P7 e P8. Os pontos P1 e P2 são coincidentes para ambos os trajetos.

Na caracterização da agitação marítima ao largo do porto em estudo recorreu-se a modelos de previsão de escala regional. Assim, considerou-se um período de previsões de agitação marítima (H_s , T_p , e DIR) entre 1979 e 2013 (35 anos) ao largo da Praia da Vitória que são disponibilizados pelo modelo WAM (WAMDI Group 1988) de 6 em 6 horas.

Com base nestes valores, e com o modelo SWAN, obtiveram-se primeiramente as características da agitação marítima (H_s , T_m ou T_p , e DIR) no ponto P1 (exterior ao porto), Lourenço (2016), Figura 3.4, que foram transferidas para o interior do porto com o modelo DREAMS (Fortes, 2012), para os restantes pontos dos dois trajetos, P2 a P8.

Para cada um destes pontos foram obtidos valores de alturas significativas de onda (H_s), períodos médios (T_m) e direções média de onda (DIR) para a mesma série temporal entre 1979 e 2013 (35 anos).

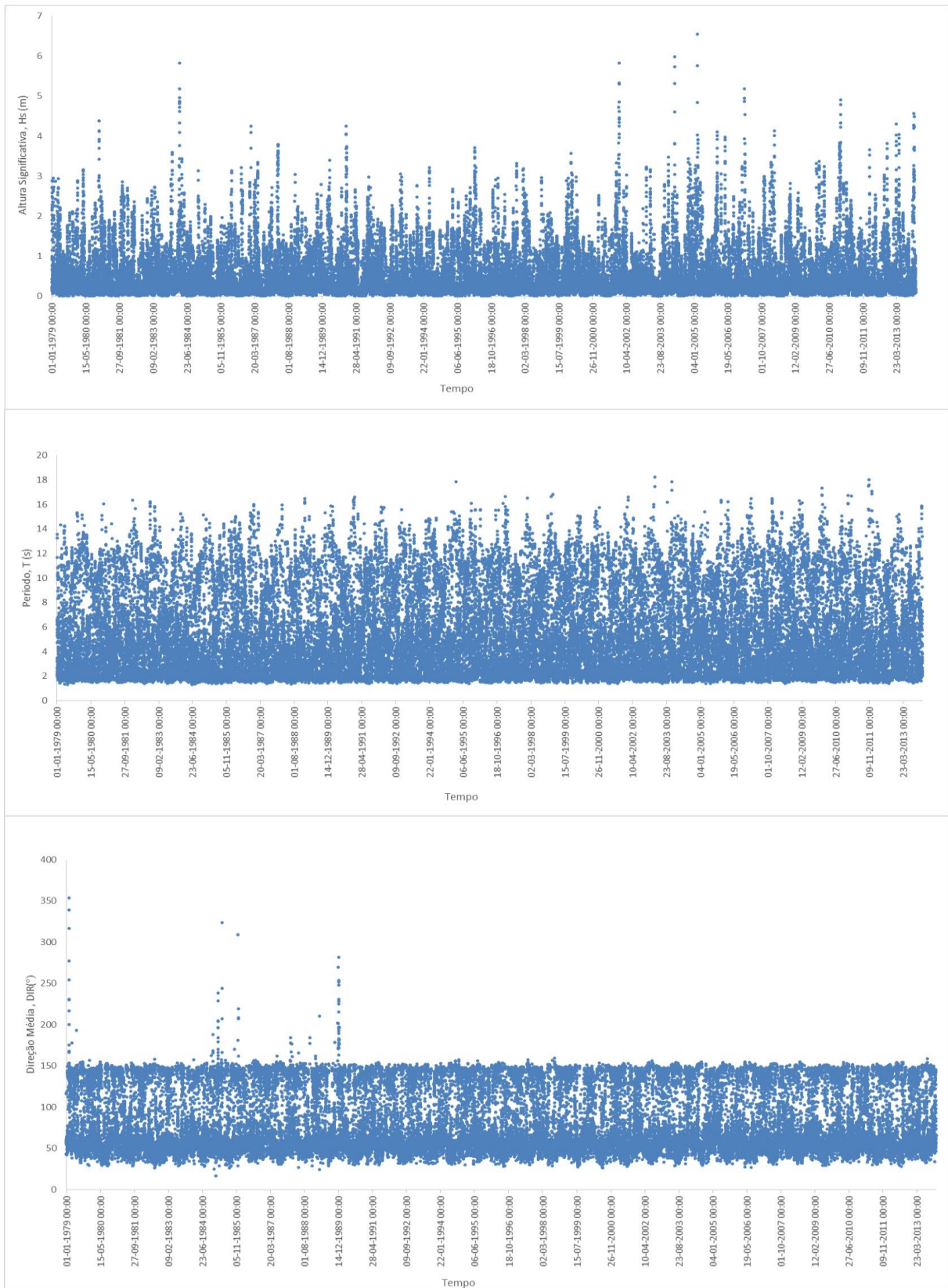


Figura 3.4 – Série temporal dos valores da altura significativa (H_s), período médio (T_m) e direção de onda (DIR) para o ponto P1 de 1 de Janeiro de 1979 a 30 de Dezembro de 2013 (Lourenço 2016).

Nas figuras seguintes, ilustra-se a evolução das séries temporais das estimativas da altura significativa e da direção das ondas nos pontos no interior do porto pertencentes de cada trajeto: Trajeto Sul (P2, P3, P4 e P5), Figura 3.5 e Figura 3.6, e Trajeto Norte (P2, P6, P7 e P8), Figura 3.7 e Figura 3.8.

No modelo numérico DREAMS, apenas foram utilizadas as estimativas da agitação marítima no ponto P1 (determinado pelo modelo numérico SWAN) com períodos médios de onda superiores a 4 s. Esta imposição deve-se a estes períodos de onda serem considerados de formação com o vento a soprar no local, criando pequenas ondas que tendem a ser destruídas pela tensão superficial da água, restaurando a superfície lisa da água, não se dando a sua propagação.

Na Figura 3.5, que traduz o comportamento das alturas significativas ao longo do trajeto Sul para todas as estimativas de agitação marítima, os pontos P4 e P5 apresentam valores inferiores em relação aos pontos P2 e P3, uma vez que esses pontos se encontram mais protegidos relativamente à agitação marítima.

O comportamento no trajeto Norte, Figura 3.7, mostra que à medida que se vai avançando para o interior do porto, de P2 para P8, vai diminuindo também a altura significativa, um aspeto também já esperado.

Na Tabela 3.2 apresentam-se os valores dos parâmetros estatísticos (máximo, média, desvio padrão e gama mais frequente) das variáveis que caracterizam a agitação marítima para todos os pontos (P1 a P6) nos dois trajetos de entrada do navio no porto.

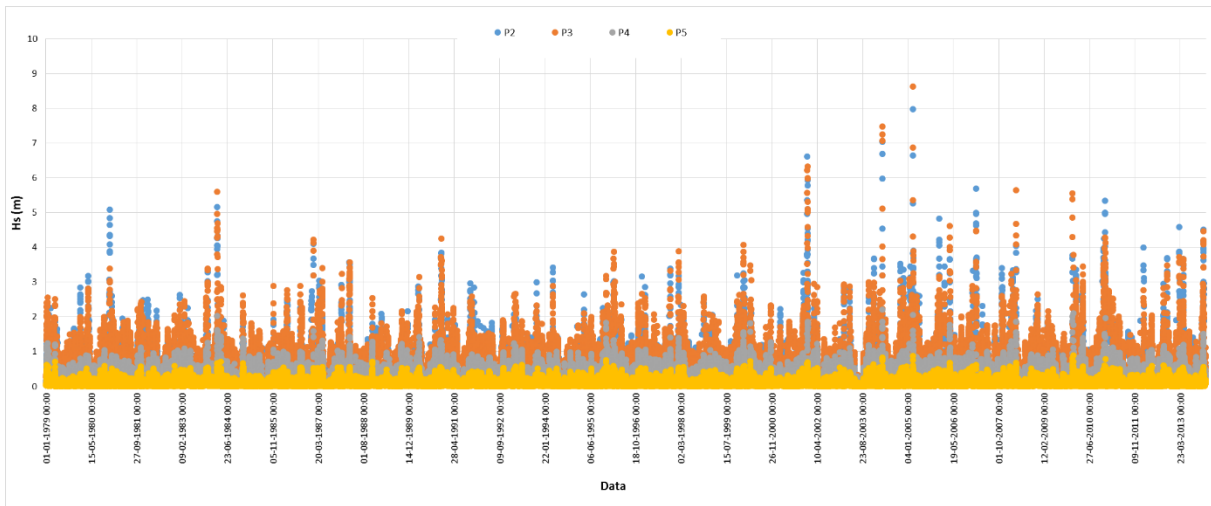


Figura 3.5 – Trajeto Sul - Séries temporais das estimativas da altura significativa em P2, P3, P4 e P5.

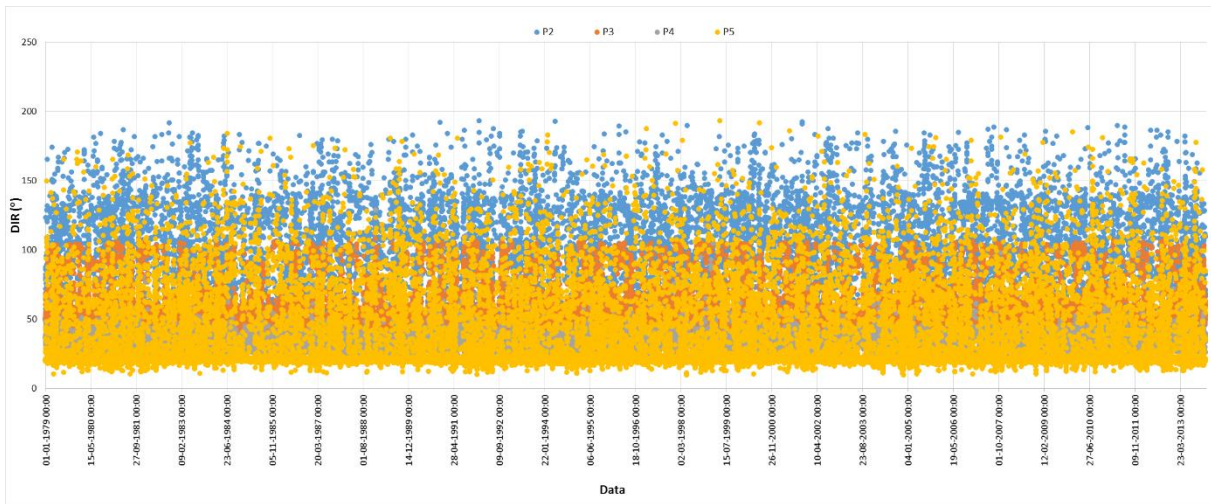


Figura 3.6 – Trajeto Sul - Séries temporais das estimativas da direção média de onda em P2, P3, P4 e P5.

