



ESCOLA NAVAL

talant de biefaire



Guilherme Mcculloch Marques

Previsão de comportamento no mar de navios:
Desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo de
Response Amplitude Operators (RAOs)

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia
Naval - Ramo Mecânica



Alfeite
2023



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Guilherme Mcculloch Marques

*Previsão de comportamento no mar de navios:
Desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo de
Response Amplitude Operators (RAOs)*

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Ciências Militares Navais, na especialidade de Engenharia Naval - Ramo
Mecânica

Orientação de: CMG EN-MEC Paulo Alexandre Marques Pires da Silva

Coorientação de: Miguel Ângelo Pereira Bento Moreira

O Aluno,

O Orientador,

Guilherme Marques

Paulo Silva

Alfeite
2023

Aos meus pais Vítor e Mafalda, à minha avó Leonor, ao meu irmão Lourenço e à
minha namorada Joana.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradecer à Escola Naval por toda a formação de excelência. Aos professores que acompanharam a minha trajetória e transmitiram todo o seu conhecimento.

Aos meus orientadores, CMG EN-MEC Paulo Pires da Silva e Professor Bento Moreira, pela orientação exemplar, pela disponibilidade e pela dedicação ao longo da elaboração desta dissertação.

A toda à minha família por terem apoiado todas as minhas decisões.

À minha namorada Joana pela companhia e suporte diário.

Por fim, agradeço a todos os meus camaradas de curso.

Resumo

Previsão de comportamento no mar de navios: Desenvolvimento de uma ferramenta de cálculo de *Response Amplitude Operators (RAOs)*

O *seakeeping* é uma área de estudo essencial na engenharia naval, esta concentra-se na análise e previsão do comportamento de navios em resposta a determinadas condições de mar. Compreender e avaliar o desempenho de um navio é crucial para garantir a segurança, o conforto da guarnição e a eficiência das operações navais.

Os Response Amplitude Operators (RAOs) são parâmetros fundamentais no estudo do *seakeeping*. Estes representam a resposta de um navio à excitação causada pelas ondas em termos de amplitude de movimento e fase. Os RAOs são usados para prever a resposta dinâmica do navio nos movimentos de avanço, deriva, arfagem, balanço e cabeceio, sob diferentes estados de mar e direção das ondas relativamente ao navio para diferentes velocidades.

O objetivo deste trabalho consiste na resolução, no domínio da frequência, da equação dinâmica do corpo livre de uma forma matricial. Este trabalho surge na sequência dos trabalhos realizados por Ferreira, S. (2018) e Ramujane, M. (2019), nas suas dissertações de mestrado os autores determinaram os coeficientes de massa acrescentada e de amortecimento recorrendo à Transformação de Lewis e ao Método de Mapeamento Conforme Multiparâmetro, respetivamente. O trabalho do autor Balixa, C. (2021) consistiu na determinação das forças de excitação de Froude-Krylov e forças de Difração que são responsáveis pela excitação externa do sistema navio em ondas. Para a determinação dos RAOs recorreu-se aos estudos acima mencionados. De entre os métodos existentes, neste trabalho são utilizados como suporte teórico a Teoria das faixas e o método de Transformação Conforme Multiparâmetro.

Este trabalho para além de contribuir para a construção e retenção de conhecimento na área de Comportamento no Mar de navios, na Escola Naval e na Marinha, permitiu obter uma ferramenta computacional que determina RAO's para navios da Marinha recorrendo aos métodos acima mencionados.

Palavras-chave: Arquitetura Naval, Comportamento no mar de navios, Response Amplitude Operators, Mapeamento Conforme Multiparâmetro, Teoria das Faixas

Abstract

Ship behavior at sea: Development of a *Response Amplitude Operators* (RAOs) calculation tool

Seakeeping is an essential area of study in Naval architecture, which focuses on analyzing and predicting the behavior of ships to certain sea conditions. Understanding a ship's performance is crucial to ensuring safety, crew comfort and the efficiency of naval operations.

The Response Amplitude Operators (RAOs) are fundamental parameters in the study of seakeeping. These represent a ship's response to excitation caused by waves in terms of amplitude of motion and phase. RAOs are used to predict the ship's dynamic response, such as surge, sway, heave, roll, pitch and yaw motions, under different sea states and wave direction relative to the ship for different speeds.

The objective of this work is to solve the problem, in the frequency domain, of the free-body dynamic equation in a matrix form. This work follows on from the works carried out by Ferreira, S. (2018) and Ramujane, M. (2019) the authors, in their master's dissertations, determined the added mass and damping coefficients using the Lewis Transformation and the Method of Conformal Multiparameter Mapping, respectively. Other work on this subject by Balixa, C. (2021) consisted in the determination of the Froude-Krylov excitation forces and Diffraction forces that are responsible for the external excitation of the ship system in waves. To determine the RAOs, the mentioned studies were used. Among the existing methods, these approach the Strip Theory and the Conformal Multiparameter Mapping.

This work, in addition to contributing to the construction and retention of knowledge in the area of Seakeeping, at the Naval School and the Navy, made it possible to obtain a computational tool that determines RAO's for Navy ships using the methods mentioned above.

Keywords: Naval Architecture, Seakeeping, Response Amplitude Operators, Multiparameter Conformal Mapping, Strip Theory

Índice

1	Introdução	1
2	Estado da Arte	3
2.1	Método Experimental	4
2.2	Teoria das Faixas	5
2.3	Método dos Painéis 3D (<i>3D- Panel Method</i>)	7
2.4	Dinâmica dos Fluidos Computacional (<i>CFD- Computational Fluid Dynamics</i>)	8
3	Dinâmica em Ondas Regulares	11
3.1	Graus de Liberdade	11
3.2	Sistemas de Coordenadas	11
3.3	Ondas Regulares	14
3.4	Espetros de ondas	17
3.4.1	Análise estatística simples	17
3.4.2	Espetro de energia das ondas	19
3.4.3	Espetro de <i>Pierson-Moskowitz</i>	21
3.4.4	Espetro de <i>Bretschneider</i>	22
3.4.5	Espetro <i>JONSWAP</i>	22
3.5	Equações de Movimento do Navio em Ondas Regulares	24
4	Cargas Hidrodinâmicas	29
4.1	Teoria das Faixas <i>Strip Theory</i>	30
4.1.1	Mapeamento conforme (dois parâmetros)	31
4.1.2	Mapeamento Conforme Multiparâmetro	33
4.2	Coeficientes de Massa Acrescentada e Amortecimento	34
4.3	Coeficientes de Restituição	35
4.4	Forças de Froude-Krylov e de Difração	36
5	<i>Response Amplitude Operators</i>	39
5.1	Formulação Teórica	39

5.2	Finalidade dos <i>Response Amplitude Operators</i>	42
5.2.1	Publicação NATO - STANAG 4154	45
6	Desenvolvimento da Ferramenta de Cálculo	47
6.1	Programação da Interface Gráfica	47
6.1.1	Ferramenta de Mapeamento Conforme Multiparâmetro . . .	47
6.1.2	Ferramenta de cálculo dos <i>Response Amplitude Operators</i> . .	52
6.2	Verificação do Software	55
6.2.1	Verificação do Software para frequências limite	55
6.2.2	Verificação dos Coeficientes de amortecimento e de massa acres- centada	59
6.3	Comparação de Resultados: <i>Software</i> elaborado <i>vs Software MaxSurf</i>	63
6.3.1	Variação da posição das secções transversais	74
6.4	Cálculo dos RAO's: Navios da Marinha Portuguesa	77
7	Análise e Discussão de Resultados	81
	Conclusão	84
	Bibliografia	87
	Apêndices	91
A	Expressões para cálculo de coeficientes hidrodinâmicos globais	91
A.1	Modo Vertical	91
A.2	Modo Horizontal	92
B	Coordenadas de uma das secções transversais reais da Fragata Vasco da Gama	93
C	Código em Matlab da Ferramenta de cálculo	95

Lista de Figuras

2.1	Representação da Secção Transversal de um navio segundo o Método de Frank	6
2.2	Método do Painel 3D	7
3.1	Movimentos de translação e rotação de um navio	11
3.2	Sistemas de coordenadas utilizado	12
3.3	Sistemas de coordenadas	13
3.4	Espetro de frequências	14
3.5	Perfil de onda de <i>Airy</i>	14
3.6	Perfil de ondas regulares	15
3.7	Formação de ondas	17
3.8	Caracterização de uma onda irregular	18
3.9	Espetro de densidade	20
3.10	Espetro de onda Pierson-Moskowitz	22
3.11	Área de Estudo- Espetro <i>JONSWAP</i>	23
3.12	Parâmetros do Espetro <i>JONSWAP</i>	24
3.13	Ângulo de Incidência	25
3.14	Frequência de Encontro em relação à proa	25
4.1	Sub-Problemas das cargas Hidrodinâmicas	29
4.2	Teoria das Faixas - ilustração	31
4.3	Intervalos permitidos das formas de Lewis	32
4.4	Relação da Transformação Conforme entre dois planos	33
5.1	Doze exemplos de <i>Seakeeping Performance Criteria</i>	43
5.2	Crítérios para reabastecimento vertical	45
6.1	Secções transversais reais	47
6.2	Interface Gráfica - Mapeamento Conforme Multiparâmetro	48
6.3	Secção transversal - Fragata da Classe Vasco da Gama	49
6.4	Representação do casco do navio do tipo fragata da classe Vasco da Gama	49

6.5	Representação do casco do navio da classe Viana do Castelo	50
6.6	Casco do Navio de Patrulha Oceânica NRP Setúbal, da classe Viana do Castelo	50
6.7	Secção transversal da proa - Fragata da Classe Vasco da Gama . . .	51
6.8	Secções transversais de proa - Navio Patrulha da Classe Viana do Castelo	51
6.9	Secção transversal de proa - Navio Patrulha da Classe Viana do Castelo	52
6.10	Interface Gráfica do Programa Desenvolvido	53
6.11	Amplitude da Força total em Arfagem - Fragata da Classe Vasco da Gama	55
6.12	Ilustração da área de flutuação para o calado em estudo	57
6.13	Amplitude da Força total em Cabeceio - Fragata da Classe Vasco da Gama	58
6.14	Comparação dos coeficientes de massa acrescentada em deriva- Resultados obtidos por (Vugts,1968) <i>vs.</i> algoritmo elaborado	59
6.15	Comparação dos coeficientes de amortecimento em deriva- Resultados obtidos por (Vugts,1968) <i>vs.</i> algoritmo elaborado	59
6.16	Comparação dos coeficientes de massa acrescentada em arfagem- Resultados obtidos por (Vugts,1968) <i>vs.</i> algoritmo elaborado	60
6.17	Comparação dos coeficientes de amortecimento em arfagem- Resultados obtidos por (Vugts,1968) <i>vs.</i> algoritmo elaborado	60
6.18	Comparação dos coeficientes de massa acrescentada no movimento de balanço devido à deriva- Resultados obtidos por (Vugts,1968) <i>vs.</i> algoritmo elaborado	61
6.19	Comparação dos coeficientes de amortecimento no movimento de balanço devido à deriva- Resultados obtidos por (Vugts,1968) <i>vs.</i> algoritmo elaborado	61
6.20	Comparação dos coeficientes de massa acrescentada em balanço- Resultados obtidos por (Vugts,1968) <i>vs.</i> algoritmo elaborado	62
6.21	Comparação dos coeficientes de amortecimento em balanço- Resultados obtidos por (Vugts,1968) <i>vs.</i> algoritmo elaborado	62
6.22	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{33} e B_{33} - Mar de Proa . .	64
6.23	Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{33} e B_{33}	64
6.24	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{35} e B_{35} - Mar de Proa . .	65

6.25	Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{35} e B_{35}	65
6.26	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{53} e B_{53} - Mar de Proa . .	66
6.27	Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{53} e B_{53}	66
6.28	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{55} e B_{55} - Mar de Proa . .	67
6.29	Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{55} e B_{55}	67
6.30	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{33} e B_{33} - Mar de través .	68
6.31	Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{33} e B_{33}	68
6.32	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{35} e B_{35} - Mar de través .	69
6.33	Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{35} e B_{35}	69
6.34	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{53} e B_{53} - Mar de través .	70
6.35	Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{53} e B_{53}	70
6.36	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{55} e B_{55} - Mar de través .	71
6.37	Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{55} e B_{55}	71
6.38	Comparação das curvas correspondentes às forças de excitação em arfagem e cabeceio recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf - Mar de Proa	72
6.39	Comparação das curvas correspondentes às forças de excitação em arfagem e cabeceio recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf - Mar de Popa	72
6.40	Comparação das curvas dos <i>Response Amplitude Operators</i> para um mar de Popa	73
6.41	Comparação das curvas dos <i>Response Amplitude Operators</i> para um mar de Proa	73
6.42	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{33} e B_{33} para diferentes posições longitudinais das secções transversais .	74

6.43	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{35} e B_{35} para diferentes posições longitudinais das secções transversais .	75
6.44	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{53} e B_{53} para diferentes posições longitudinais das secções transversais .	75
6.45	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{55} e B_{55} para diferentes posições longitudinais das secções transversais .	76
6.46	RAO em Arfagem - Mar de Proa ($\mu = 180^\circ$)	77
6.47	RAO em Balanço - Mar de Proa ($\mu = 180^\circ$)	77
6.48	RAO em Cabeceio - Mar de Proa ($\mu = 180^\circ$)	78
6.49	RAO em Balanço - Mar de través ($\mu = 90^\circ$)	78
6.50	RAO em Arfagem - Mar de popa ($\mu = 0^\circ$)	78
6.51	RAO em Balanço - Mar de popa ($\mu = 0^\circ$)	79
6.52	RAO em Cabeceio - Mar de popa ($\mu = 0^\circ$)	79
7.1	Comparação dos erros relativos em função da frequência para secções transversais diferentes	82
7.2	Comparação dos erros relativos em função da frequência para secções transversais diferentes	82

Lista de Tabelas

3.1	Características de ondas regulares	16
3.2	Exemplo numérico usado para a determinação das funções $f(x)$ e $F(x)$	18
6.1	Comparação entre o valor estimado dos Coeficientes de Restituição e da Força de Excitação em Arfagem para uma condição "quasi-estática"	56
6.2	Comparação da área de flutuação e da posição do centro de flutuação	57
6.3	Comparação entre o valor estimado dos Coeficientes de restituição e a força de excitação em cabeceio para a condição "quasi-estática" . .	57
6.4	Comparação entre o valor estimado dos valores do coeficiente C_{55} obtidos por dois métodos distintos de cálculo	58

Lista de Acrónimos e Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
BEM	<i>Boundary element method</i>
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
FDM	<i>Finite Difference Method</i>
FVM	<i>Finite Volume Method</i>
FPSO	<i>Floating Production, Storage, and Offloading</i>
GM_T	Altura metacêntrica transversal
GM_L	Altura metacêntrica Longitudinal
HMC	<i>Heerema Marine Contractors</i>
ISSC	<i>International Ship and Offshore Structures Congress</i>
JONSWAP	<i>Joint North Sea Wave Project</i>
LCF	<i>Longitudinal Center of Flotation</i>
NPO	<i>Navio de Patrulha Oceânica</i>
RAO	<i>Response Amplitude Operator</i>

Notação Técnica e Científica

Latim

A_{jk}	Coefficientes de massa acrescentada
$a_0, a_1, a_3, \dots a_{2N-1}$	Coefficientes da Transformação Conforme Multiparâmetro
B	Boca da secção submersa
B_{jk}	Coefficientes de Amortecimento
B_0	Metade da boca da secção submersa
C_{jk}	Coefficientes da força de restituição hidrostática
c	Velocidade de onda
d	Profundidade da onda
D	Calado da secção submersa
F_j	Forças e momentos externos totais que atuam no navio na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
F_j^D	Força de difração total que atuam no navio na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
F_j^I	Força de Froude-Krylov total que atuam no navio na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
F_{EX_j}	Força de excitação na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
F_{G_j}	Componente da força gravitacional que atua na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
F_{H_j}	Componentes das forças do fluido que atuam no navio na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
F_{HD_j}	Componentes das forças hidrodinâmicas que atuam no navio na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
$\tilde{F}_{HD_j}$	Componentes das forças instáveis das forças hidrodinâmicas que atuam no navio na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
$\tilde{F}_{HS_j}$	Componentes das forças hidrostáticas que atuam no navio na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
$\tilde{F}_{R_j}$	Forças hidrodinâmicas devido ao movimento forçado na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
$\tilde{f}_j$	Força de Froude-Krylov seccional na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$

$G(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$	Sistema de coordenadas fixo no navio (sistema não-inercial)
g	Aceleração gravítica
$\overline{H}_{\frac{1}{3}}$	Altura média calculada para um terço das ondas maiores
H	Altura de onda
$\overline{H}_a$	Altura média de onda
h_j	Força de difração seccional
I_{jj}	Momentos de inércia em $j = 4, 5, 6$
k	Número de onda
N_j	Vetor normal bidimensional generalizado à superfície do casco (exterior)
n_j	Vetor normal tridimensional generalizado à superfície do casco (exterior)
$O(x, y, z)$	Sistema de coordenadas fixo na posição média do centro de gravidade do navio
P	Pressão do fluido
S	Superfície da área das obras vivas do casco
S_ζ	Espetro de onda
$S(x_0, y_0, z_0)$	Sistema de coordenadas fixo no espaço
T	Período da onda
T_H	Período de análise
$\overline{T}_p$	Período obtido a partir da média de dois picos sucessivos
$\overline{T}_z$	Período obtido a partir da média entre duas intersecções no zero médio
T_{jk}	Função de transferência
t	Instante de tempo
U_0	Velocidade média de avanço do navio

Grego

σ	Coeficiente da área da secção
Δ	Massa total do navio
Δ_{jk}	Matriz de inércia generalizada do navio
ζ_a	Amplitude de onda
$\eta_j(t)$	Resposta do navio em ondas sinusoidais dependente do tempo na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
$\bar{\eta}_j$	Amplitude complexa da resposta do navio na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
$\ddot{\eta}_j(t)$	Aceleração do navio dependente do tempo na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$
$\ddot{\eta}_k$	Acelerações no modo k
θ	Ângulo da Transformação Conforme Multiparâmetro
λ	Comprimento de onda
μ	Ângulo de incidência da onda
ρ	Massa volúmica do fluido
Φ	Potencial de velocidade
ϕ	Potencial de velocidade independente do tempo
ϕ_D	Potencial da onda difratada independente do tempo
ϕ_I	Potencial da onda incidente independente do tempo
ϕ_j	Potencial da radiação devido ao movimento forçado na direção $j(j = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$ independente do tempo
ϕ_T	Potencial de perturbação dinâmico
ω_0	Frequência angular da onda
ω_e	Frequência angular de encontro da onda

Capítulo 1

Introdução

Na fase de vida operacional de um navio ou na sua fase de projeto é importante saber qual será o seu comportamento quando sujeito à excitação de uma onda regular. A resposta de um navio é um fenómeno de elevada complexidade, envolvendo a interação de diversos fenómenos hidrodinâmicos. Embora a resposta de um navio, sujeito à ação das ondas seja não-linear, existem cálculos e técnicas que permitem o seu cálculo de forma expedita (Lloyd, 1998).

As funções de resposta à excitação são análogas às obtidas em sistemas lineares noutros campos de aplicação como por exemplo no contexto da eletrónica e da comunicação (Granger, 1962). Em contexto marítimo são denominadas por funções de transferência ou por função da resposta em frequência. O módulo da função transferência tem uma terminologia própria no contexto da arquitetura naval, *Response Amplitude Operator* (RAO). Este valor representa a razão entre a amplitude da resposta e amplitude da onda regular de excitação (Denis & Pierson, 1953).

Os trabalhos feitos para determinar os RAO's, recorrem a cálculos analíticos, a testes em modelos a uma reduzida ou testes feitos à escala real (Balixa, 2021). Analiticamente os RAO's podem ser calculados conhecendo as forças de excitação, os coeficientes de massa acrescentada, os coeficientes de amortecimento, os coeficientes de restituição e a matriz massa do navio em estudo. A determinação das forças e dos coeficientes hidrodinâmicos pode ser feita utilizando a Teoria das Faixas, *strip theory*. Dividindo o navio num número finito de faixas, o valor dos coeficientes de massa acrescentada e de amortecimento, em cada secção transversal pode ser obtido recorrendo ao método de Transformação de Lewis ou do Método de Transformação Conforme Multiparâmetro (Salvesen et al., 1970).

É possível realizar a identificação experimental dos RAO's (*Response Amplitude Operators*) para um determinado estado de mar, proa e velocidade utilizando medições de movimento em escala real do navio e conhecendo os dados característicos

das ondas (excitação). O autor Skandali (2015) desenvolveu um método matemático para a obtenção dos RAO's tendo em conta o acima referido (Skandali, 2015). O processo de identificação foi aplicado a um navio específico, o *Thialf*, um navio grua semi-submersível de 22 metros de calado em que as suas movimentações foram regularmente monitorizadas pela empresa *Heerema Marine Contractors* (HMC).

Experimentalmente uma das dificuldades em trabalhar com modelos à escala é transformar os resultados obtidos em resultados compatíveis com o modelo real uma vez que é necessário ter em conta as forças hidrodinâmicas viscosas.

Atualmente com os avanços tecnológicos, os métodos computacionais permitem abordar os estudos enumerados de uma forma mais simples e expedita. Ao longo dos anos também foram desenvolvidas ferramentas que permitem o cálculo das respostas usando métodos mais avançados não lineares como a dinâmica de Fluidos Computacional (CFD-Computational Fluid Dynamics), método dos Elementos Finitos (FEM- Finitite Element Method) e o método dos Elementos de Fronteira (Boundary Element Method). Um dos softwares que faz uso do método FEM é o ANSYS AQWA[®] (Ibinabo & Tamunodukobipi, 2019).

A previsão de comportamento no mar de unidades navais é fundamental para estimar e melhorar o desempenho operacional da plataforma e dos sistemas de armas e sensores. No âmbito militar com as ferramentas de previsão adequadas podem-se estimar os limites de mar para operações de voo (Grigoropoulos, 2010), limites de utilização de alguns sensores e armas, limites de utilização do aparelho propulsor, limites de resistência estrutural, entre outras aplicações.

O objetivo deste trabalho é elaborar um programa destinado ao cálculo dos RAO's através da criação de um algoritmo em Matlab[®]. Os trabalhos de Ferreira (2018) e de Ramujane (2019) resolveram o problema da radiação representado pelo cálculo dos coeficientes de massa acrescentada e de amortecimento. O trabalho de Balixa (2021) incidiu na resolução do problema das forças de excitação, representado pelas forças de Froude-Krylov e de Difração. Com os resultados obtidos na sequência dos trabalhos desenvolvidos, é possível obter os RAO's para os navios da Marinha Portuguesa.

Alguns capítulos importantes que ajudam a compreender o trabalho desenvolvido podem ser consultados nas dissertações de mestrado dos autores Ferreira (2018), Ramujane (2019) e Balixa (2021).

Capítulo 2

Estado da Arte

Uma das áreas da Engenharia Oceânica e da Arquitetura Naval de extrema importância consiste no estudo do comportamento dinâmico de um navio no mar (*Seakeeping*). Este estudo por vezes incide na determinação da resposta de um navio ao estado do mar. A relação entre a amplitude do seu movimento e a amplitude da onda, no domínio da frequência, denomina-se *Response Amplitude Operator*. Dependendo da complexidade da estrutura a estudar o cálculo dos RAO's pode ser feito experimentalmente recorrendo a modelos à escala ou modelos reais, simulando as condições de excitação em tanques de ondas.

Analiticamente a obtenção dos RAO's é feita após determinados os coeficientes hidrodinâmicos e as forças de excitação. Para este cálculo podem ser usados diferentes métodos. Os métodos numéricos lineares baseiam-se no cálculo do potencial de escoamento de fluido numa determinada superfície. Destes métodos destacam-se a Teoria Unificada para corpos esbeltos e a Teoria das Faixas (J.N.Newman, 1977). O problema da radiação-difração bidimensional para cada uma das faixas, secção transversal do navio, pode ser resolvido recorrendo ao Método de Mapeamento Conforme (Ferreira, 2018), Método do Mapeamento conforme Multiparâmetro (Ramujane, 2019), Método do Pannel (Arriaga & Matos, 2012) e Método de Frank (Frank, 1967).

O cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos e das forças de excitação pode ser ainda feito recorrendo a métodos mais avançados não lineares, que irão ser descritos neste capítulo.

No que respeita ao cálculo dos RAO's, existem programas computacionais presentes no mercado. O ANSYS AQWA (Ibinabo & Tamunodukobipi, 2019) simula a resposta de navios e plataformas offshore recorrendo ao método do Pannel 3D.

O WAMIT 2000 baseia-se na teoria do potencial linear e é o software mais usado e mais fidedigno no cálculo da resposta em frequência. O MOSES 2000 para além destas funcionalidades também permite analisar a fadiga de estruturas (Islam et al., 2019). Neste capítulo irão ser descritas algumas das técnicas e métodos mencionados.

2.1 Método Experimental

A excitação causada pelas ondas no navio gera movimentos de elevada complexidade. A abordagem mais comum no tratamento destes movimentos é assumir o casco como sendo rígido e decompor as movimentações tendo em conta os 6 graus de liberdade.

Contudo, existe acoplamento entre os diferentes modos de oscilação, o que nem sempre é considerado. A maioria dos estudos trata individualmente os deslocamentos verticais, considerando os modos arfagem e cabeceio, os deslocamentos horizontais, analisando os modos de deriva e guinada e o modo de balanço.

No caso da arfagem e de cabeceio, estes movimentos apresentam grande relevância em problemas dinâmicos. Os modos de deriva e de guinada estão relacionados com problemas de manobrabilidade. O balanço é o modo de oscilação com maior risco no ponto de vista da estabilidade do navio.

A obtenção dos *Response Amplitude Operators* recorrendo ao método experimental apenas é possível com algumas restrições (Denis & Pierson, 1953). Em arfagem e cabeceio as condições de experimentação são limitadas a mares de proa e de popa. Em balanço, para mares de través e com o modelo a pairar.

Os métodos lineares de previsão teóricos, no caso do balanço não apresentam uma boa precisão. Isto deve-se ao facto de os efeitos viscosos não serem representados adequadamente nas previsões teóricas. Uma alternativa são os métodos não lineares no entanto, estes são de elevada complexidade e normalmente apresentam resultados pouco mais precisos (Bertram, 2000).

O autor Meza (1985) no seu trabalho utilizou equações lineares para identificar zonas de ressonância em balanço, de seguida, recorrendo a métodos experimentais num tanque de provas verificou e quantificou o fenómeno.

2.2 Teoria das Faixas

O uso da teoria potencial para a resolução de problemas relacionados com a previsão do movimento de um navio é suficiente para a obtenção de resultados, com uma precisão razoável no âmbito da engenharia (Fossen, 2011).

As condições de fronteira para resolver a Equação de Laplace podem ser definidas recorrendo à Teoria das Faixas. A teoria potencial encontra-se descrita no capítulo 5.1 do livro de Fossen (2011).

O método da Teoria das Faixas é o método linear mais utilizado na previsão de um comportamento de um navio num determinado estado de mar. Este método foi inicialmente abordado e estudado em 1957 por Korvin-Kroukovsky e Jacobs. Com o passar dos anos surgiram algumas variações do método original, destas variações destacam-se os estudos desenvolvidos por Salvensen, Tuck e Faltinsen.

A implementação deste método é feita dividindo o casco num número finito de faixas ou secções. Secções estas que devem ser transversais, uniformes, independentes e rigidamente ligadas umas às outras. Fazendo esta transformação o problema tridimensional (3D) torna-se num problema bidimensional (2D). Para além disso considera-se o corpo rígido flutuando num fluido ideal, isto é: homogéneo, incompressível, irrotacional e sem viscosidade.

Os coeficientes hidrodinâmicos de cada faixa são determinados assumindo que cada secção se trata de uma secção correspondente a um cilindro de comprimento longo. Isto deve-se ao facto da derivação dos coeficientes do potencial, segundo Ursell, ser apenas válida para secções transversais semicirculares (Journée & Adegeest, 2003).

Para determinar os coeficientes de massa acrescentada e de amortecimento nos modos deriva, arfagem e balanço, pelo método de Ursell, as secções transversais reais de um navio devem ser mapeadas de acordo com um semicírculo de raio unitário (Ursell, 1949).

O correspondente problema bidimensional pode ser resolvido recorrendo ao método de Mapeamento Conforme, ao método de Mapeamento Conforme Multiparâmetro, ou ao método de Frank (Balixa, 2021).

A abordagem analítica mais simples utiliza o método de Mapeamento Conforme (*Conformal Mapping Method*). Este método, também conhecido por Transformação de Lewis, utiliza apenas dois coeficientes de mapeamento. Neste caso apenas

a boca, o calado e a área da secção transversal do semi-círculo, serão semelhantes à secção transversal real. O Mapeamento Conforme, técnica utilizada por Tasai (1959) e Ferreira (2018), é, no entanto a técnica de mapeamento menos realista para a transformação das secções.