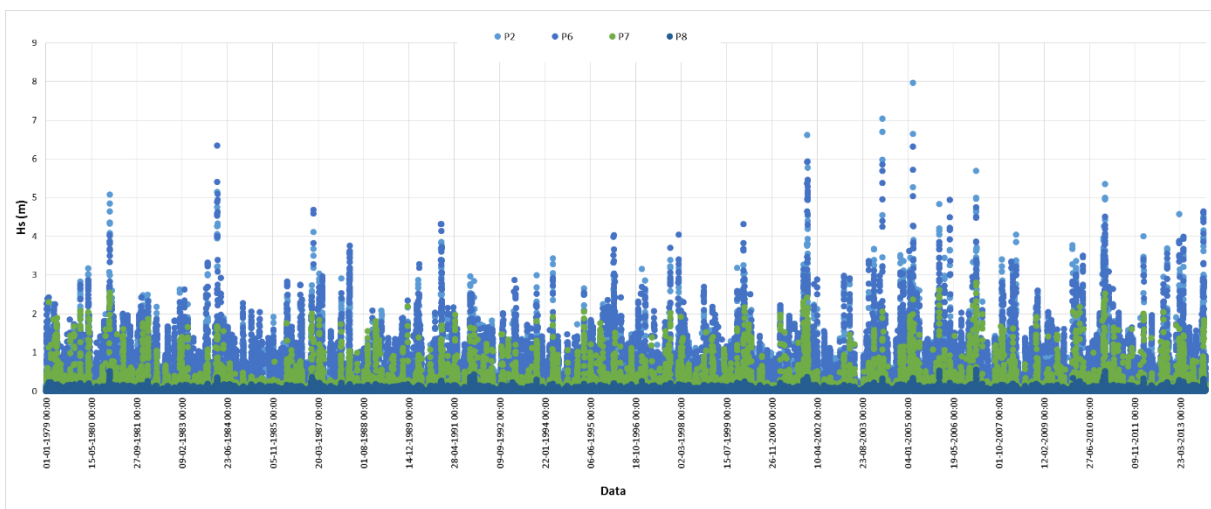


Figura 3.7 – Trajeto Norte - Séries temporais das estimativas da altura significativa em P2, P6, P7 e P8.

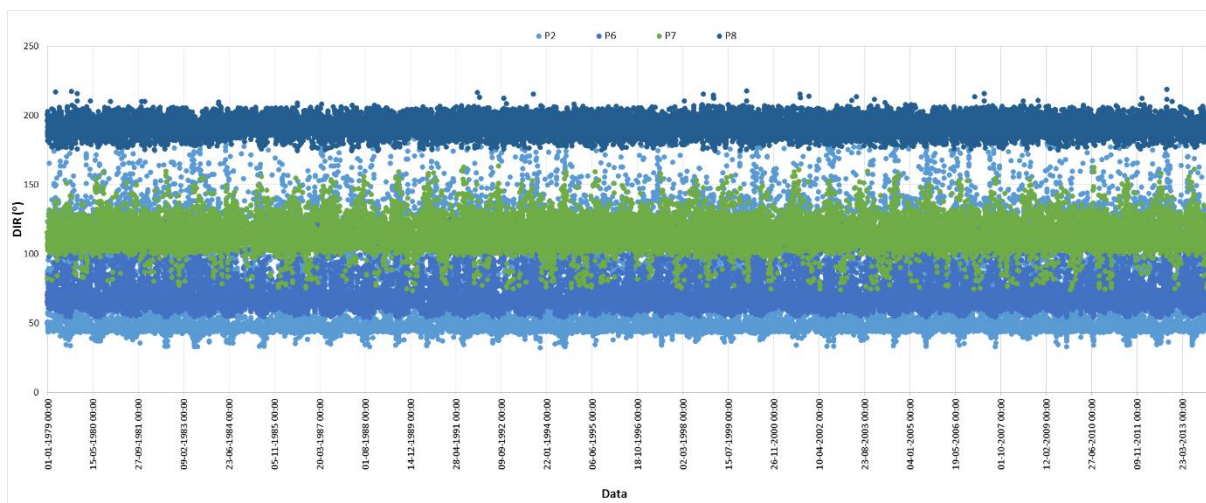


Figura 3.8 – Trajeto Norte - Séries temporais das estimativas da direção média de onda em P2, P6, P7 e P8.

Tabela 3.2 – Parâmetros estatísticos da agitação marítima nos pontos P1 a P8.

Pontos	Parâmetros	Máximo	Média	Desvio Padrão	Gama mais frequente
P1 (SWAN)	Hs (m)	6.54	0.55	0.60	[0.0 - 0.5] (64%)
	Tm (s)	18.23	5.20	3.30	[2.0 - 4.0] (31%)
	DIR (°)	353.32	78.33	36.87	[40.0 - 60.0] (47%)
P2	Hs (m)	7.97	0.47	0.55	[0.0 - 0.5] (67%)
	Tm (s)	18.23	7.58	2.78	[4.0 - 6.0] (39%)
	DIR (°)	193.16	76.31	34.10	[40.0 - 60.0] (47%)
P3	Hs (m)	8.62	0.63	0.62	[0.0 - 0.5] (52%)
	Tm (s)	18.23	7.58	2.78	[4.0 - 6.0] (39%)
	DIR (°)	107.85	54.74	14.09	[40.0 - 60] (72%)
P4	Hs (m)	2.22	0.28	0.26	[0.0 - 0.5] (82%)
	Tm (s)	18.23	7.58	2.78	[4.0 - 6.0] (39%)
	DIR (°)	128.63	35.27	4.88	[20.0 - 40.0] (91%)
P5	Hs (m)	0.89	0.11	0.11	[0.0 - 0.5] (99%)
	Tm (s)	18.23	7.58	2.78	[4.0 - 6.0] (39%)
	DIR (°)	193.00	37.68	28.46	[20.0 - 40.0] (52%)
P6	Hs (m)	6.34	0.53	0.63	[0.0 - 0.5] (64%)
	Tm (s)	18.23	7.58	2.78	[4.0 - 6.0] (39%)
	DIR (°)	129.59	74.13	15.83	[60.0 - 80.0] (68%)
P7	Hs (m)	2.81	0.16	0.28	[0.0 - 0.5] (93%)
	Tm (s)	18.23	7.58	2.78	[4.0 - 6.0] (39%)
	DIR (°)	163.21	113.20	9.34	[100.0 - 120.0] (78%)
P8	Hs (m)	0.55	0.04	0.04	[0.0 - 0.5] (100%)
	Tm (s)	18.23	7.58	2.78	[4.0 - 6.0] (39%)
	DIR (°)	218.41	192.06	5.84	[180.0 - 200.0] (89%)

Da análise da Tabela 3.2 pode constatar-se a diminuição da altura significativa da agitação marítima do ponto P1 (no exterior do porto) para os pontos que se localizam mais para o interior.

O valor médio de altura significativa, H_s , atinge o máximo no ponto P3 com 0.63 m e o valor mínimo no ponto P8 com 0.04 m. O valor médio de H_s não é superior no ponto P1 devido à existência de maior número de valores de estimativas da agitação marítima no ponto P1, o que origina maior número com valores relativamente baixos de H_s .

Relativamente à direção média das ondas, a Tabela 3.2, com uma análise ao desvio padrão, mostra que os pontos localizados perto da entrada do porto apresentam uma maior variação na direção da onda, relativamente aos pontos situados no interior da bacia do porto. No ponto P5 apresenta-se uma maior variação da direção média das ondas, aumento do desvio padrão.

Para os pontos do trajeto Norte, P6, P7 e P8, à medida que o navio se move em direção ao interior do porto observa-se um aumento da gama de direções das ondas incidentes mais frequentes, fenómeno resultante de reflexão e refração de onda.

4 - MOVIMENTOS DO NAVIO

4.1 - Metodologia

Para a determinação dos movimentos verticais do navio, será seguida a metodologia abaixo:

- Determinação da amplitude dos movimentos do navio para todos os seus seis graus de liberdade para uma gama de profundidades, T e β ;
- Definição do espectro da caracterização da agitação marítima;
- Determinação do espectro de resposta;
- Determinação do momento de ordem zero (m_0) do gráfico do espectro de resposta, e consequente altura do movimento vertical.

4.2 - Amplitude dos movimentos do navio

O navio considerado foi o “N/M Fernão Gomes”, um navio com um comprimento de 114 m, uma boca de 19 m e um calado de 7 m. Começou-se por utilizar o modelo WAMIT, para determinar a amplitude dos movimentos verticais do navio segundo cada um dos seis graus de liberdade relativamente ao eixo baricêntrico do navio. Para tal a superfície molhada do casco do navio foi discretizada em 421 painéis, Figura 4.1.

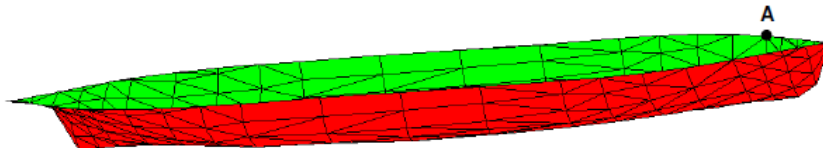


Figura 4.1 - Divisão em painéis da superfície molhada do casco do navio “N/M Fernão Gomes”.

Este cálculo foi efetuado para 80 períodos de onda distribuídos entre 251.33 s e 3.14 s (frequências entre 0.025 rad/s e 2.0 rad/s) e para cada período foram consideradas 25 ângulos que faz o eixo longitudinal do navio com a direção de propagação da onda (β) incidente entre 0° e 360° com intervalos de 15° .

A profundidade em que se encontra o navio não pode ser desprezada, de modo que foi determinado os movimentos do navio para profundidades entre 8.4 m e 34.4 m com intervalos de 2 m. Na Tabela 4.1 encontra-se uma amostra dos resultados obtidos pelo modelo WAMIT.

Tabela 4.1 – Exemplo dos resultados de saída do modelo numérico WAMIT para uma profundidade de 20.4 m.

Período	Direção	Índice	Amplitude	Fase	Valor Real	Valor Imaginário
2.51E+02	0.00E+00	1	2.77E+01	-9.01E+01	-2.91E-02	-2.77E+01
2.51E+02	0.00E+00	2	2.50E-01	6.95E+01	8.77E-02	2.35E-01
2.51E+02	0.00E+00	3	9.99E-01	5.20E-03	9.99E-01	9.07E-05
2.51E+02	0.00E+00	4	1.23E-06	1.88E+01	1.16E-06	3.96E-07
2.51E+02	0.00E+00	5	1.77E-03	9.02E+01	-6.41E-06	1.77E-03
2.51E+02	0.00E+00	6	2.45E-03	-9.70E+01	-2.98E-04	-2.43E-03

Para a determinação da amplitude do movimento vertical de qualquer ponto do navio, é necessário determinar o produto externo do vetor velocidade de rotação pelo vetor de posição desse ponto em relação à origem do referencial baricêntrico do navio. No caso presente, as coordenadas desse ponto no referencial do navio são (45.5, 5.4, 0.0), ponto A da Figura 4.1.

Para a determinação da amplitude do movimento vertical, e como mostra a equação (32), os graus de liberdade que contribuem para o movimento vertical são a arfagem (3), o balanço (4) e o cabeceio (5), como se pode confirmar pela Figura 2.4.

Deste modo, obtém-se a amplitude do movimento vertical do ponto do navio, ponto A, para uma profundidade, um período (que se traduz em frequência) e um ângulo entre a direção de onda e o eixo longitudinal do navio. Um exemplo desses resultados é apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2- Determinação do módulo de amplitude da resposta para o ponto A.

Profundidade (m)	ω (rad/s)	β (°)	módulo da amplitude da resposta (m)
8.4	0.02	0	1.006
8.4	0.02	15	1.004
8.4	0.02	30	1.003
8.4	0.02	45	1.001
8.4	0.02	60	0.999
8.4	0.02	75	0.997
8.4	0.02	90	0.997
8.4	0.02	105	0.997
8.4	0.02	120	0.998
8.4	0.02	135	1.000

Os resultados da amplitude dos movimentos verticais do navio provenientes do modelo numérico WAMIT, Tabela 4.1, bem como o módulo da amplitude da resposta para um

determinado ponto do navio, Tabela 4.2, representam resultados para o navio com velocidade de avanço nula, $v = 0 \text{ m/s}$.