O método de Mapeamento Conforme Multiparâmetro utiliza mais de dois coeficientes de mapeamento. Visto que geralmente são usados em torno de 10 coeficientes para definir a secção transversal (Journée & Adegeest, 2003), este método apresenta uma maior precisão. Os coeficientes são determinados de modo a minimizar a distância entre os pontos que representam a secção real e os pontos da secção mapeada (Ramujane, 2019).

Os métodos de mapeamento apresentados consideram a secção transversal imersa. Em secções que estejam representados bolbos e estabilizadores, estas técnicas não são válidas. Para além disso, o mapeamento conforme pode falhar para secções transversais com uma área seccional muito baixa, como por exemplo nas secções mais a vante (Journée & Adegeest, 2003).

Um método alternativo é o Método de Frank. Este é baseado na Teoria de Faixas e na teoria potencial de escoamento de fluido. Contudo, ao contrário das técnicas apresentadas, o método de Frank não utiliza o mapeamento para determinar os coeficientes hidrodinâmicos.

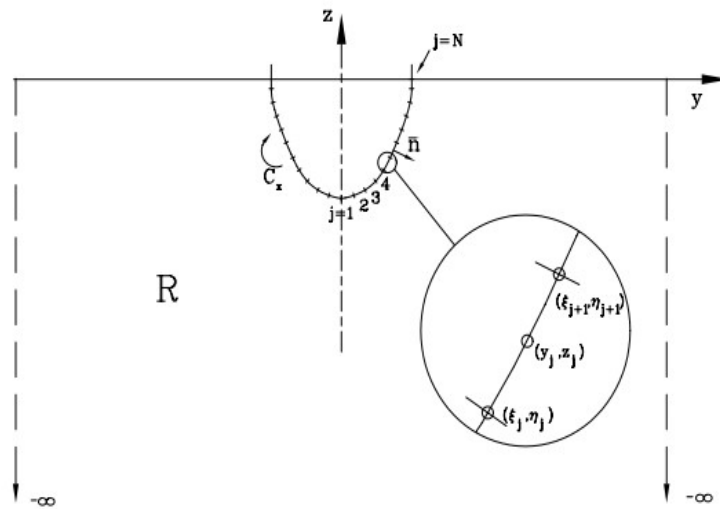


FIGURA 2.1: Representação da Secção Transversal de um navio segundo o Método de Frank

Fonte: Retirado de Pedersen, 2000

O método desenvolvido por Frank (1967) considera as seções transversais simétricas longitudinalmente (Frank, 1967). Cada secção é representada por um determinado número de pontos, unidos entre si por segmentos de reta, como ilustrado na Figura 2.1. O potencial de velocidade é possível obter recorrendo à função de Green (Pedersen, 2000).

O método de Frank embora aproxime com precisão qualquer secção transversal do navio, apresenta alguns resultados irregulares em determinadas frequências. Geralmente estas frequências irregulares ocorrem para frequências altas onde o espetro de ondas apresenta menor energia (Pedersen, 2000).

2.3 Método dos Painéis 3D (3D- Panel Method)

O Método do Painel 3D é um método numérico utilizado para resolver as equações do potencial do escoamento do fluido em corpos tridimensionais. O método divide o corpo em pequenos painéis retangulares planos, e aproxima o fluxo em redor de cada painel assumindo uma distribuição constante de fontes e poços no painel (Hess & Smith, 1967).

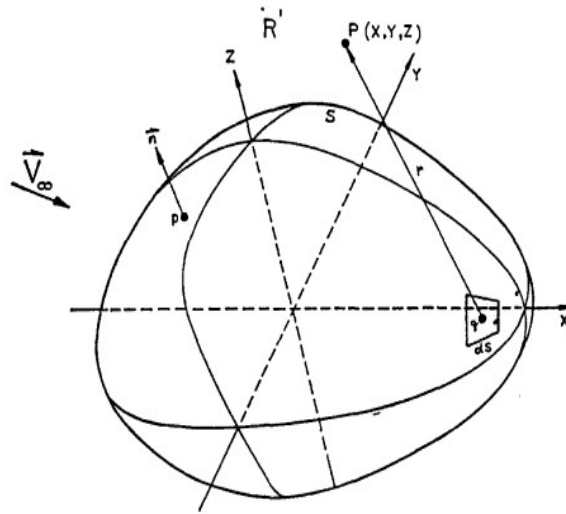


FIGURA 2.2: Método do Painel 3D
Fonte: Retirado de Hess and Smith, 1967

O método utiliza então estas aproximações para resolver o potencial da velocidade e os coeficientes de pressão em cada painel, estes valores são integrados ao longo do corpo determinando as características gerais do fluxo.

Uma das primeiras referências sobre o método do painel 3D, foi publicada no ano de 1967 pelos autores Hess e Smith. Este artigo introduziu o conceito de dividir o corpo em painéis permitindo a transformação da equação diferencial homogênea 3D para o integral 2D (Arriaga & Matos, 2012). Desde então, o Método do Painel tem sido amplamente utilizado na área da hidrodinâmica e da aerodinâmica. Uma das vantagens deste método é a sua capacidade de lidar com geometrias complexas e fluxos instáveis (Mantzaris, 1998).

2.4 Dinâmica dos Fluidos Computacional (*CFD-Computational Fluid Dynamics*)

Programas de CFD compreendem métodos numéricos que resolvem as equações diferenciais do escoamento do fluido de uma forma mais expedita. No contexto da hidrodinâmica, CFD pode ser usado para determinar a velocidade de escoamento e a pressão exercida por um fluido numa superfície imersa. O processo para a resolução de problemas hidrodinâmicos recorrendo a CFD começa pela caracterização do problema. Define-se inicialmente as condições iniciais e de contorno, as propriedades físicas do fluido e o modelo em estudo. A superfície do modelo é seguidamente discretizada numa malha de pontos que representam a geometria do problema (Bertram, 2000). As principais técnicas de CFD são:

- *BEM- Boundary Element Method-* O método dos elementos de contorno ou método dos elementos de fronteira é um método computacional para determinar fluxos potenciais. A solução de sistemas de equações diferenciais pode ser formulada em forma integral e, portanto, o processo de transformação de um problema 3D para 2D simplifica o problema acelerando os cálculos. O método BEM recorre ao método do painel (Bertram, 2000) dividindo a superfície de uma estrutura num número finito de elementos (painéis), um benefício extra deste método é o tratamento analítico de domínios infinitos por meio de uma função de Green adequada às condições de fronteira. O uso de BEM na área da hidrodinâmica pode ser analisado em detalhe em Kaklis (2017) e Salvatore (2018), para além disso este método encontra-se implementado no código do software comercial SHIPFLOW (FLOWTECH International AB, Gothenburg,

Sweden) usado por Pacuraru (2020). (Kaklis et al., 2017; Pacuraru et al., 2020; Salvatore et al., 2018)

- *FEM- Finite Element Method*- O método dos elementos finitos é uma técnica numérica que subdivide o domínio de um problema em partes menores denominados elementos finitos (Chung, 1978). Este método é maioritariamente utilizado na análise estrutural (Ion & Ticu, 2015) não sendo tão eficiente na área da hidrodinâmica e do *Seakeeping*.

Para além dos métodos apresentados, Bertram (2000) descreve ainda *FDM-Finite difference methods* e *FVM-Finite volume methods*. À semelhança do FEM os métodos FDM e FVM são denominados de *field methods* uma vez que definem todo o domínio do fluido ao contrário do BEM que apenas define os limites. Este método, no domínio da frequência permite calcular as forças e movimentos de um navio em ondas regulares sendo por isso o mais usado para *Seakeeping*.

Os métodos de CFD na indústria da construção naval têm um papel fundamental uma vez que, uma otimização numérica pode economizar iterações demoradas em testes em modelo reduzindo assim o tempo de desenvolvimento. Tornou-se recorrente o uso destes métodos no estudo e desenvolvimento de cascos numa fase de projeto. Com o crescimento do poder computacional, as simulações em escala real serão cada vez mais precisas, substituindo a longo prazo os testes experimentais em tanque de ondas. A utilização do CFD em detrimento dos testes em modelo levará a uma redução de custos e de tempo na fase de projeto de um navio.

Capítulo 3

Dinâmica em Ondas Regulares

3.1 Graus de Liberdade

Os navios, em função do estado do mar, movimentam-se tridimensionalmente em movimentos de translação e de rotação. A figura 3.1 representa os movimentos de translação η_1 = avanço (*surge*), η_2 = deriva (*sway*), η_3 = arfagem (*heave*) e os movimentos de rotação η_4 = balanço (*roll*), η_5 = cabeceio (*pitch*), η_6 = guinada (*yaw*) (Salvesen et al., 1970).

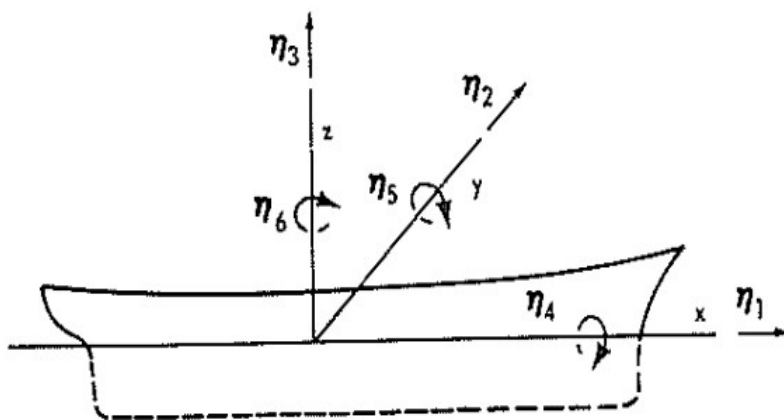


FIGURA 3.1: Movimentos de translação e rotação de um navio
Fonte: Adaptado de Salvesen, 1970

3.2 Sistemas de Coordenadas

Um navio no ambiente oceânico tem a capacidade de se movimentar, num espaço tridimensional, nos seus seis graus de liberdade. Infelizmente para caracterizar estes movimentos não existe um sistema de coordenadas comum e universal. No trabalho desenvolvido por Denis and Pierson (1953) a caracterização do movimento

de um navio é feita considerando quatro referenciais. Todos eles são direcionados com o eixo z na vertical e com sentido positivo para cima, os momentos seguem a “regra da mão direita” e, portanto, são positivos no sentido anti-horário, com referência positiva do eixo.

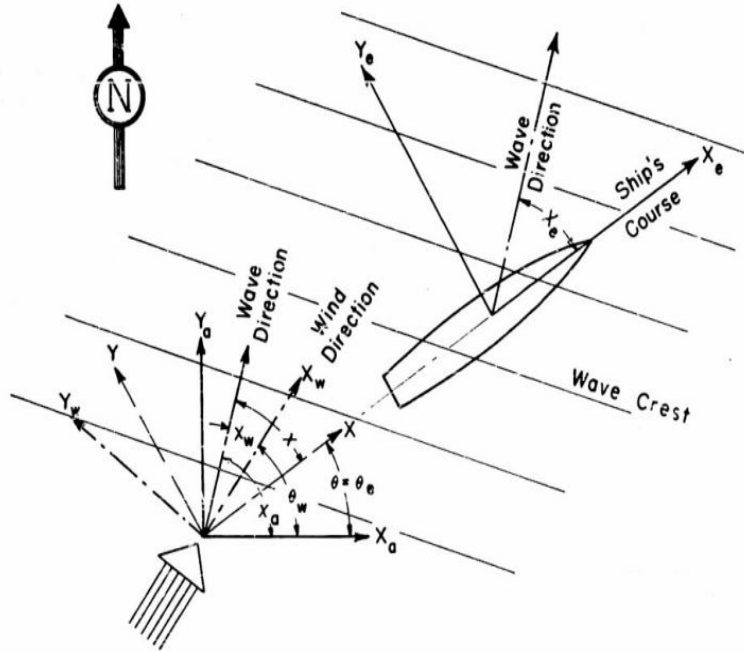


FIGURA 3.2: Sistemas de coordenadas utilizado

Fonte: Retirado de St.Denis and Pierson, 1953

Sistema de coordenadas fixo em relação à terra (Sistema inercial): As coordenadas podem ser identificadas pelo subscrito a . A origem deste referencial está num ponto fixo da superfície do mar. Os eixos X_a e Y_a são positivos no sentido de Este e Norte, respetivamente. Os ângulos, x_a , são medidos no sentido anti-horário, tendo como referência o eixo positivo de X_a . Este referencial é usado para descrever o mar *per se* sem referência a um navio, posição ou rumo.

Sistema de coordenadas fixo orientado em relação ao sentido do vento: As coordenadas podem ser identificadas pelo subscrito w . A origem deste referencial é a mesma que o anterior. O eixo X_w é positivo na direção em que sopra o vento. Este referencial é usado na obtenção do espectro de frequência do estado do mar.

Sistema de coordenadas fixo orientado em relação ao movimento do navio: As coordenadas podem ser identificadas pela ausência de qualquer subscrito. A origem do referencial é a mesma que os anteriores. Este é o referencial usado na obtenção das *Response Amplitude Operators*.

Sistema de coordenadas móvel em função da proa do navio: As coordenadas podem ser identificadas pelo subscrito e . A origem deste referencial está no centro de gravidade do navio. O eixo X_e é positivo na direção da proa do navio. Este referencial é usado para obter a resposta do navio.

A figura 3.3 representa os sistemas de coordenadas utilizados neste trabalho encontram-se definidos por Lewis (1989) no *Principles of Naval Architecture*.

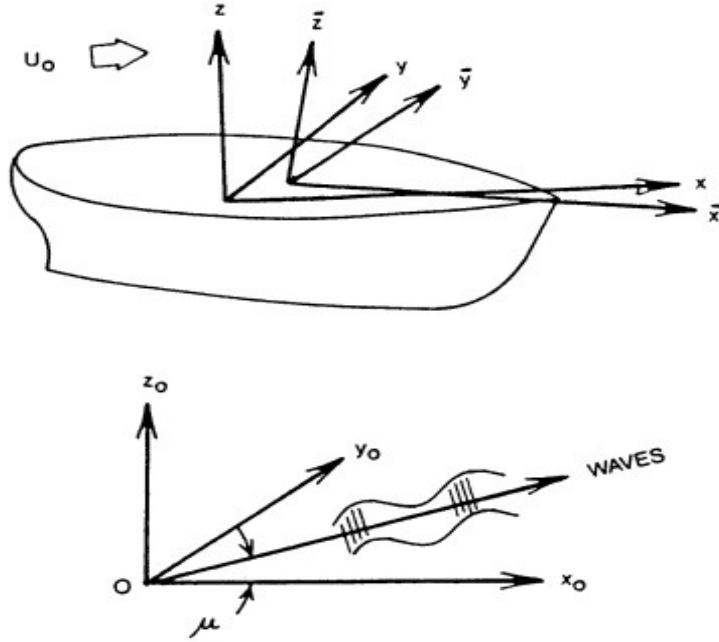


FIGURA 3.3: Sistemas de coordenadas

Fonte: Retirado de Lewis, 1989

Sistema de coordenadas fixo em relação à terra: $S(x_0, y_0, z_0)$ é um sistema inercial em que o plano (x_0, y_0) coincide com a superfície da água sem perturbações, a orientação de x_0 coincide com a propagação da onda e z_0 é orientado verticalmente.