Para uma análise como varia o módulo da amplitude da resposta do navio, a Figura 4.2 ilustra a influência para alguns exemplos de profundidade e com um ângulo β de $\beta = 0^\circ$.

Da análise da mesma Figura 4.2, pode concluir-se que a diminuição da profundidade implica uma diminuição da frequência onde ocorre o máximo da resposta e verifica-se também um ligeiro aumento do valor da amplitude máxima.

A Figura 4.3 apresenta a influência do ângulo entre o eixo longitudinal do navio e a direção das ondas incidentes nas amplitudes dos movimentos verticais do ponto A do navio, quando o navio está a uma profundidade de 10.4 m. Apresenta-se resultados para vários ângulos, β . Os ângulos de incidência que provocam maior resposta do navio são os ângulos em torno de 90° e 270° .

Este efeito dever-se-á ao pequeno valor do coeficiente de amortecimento para o movimento de balanço. (Rodrigues, 2010)

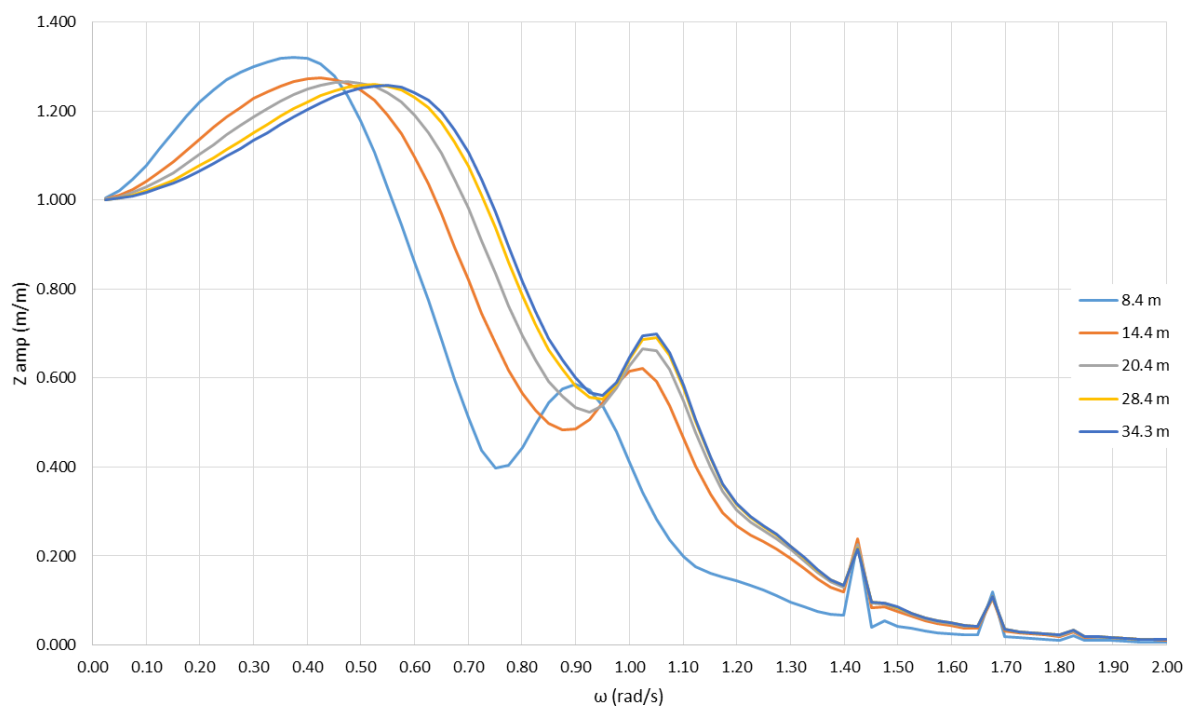


Figura 4.2 – Influência na amplitude do movimento vertical para o ponto A do navio “N/M Fernão Gomes” da profundidade na zona onde o navio tem ondas de popa, $\beta=0^\circ$.



Figura 4.3 – Influência na amplitude do movimento vertical para o ponto A do ângulo de incidência das ondas com o navio, quando este está sobre uma zona de profundidade 10.4 m. a) β a variar entre 0° e 180° . b) β a variar entre 225° e 360° .

Determinada a amplitude do movimento vertical do navio para o ponto A, para a gama de valores pré-definidos de profundidades, frequência e direção de onda em que foram realizados os cálculos com o modelo WAMIT, utilizam-se esses resultados para determinar a amplitude dos movimentos verticais nos diversos pontos ao longo das duas trajetórias de entrada do navio no porto da Praia da Vitória (P1 a P8), Figura 3.3, tendo em conta os parâmetros da agitação

marítima previstos para esses pontos e as características de navegabilidade, profundidade, velocidade de avanço do navio e rumo do navio, Tabela 3.1.

Para a amplitude de resposta do movimento vertical de um ponto do navio num determinado ponto da sua trajetória, é primeiramente determinado a frequência de encontro do navio com as ondas, ω_e .

A frequência de encontro, equação (36), é calculada tendo em consideração a velocidade de avanço do navio, o ângulo que faz o vetor da direção de onda com o vetor do rumo do navio e a frequência angular da onda, que neste caso é variável e depende da frequência da discretização do espectro de agitação marítima. Tendo determinado a frequência de encontro e tendo os dados da caracterização da agitação marítima, mais propriamente *DIR* e a profundidade do local, a amplitude da resposta do movimento vertical para um ponto do navio determina-se através de uma interpolação na matriz ordenada resultante do modelo WAMIT para a gama de valores pré-definidos de profundidade, frequência angular e ângulo entre *DIR* e o eixo longitudinal do navio, Tabela 4.2.

A Figura 4.4 mostra como varia a função resposta em função da velocidade de avanço do navio para cada frequência da discretização do espectro de agitação, para um dado estado de agitação caracterizado por $DIR = 90^\circ$ e o local onde se encontra o navio com profundidade de 30 m e com um rumo de 270° . Analisando a figura podemos concluir que para frequências mais altas, o valor do módulo de amplitude no ponto A vai aumentando com o aumento da velocidade do navio. Para velocidades baixas, o valor do módulo para as frequências mais altas aproxima-se do valor de zero (0), enquanto para velocidades mais elevadas tende um comportamento mais constante sempre próximo do valor de um (1).

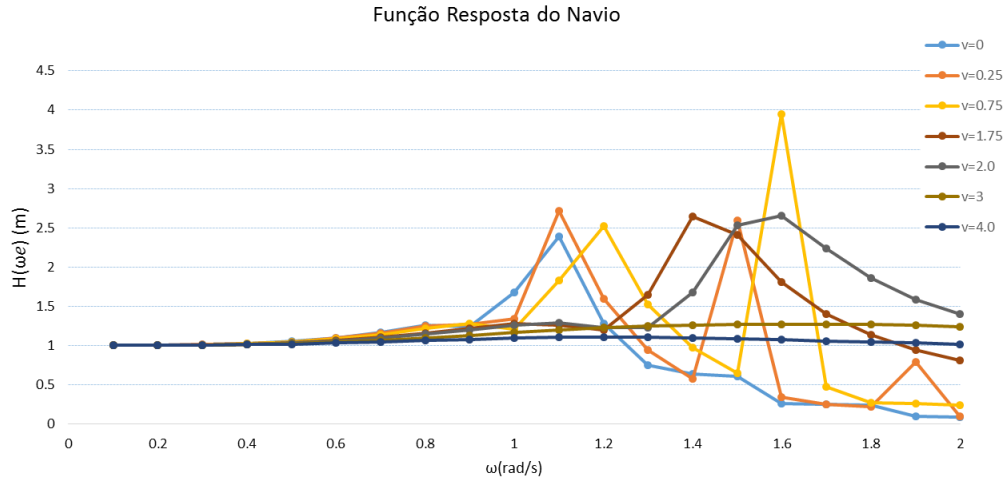


Figura 4.4 – Exemplo da importância da velocidade na função resposta do navio para $DIR=90^\circ$, Profundidade=30 m, rumo do navio= 270° .

Os resultados obtidos, para os vários valores de agitação previsto nos vários pontos da trajetória, através da interpolação foram determinados através de programação VBA. Estes resultados são apresentados no capítulo 4.6.

4.3 - Determinação do espectro da agitação marítima

Para um dado estado de agitação determina-se o espectro da agitação marítima incidente no navio, com base no espectro empírico JONSWAP. Esta análise espectral permite a caracterização da superfície livre do mar, possibilitando a descrição da distribuição de energia dum estado de agitação marítima para uma discretização em várias frequências.

O espectro de agitação é determinado com base no espectro JONSWAP, equação (25) reparametrizado em função de H_s e T_p .

De modo a uma representação espectral para cada caracterização da agitação marítima prevista foi utilizado para este trabalho uma discretização de frequências de 0 a 2 rad/s com espaçamento de 0.1 rad/s. A Figura 4.5 ilustra um exemplo do espectro da agitação marítima, para um determinado estado agitação, no ponto P1 da trajetória do navio.

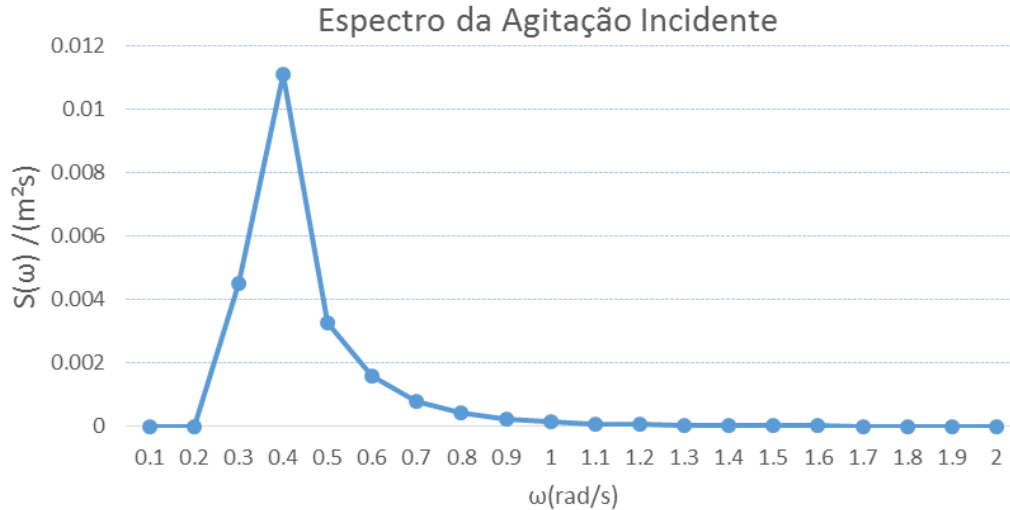


Figura 4.5 - Espectro de agitação incidente adotado, $S(\omega)$, para $H_s=0.20$ m e $T_p=17.37$ s e $DIR=61.08^\circ$.

Em modo de comparação, Figura 4.6, mostra o espectro da agitação incidente adotado com o que representa uma melhor distribuição de densidade de energia. Com esta comparação, mesmo só sendo para um dado estado de agitação previsto, podemos concluir que com a discretização de frequências usada para a representação espectral da agitação marítima incidente no navio, não estamos a utilizar as frequências com o maior valor de energia. Para um trabalho futuro deverá ter-se em consideração uma melhor discretização do espectro da densidade de energia da agitação incidente. Uma sugestão de melhor representação será encontrar os valores de frequência que correspondam a intervalos de energia constante.