Sistema de coordenadas fixo no navio: $G(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ é um sistema fixo ao navio com origem no centro de gravidade G , movendo-se com todos os movimentos do navio. O plano $(\bar{x}, \bar{y})$ coincide com a linha de água do navio, sendo o eixo $\bar{z}$ normal a este plano e de sentido positivo para cima. O eixo $\bar{x}$ é direcionado para a proa do navio.

Sistema de coordenadas que se move à velocidade constante: $O(x, y, z)$ move-se com a velocidade constante do navio U_0 na direção positiva do avanço relativamente ao sistema fixo $S(x_0, y_0, z_0)$. Estes dois sistemas de coordenadas relacionam-se da seguinte forma:

$$(x_0, y_0, z_0) = (x + U_0 t, y, z)$$

3.3 Ondas Regulares

Durante o projeto de uma plataforma que irá operar em ambientes marítimos é necessário considerar as forças de excitação a que esta estará sujeita. As ondas do mar são as que têm mais impacto na estrutura. Para conhecer o comportamento dos navios é necessário compreender os processos físicos associados às ondas (Lloyd, 1998).

Tendo em conta a complexidade e irregularidade das ondas, na natureza não existem duas ondas com as mesmas características (Balixa, 2021). As ondas regulares apenas podem ser reproduzidas em laboratório em condições controladas, no entanto para determinar o comportamento dinâmico do navio no mar é necessário utilizar modelos matemáticos de ondas oceânicas que contemplem uma variabilidade de ondas com diferentes períodos e amplitudes. Sendo assim, as ondas irregulares podem ser representadas pela sobreposição de várias ondas regulares adequadas que ao serem modeladas recorrendo à Série de Fourier, verificamos uma sobreposição de harmônicas. Esta análise pode ser feita considerando que há um padrão de onda que se repete num determinado período, t_l .

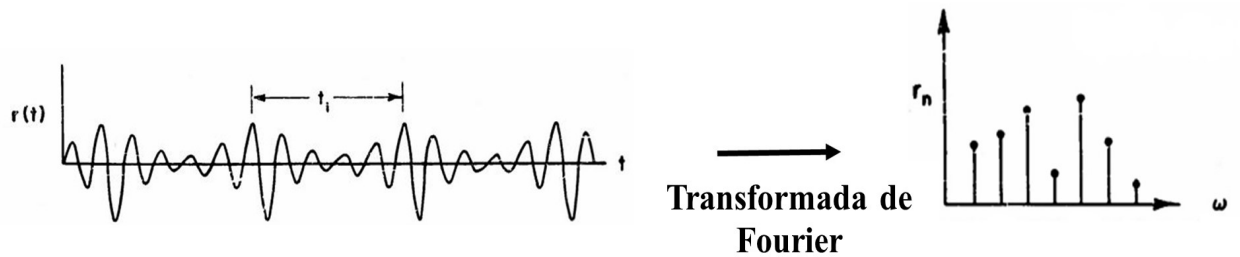


FIGURA 3.4: Espectro de frequências
Fonte: Adaptado de St.Denis and Pierson, 1953

A Teoria de Ondas de Pequena Amplitude conhecida por Teoria das Ondas de Airy ou por Teoria das Ondas Lineares, figura 3.5, assume que as ondas são regulares.

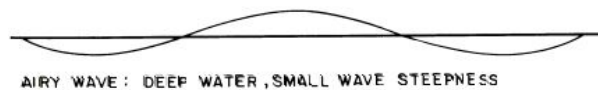


FIGURA 3.5: Perfil de onda de Airy
Fonte: Retirado de Bernard Le Méhauté, 1976

De acordo com esta teoria, uma perturbação da superfície, criada por uma força impulsiva periódica, agindo ao longo de uma linha reta, percorre da origem até ao infinito num sistema de onda progressiva na direção x , com as cristas da onda perpendiculares ao sentido da propagação e a uma velocidade, c . O comprimento de onda λ e o período T são constantes.

Esta teoria é aplicada quando a altura é pequena em relação à profundidade, ou seja, para situações onde estas condições $H/d < 1$, $d/\lambda > 0,5$ se verificam. Considerando H a altura onda (dobro da amplitude), λ o comprimento de onda e d é a profundidade da onda tendo em conta o solo. Para além disso existem ainda alguns pressupostos para esta teoria:

- As ondas são bidimensionais;
- A pressão à superfície é constante;
- O fluido é homogêneo, incompressível, irrotacional e invíscido;
- O fundo é horizontal, estacionário e impermeável.

O perfil Airy pode ser representado também pela figura 3.6 e as suas características estão presentes na tabela 3.1:

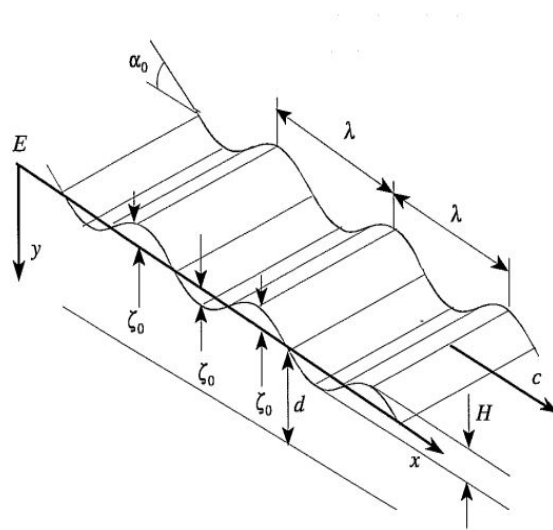


FIGURA 3.6: Perfil de ondas regulares

Fonte: Retirado de Lloyd,1998

TABELA 3.1: Características de ondas regulares

ζ_0	A amplitude da onda ou a distância vertical desde o nível médio ($y = 0$) até á crista ou cava; ζ_0 é sempre positivo	m
H	A altura da onda; o dobro da amplitude da onda	m
λ	O comprimento de onda: a distância horizontal entre uma crista (ou cava) e a próxima	m
c	A velocidade da onda: a velocidade de uma crista individual na direção x	m/s
T	O período da onda: o intervalo de tempo da passagem entre cristas (ou cava) sucessivas num determinado ponto	s
α	O declive da onda instantâneo: o gradiente do perfil da superfície	rad
α_0	O declive da onda máximo ou amplitude do declive da onda; α_0 é sempre positivo	rad
d	Profundidade da onda tendo em conta o solo	m
H/λ	A inclinação da onda	

Este tipo de onda pode ser descrito por um perfil sinusoidal de amplitude constante representado pela equação: (Bernard Le Méhauté, 1976)

$$\eta = \frac{H}{2} \sin(kx - \omega_0 t) \quad (3.1)$$

Onde k é o número de onda ($k=2\pi/\lambda$) e ω_0 é a frequência angular da onda ($\omega_0=2\pi/T$) e H é a altura de onda.

3.4 Espectros de ondas

O conhecimento das características de ondas regulares é um recurso importante para o desenvolvimento de projetos na área da construção naval. Contudo, no oceano este tipo de ondas não ocorre. A formação de ondas encontra-se muitas vezes associada à ação do vento. Este ao soprar sobre uma região de águas calmas criará perturbações que se propagarão na mesma direção que o vento, como ilustrado na figura 3.7.

Se o vento continuar a soprar nessa direção, essas perturbações irão avançar crescendo em comprimento e altura até serem consideradas ondas. Este processo, contínuo, culmina num conjunto de ondas de diferentes comprimentos e alturas, figura 3.8.

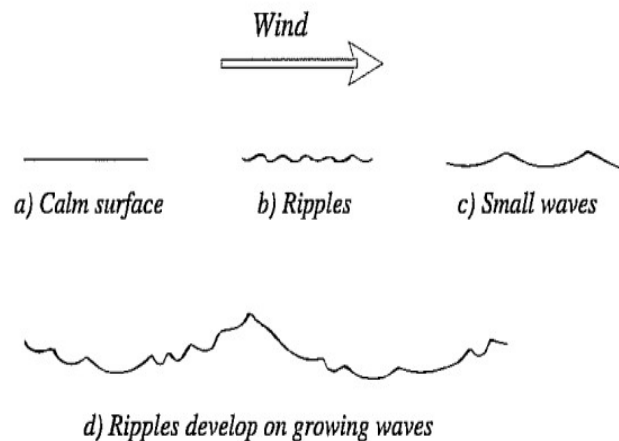


FIGURA 3.7: Formação de ondas
Fonte: Retirado de Lloyd,1998

3.4.1 Análise estatística simples

O vento varia tendo em conta a geografia do local e por vezes a sua complexidade leva a que o padrão de ondas nessa região seja confuso. No entanto já existe a aplicação de métodos estatísticos para quantificar as características das ondas numa dada região.

Para fazer uma análise estatística confiável num período T_H , este deve ser 100 vezes superior ao da onda com maior período. Os valores médios destas amostras são usados para caracterizar as ondas medidas.

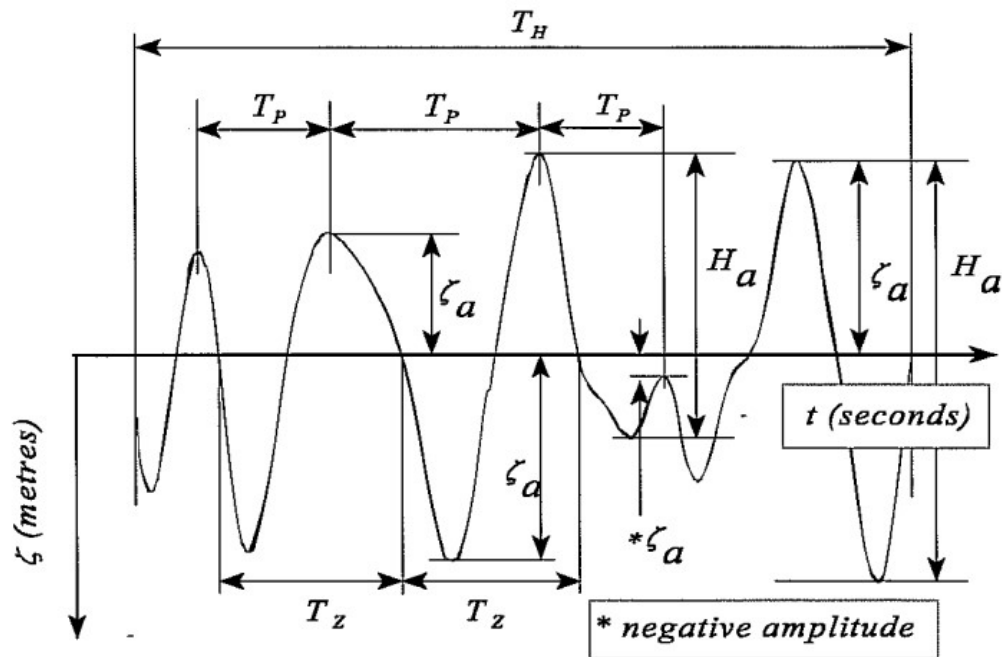


FIGURA 3.8: Caracterização de uma onda irregular

Fonte: Retirado de Lloyd,1998

O período $\overline{T_P}$ é obtido a partir da média dos períodos entre picos sucessivos e o período $\overline{T_Z}$ pela média entre duas interseções no zero médio.

A obtenção da altura média $\overline{H_a}$ é feita após a obtenção da função densidade de probabilidade $f(x)$ e da função distribuição $F(x)$. Agrupando o número de ondas em determinados intervalos de altura e dividido esse valor (de cada intervalo) pelo número total de ondas, obtemos a função densidade de probabilidade $f(x)$ como ilustrado na tabela 3.2.

 TABELA 3.2: Exemplo numérico usado para a determinação das funções $f(x)$ e $F(x)$

Alturas de onda (m)	Altura média do intervalo (m)	Número de ondas	Coefficientes de $f(x)$	Coefficientes de $F(x)$
0.25-0.75	0.5	15	0.100	0.100
0.75-1.25	1	30	0.200	0.300
1.25-1.75	1.5	55	0.367	0.667
1.75-2.25	2	21	0.140	0.807
2.25-2.75	2.5	14	0.093	0.900
2.75-3.25	3	9	0.060	0.960
3.25-3.75	3.5	5	0.033	0.993
3.75-4.25	4	1	0.007	1.000
Total		150	1.000	

A soma cumulativa desses valores permite obter a função distribuição $F(x)$ dada pela expressão:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (3.2)$$

O valor de $\overline{H_a}$ é por fim obtido a partir do somatório das multiplicações entre a altura média do intervalo, $\overline{H_m}$ e o coeficiente da função densidade de probabilidade, $f_m(x)$ como ilustrado na equação:

$$\overline{H_a} = \sum_{m=1}^M \overline{H_m} \times f_m(x) \quad (3.3)$$

Por vezes para caracterizar um espectro de ondas também utiliza-se a altura média calculada para um terço das ondas maiores, representado por $\overline{H_{\frac{1}{3}}}$. O valor da altura significativa, $\overline{H_{\frac{1}{3}}}$ é obtido recorrendo ao mesmo método utilizado no cálculo de $\overline{H_a}$.

3.4.2 Espectro de energia das ondas

Uma onda irregular pode ser analisada como sendo a sobreposição de ondas sinusoidais (Journée & Massie, 2001). A altura da crista da onda (no domínio do tempo) de um mar irregular pode ser escrita como a soma de componentes das diversas ondas regulares que a compõe (no domínio da frequência):

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^N \zeta_{a_n} \cos(k_n x - w_n t + \varepsilon_n) \quad (3.4)$$

Os valores k_n , ω_n , ε_n representam o número de onda, a frequência e a fase. Os valores das amplitudes de onda, ζ_{a_n} podem ser expressos usando um espectro de onda $S_\zeta(\omega_n)$ definido por:

$$S_\zeta(\omega_n) \cdot \Delta\omega = \sum_{\omega_n}^{\omega_n + \Delta\omega} \frac{1}{2} \zeta_{a_n}^2(\omega) \quad (3.5)$$

O valor de $\Delta\omega$ é a diferença constante entre duas frequências sucessivas. Este intervalo pode ser verificado na figura 3.9.