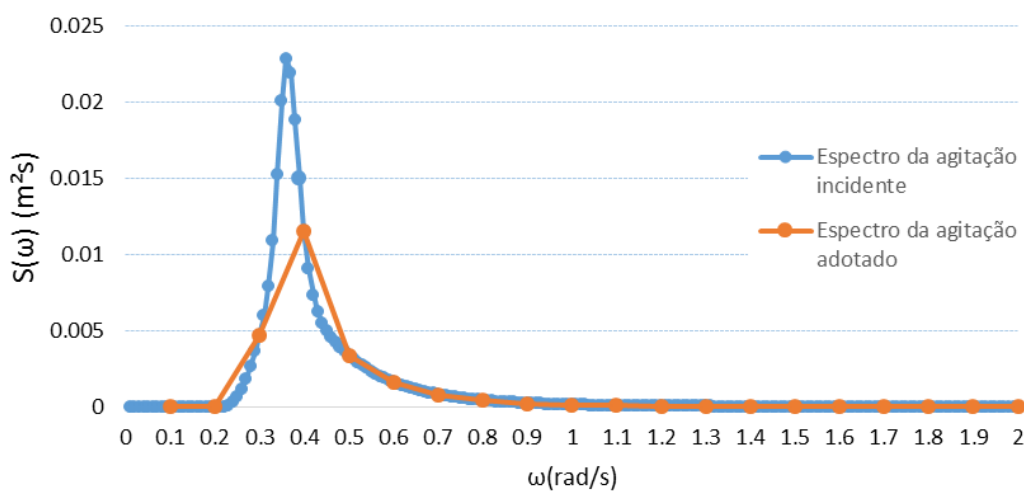


Figura 4.6 – Comparação entre o espectro de agitação adotado e o espectro de agitação incidente, $S(\omega)$, para $H_s=0.20$ m e $T_p=17.37$ s e $DIR=61.08^\circ$.

4.4 - Determinação do espectro de resposta do navio

Através da equação (21) é possível determinar o espectro de resposta do navio, $S_R(\omega)$ a partir da caracterização do espectro de agitação marítima incidente no navio, $S(\omega)$ e da função de resposta da amplitude vertical para o ponto A do navio para qualquer ponto sobre a trajetória de navegação do navio, $H(\omega_e)$: basta multiplicar a densidade espectral de energia da agitação incidente pelo quadrado da resposta da amplitude do movimento vertical do navio.

A Figura 4.7 ilustra o espectro de resposta, para as mesmas características de agitação marítima incidente no navio, no ponto da trajetória P1, tendo em conta todas as características de navegabilidade do navio para esse mesmo ponto, que se encontram na Tabela 3.1.

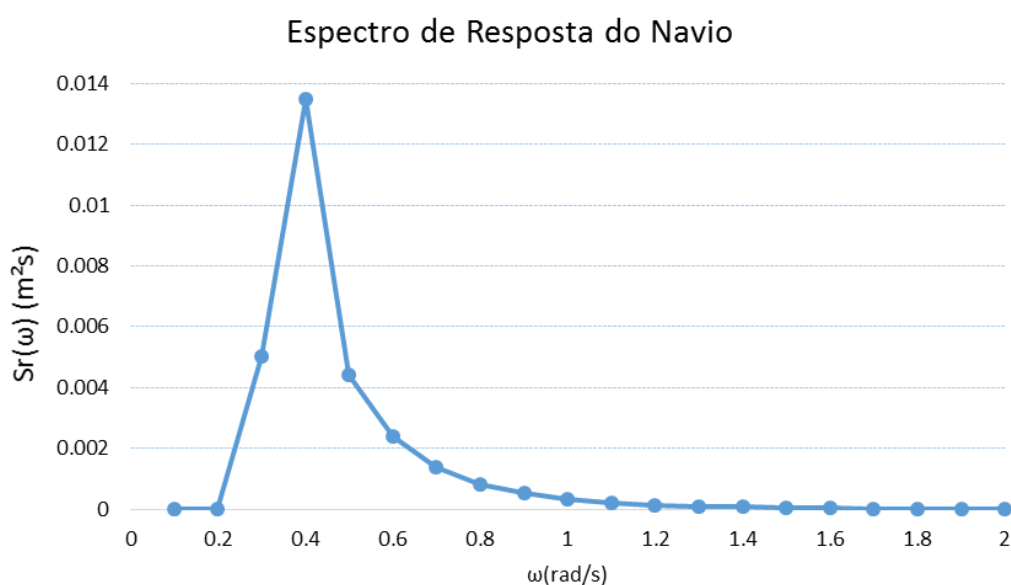


Figura 4.7 – Espectro de resposta à agitação incidente no navio, para $H_s=0.20 \text{ m}$ e $T_p=17.37 \text{ s}$ e $DIR=61.08^\circ$, no ponto P1.

Analisando a Figura 4.5 e a Figura 4.7 verifica-se que os valores do espectro de resposta são superiores aos valores do espectro da agitação marítima, tendo como máximos para a mesma frequência de 0.4 rad/s , $0.0135 \text{ m}^2/\text{s}$ e $0.0111 \text{ m}^2/\text{s}$ respetivamente.

Para uma melhor representação do espectro de resposta deverá ser utilizado uma melhor discretização das frequências, pois não se está a conseguir considerar as frequências de maior valor de energia.

4.5 - Determinação do movimento vertical do navio

Calculado o espectro de resposta, e como descrito na metodologia, é possível calcular o movimento vertical do navio, determinando inicialmente o momento de ordem zero, m_0 , que representa a área total sob a curva do espectro da resposta do navio, resultante da equação (36),

$$m_0 = \int_0^{\infty} S_R(\omega) d\omega \quad (40)$$

E assim, determinar a altura significativa dos movimentos verticais, atendendo que segue uma distribuição de Rayleigh, equação (37).

Para a obtenção da função resposta do navio, do espectro de agitação marítima, do espectro da resposta do navio e da altura significativa dos movimentos verticais do navio recorreu-se à programação VBA. Através desta programação, foi conseguido um método de cálculo de modo a determinar os movimentos verticais de um ponto do navio para qualquer ponto da sua trajetória tendo como dados de entrada as características de agitação marítima previstas para esse ponto da trajetória, a profundidade, o rumo do navio e a sua velocidade. Esta programação teve o cuidado, visto que são valores com muita precisão pois têm muitas casas decimais, de utilizar a função CDbl. Esta função converte um valor numérico ou uma expressão que resulta num valor numérico, em um valor de dupla precisão.

Toda a programação em VBA desenvolvida durante este trabalho encontra-se em Anexo.

Todos os resultados obtidos com a metodologia descrita anteriormente são apresentados no capítulo 4.6.

4.6 - Resultados

De acordo com a equação (21), é possível determinar o espectro de resposta, $S_R(\omega)$, através do espectro de agitação incidente no navio, $S(\omega)$, e da função resposta do navio, $H(\omega_e)$, para qualquer estado de agitação marítima previsto nos pontos que definem as trajetórias do navio, profundidade a que se encontra o navio, velocidade de avanço e rumo do navio. Assim, utilizando programação VBA como atrás citado, foram determinados todos os parâmetros caracterizadores dos movimentos verticais do navio para a agitação marítima prevista para o porto da Praia da Vitória entre os anos de 1979 e 2013 em todos os pontos dos dois trajetos de entrada do navio “N/M Fernão Gomes” no porto. Em seguida são apresentados os resultados.

Para a determinação do módulo de amplitude no ponto A do navio para os dados de agitação previstos em cada ponto da trajetória, tendo em conta que o navio se encontra com velocidade não nula, para cada valor de frequência da discretização do espectro de agitação, é primeiramente determinada a frequência de encontro que corresponde e então feita a interpolação na matriz dos valores pré-definidos, Tabela 4.2. A Figura 4.8 representa a sequência para a determinação do módulo de amplitude dos movimentos verticais no ponto A do navio para qualquer dado de agitação marítima previsto, profundidade, velocidade de avanço e rumo do navio.



Figura 4.8 – Esquema para determinar o módulo de amplitude do ponto A do navio para as características da agitação marítima previstas.

A título de exemplo a Figura 4.9 apresenta a função resposta para o ponto A do navio quando este está em manobra no ponto P1.

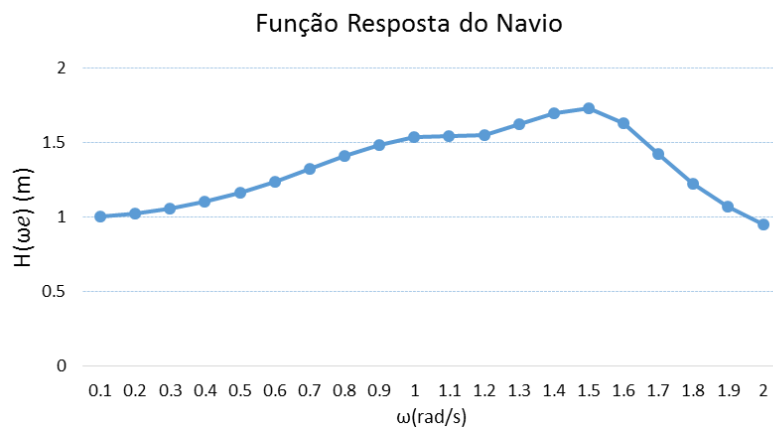


Figura 4.9 – Exemplo da função resposta para o ponto A do navio no P1 com $DIR=61.08^\circ$.

A Tabela 4.3 traduz os resultados do espectro de resposta no ponto A do navio para o ponto P1 dos trajetos Sul e Norte.

Tabela 4.3 - Exemplo dos resultados do espectro de resposta no ponto P1 do trajeto do navio.

P1	Prof	30	rumonavio	270	velocidade	2
----	------	----	-----------	-----	------------	---

maré	Tm	PROFUN	HS	TP	DIR	ω_1 0.1	ω_2 0.2	...	...	ω_{19} 1.9	ω_{20} 2
1.09	13.5709	31.09	0.196	17.37075	61.086	1.723E-92	7.345E-07	...	...	6.642E-06	4.076E-06
1.96	13.2432	31.96	0.197	16.9513	59.394	5.48E-102	2.077E-07	...	...	6.299E-06	3.802E-06
0.86	2.6666	30.86	0.372	3.413248	116.148	0	0	...	...	0.0069254	0.003168
1.96	2.377	31.96	0.435	3.04256	117.535	0	0	...	...	0.0040636	0.0046835
0.85	11.6523	30.85	0.246	14.91494	58.26	4.5E-170	2.837E-11	...	...	1.539E-05	9.271E-06
2.18	5.5243	32.18	0.16	7.071104	57.735	0	3.5E-211	...	...	0.0001185	7.212E-05
0.71	6.3274	30.71	0.127	8.099072	55.703	0	5.34E-123	...	...	4.021E-05	2.434E-05
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0.0002152	0.0002762

Determinado o espectro de resposta, como descrito na metodologia, é possível determinar a área sob a curva desse espectro, o momento de ordem zero, e posteriormente a altura significativa do movimento vertical no ponto A do navio. A Tabela 4.4 e Tabela 4.5, apresentam os resultados estatísticos das alturas significativas dos movimentos verticais para cada estado de agitação previsto entre os anos de 1979 a 2013.

Tabela 4.4 – Parâmetros estatísticos da altura significativa dos movimentos verticais do ponto A do navio nos pontos do Trajeto Sul.

Pontos	Parâmetros	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variação da gama mais frequente
P1	Hnavio (m)	8.10	0.67	0.89	[0.0 - 0.05] (24%)
P2S	Hnavio (m)	10.45	0.62	0.73	[0.0 - 0.05] (10%)
P3	Hnavio (m)	12.11	0.86	0.91	[0.0 - 0.05] (7%)
P4	Hnavio (m)	2.98	0.28	0.27	[0.0 - 0.05] (18%)
P5	Hnavio (m)	1.16	0.12	0.12	[0.0 - 0.05] (36%)

Tabela 4.5 - Parâmetros estatísticos da altura significativa dos movimentos verticais do ponto A do navio nos pontos do Trajeto Norte.