O espectro de energia de ondas é obtido quando $\Delta\omega$ tende para zero, resultando assim na expressão:

$$S_\zeta(\omega_n) \cdot d\omega = \frac{1}{2} \zeta_{a_n}^2(\omega) \quad (3.6)$$

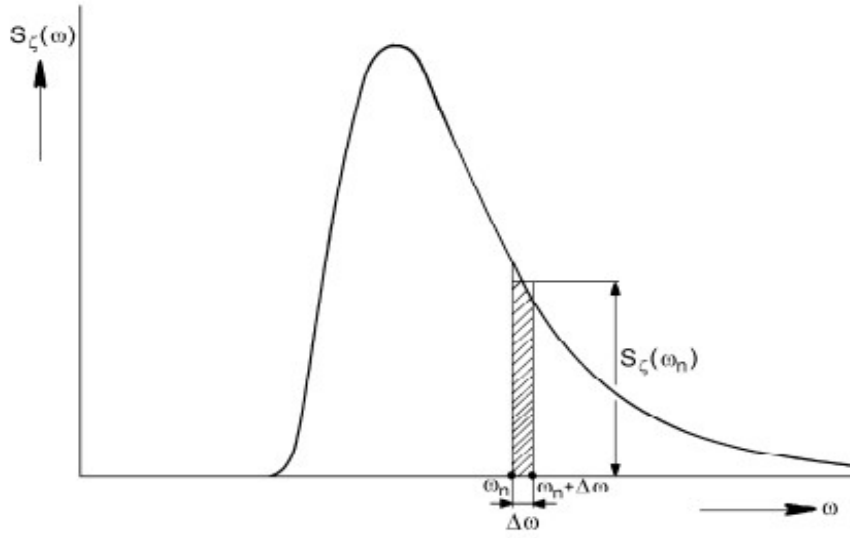


FIGURA 3.9: Espectro de densidade
 Fonte: Retirado de Journée and Massie, 2001

A partir do espectro de energia e dos momentos espectrais é possível determinar alguns parâmetros estatísticos. O momento é dado por:

$$m_{n\zeta} = \int_0^{\infty} \omega^n \cdot S_{\zeta}(\omega) \cdot d\omega \quad (3.7)$$

O valor de $m_{0\zeta}$ é a área da curva do espectro, $m_{1\zeta}$ é o primeiro momento de área (momento estático) e $m_{2\zeta}$ é o segundo momento de área. Dos valores destes momentos podemos obter o valor *RMS* (*Root Mean Square*), $\zeta_{a_{\frac{1}{3}}}$ correspondente à amplitude significativa de onda e $H_{\frac{1}{3}}$ representa a altura significativa de onda:

$$\begin{aligned} RMS &= \sqrt{m_{0\zeta}} \\ \zeta_{a_{\frac{1}{3}}} &= 2 \cdot \sqrt{m_{0\zeta}} \\ H_{\frac{1}{3}} &= 4 \cdot \sqrt{m_{0\zeta}} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Os valores dos períodos de onda podem ser definidos a partir dos momentos espectrais:

$$\begin{aligned} m_{1\zeta} &= \omega_1 \cdot m_{0\zeta} \\ m_{2\zeta} &= \omega_2^2 \cdot m_{0\zeta} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Dos momentos espectrais obtem-se o período T_z , correspondente ao tempo entre duas interseções sucessivas no zero médio. E o período T_p associado ao tempo entre dois picos sucessivos do espectro.

$$\begin{aligned} T_z &= 2\pi \cdot \frac{m_{0\zeta}}{m_{1\zeta}} \\ T_p &= 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m_{0\zeta}}{m_{1\zeta}}} \end{aligned} \quad (3.10)$$

3.4.3 Espectro de *Pierson-Moskowitz*

De um modo geral, o espectro de energia de ondas derivado da análise de uma sucessão de ondas irregulares, obtido num determinado local e num determinado período, será um resultado único. Embora seja útil para prever as condições do mar nessa região, o seu uso em termos de projeto de navios é limitante. Normalmente são usados espectros de onda idealizados, com fórmulas diferentes, adequadas às condições de oceano ou zonas costeiras (Bernard Le Méhauté, 1976).

Um dos espectros mais simples é de Pierson-Moskowitz (Stewart, 1987). Divulgado no ano de 1964 este estudo foi feito com o objetivo de caracterizar o mar Atlântico Norte para várias velocidades de vento (figura 3.10) e pode ser descrito pela expressão:

$$S_{\zeta(\omega)} = \frac{0.0081g^2}{\omega^5} \cdot e^{-0.74(\frac{g}{\omega U})^4} \quad (3.11)$$

O valor U da equação é a velocidade do vento medida a 19,5m acima do nível médio do mar, altura a que os anemómetros estavam instalados. A variável g corresponde à aceleração gravítica (m/s^2) e ω à frequência (rad/s).

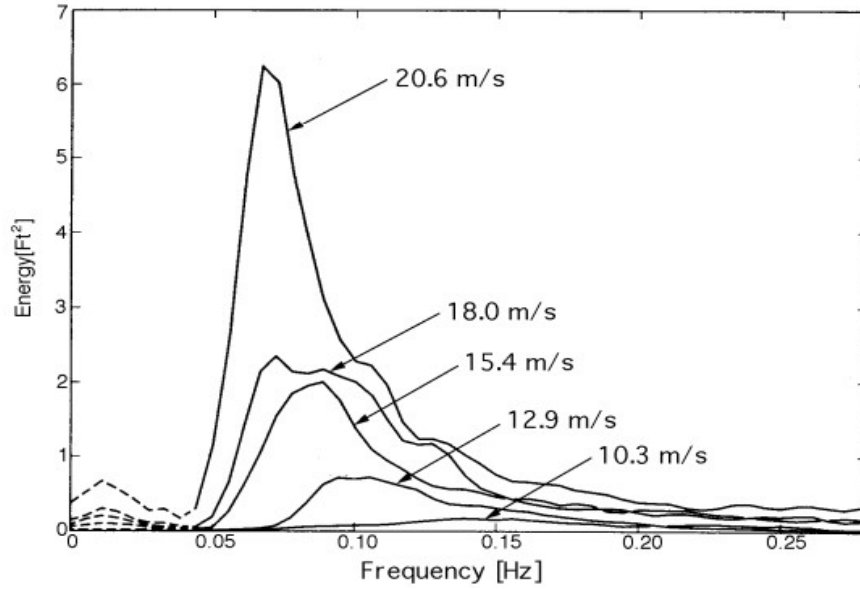


FIGURA 3.10: Espectro de onda Pierson-Moskowitz
 Fonte: Retirado de Stewart, 1987

3.4.4 Espectro de *Bretschneider*

O espectro de Bretschneider pode ser denominado por espectro de Pierson-Moskowitz de dois parâmetros. Este espectro é uma modificação do espectro de Pierson-Moskowitz, em que segundo o ISSC (*International Ship Structures Congress*, o espectro é representado em função da altura significativa de onda, $H_{\frac{1}{3}}$, da frequência máxima, ou de pico ω_m e da frequência das ondas ω (American Bureau of Shipping, 2016). Este espectro é utilizado, tal como o anteriormente apresentado, em mar desenvolvido e a sua expressão é dada por:

$$S(\omega) = \frac{5}{16} \frac{H_{\frac{1}{3}}^2 \omega_m^4}{\omega^5} e^{-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4} \quad (3.12)$$

3.4.5 Espectro *JONSWAP*

O espectro de *JONSWAP* (Joint North Sea Wave Project) é uma versão modificada do espectro de *Pierson-Moskowitz*. Este modelo foi formulado em 1973 por uma cooperação de cientistas dos Estados Unidos, Holanda, Alemanha e Inglaterra (Hasselmann et al., 1973). O objetivo do trabalho era determinar empiricamente o espectro de energia na região apresentada na figura 3.11. Para obter uma elevada densidade de amostras, foram instalados diversos sensores em treze *wave stations* distribuídas espaçadamente a 160 km para Oeste da ilha de Sylt (Norte da Alemanha).

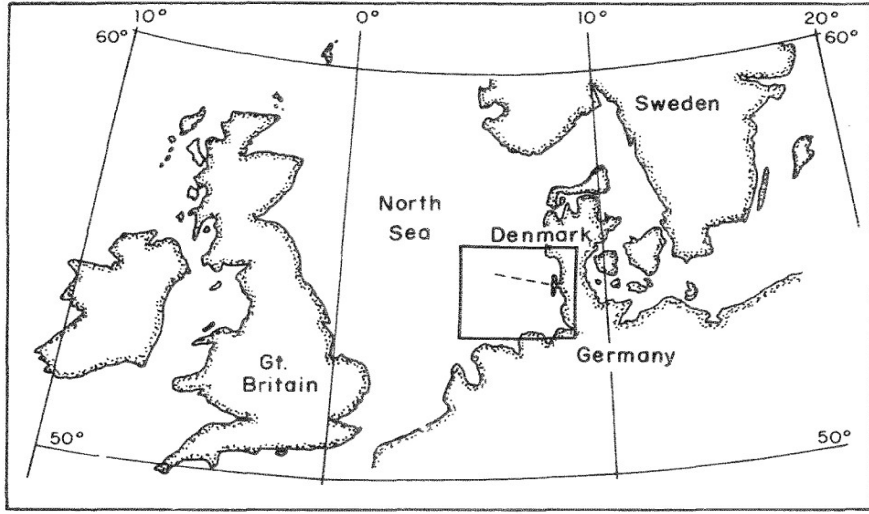


FIGURA 3.11: Área de Estudo- Espectro *JONSWAP*

Fonte: Retirado de Hasselmann et al, 1973

Depois de analisar os dados adquiridos, Hasselmann et al. concluíram que o espectro de ondas inclui interações onda-onda não lineares. Esta descoberta culminou num ajuste ao espectro de *Pierson-Moskowitz*. Como podemos denotar na expressão 3.14 o espectro de *JONSWAP* apresenta um fator de aumento de pico. (Hasselmann et al., 1973)

$$S(\omega) = \frac{\alpha g}{\omega^5} e^{[-\frac{5}{4}(\frac{\omega_m}{\omega})^4]} \gamma^r \quad (3.13)$$

$$r = e^{[-\frac{(\omega - \omega_m)^2}{2\sigma^2 \omega_m^2}]} \quad (3.14)$$

O espectro é caracterizado por cinco parâmetros ω_m , σ_a , σ_b , γ e α , como ilustrado na figura 3.12. A determinação destes parâmetros pode ser consultada no trabalho desenvolvido pelo autor (Hasselmann et al., 1973).

O valor ω_m corresponde à frequência máxima do espectro, α corresponde à constante de Phillips $\alpha = 3.3$. Os restantes parâmetros definem a forma do espectro: γ é a razão entre o valor máximo de S do espectro de *JONSWAP* e do espectro de *Pierson-Moskowitz* e σ assume dois valores, σ_a para $\omega < \omega_m$ e σ_b para $\omega > \omega_m$:

$$\begin{cases} \sigma_a = 0.07 \\ \sigma_b = 0.09 \end{cases} \quad (3.15)$$

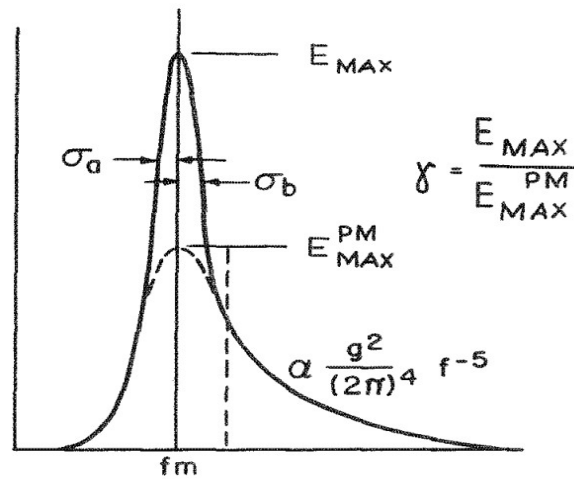


FIGURA 3.12: Parâmetros do Espectro *JONSWAP*

Fonte: Retirado de Hasselmann et al, 1973

3.5 Equações de Movimento do Navio em Ondas Regulares

O estudo da dinâmica do navio sujeito a diversos estados de mar é algo complexo, uma vez que relaciona as interações entre a dinâmica do próprio navio e as forças hidrodinâmicas envolvidas. A previsão do seu comportamento em mares irregulares pode ser feito conhecendo as respostas do navio em ondas regulares de diferentes frequências (Lewis, 1989). Para fazer este estudo é necessário considerar algumas aproximações e linearizar as equações de movimento. Esta análise linear do movimento do navio produz bons resultados em amplas condições de mar e para diversos navios. As equações apresentadas neste subcapítulo seguem a obra *Principles of Naval Architecture* de Lewis (1989).

Considerando que o navio se desloca a uma velocidade constante U_0 , a frequência de encontro entre o navio e as ondas regulares de frequência ω_0 é dado pela expressão 3.16. O valor de μ corresponde ao ângulo entre popa do navio e a direção da onda, ilustrado na figura 3.13.

$$\omega_e = \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} U_0 \cos \mu \quad (3.16)$$

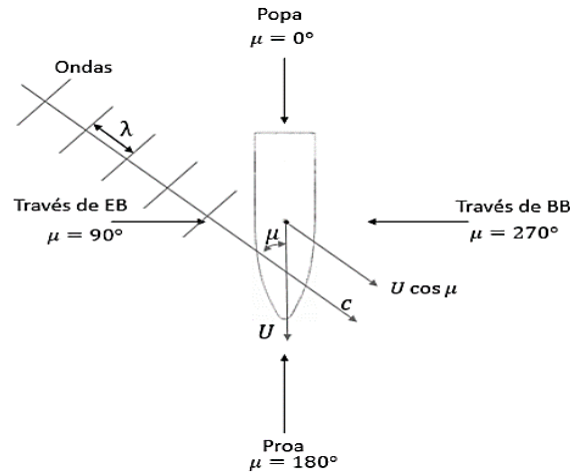


FIGURA 3.13: Ângulo de Incidência

Fonte: Adaptado de Lloyd, 1998

Analisando a equação 3.16 verificamos que, para ondas de proa ($90^\circ < \mu < 270^\circ$) a frequência de encontro é superior à frequência de onda. Em mares de través ($\mu = 90^\circ$ ou 270°) a frequência de encontro é igual à frequência de onda e não é afetada pela velocidade do navio. No caso de mares a ré do través, com ângulos de incidência ($0^\circ < \mu < 90^\circ$ ou $270^\circ < \mu < 360^\circ$) a frequência de encontro é inferior à frequência das ondas. Para elevados valores de ω_0 a frequência de encontro é negativa. A relação entre a frequência de encontro e a proa do navio encontra-se ilustrada na figura 3.14.