Pontos	Parâmetros	Máximo	Média	Desvio Padrão	Variação da gama mais frequente
P1	Hnavio (m)	8.10	0.67	0.89	[0.0 - 0.05] (24%)
P2N	Hnavio (m)	10.45	0.62	0.73	[0.0 - 0.05] (10%)
P6	Hnavio (m)	9.01	0.79	0.93	[0.0 - 0.05] (12%)
P7	Hnavio (m)	3.45	0.19	0.34	[0.0 - 0.05] (42%)
P8	Hnavio (m)	0.45	0.02	0.02	[0.0 - 0.05] (95%)

Com a análise das tabelas, Tabela 4.4 e Tabela 4.5, constata-se que os resultados das alturas significativas dos movimentos verticais vão diminuindo dos pontos no exterior do porto para os pontos do interior do porto. Como sucedido na agitação marítima também na altura significativa dos movimentos verticais do navio existe um aumento no ponto P3 em relação ao ponto P2. Este acontecimento é devido à agitação marítima ser superior no ponto P3, o que origina alturas significativas de movimentos verticais superiores.

Quanto ao acréscimo de número de registos de alturas significativas da resposta do navio no ponto P1, deve-se à existência de um grande número de estimativas da agitação marítima, para esse local com períodos de onda inferiores a 4 s, que não foram considerados nos restantes pontos.

Estas conclusões podem ser tiradas também da análise da Figura 4.10 e da Figura 4.11 que traduzem o desenvolvimento das alturas significativas previstas entre os anos de 1979 até 2013.

A partir destes resultados é possível calcular a probabilidade dos movimentos verticais do navio que ultrapassam determinados limiares pré-definidos, conforme a metodologia descrita em 3.5.

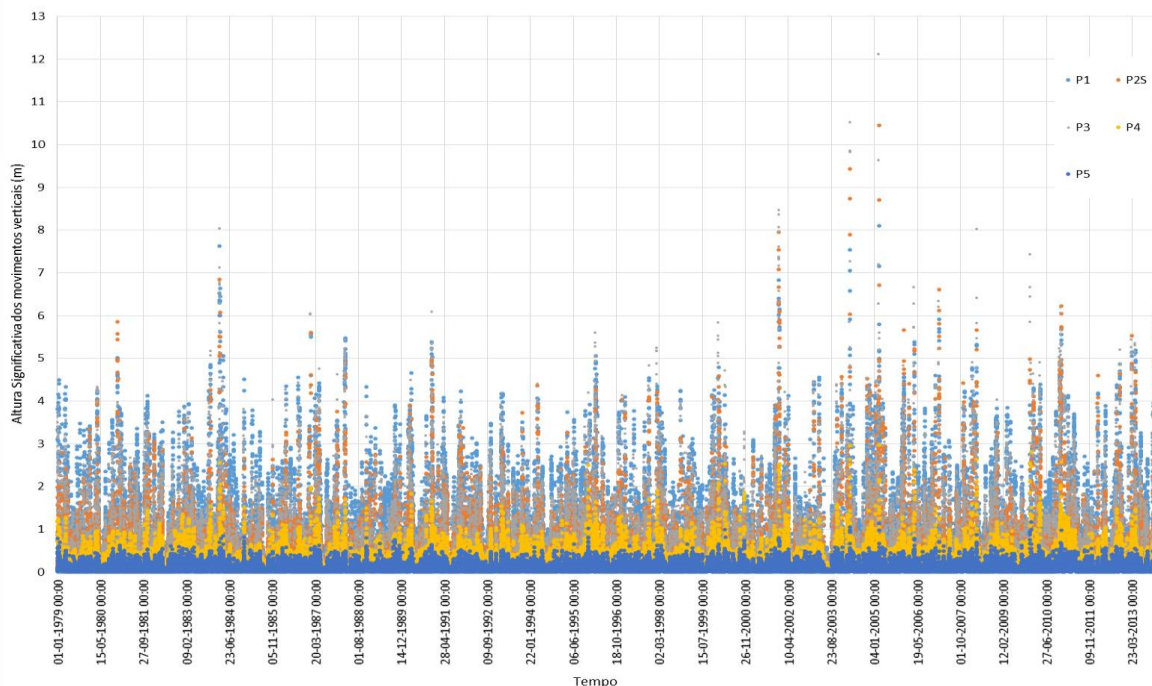


Figura 4.10 – Altura significativa dos movimentos verticais do navio no ponto A, nos pontos do trajeto Sul.

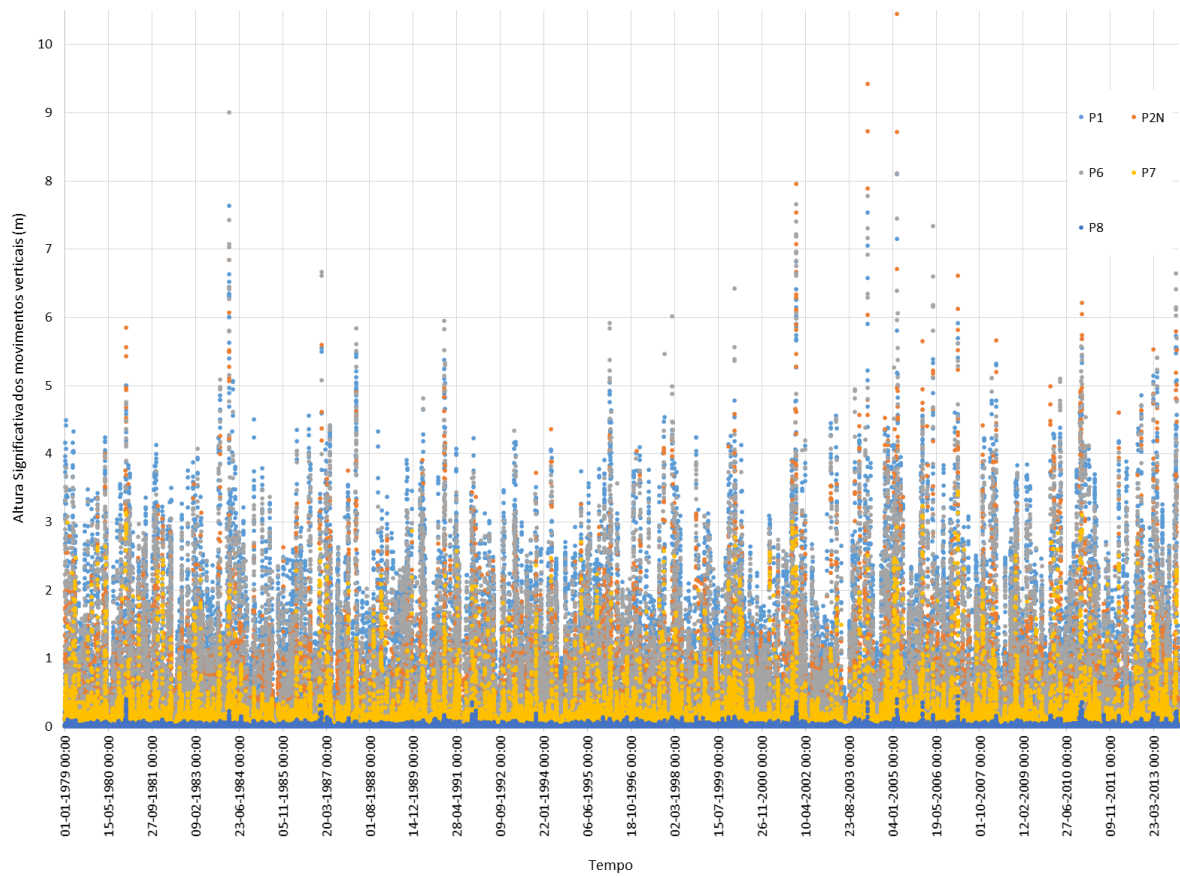


Figura 4.11 - Altura significativa dos movimentos verticais do navio no ponto A, nos pontos do trajeto Norte.

5 - AVALIAÇÃO DO RISCO ASSOCIADO A MOVIMENTOS VERTICAIS DO NAVIO

Concluídas as etapas de definição do regime de agitação marítima e a consequente determinação dos movimentos verticais do navio de estudo, “N/M Fernão Gomes”, para os pontos que definem ambas as trajetórias de entrada no porto, está-se em condições de determinar o grau de risco de navegação. Esta avaliação de risco associado à excedência de um limiar pré-definido para os movimentos verticais do navio é realizada através da análise da probabilidade de excedência desse limiar e de uma análise das respetivas consequências.

Para tal, foi seguido a metodologia de avaliação do risco neste trabalho que consiste nos seguintes passos (Santos, 2013):

- Definição, em cada ponto da trajetória de entrada do navio no porto, de um limiar na altura do movimento vertical do ponto A que implique a ocorrência de um acontecimento prejudicial;
- Realização de uma tabela com os graus de probabilidade de ocorrência dos acontecimentos prejudiciais para cada um dos pontos das trajetórias;
- Realização de uma tabela com os graus de consequências associadas à ocorrência de acontecimento perigoso para cada um dos pontos das trajetórias;
- Multiplicação dos valores do grau de probabilidade de ocorrência pelo grau de consequência do mesmo ponto obtendo-se assim grau de risco associado à ocorrência de um acontecimento perigoso para esse ponto.

5.1 - Análise da probabilidade de ocorrência

Para ilustrar e testar a metodologia de avaliação do risco apresentada anteriormente, definiu-se, a título de exemplo, vários limiares para a altura do movimento vertical do navio. Os valores assumidos para os limiares pré definidos dependem da zona onde se encontra o navio em manobra, se no interior ou no exterior do porto. Para o exterior do porto (ponto P1 e P2) foram assumidos os limiares de 0.5 m, 1.0 m, 1.5 m e 2.0 m para movimentos verticais excessivos. Já para o interior do porto, e visto que este está mais protegido a nível de agitação marítima, assumiram-se os valores de limiar de movimento excessivo de 0.2 m, 0.4 m, 0.5 m, 1.0 m e 1.5 m.

O cálculo da probabilidade de ocorrência dos limiares considerados perigosos foi obtido através dos valores das alturas significativas dos movimentos verticais do navio para todo o registo de estados de agitação em cada ponto das trajetórias.

Este cálculo da probabilidade de ocorrência perigosa foi determinado, calculando o número de estimativas das alturas significativas dos movimentos verticais que foi ultrapassado o valor assumido como altura de movimento excessivo no total de registos de alturas significativas para cada estado de agitação.

As tabelas seguintes, Tabela 5.1 e Tabela 5.2, mostram os resultados para o número de registos de movimentos verticais do navio que ultrapassaram os limiares de risco definidos, para os pontos que definem ambas as trajetórias de entrada do navio no porto e a correspondente probabilidade de ocorrência, para o conjunto de 51 132 estados de agitação estimados entre 1979 e 2013 para o ponto P1 e 27387 estimados para os restantes pontos.

Tabela 5.1 – Número de movimentos verticais do navio que ultrapassaram os vários limites de risco nos pontos à entrada do porto.

Pontos da trajetória	Limites movimentos verticais (m)			
	>0.5	>1.0	>1.5	>2
P1	19795	12040	7719	4849
P2N	11545	5420	2489	1284
P2S	11545	5420	2489	1284

Tabela 5.2 - Número de movimentos verticais do navio que ultrapassaram os vários limites de risco nos pontos no interior do porto.

	Pontos da trajetória	Limites movimentos verticais (m)				
		>0.2	>0.4	>0.5	>1	>1.5
Trajeto Sul	P3	20690	16571	14899	8692	4983
	P4	14017	6657	4272	625	119
	P5	5733	848	256	4	0
Trajeto Norte	P6	17926	13909	12671	7944	4967
	P7	6846	3246	2479	1012	490
	P8	53	3	0	0	0

A análise das tabelas acima permite concluir que o número de movimentos verticais ultrapassarem os limiares definidos vai diminuindo à medida que se avança no interior do porto. Este facto é verificado para todos os limiares.

Uma exceção é o ponto P3 que tem um maior número de registos que ultrapassaram os vários limites de risco em relação ao ponto P2S. Este efeito é devido à amplitude da agitação incidente ser superior no ponto P3.

Estes resultados, já esperados, são resultado não só da altura significativa da agitação marítima ir diminuindo à medida que entramos no interior do porto, mas também por a velocidade de navegação do navio ir diminuindo no mesmo sentido.

A velocidade tem uma influência muito significativa na quantificação dos movimentos verticais do navio que excedem os limiares de risco sendo esse número de movimentos tanto maior quanto maior for a média da altura significativa da agitação marítima incidente no ponto onde se localiza o navio, (Oliveira, 2012).

Tendo obtido a probabilidade dos movimentos verticais ultrapassarem o limiar estabelecido, será atribuído um grau a essa probabilidade de ocorrência, utilizando a distribuição da Tabela 2.1. A Tabela 5.3 mostra os valores do grau da probabilidade de ocorrência de situação perigosa, para os pontos que definem a entrada do navio no porto da Praia da Vitória e a forma como variam esses valores para todos os limiares estabelecidos.

Tabela 5.3 – Grau de probabilidade de ocorrência de movimentos excessivos nos pontos de entrada no porto.

Grau de probabilidade de ocorrência				
Pontos da trajetória	Limites movimentos verticais (m)			
	>0.5	>1.0	>1.5	>2
P1	4	3	3	2
P2N	4	3	2	2
P2S	4	3	2	2

O mesmo cálculo do grau de probabilidade de ocorrência foi efetuado para os restantes pontos do interior do porto, Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Grau de probabilidade de ocorrência de movimentos excessivos nos pontos no interior do porto.

	Pontos da trajetória	Limites movimentos verticais (m)				
		>0.2	>0.4	>0.5	>1	>1.5
Trajeto Sul	P3	5	5	5	4	3
	P4	5	3	3	2	1
	P5	3	2	1	1	1
Trajeto Norte	P6	5	5	4	4	3
	P7	3	3	2	2	2
	P8	1	1	1	1	1

Tendo obtido o grau de probabilidade, verifica-se que os valores do grau de probabilidade de ocorrência de movimentos excessivos no navio tendem a diminuir em ambas as trajetórias à medida que o navio entra no porto.

5.2 - Análise das consequências

Para uma avaliação rigorosa e completa do risco neste caso de estudo, seria necessário conhecer e quantificar todos os perigos envolvidos, de forma a determinar as consequências a nível de prejuízos para determinado limiar de altura do movimento vertical. No entanto, não se tem esta informação.

Assim, na falta de informação relativa aos prejuízos associados à ocorrência de movimentos verticais excessivos no navio, foi considerado um grau de consequências, com o objetivo de mostrar o funcionamento do procedimento de avaliação do risco. Para este caso, foi considerado o grau de 5 de consequências para os pontos do exterior do porto (P1, P2N e P2S) e o grau 10 de consequências nos restantes pontos (P3 a P8), situados no interior do porto. Estes valores do grau de consequências foram retirados da Tabela 2.2.

5.3 - Grau de risco

Para a obtenção do grau de risco associado à ocorrência de movimentos verticais que excedem um limiar pré-definido, para os pontos que definem as trajetórias do navio no porto, é necessário multiplicar, para os mesmos pontos, o grau de probabilidade de ocorrência de movimentos excessivos do navio pelo grau de consequências.

A Tabela 5.5 traduz o grau de risco associado aos movimentos excessivos em ambas as trajetórias de entrada do navio no porto. Para esta obtenção foi utilizado apenas o limiar de 1.0 m como definidor de uma situação perigosa para ambos os trajetos.

Com base nos resultados pode avaliar-se o nível de aceitabilidade do grau de risco, recorrendo à Tabela 2.3, onde se apresentam os intervalos da avaliação da aceitabilidade para o grau de risco obtido.

Tendo obtido os valores de risco, é possível obter os mapas de risco que permitem uma melhor e mais fácil interpretação dos resultados obtidos, Figura 5.1. Como se pode constatar, todos os pontos de ambas as trajetórias no porto da Praia da Vitória apresentam o nível de risco indesejável (cor laranja) nos pontos P1, P2 em ambas as trajetórias, P4 e P7 e o nível de risco reduzido (cor amarela) nos pontos P5 e P8. Contudo os pontos P3 e P6 têm risco inaceitável (cor vermelha). Para estes pontos, P3 e P6, impõe-se proceder a um controlo de riscos, por exemplo, eliminar a origem dos riscos.

É ainda importante referir que o nível de consequências foi obtido de forma subjetiva, por falta de informação.

Tabela 5.5 – Grau de risco associado a movimentos verticais excessivos do navio para um limiar de 1.0 m, nos pontos de ambas as trajetórias.

		Trajeto Norte				
		P1	P2N	P6	P7	P8
Grau de Risco		15	15	40	20	10

		Trajeto Sul				
		P1	P2S	P3	P4	P5
Grau de Risco		15	15	40	20	10

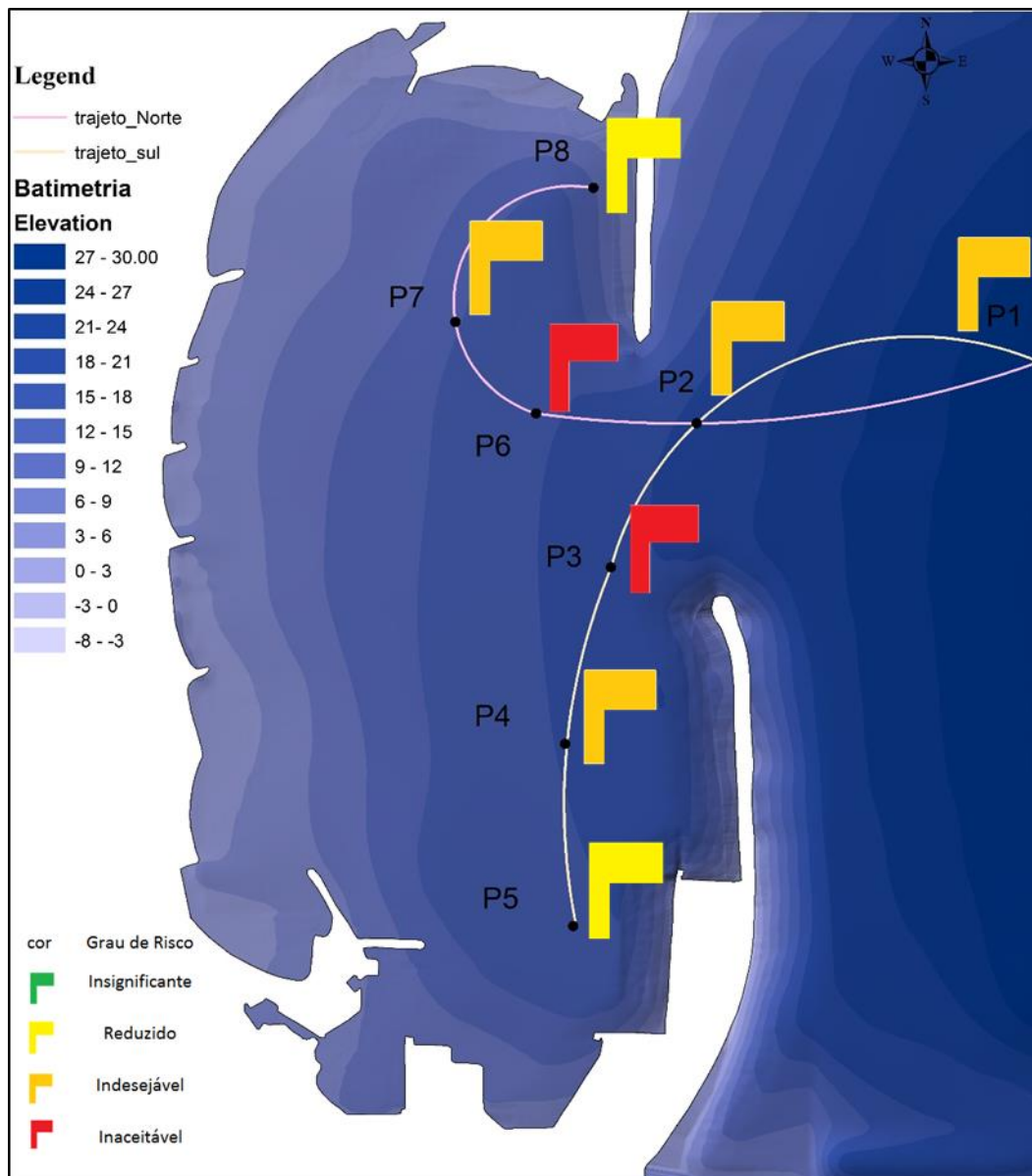


Figura 5.1 – Mapa de risco para a navegação do “N/M Fernão Gomes” no porto da Praia da Vitória, relativamente aos movimentos verticais que excedem 1.0 m.

6 - CONCLUSÕES

Este trabalho seguiu uma metodologia para determinar a resposta, em termos dos movimentos verticais, do navio “N/M Fernão Gomes” à agitação marítima incidente neste ao longo da sua trajetória de entrada no porto da Praia da Vitória, na ilha Terceira, Açores.

A metodologia consiste nos seguintes passos:

- Caracterização da agitação marítima;
- Determinação de movimentos do navio;
- Avaliação do risco de navegação;
- Construção de mapas de risco.

Para a caracterização da agitação marítima, recorreu-se a previsões ao largo realizados com o modelo WAM, tendo-se transferido estas características para a entrada e para o interior do porto utilizando dois modelos numéricos, SWAN e DREAMS respetivamente.

Considerando linear a interação do navio com as ondas, a resposta do navio a um determinado estado de agitação marítima pode ser determinada utilizando ferramentas matemáticas de análise. Assim para a determinação da resposta em termos de amplitude do movimento vertical utilizaram-se resultados no domínio da frequência, uma análise espectral. Assim, o espectro da resposta do navio à agitação marítima incidente, é obtido a partir do espectro de agitação incidente no navio e da função resposta do navio em frequência.

Para a determinação do espectro de agitação marítima foi considerado o espectro JONSWAP, parametrizado para casos práticos, ficando o espectro em função de altura significativa e período de pico.

A função resposta do navio em termos de amplitude dos movimentos verticais de um dado ponto selecionado no navio foi determinada com o modelo numérico WAMIT. Este modelo permite determinar os potenciais associados aos problemas de radiação e de difração do navio, bem como os movimentos verticais da origem do referencial baricêntrico do navio. Para se obter a amplitude do movimento vertical em qualquer ponto do navio, é necessário avaliar a componente vertical do produto externo do vetor velocidade pelo vetor posição em relação à origem do referencial baricêntrico do navio.

Tendo sido considerada velocidade de avanço do navio não nula, foi necessário ter em conta na função resposta do navio a utilização da frequência de encontro, isto é, frequência à qual o navio encontra as ondas.

Para o espectro da resposta do navio à agitação foi admitido que é de banda estreita, utilizando-se assim uma distribuição de Rayleigh para a determinação da altura significativa dos movimentos verticais do navio. Uma vez conhecidas as características da agitação marítima para todas as estimativas de estados de agitação, avaliou-se a altura significativa dos movimentos verticais do navio para cada um dos pontos que definem ambas as trajetórias de manobra do navio no interior do porto.