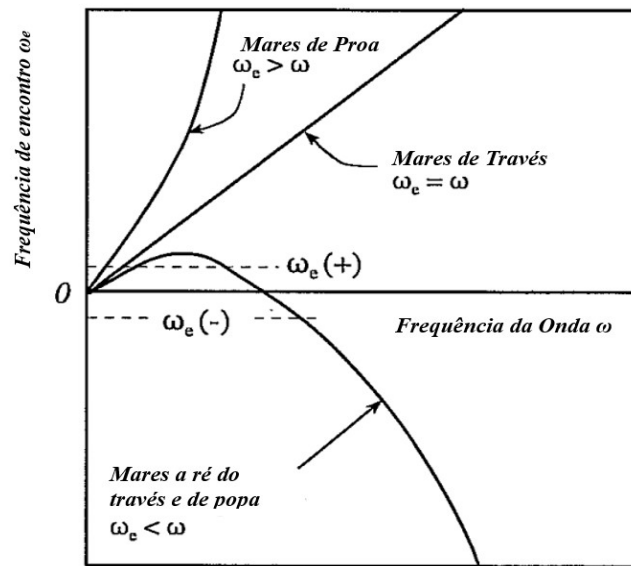


FIGURA 3.14: Frequência de Encontro em relação à proa

Fonte: Adaptado de Lloyd, 1998

A equação de movimento é expressa pela segunda lei de Newton na forma linearizada nos seus seis graus de liberdade e é dada por:

$$\sum_{k=1}^6 \Delta_{jk} \ddot{\eta}_k(t) = F_j(t) \quad (3.17)$$

A matriz Δ_{jk} representada na equação 5.5 é matriz de inércia e tem como componentes a massa do navio, a posição do centro de gravidade e os momentos de inércia. A matriz representada pela equação 5.5, uma vez que o navio é simétrico, apresenta termos nulos. O valor de $\ddot{\eta}_k$ representa as acelerações no modo de excitação k e F_j representa o somatório das forças e momentos que atuam no corpo na direção j . As funções $\ddot{\eta}_k$ e F_j são funções harmônicas no tempo. Ao linearizar a equação 3.17, esta fica reduzida a seis equações, uma para cada grau de movimento. Estas equações encontram-se desenvolvidas no capítulo 3.3 do *Principles of Naval Architecture*.

A resposta do navio dependente do tempo $\eta_j(t)$ é representada por uma sinusoidal na frequência de encontro. Atendendo à teoria linear, as respostas do navio serão diretamente proporcionais à excitação da onda. A resposta complexa é dada pela expressão 3.18, onde $\bar{\eta}_j$ é a amplitude da resposta do navio na direção j :

$$\eta_j(t) = \bar{\eta}_j e^{i\omega_e t} \quad (3.18)$$

O vetor força total representado por F_j , pode ser decomposto pela componente da força gravitacional F_{Gj} e pela componente da força que o fluido exerce sobre o casco F_{Hj} , a esta componente estão associadas as forças hidrodinâmicas e hidrostáticas. As forças hidrostáticas e hidrodinâmicas que atuam sobre o casco nos seus seis graus de liberdade são dados por integração da pressão que o fluido exerce sobre o casco na parte submersa. Na equação 3.19, P representa a pressão que o fluido exerce sobre o casco, n_j é a normal unitária ao casco e S é a área do casco na parte submersa (obras vivas do navio).

$$F_{Hj} = \iint_S P n_j ds \quad (3.19)$$

Considerando que o fluido é invíscido e irrotacional, substituindo na equação 3.19 o valor de P pela equação de Bernoulli obtemos:

$$F_{Hj} = \iint_S \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho (\nabla \Phi \times \nabla \Phi) - \rho g z \right) n_j ds \quad (3.20)$$

Das forças que atuam sobre o casco, as forças hidrostáticas são representadas por F_{HSj}^* , estas dependem dos coeficientes de restituição hidrostática C_{jk} . A forma da matriz generalizada das componentes das forças hidrostáticas resultante é dada pela seguinte expressão:

$$F_{HSj}^* = - \sum_{k=1}^6 C_{jk} \bar{\eta}_j e^{i\omega_e t} \quad (3.21)$$

Para além das forças hidrostáticas, sobre o casco atuam forças hidrodinâmicas que podem ser determinadas resolvendo o integral:

$$F_{Hj} = \rho \iint_S \left(\frac{1}{2} U_0^2 - \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} (\nabla \Phi \times \nabla \Phi) \right) n_j ds \quad (3.22)$$

Quando o navio se desloca a uma velocidade média constante e sujeito a uma oscilação forçada, gera uma radiação de ondas que se propaga para longe das imediações do casco. O potencial das ondas decresce à medida que estas se afastam do casco do navio. Adotando uma aproximação linear para a pressão que o fluido exerce sobre o casco, as forças hidrodinâmicas instáveis $\tilde{F}_{HDj}$ são dadas por:

$$\tilde{F}_{HDj} = -\rho \iint_S n_j \left(i\omega_e - U_0 \frac{\partial}{\partial x} \right) \phi_T e^{i\omega_e t} ds \quad (3.23)$$

O potencial de perturbação dinâmico ϕ_T relaciona-se com potencial da onda incidente ϕ_I , o potencial da onda difratada ϕ_D e o potencial de radiação devido ao movimento unitário na direção j segundo a expressão 3.24:

$$\phi_T = \phi_I + \phi_D + \sum_{j=1}^6 \phi_j \bar{\eta}_j \quad (3.24)$$

As forças hidrodinâmicas variáveis que atuam no navio são compostas pelas forças de excitação na direção j , F_{EXj} e as forças hidrodinâmicas devido ao movimento forçada nos seis graus de liberdade, F_{Rj} .

Tendo em conta as diferentes componentes das forças apresentadas anteriormente obtém-se a equação linearizada do movimento:

$$\sum_{k=1}^6 [-\omega_e^2 (\Delta_{jk} + A_{jk}) + i\omega_e B_{jk} + C_{jk}] \cdot \bar{\eta}_k = F_j^I + F_j^D \quad (3.25)$$

Capítulo 4

Cargas Hidrodinâmicas

O estudo da previsão do comportamento de navios no mar (*Seakeeping*) consiste na obtenção das amplitudes complexas de movimento $\overline{\eta}_k$. Para determinar esta resposta é necessário o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos, coeficientes hidrostáticos e forças de excitação (Balixa, 2021). A equação linearizada do movimento do navio, para os seis graus de liberdade em ondas regulares pode ser resolvida dividindo-a em dois sub-problemas como ilustrado na (figura4.1) (Faltinsen, 1990).

- Sub-problema A: Cálculo das cargas hidrodinâmicas, compostas pelas Forças de Froude-Krylov e de Difração, denominadas por cargas de excitação de ondas (*wave excitation loads*). Determinação das forças e momentos do navio com a estrutura impedida de oscilar e excitada por ondas regulares.
- Sub-problema B: Cálculo das forças e momentos no navio quando este é forçado a oscilar a uma frequência de excitação coincidente com a das ondas. Estas são designadas massa acrescentada, amortecimento e restituição hidrostática.

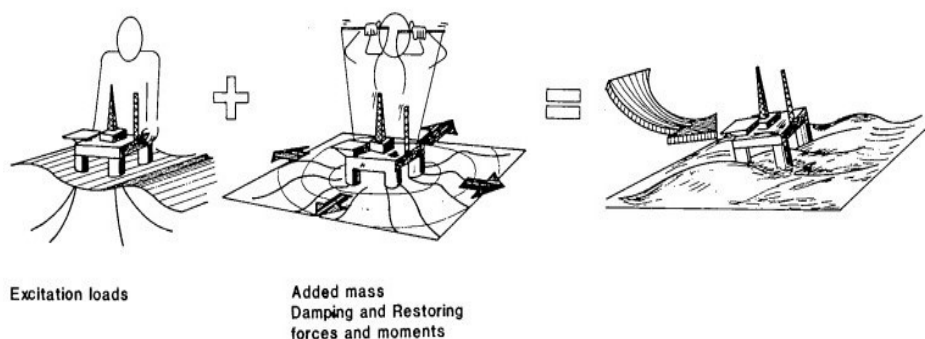


FIGURA 4.1: Sub-Problemas das cargas Hidrodinâmicas

Fonte: Retirado de Faltinsen,1990

A matriz de massa e momentos de inércia, Δ_{jk} , pode ser obtida calculando os valores presentes na matriz representada pela equação 5.5, a força de restituição hidrostática resultante relaciona-se com os coeficientes de restituição hidrostática C_{jk} através da expressão 3.19. As forças de Froude-Krylov representadas por F_j^I são obtidas através da integração direta do potencial das ondas incidentes sobre o casco do navio. A maior dificuldade encontra-se na determinação dos coeficientes de massa acrescentada A_{jk} , de amortecimento B_{jk} e nas forças de difração F_j^D .

4.1 Teoria das Faixas *Strip Theory*

Um dos métodos para a determinação dos coeficientes de massa acrescentada e de amortecimento é o método da Teoria das faixas (Ramujane, 2019). Este é caracterizado por ser um método computacional em que as forças e movimentos presentes num corpo flutuante tridimensional, podem ser calculadas a partir da teoria potencial para uma figura de duas dimensões (Journée, 2001).

A teoria das faixas considera que o navio é representado por um número finito de faixas, ou secções transversais bidimensionais, conectadas rigidamente entre si. Cada um destas faixas deve ter uma forma semelhante ao casco do navio. Os coeficientes hidrodinâmicos de cada faixa são obtidos assumindo que cada uma dessas secções faz parte de um segmento pertencente a um cilindro de comprimento infinito (figura 4.2).

Vários autores fizeram contribuições para o desenvolvimento desta teoria. É de salientar os trabalhos desenvolvidos por Faltinsen (1990), Salvesen et al (1970), Schmitke (1978) e Tasai (1959). Em todos estes trabalhos considerou-se:

- O corpo é rígido a flutuar num fluido ideal (homogéneo, incompressível, irrotacional e sem viscosidade);
- As faixas representam apenas as obras vivas do navio;
- O navio é considerado um corpo esbelto, isto é, o comprimento do navio é muito maior do que a sua boca ou calado e a boca é muito menor do que o comprimento de onda;
- O casco é rígido de forma que não ocorra a flexão da estrutura;
- Os movimentos são pequenos;
- O campo de escoamento em cada faixa transversal do navio pode ser aproximado pelo escoamento bidimensional na respetiva faixa.

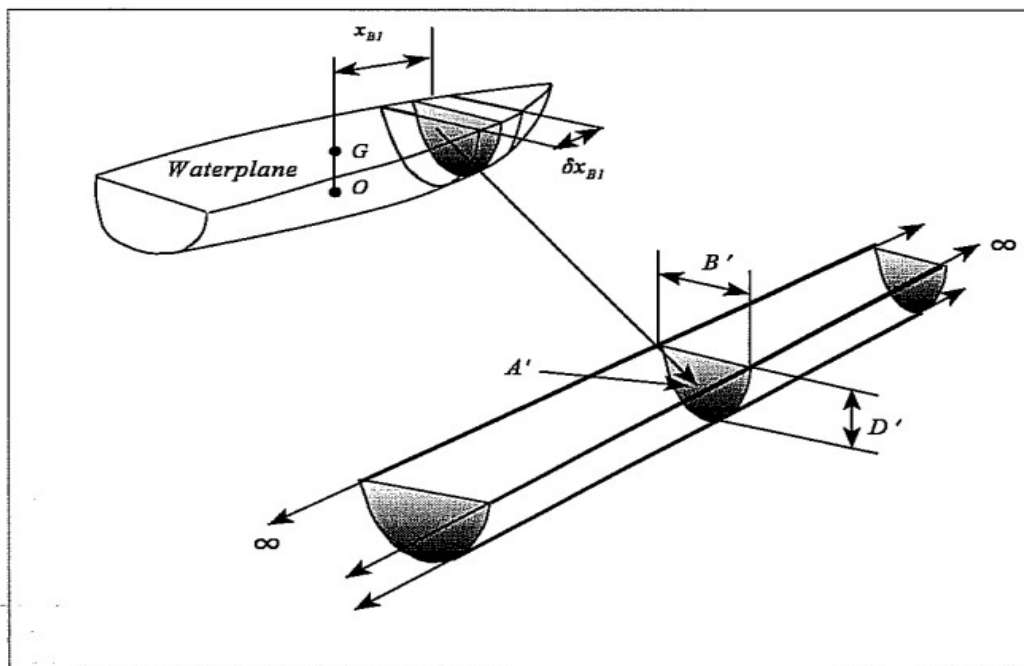


FIGURA 4.2: Teoria das Faixas - ilustração
Fonte: Retirado de Lloyd,1990

4.1.1 Mapeamento conforme (dois parâmetros)

Através da Teoria da Faixas é possível calcular o potencial da velocidade do fluido ao longo de todas as secções transversais bidimensionais de um navio. No entanto para determinar os coeficientes de massa acrescentada e os coeficientes de amortecimento um dos métodos utilizados é a Transformação Conforme (Lloyd, 1998). O mapeamento conforme é utilizado para alterar a representação da secção transversal de um navio, para um círculo cuja sua forma de expansão multipolar do potencial é conhecida (Ursell, 1949). Este autor derivou o potencial de velocidade em torno de um cilindro para os casos de deriva, arfagem e balanço. Ao utilizarmos as soluções obtidas por Ursell (1949) o problema do mapeamento conforme, culmina na determinação dos parâmetros de transformação que mapeiam a secção arbitrária do navio num círculo unitário. Uma grande vantagem na utilização deste método é a seguinte, o potencial de velocidade do fluido em torno de uma secção transversal com forma arbitrária num plano complexo pode ser derivado da secção circular mais conveniente (Journée, 2001).