Da observação das alturas significativas dos movimentos verticais para cada estado de agitação, foi possível concluir que estas vão diminuindo ao longo da trajetória de entrada do navio no porto. Os movimentos superiores acontecem nos pontos do exterior do porto, sendo este cenário já esperado, pois o navio no interior do porto pratica velocidades inferiores e as alturas significativas da agitação marítima também são inferiores no interior do porto.

Tendo determinado a altura significativa dos movimentos verticais para cada estado de agitação, foi avaliado o risco associado à ocorrência de movimentos verticais de excederem um limiar pré-definido nos pontos que definem a trajetória do navio. Esta avaliação de risco associado à excedência de um limiar pré-definido para os movimentos verticais do navio é realizada através do produto da análise da probabilidade de excedência desse limiar com a análise das respectivas consequências.

A probabilidade de ocorrência de acontecimentos prejudiciais foi estabelecida a partir da probabilidade das alturas significativas dos movimentos verticais ultrapassarem vários limiares pré-definidos. Esta probabilidade é determinada pelo quociente do número de alturas significativas dos movimentos verticais que ultrapassam os vários limiares pré-definidos pelo número total de estados de agitação considerados.

A avaliação do nível de consequências foi feita de forma subjetiva (por falta de informação), mas funcionando como forma de exemplificar o processo de avaliação do risco. Para esta avaliação foram considerados dois níveis de consequências distintos, um para os pontos no exterior do porto e um outro para os pontos no interior do porto.

Esta avaliação do risco foi determinada para todos os pontos que definem ambas as trajetórias de entrada do navio no porto da Praia da Vitória. A título de exemplo foi ainda elaborado um mapa de risco para possibilitar uma interpretação fácil dos resultados, relativamente aos movimentos verticais excederem o limiar pré-definido de 1.0 m para os pontos que caracterizam a trajetória Sul e a trajetória Norte do navio “N/M Fernão Gomes” no porto da Praia da Vitória. Tendo a determinação do grau de risco para cada ponto que definem as trajetórias do navio em manobra no porto da Praia da Vitória, pode avaliar-se o nível de aceitabilidade, atribuindo uma cor dependendo do valor do grau de risco.

Com este trabalho pode concluir-se que nos pontos que definem as trajetórias, considerando um limiar de 1.0 m como o limiar de acontecimento perigoso, existe risco inaceitável (cor vermelha) nos pontos P3 e P6, o que levaria à elaboração dum plano de controlo de riscos para estes pontos da trajetória do navio.

Para este trabalho foi criada uma programação em VBA para todas os passos necessários para a determinação das alturas significativas dos movimentos verticais num dado ponto do navio para qualquer ponto em que se encontre o navio ao longo da sua trajetória. Através desta programação conseguimos com os dados que caracterizam o local onde se encontra o navio, profundidade, velocidade, rumo e características da agitação marítima previstas determinar a altura significativa para qualquer dado de agitação previsto.

Como trabalho futuro refere-se a implementação do sistema de alerta com uma avaliação em tempo real de situações de emergência e emissão de alerta, quando os valores dos movimentos verticais ultrapassarem limiares pré-definidos considerados prejudiciais, possibilitando a prevenção de acidentes provocados por movimentos verticais excessivos. De forma a uma melhor determinação das alturas significativas, deverá criar-se uma melhor caracterização da agitação marítima, isto é, a discretização utilizada neste trabalho não contempla as frequências com maior valor de densidade espectral. Num trabalho futuro deverá ser criada uma expressão que determine os valores de frequência a que correspondam intervalos de energia iguais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Booij, N., Ris, R.C., Holthuijsen, L.H. 1999. A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation. *J. Geographical Res.*, C4(104), 7649-7666.
- Cummins W.E. (1962). Impulse response function and ship motions. *Schiffstechnik*, 9, 101-109.
- Faltinsen, O.M. (1990). *Sea loads on ships and offshore structures*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Fortes, C.J.E.M. (2002). *Transformações Não Lineares de Onda em Zonas Portuárias. Análise pelo Método dos Elementos Finitos*. Tese de Douturamento em Eng. Mecânica, IST.
- Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Poseiro, P., Capitão, R., Santos, J.A., Pinheiro, L.P., Rodrigues, A., Sabino, A., Rodrigues, M.C., Raposeiro, P., Ferreira, J.C., Silva, C., Simões, A., Azevedo, E.B. (2013). *O Projeto HIDRALERTA. Sistema de Previsão e Alerta de Inundações em Zonas Costeiras e Portuárias*. In *Atas das 8ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária*. LNEC, Lisboa, Portugal.
- Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Poseiro, P., Santos, J.A., Capitão, R., Pinheiro, L., Sabino, A., Rodrigues, A., Ferreira, J.C., Martinho, S., Raposeiro, P., Silva, C., Simões, A., Azevedo, E. B., Rodrigues, M.C. (2014). *Desenvolvimentos recentes do HIDRALERTA. Sistema de previsão e alerta de inundações em zonas costeiras e portuárias*. In *Atas das 3as Jornadas de Engenharia Hidrográfica*, Instituto Hidrográfico, 24 a 26 de junho. Lisboa, Portugal. ISSN - 978-989-705-073-2.
- Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Poseiro, P., Santos, J.A., Garcia, T., Capitão, R., Pinheiro, L., Reis, R., Craveira, J., Lourenço, I., Lopes, P., Rodrigues, A., Sabino, A., Araújo, J.P., Ferreira, J.C., Silva, S.F., Raposeiro, P., Simões, A., Azevedo, E.B., Reis, F.V., Silva, M.C., Silva, C.P. (2015). *Ferramenta de Apoio à Gestão Costeira e Portuária: o Sistema HIDRALERTA*. In *Atas do VIII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa*, Aveiro, Outubro 2015.
- Goda, Y. (1985). *Random Seas and Design of Maritime Structures*. Advance series on ocean engineering, v.15. World Scientific Publishing, Singapore.

- Hasselmann, K.; Barnett, T.P.; Bouws, E.; Carlson, H.; Cartwright, D.E.; Enke, K.; Ewing, J.A.; Gienapp, H.; Hasselmann, D.E.; Kruseman, P.; Meerburg, A.; Muller, P.; Olbers, D.J.; Richter, K.; Sell, W.; Walden, H. (1973). "Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)." *Ergänzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift Reihe, A(8) (Nr. 12)*, p.95.
- Le Méhauté, B.; Hanes, D. M. (1990). *The Sea - Ocean Engineering Science*, Wiley, New York.
- Lopes, P., Poseiro, P., Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Garcia, T., Azevedo, E., Rodrigues, M.C., Rodrigues A., Sabino, A. (2016). Otimização da arquitetura computacional do sistema HIDRALERTA. 13º Congresso da Água. 7, 8 e 9 de março de 2016, LNEC, Lisboa.
- Lourenço, I. F. (2016). Avaliação do Risco de galgamento sobre estruturas portuárias. Caso de estudo da Praia da Vitória, Açores. Tese de mestrado em Engenharia Civil, ISEL, Dezembro.
- Neves, D. R. (2009) Utilização de um sistema de informação geográfica para modelação numérica em zonas portuárias. Tese de mestrado em Oceanografia, FCUL, Setembro.
- Neves, D.R.; Rodrigues, S.; Reis, M.T.; Fortes, C.J.E.M.; Santos, J.A. (2010) Aplicação ao Porto de Sines (Portugal) de uma nova Metodologia de Avaliação do Rico para a Navegação Portuária utilizando o Sistema de Informação Geográfica GUIOMAR. *Revista de Gestão Costeira Integrada Vol.10, N°4*, pp.483-504.
- Neves, D.R.; Rodrigues, S.; Vieira, A.S.; Santos, J.A.; Fortes, C.J.E.M.; Reis, M.T.; Simões, A.; Azevedo, E.B. (2012) Avaliação do risco para a navegação em zonas portuárias. Avanços na constituição de um sistema de suporte à decisão. Congresso para planeamento e gestão de zonas costeiras, Boavista, Cabo Verde, Abril, pp.1-19.
- Neves, D.R., Santos, J.A., Reis, M.T., Fortes, C.J.E.M., Simões, A., Azevedo, E.B., Rodrigues, M.C. (2012). Metodologia de avaliação do risco associado ao galgamento de estruturas marítimas. Aplicação ao porto e à baía da Praia da Vitória, Açores, Portugal. *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 12(3), 291-312.
- Newman, J.N., Sclavounos, P.D. (1988). The computation of wave loads on large offshore structures. In *Boss 88 Conference*, Norway, pp. 1-99.

- Oliveira, R. (2012). Avaliação do Risco Associado a Movimentos Verticais de Navios em manobra no Porto da Praia da Vitória. Tese de Mestrado em Eng. Civil, ISEL.
- Pierson, W.J., Moskowitz, L. (1964). A proposed spectral form for fully developed windseas based on the similarity form of Kitaigorodskii. *Journal of Geophysical Research*, Washinton, v. 69, p. 5181-5190.
- Pinheiro, L.V., Santos, J.A., Abecasis Jalles, B.M, Fortes, C.J.E.M. (2013). Aplicação da ferramenta SWAMS ao comportamento de um navio amarrado no terminal XXI do porto de Sines. 8 JPECP, LNEC Lisboa, Portugal, Outubro.
- Pinheiro, L.V., Lopes, P., Fortes, C.J.E.M., Poseiro, P., Santos, J.A. (2016). Sistema de Alerta para a Navegação no Porto da Praia da Vitória. 13.º Congresso da Água, LNEC, Lisboa, Março.
- Raposeiro, P.D., Fortes, C.J.E.M., Capitão, R., Reis, M.T., Ferreira, J.C., Pereira, M.T., Guerreiro, J. (2013). Preliminary phases of the Hidralerta System: Assessment of the flood levels at São João da Caparica beach, Portugal. *Journal of Coastal Research*, SI 64, 1896-1900.
- Rodrigues, S. (2010b). Movimentos de Navios em Manobra Induzidos pela Agitação Marítima. Tese de Mestrado em Meteorologia e Oceanografia Física, Universidade Aveiro.
- Rodrigues, S., Santos, J.A., Lemos, R. (2010a). Interação da agitação marítima com navios em manobra na entrada de portos. Congresso de métodos numéricos em Eng. 2011, Coimbra.
- Sabino, A., Rodrigues, A., Araújo, J., Poseiro, P., Reis, M.T., Fortes, C.J.E.M. (2014). Wave Overtopping Analysis and Early Warning Forecast System. In Proc. ICCSA 2014, Guimarães, Part I, LNCS 8579, 267-282.
- Sabino, A., Rodrigues, A., Poseiro, P., Reis, M.T., Fortes, C.J.E.M., Reis, R. (2015). Coastal risk forecast system. In Proc. GISTAM 2015, 1st International Conference on Geographical Information Systems Theory, Applications and Management, C. Grueau & J.G. Rocha (Eds.), SCITEPRESS, 201-209. ISBN: 978-989-758-099-4.

Santos, J.A., Fortes, C.J.E.M., Reis, M.T., Oliveira, R. (2013). Movimentos Verticais Excessivos de um Navio em Manobra. Avaliação da Probabilidade de Ocorrência. Revista territorium 20, pp. 133-145.

Santos, J.A.; Reis, M.T.; Neves, D.R.; Fortes, C.J.E.M.; Rodrigues, S.; Azevedo, E.B.; Rodrigues, M.C.; Simões, A.; Ramalleira, J.; Raposeiro, P. (2011) Aplicação de uma metodologia para a avaliação do risco para a navegação e galgamento no porto da Praia da Vitória. 7ª Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Porto, Outubro, pp.1-24.

Tolman, H. (1999). User Manual and System Documentation of WAVEWATCH-III. Version 1.18, NOAA/NWS/NCEP/OMB. Technical Note 166, Washington, E.U.A.

WAMDI Group (1988). The WAM model – A third generation ocean wave prediction model. Journal of Physical Oceanography, 18, 1775-1810.

Whitcomb, T. (2012). Navy global forecast system, NAVGEM: Distribution and user support. In: Proceedings of the 2nd Scientific Workshop on ONR DRI: Unified Parameterization for Extended Range Prediction.

Informação suplementar sobre marés. Disponível em <http://www.hidrografico.pt/download-tabelas-mare.php>, Capítulo 3, data de consulta a Março 2015.

ANEXOS

ANEXO 1 - PROGRAMAÇÃO VBA PARA O CÁLCULO DA AMPLITUDE DO MOVIMENTO VERTICAL

```
Function resposta3(x1 As Double, x2 As Double, reH3 As Double, imH3 As Double, reH4 As Double, imH4 As Double, reH5 As Double, imH5 As Double) As String
```

```
Dim H3 As String, H4 As String, H5 As String, r1H5 As String, r2H4 As String
```

```
H3 = Application.Complex(reH3, imH3)
```

```
H4 = Application.Complex(reH4, imH4)
```

```
H5 = Application.Complex(reH5, imH5)
```

```
r1H5 = Application.ImProduct(x1, H5)
```

```
r2H4 = Application.ImProduct(-x2, H4)
```

```
resposta3 = CDbI(Application.ImSum(H3, r1H5, r2H4))
```

```
End Function
```

ANEXO 2 - PROGRAMAÇÃO VBA PARA O CÁLCULO DA INTERPOLAÇÃO

Function InterpolR3(x1 As Single, x2 As Single, x3 As Single, nxval As Range, xfunc As Range, yfunc As Range) As Single

' a gama xfunc

' está ordenada da primeira para a terceira coluna

Dim nx1 As Integer, nx2 As Integer, nx3 As Integer, nfunc As Integer

Dim raux As Range

Dim xa1(4) As Single, xa2(4) As Single, xa3(4) As Single, ya1(4, 4, 4) As Single

Dim px1 As Single, px2 As Single, px3 As Single

Dim y As Single, dy As Single

Dim i As Integer, j As Integer, k As Integer, l As Integer

Dim ix1 As Integer, ix2 As Integer, ix3 As Integer

Dim i1 As Integer, i2 As Integer, i3 As Integer

nx1 = nxval(1, 1).Value

nx2 = nxval(1, 2).Value

nx3 = nxval(1, 3).Value

nfunc = nx1 * nx2 * nx3

px1 = (xfunc(nfunc, 1).Value - xfunc(1, 1)) / (nx1 - 1)

px2 = (xfunc(nfunc, 2).Value - xfunc(1, 2)) / (nx2 - 1)

px3 = (xfunc(nfunc, 3).Value - xfunc(1, 3)) / (nx3 - 1)

ix1 = Int((x1 - xfunc(1, 1).Value) / px1) + 1

If (ix1 < 1) Then ix1 = 1

If (ix1 + 2 > nx1) Then ix1 = nx1 - 2

ix2 = Int((x2 - xfunc(1, 2).Value) / px2) + 1

If (ix2 < 1) Then ix2 = 1

If (ix2 + 2 > nx2) Then ix2 = nx2 - 2

ix3 = Int((x3 - xfunc(1, 3).Value) / px3) + 1

If (ix3 < 1) Then ix3 = 1

If (ix3 + 2 > nx3) Then ix3 = nx3 - 2

For i = 1 To 3

i1 = (ix1 - 1 + i - 1) * nx2 * nx3

For j = 1 To 3

i2 = i1 + (ix2 - 1 + j - 1) * nx3

For k = 1 To 3

i3 = i2 + ix3 - 1 + k

ya1(i, j, k) = yfunc(i3).Value

Next k

Next j

Next i

' determinacao de xa posta noutro ciclo apenas para ficar mais claro

For i = 1 To 4

i1 = (ix1 - 1 + i - 1) * nx2 * nx3 + 1

xa1(i) = xfunc(i1, 1).Value

$i2 = (ix2 - 1 + i - 1) * nx3 + 1$

$xa2(i) = xfunc(i2, 2).Value$

$i3 = ix3 - 1 + i$

$xa3(i) = xfunc(i3, 3).Value$

Next i

Call polin3(xa1(), xa2(), xa3(), ya1(), 3, 3, 3, x1, x2, x3, y, dy)

InterpolR3 = y

End Function

Sub polin3(x1a() As Single, x2a() As Single, x3a() As Single, ya() As Single, m As Integer, n As Integer, o As Integer, x1 As Single, x2 As Single, x3 As Single, y As Single, dy As Single)

Dim j As Integer, k As Integer, l As Integer

Dim ytmp(30) As Single

For j = 1 To m

For k = 1 To n

For l = 1 To o

ytmp(l) = ya(j, k, l)

Next l

Call polint(x3a(), ytmp(), o, x3, ya(j, k, 1), dy)

Next k

Next j

For j = 1 To m

For k = 1 To n

```

    ytmp(k) = ya(j, k, 1)

Next k

Call polint(x2a(), ytmp(), n, x2, ya(j, 1, 1), dy)

Next j

For j = 1 To m

    ytmp(j) = ya(j, 1, 1)

Next j

Call polint(x1a(), ytmp(), m, x1, y, dy)

End Sub

Sub polint(xa() As Single, ya() As Single, n As Integer, x As Single, y As Single, dy As Single)

Dim namx As Integer

Dim i As Integer, m As Integer, ns As Integer

Dim den As Single, dif As Single, dift As Single, ho As Single, hp As Single, w As Single,
c(30) As Single, d(30) As Single

ns = 1

dif = Abs(x - xa(1))

For i = 1 To n

    dift = Abs(x - xa(i))

    If (dift < dif) Then

        ns = i

        dif = dift

    End If

```

$c(i) = ya(i)$

$d(i) = ya(i)$

Next i

$y = ya(ns)$

$ns = ns - 1$

For m = 1 To n - 1

For i = 1 To n - m

$ho = xa(i) - x$

$hp = xa(i + m) - x$

$w = c(i + 1) - d(i)$

$den = ho - hp$

If (den = 0) Then

Stop

End If

$den = w / den$

$d(i) = hp * den$

$c(i) = ho * den$

Next i

If (2 * ns < n - m) Then

$dy = c(ns + 1)$

Else

$dy = d(ns)$

$ns = ns - 1$

End If

$y = y + dy$

Next m

End Sub

ANEXO 3 - PROGRAMAÇÃO VBA PARA O CÁLCULO DA FREQUÊNCIA DE ENCONTRO E DO ÂNGULO ENTRE O RUMO DO NAVIO E A DIREÇÃO DAS ONDAS INCIDENTES NO NAVIO

Procedimento para o cálculo do valor k da relação dispersão:

```
Function k(w As Double, d As Double) As Double
```

```
Dim k0 As Double, kaux As Double
```

```
k0 = Cdbl(w * w / 9.8)
```

```
k = Cdbl(k0)
```

```
Do
```

```
    kaux = Cdbl(k)
```

```
    k = Cdbl(k0 / Application.Tanh(k * d))
```

```
Loop While (Abs(k - kaux) > 0.000001 * k)
```

```
End Function
```

Procedimento para o cálculo do ângulo do vetor direção de onda com o vetor rumo do navio:

' Calcbeta= angulo que o navio faz com a onda, em graus

```
Function Calcbeta(rumonavio As Double, Rumoonda As Double) As Double
```

```
Calcbeta = rumonavio - (Rumoonda + 180)
```

```
Do While (Calcbeta > 360)
```

```
    Calcbeta = Calcbeta - 360
```

```
Loop
```

```
Do While (Calcbeta < 0)
```

```
    Calcbeta = Calcbeta + 360
```


Loop

End Function

Procedimento para o cálculo da frequência de encontro das ondas com o navio:

'frequência de encontro, u em m/s

Function we(w As Double, d As Double, u As Double, beta As Double) As Double

Dim k1 As Double

k1 = Cdbl(k(w, d))

'beta entra em graus

beta = Cdbl(Calcbeta(rumonavio, Rumoonda))

we = Cdbl(w - k1 * u * Cos(beta * Application.Pi() / 180))

End Function

ANEXO 4 - PROGRAMAÇÃO VBA PARA O CÁLCULO DO ESPECTRO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA, ESPECTRO DE RESPOSTA, E AMPLITUDE SIGNIFICATIVA DO MOVIMENTO VERTICAL

Procedimento para o cálculo do espectro da agitação marítima:

Function Sw(Hs As Double, Wp As Double, w As Double) As Double

Dim sigma As Double, betaSw As Double, gama As Double, r As Double, Tp As Double

If w <= Wp Then

 sigma = CDBl(0.07)

Else

 sigma = CDBl(0.09)

End If

gama = 3.3

'betaSw foi dividido por 2*Pi para que o integral em frequencia angular (w) seja igual ao integral em frequencia (f)

betaSw = CDBl(((0.06238 * (1.094 - 0.01915 * Application.Ln(gama))) / (0.23 + 0.0336 * gama - 0.185 * (1.9 + gama) ^ (-1)))) / (2 * Application.Pi()))

r = CDBl(Exp(-0.5 * ((w - Wp) / (sigma * Wp)) ^ 2))

Tp = CDBl(2 * Application.Pi() / Wp)

Sw = CDBl(betaSw * Hs ^ 2 * Tp ^ (-4) * (w / (2 * Application.Pi())) ^ (-5) * Exp(-5 / 4 * (w / Wp) ^ (-4)) * gama ^ r)

End Function

Procedimento para o cálculo do espectro de resposta do navio:

'dados de entrada: d=profundidade; Hs= altura de onda; Tp= frequencia de pico; u= velocidade do navio; rumoonda= DIR direcção de onda em graus; rumonavio= rumo do navio em graus;

W= frequencia para caracterizar a onda e a resposta; nxval matriz com o número de repetições;
xfunc= matriz com valores ordenados por coluna para interpolar; yfunc = matriz de valores a
interpolar

Function Sresposta(d As Double, Hs As Double, Tp As Double, Rumoonda As Double, u As
Double, rumonavio As Double, w As Double, nxval As Range, xfunc As Range, yfunc As
Range) As Double

Dim x1 As Single, x2 As Single, x3 As Single, beta As Double

x1 = d

x2 = Cdbl(we(w, d, u, beta))

beta = Cdbl(Calcbeta(rumonavio, Rumoonda))

x3 = beta

H3 = Cdbl(InterpolR3(x1, x2, x3, nxval, xfunc, yfunc))

Dim Wp As Double, Espetro_onda As Double

Wp = Cdbl(2 * Application.Pi() / Tp)

Espetro_onda = Cdbl(Sw(Hs, Wp, w))

Sresposta = Cdbl(H3 * H3 * Espetro_onda)

End Function

Procedimento para o cálculo da amplitude significativa dos movimentos verticais do navio:

Function Hm0(xi As Range, yi As Range) As Double

Dim nxi As Integer, nyi As Integer, deltax As Double

nxi = Cdbl(xi.Count)

nyi = Cdbl(yi.Count)

If nxi <> nyi Then

```
Hm0 = -999999999
```

```
Else
```

```
deltax = CDBl(xi(2).Value - xi(1).Value)
```

```
Hm0 = CDBl((yi(1).Value + yi(nyi).Value) / 2)
```

```
For i = 2 To nxi - 1
```

```
Hm0 = CDBl(Hm0 + yi(i).Value)
```

```
Next i
```

```
Hm0 = CDBl(Hm0 * deltax)
```

```
End If
```

```
Hm0 = CDBl(4 * Sqr(Hm0))
```

```
End Function
```