Um dos métodos utilizados por Ferreira (2018), foi o método de mapeamento conforme de dois parâmetros denominado também pelo Método da Transformação de Lewis. A designação de mapeamento conforme de dois parâmetros deve-se ao facto de o método de Lewis basear-se apenas em dois parâmetros:

- O coeficiente a área da secção $\sigma = \frac{A}{BD}$
- Relação Boca/Calado $H = \frac{B}{D}$

Os valores A , B e D , representam a área submersa (m), a boca submersa (m) e o calado da secção (m), respetivamente. Embora não existam limites para o valor da relação boca/calado, há determinados intervalos em que o valor do coeficiente da área da secção é permitido, com vista a que as formas de Lewis não sejam excessivamente deformadas. Estes intervalos são definidos pela equação 4.1 para $H \leq 2$ e pela equação 4.2 para $H \geq 2$:

$$\frac{3\pi}{64}(4 - H) \leq \sigma \leq \frac{3\pi}{256}(24 + H) \quad (4.1)$$

$$\frac{3\pi}{16} \frac{(H - 1)}{H} \leq \sigma \leq \frac{3\pi}{64} \frac{(1 + 6H)}{H} \quad (4.2)$$

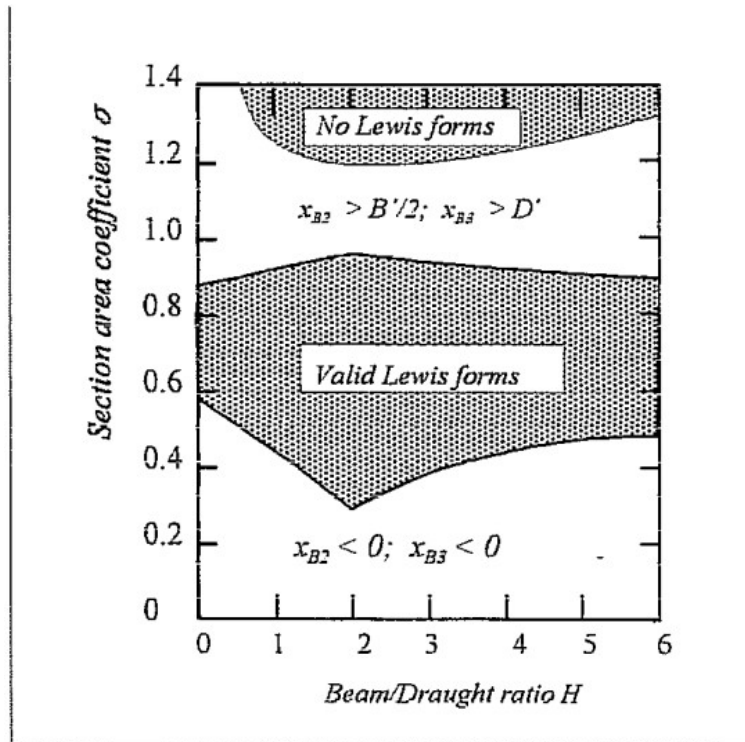


FIGURA 4.3: Intervalos permitidos das formas de Lewis

Fonte: Retirado de Lloyd,1998

O Método de Mapeamento Conforme, apesar de ser computacionalmente mais rápido, este apresenta algumas dificuldades na apresentação e estudo dos coeficientes hidrodinâmicos nas secções que se situam na proa do navio. No entanto, para estudos dimensionais preliminares, torna-se um método útil, uma vez que apenas é necessário ter em conta a boca, o calado e área das obras vivas da respetiva secção.

4.1.2 Mapeamento Conforme Multiparâmetro

Um outro método utilizado para que a função potencial seja "transformada", adequadamente entre os domínios de integração (com preservação das condições de fronteira e a dinâmica do escoamento), é o método da transformação conforme multiparâmetro.

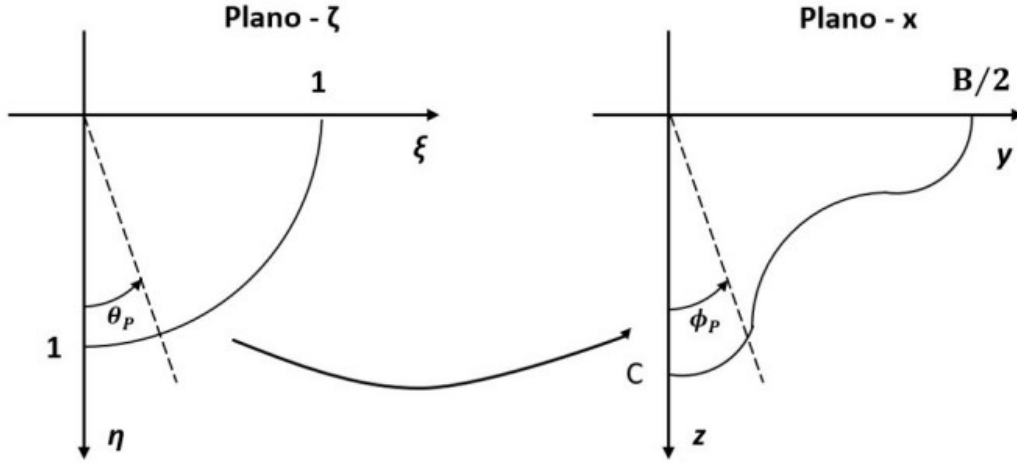


FIGURA 4.4: Relação da Transformação Conforme entre dois planos
Fonte: Retirado de Ramujane, 2019

Como representado na figura 4.4 a técnica apresentada descreve a transformação das coordenadas de um círculo unitário no plano de referência para coordenadas de secções arbitrárias (Ramujane, 2019), através das expressões em série:

$$y(\theta) = a_0(\sin(\theta) + \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} a_{2n-1} \sin(2n-1)\theta)) \quad (4.3)$$

$$z(\theta) = a_0(\cos(\theta) + \sum_{n=1}^N (-1)^n a_{2n-1} \cos(2n-1)\theta)) \quad (4.4)$$

Conhecendo os valores das coordenadas y e z correspondentes aos pontos da secção real do navio é possível calcular os vários coeficientes a_0, a_1, a_3, a_N . Ao contrário do Método de Lewis, as equações são não lineares, não podendo as mesmas serem resolvidas diretamente, sendo necessário um processo iterativo. A determinação dos coeficientes de transformação baseia-se na minimização do quadrado da

norma Euclidiana do resíduo. O método utilizado por Ramujane (2019) denomina-se método de recozimento simulado (*simulated annealing*), mais detalhes podem ser consultados no trabalho desenvolvido pelo autor.

4.2 Coeficientes de Massa Acrescentada e Amortecimento

O método de Mapeamento Conforme Multiparâmetro é a técnica de mapeamento mais precisa uma vez que utiliza um maior número de coeficientes. Após o mapeamento das secções transversais, a determinação dos coeficientes de massa acrescentada e de amortecimento, neste trabalho foi feita por Ramujane (2019) aplicando o método de Tasai-Porter.

Os coeficientes hidrodinâmicos 2D, massa acrescentada e amortecimento em Arfagem (a_{33}, b_{33}), Deriva (a_{22}, b_{22}), Balanço (a_{44}, b_{44}), Balanço devido a Deriva (a_{42}, b_{42}) e Deriva devido ao Balanço (a_{24}, b_{24}), seguem as equações desenvolvidas na teoria potencial de Tasai (1959).

$$a_{33} = \frac{\rho B^2}{2} \left[\frac{M_0 B + N_0 A}{A^2 + B^2} \right] \left[\frac{kg}{m} \right] \quad (4.5)$$

$$b_{33} = \frac{\rho B^2}{2} \left[\frac{M_0 A - N_0 B}{A^2 + B^2} \omega \right] \left[\frac{Ns}{m^2} \right] \quad (4.6)$$

$$a_{22} = \frac{\rho B^2}{2} \left[\frac{M_0 p_0 + N_0 q_0}{p_0^2 + q_0^2} \right] \left[\frac{Kg}{m} \right] \quad (4.7)$$

$$b_{22} = \frac{\rho B^2}{2} \left[\frac{M_0 p_0 - N_0 q_0}{p_0^2 + q_0^2} \omega \right] [Ns] \quad (4.8)$$

$$a_{42} = -\frac{\rho B^3}{2} \left[\frac{Y_r q_0 + X_r p_0}{p_0^2 + q_0^2} \right] [Ns^2] \quad (4.9)$$

$$b_{42} = -\frac{\rho B^3}{2} \left[\frac{Y_r p_0 - X_r q_0}{p_0^2 + q_0^2} \omega \right] [Ns] \quad (4.10)$$

$$a_{44} = \frac{\rho B^4}{8} \left[\frac{Y_r q_0 + X_r p_0}{p_0^2 + q_0^2} \right] [kgm] \quad (4.11)$$

$$b_{44} = \frac{\rho B^4 \pi^2}{64} \left[\frac{\omega}{p_0^2 + q_0^2} \right] \left[\frac{Ns}{rad} \right] \quad (4.12)$$

$$a_{24} = -\frac{\rho B^3}{8} \left[\frac{M_0 q_0 + N_0 p_0}{p_0^2 + q_0^2} \right] \left[\frac{Ns^2}{radm} \right] \quad (4.13)$$

$$b_{24} = -\frac{\rho B^3}{8} \left[\frac{M_0 p_0 - N_0 q_0}{p_0^2 + q_0^2} \omega \right] \left[\frac{Ns}{radm} \right] \quad (4.14)$$

As expressões para o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos locais, encontram-se em detalhe no Apêndice A do trabalho desenvolvido por Ramujane (2019). O cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos globais são calculados a partir das expressões apresentadas no Apêndice A retiradas da Tabela 13 da Secção 3.4 do Capítulo 3 do livro de Lewis (1989).

4.3 Coeficientes de Restituição

Os coeficientes de restituição são forças hidrostáticas responsáveis pelo retorno do navio à sua posição de equilíbrio após uma perturbação. Os valores C_{jk} correspondem à força que atua no navio na direção j considerando o movimento k . Exceto os valores apresentados nas equações a baixo, os restantes coeficientes são nulos, $C_{jk} = 0$ (Lewis, 1989). Os coeficientes C_{33}, C_{35} e C_{53} são determinados a partir das equações 4.15 e 4.16 onde a constante g representa a aceleração gravítica, (m/s^2), ρ é a densidade do fluido, (kg/m^3) e $\int_L B(x)dx$ é a área de flutuação.

$$C_{33} = \rho g \int B(x)dx \quad (4.15)$$

$$C_{35} = C_{53} = -\rho g \int xB(x)dx \quad (4.16)$$

Nas expressões 4.17 e 4.18 os valores $\overline{GM_T}, \overline{GM_L}, LCF, S$ e ∇ correspondem à altura metacêntrica transversal, à altura metacêntrica longitudinal, ao centro de flutuação (centro geométrico da área de flutuação), à área de flutuação e ao volume de carena.

$$C_{44} = \rho g \nabla \overline{GM_T} \quad (4.17)$$

$$C_{55} = \rho g \nabla \overline{GM_L} + LCF^2 C_{33} \quad (4.18)$$

Na maioria dos navios a posição do centro de gravidade e do centro de impulsão têm uma diferença pequena comparando com o comprimento do navio. Por esta razão o valor do coeficiente de restituição C_{55} pode ser dado por:

$$C_{55} = \rho g S_{11} = \rho g \int x^2 B(x) dx \quad (4.19)$$

O primeiro e segundo momento de área em relação ao eixo dos y , da área de flutuação podem ser determinados recorrendo aos integrais ao longo do comprimento do navio, representados nas equações 4.20 e 4.21, respetivamente:

$$S_1 = \int_L x B(x) dx \quad (4.20)$$

$$S_{11} = \int_L x^2 B(x) dx \quad (4.21)$$

Determinando os coeficientes de restituição é possível construir a matriz 5.8 apresentada no Capítulo 5 do trabalho de Martinussen (2011) (Martinussen, 2011).

4.4 Forças de Froude-Krylov e de Difração

Considerando a equação 3.23, substituindo o potencial de perturbação dinâmico, ϕ_T pela expressão 3.24 obtemos dois termos das forças hidrodinâmicas variáveis, $\tilde{F}_{HDj}$. Sendo F_{EXj} as forças de excitação na direção j e F_{Rj} as forças hidrodinâmicas na direção j devido ao movimento forçado nos seis graus de liberdade.

$$\tilde{F}_{HDj} = F_{EXj} + F_{Rj} \quad (4.22)$$

As forças dinâmicas devido ao movimento forçado dependem dos coeficientes de massa acrescentada, A_{jk} e os coeficientes de amortecimento, B_{jk} . Quanto às forças de excitação estas são compostas por duas componentes, a força de excitação devido à incidência das ondas F_j^I e força de excitação devido à difração das ondas F_j^D (Lewis,

1989). As forças de excitação devido à incidência das ondas são denominadas por forças de Froude-Krylov. Estas quando o comprimento de onda é muito maior que o comprimento do navio, podem ser usadas para aproximar as forças de excitação totais. Quando os comprimentos de onda são menores, as forças de difração são mais significativas pelo que esta aproximação se torna imprecisa. A força total de excitação é então definida pela soma:

$$F_{EXj} = F_j^I + F_j^D \quad (4.23)$$

As forças de Froude-Krylov representam a integração da pressão ao longo da superfície do casco, que existiria na onda incidente se o navio não estivesse presente. As forças de Froude-Krylov pode ser determinadas segundo o integral:

$$F_j^I = -\rho \iint_S n_j \left(i\omega_e - U_0 \frac{\partial}{\partial x} \right) \phi_I ds \quad (4.24)$$

A amplitude complexa da força de excitação devido à difração das ondas F_j^D , denomina-se força de difração e é determinada pela expressão 4.25. A difração ocorre quando as ondas incidem nas obras vivas do navio. Quando estas encontram o casco, parte da energia da onda é transmitida e parte é refletida. A difração ocorre quando a onda contorna o navio e se propaga em seu torno, este fenómeno é mais evidente quando o comprimento de onda é da mesma ordem de grandeza ou maior do que as dimensões do navio.

$$F_j^D = -\rho \iint_S n_j \left(i\omega_e - U_0 \frac{\partial}{\partial x} \right) \phi_D ds \quad (4.25)$$

A dedução do cálculo das forças de Froude-Krylov e de Difração seccionais encontra-se descrita no subcapítulo do trabalho desenvolvido por Nuno (2021), bem como o cálculo do potencial da velocidade, aspeto importante na determinação das forças de Difração.

Recorrendo à Teoria das Faixas e tendo por base a Transformação Conforme Multiparâmetro a força de Froude-Krylov seccional é dada por:

$$f_j(x) = g e^{-ikx \cos \mu} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} N_j e^{iky \sin \mu} e^{kz} \left\| \left(\frac{dy}{d\theta}, \frac{dz}{d\theta} \right) \right\| d\theta \quad (4.26)$$

onde k é o número de onda dada por $k = \omega^2/g$ (rad²/m), μ é o ângulo de incidência (rad) e N_j são as normais generalizadas bidimensionais no plano yz .

A força de Difração seccional depende do potencial de velocidade ϕ_j , da frequência da onda ω_0 e dos vetores normais N_2 e N_3 :

$$h_j(x) = \omega_0 e^{-ikx \cos \mu} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} (iN_3 - N_2 \sin \mu) e^{iky \sin \mu} e^{kz} \phi_j(1, \theta) \left\| \left(\frac{dy}{d\theta}, \frac{dz}{d\theta} \right) \right\| d\theta \quad (4.27)$$

Determinadas as forças de Froude-Krylov e de Difração seccionais, é possível determinar a força total de excitação nos diferentes graus de liberdade:

$$F_j^I = \rho \zeta_0 \int_L f_j(x) dx \quad j = 2, 3, 4 \quad (4.28)$$

$$F_5^I = -\rho \zeta_0 \int_L x f_3(x) dx \quad (4.29)$$

$$F_6^I = \rho \zeta_0 \int_L x f_2(x) dx \quad (4.30)$$

$$F_j^D = \rho \zeta_0 \int_L h_j(x) dx + \rho \zeta_0 \frac{U}{i\omega_e} h_j^A \quad j = 2, 3, 4 \quad (4.31)$$

$$F_5^D = -\rho \zeta_0 \int_L \left[x h_3(x) + \frac{U}{i\omega_e} h_3(x) \right] dx - \rho \zeta_0 \frac{U}{i\omega_e} x_A h_3^A \quad (4.32)$$

$$F_6^D = \rho \zeta_0 \int_L \left[x h_2(x) + \frac{U}{i\omega_e} h_2(x) \right] dx + \rho \zeta_0 \frac{U}{i\omega_e} x_A h_2^A \quad (4.33)$$

Nestas expressões x é a coordenada do eixo x da faixa, e h_j^A refere-se a $h_j(x)$ calculado no painel de popa, uma vez que este influencia o cálculo final das forças de excitação.

Capítulo 5

Response Amplitude Operators

5.1 Formulação Teórica

Com a resolução do problema da radiação, representado pelo cálculo dos coeficientes de massa acrescentada e amortecimento por Ferreira (2018) e Ramujane (2019), e o problema das forças de excitação, representado pelas forças de Froude-Krylov e de Difração por Nuno (2021), é possível a identificação e cálculo dos *Response Amplitude Operators* (RAO's).

Ao assumir a teoria linear, podemos calcular a função transferência no domínio da frequência. Os RAO's fornecem-nos a amplitude da resposta oscilatória de um navio quando este é excitado por uma onda regular de amplitude unitária. Para cada grau de liberdade existe uma resposta associada (Denis & Pierson, 1953).

Para encontrar a função transferência, precisamos de determinar a amplitude estacionária do movimento. Este resultado pode ser obtido a partir da solução da equação linearizada do movimento (Martinussen, 2011). Se assumirmos um movimento oscilatório harmónico temos:

$$\eta_j = \overline{\eta_j} \cdot e^{i\omega_e t} \quad (5.1)$$

$$\dot{\eta}_j = i\omega_e \overline{\eta_j} \cdot e^{i\omega_e t} \quad (5.2)$$

$$\ddot{\eta}_j = -\omega_e^2 \overline{\eta_j} \cdot e^{i\omega_e t} \quad (5.3)$$

Uma vez que são seis graus de movimento, mas que um deles é o avanço, as equações de movimento podem ser expressas em forma de matriz:

$$\eta = \begin{bmatrix} \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

Para a resolução das equações do movimento, é necessário considerar as matrizes correspondentes aos coeficientes de massa acrescentada, os de amortecimento e os coeficientes de restituição. A matriz massa-inércia designada por *mass matrix* segundo Lewis (1989) é dada por:

$$M = \begin{bmatrix} M & 0 & -M\bar{z}_g & 0 & M\bar{x}_g \\ 0 & M & 0 & -M\bar{x}_g & 0 \\ -M\bar{z}_g & 0 & I_{44} & 0 & -I_{46} \\ 0 & -M\bar{x}_g & 0 & I_{55} & 0 \\ M\bar{x}_g & 0 & -I_{46} & 0 & I_{66} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

O valor de M corresponde à massa total do navio, I_{jj} para $j = 4, 5, 6$ são os momentos de inércia em torno dos eixos $\bar{x}$, $\bar{y}$ e $\bar{z}$, respetivamente e I_{46} é o produto de inércia entre os graus de liberdade balanço-guinada que por sua vez é igual a I_{64} . O centro de gravidade do navio no sistema não inercial é representado por $(\bar{x}_g, 0, \bar{z}_g)$.

As matrizes dos coeficientes de massa acrescentada e de amortecimento são dadas por Salvesen (1970):

$$A = \begin{bmatrix} A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} \\ 0 & A_{33} & 0 & A_{35} & 0 \\ A_{42} & 0 & A_{44} & 0 & A_{46} \\ 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ A_{62} & 0 & A_{46} & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

$$B = \begin{bmatrix} B_{22} & 0 & B_{24} & 0 & B_{26} \\ 0 & B_{33} & 0 & B_{35} & 0 \\ B_{42} & 0 & B_{44} & 0 & B_{46} \\ 0 & B_{53} & 0 & B_{55} & 0 \\ B_{62} & 0 & B_{46} & 0 & B_{66} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

A obtenção destes coeficientes pode ser feita segundo os métodos apresentados pelos autores Ramujane (2019), Ferreira (2018) e Martinussen (2011). Os coeficientes de restituição podem ser obtidos a partir das equações apresentadas no Capítulo 2 de Martinussen (2011).

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{33} & 0 & C_{35} & 0 \\ 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & C_{53} & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

A soma das Forças de Froude-Krylov e de Difração, dá-nos a força de excitação. Estas forças podem ser apresentadas na forma de matriz e foram calculadas por Nuno (2021) e Martinussen (2011).

$$F = \begin{bmatrix} F_2 \\ F_3 \\ F_4 \\ F_5 \\ F_6 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Considerando a equação linearizado do movimento:

$$[-\omega_e^2(M + A) + i\omega_e B + C]\bar{\eta}_j \cdot e^{i\omega_e t} = F e^{i\omega_e t} \quad (5.10)$$

A matriz complexa da resposta, no domínio da frequência é dado pela equação 5.11:

$$\bar{\eta}_j = H(\omega_e)F(\omega_e) \quad (5.11)$$

Em que $H(\omega_e)$ é definida pela expressão 5.12 e representa a inversa da matriz que, na equação linearizada do movimento, multiplica pelo vetor coluna dos

diferentes graus de movimento:

$$H(\omega_e) = [-\omega_e^2(M + A) + i\omega_e B + C]^{-1} \quad (5.12)$$

Tipicamente as curvas de resposta no caso da arfagem e de cabeceio são representadas segundo as expressões 5.13 e 5.14, (Belga et al., 2018). O módulo das expressões complexas, $|\Phi_{\eta_3, \eta_5}|$, conhecidas por funções de transferência, são denominadas por *Response Amplitude Operators* (RAO).

$$\Phi_{\eta_3}(\omega) = \frac{\eta_3}{\zeta_a} \quad (5.13)$$

$$\Phi_{\eta_5}(\omega) = \frac{\eta_5}{ik\zeta_a} \quad (5.14)$$

5.2 Finalidade dos *Response Amplitude Operators*

A determinação da resposta do navio na sua fase de projeto representa um grande desafio, no entanto o desempenho do navio em qualquer via marítima deve ser adequado em função das condições de operação. Segundo Lewis (1989) a avaliação de desempenho do comportamento do navio no mar depende de quatro fatores:

- **Missão:** Cada navio tem uma missão específica, bem como condições de carregamento adequadas ao seu tipo de missão. Em função da sua missão, os navios podem ser divididos em três categorias:
 - Transporte de pessoas ou de mercadorias;
 - Navios militares que integrem missões de busca e salvamento, operações navais e missões humanitárias;
 - Navios de comércio, nomeadamente os navios de pesca e os de exploração de petróleo e de minérios.
- **Ambiente:** A ondulação, o vento e as características do oceano são definidas em função da localização e da hora em que o navio vai operar.
- **Resposta do navio:** A resposta do navio é obtida em função do estado do mar, da velocidade do navio e da proa, seja em águas calmas ou agitadas.

- **Seakeeping performance criteria:** Estes são elementos chave no desenvolvimento de uma metodologia para avaliar o desempenho operacional de um navio e perceber se, com os valores limites prescritos as missões podem ou não ser realizadas.

Segundo Lewis (1989) os *Seakeeping performance criteria* encontram-se divididos por categorias:

- Amplitudes de movimento, deslocamentos absolutos, ângulos de rotação, inclinação e de guinada;
- Velocidades e acelerações verticais, transversais e longitudinais em relação à terra;
- Deslocamentos verticais relativos e velocidades em locais específicos da plataforma em relação à superfície do oceano;
- Movimentos relativos entre o navio e aeronaves.

A tabela representada na figura 5.1 para além dos *Seakeeping performance criteria* ilustra também os elementos do navio afetados.

No.	Seaway Performance Criteria	Affected Elements	Performance Degradations
(a) Absolute Motion Amplitudes			
1. Roll angle	{	People, Mission and Platform Systems	{ Personnel injury, reduced task proficiency, and mission and hull system degradation.
2. Pitch angle			
3. Vertical displacement of points on flight deck	{	{ People Mission Systems	{ Injury to personnel handling aircraft. Inability to safely launch or recover aircraft.
(b) Absolute Velocities and Accelerations			
4. Vertical acceleration	{	People and Mission Systems	{ Personnel fatigue, reduced task proficiency and mission system degradation
5. Lateral acceleration			
6. Motion sickness incidence (MSI)		People	Reduced task proficiency.
7. Slam acceleration (vibratory, vertical)		People, Mission and Platform Systems	{ Personnel fatigue, injury, reduced task proficiency and mission and hull system degradation. Preclusion of towed sonar operation.
(c) Motions Relative to Sea			
8. Frequency of slamming. (Simultaneous bow reimmersion & exceedance of a threshold vertical velocity.)	{	{ Mission Systems Platform System	{ Hull Whipping stresses and damage to sensors on the masts Slamming damage to bottom forward hull structure.
9. Frequency of emergence of a sonar dome		Mission Systems	Reduced efficiency of sonar.
10. Frequency of deck wetness (submergence of the main deck forward.)	{	{ People Mission Systems	{ Injury or drowning of personnel. Damage to deck-mounted equipment.
11. Probability of propeller emergence		Platform System	Damage to the main propulsion plant.
(d) Motions relative to aircraft			
12. Vertical velocity of aircraft relative to the flight deck		Mission Systems	Damage to aircraft landing gear and/or loss of aircraft.

FIGURA 5.1: Doze exemplos de *Seakeeping Performance Criteria*

Fonte: Retirado de Lewis,1989

Por exemplo, a determinação do movimento na proa do navio permite avaliar com que frequência o sonar sai da água e que por consequência afeta a sua eficiência enquanto equipamento. Os valores reais de todas as respostas presentes na tabela, exceto aquelas que envolvem os movimentos de outros corpos (como no critério 12), são totalmente dependentes dos movimentos do navio no mar.

Os limites prescritos para estes critérios são em grande parte valores obtidos de forma empírica por parte daqueles que estipulam os requisitos operacionais para um navio. Cada um dos valores prescritos são vistos como um limite operacional médio e razoável, tomando em consideração:

- **Pessoal**
 - Conforto
 - *Motion Sickness*
 - Fadiga do pessoal
 - Cumprimento da tarefa
 - Segurança
- **Carga útil do navio**
 - Descolagem ou aterragem de helicópteros
 - Movimentação de carga
- **Navio**
 - Danos no casco
 - Danos no convés
 - Danos nos sistemas
 - Eficiência dos sistemas
 - Sistema de propulsão

Os valores relacionados com o pessoal e com a carga útil do navio, podem ser independentes do mar, do vento e das condições meteorológicas. Muitos dependem também da missão do navio, da sua duração e da experiência da guarnição. Os limites encontram-se descritos na tabela 20 da secção 7 do *Principles of Naval Architecture* de Lewis (1989), muitos deles devem ser considerados como provisórios e sujeitos a revisão.

5.2.1 Publicação NATO - STANAG 4154

A publicação STANAG 4154 incorpora os critérios e limites para o comportamento do navio no mar. Os navios militares praticam diversas missões em função do seu tipo. São consideradas operações navais o trânsito e patrulha, a guerra anti-submarina, a guerra anti-aérea, a guerra de superfície e a guerra anti-minas. Para além destas missões os navios da marinha realizam atividades de suporte, nomeadamente operações com aeronaves, reabastecimento no mar, carregamento de armas e ações de manutenção.

Para cada uma destas missões, os critérios devem ser definidos apropriadamente em função das atividades realizadas. Por exemplo um navio de patrulha oceânica, necessita de navegar a uma grande velocidade para perseguir um alvo inimigo, ao saber a resposta do navio a um determinado estado de mar, é possível aconselhar uma velocidade que seja viável para essa operação. Para além disso um navio de patrulha opera com semi-rígidas e efetua, em caso de emergência combate a sinistros a bordo, desta forma os critérios para estas situações devem ser definidos apropriadamente.

Os critérios encontram-se divididos em três grupos, os critérios da resposta ao movimento, os critérios derivados da resposta e os outros. A determinação dos *Response Amplitude Operators* é um dos métodos utilizados para a formulação de critérios da resposta ao movimento. Estes critérios encontram-se definidos para determinadas operações que o navio realize. No caso de um reabastecimento a partir de um helicóptero, a figura 5.2 apresenta os valores limites.

Limiting Factor	Performance Limitations		
	Motion	Limit*	Location
Helicopter	Relative Wind	$\pm 30^\circ$ off head seas, 15-30 kts	
Helicopter-to-ship	Vertical Displacement	0.7m	VERTREP Station
	Vertical Velocity	1.05m/sec	VERTREP Station
Equipment: missile dolly slip angle	Roll	1.6°	
	Pitch	1.6°	

FIGURA 5.2: Critérios para reabastecimento vertical
Fonte: STANAG 4154

Capítulo 6

Desenvolvimento da Ferramenta de Cálculo

6.1 Programação da Interface Gráfica

6.1.1 Ferramenta de Mapeamento Conforme Multiparâmetro

As secções transversais de um navio nem sempre são caracterizadas por um número de coordenadas que permita efetuar o seu mapeamento recorrendo à transformação Conforme Multiparâmetro. Para obter os coeficientes de mapeamento $a_0, a_1 \dots a_N$ são necessários vários pontos representados por coordenadas y e z . As secções transversais das fragatas da classe Vasco da Gama podem ser representadas segundo um ficheiro de coordenadas, como ilustrado no Apêndice B.

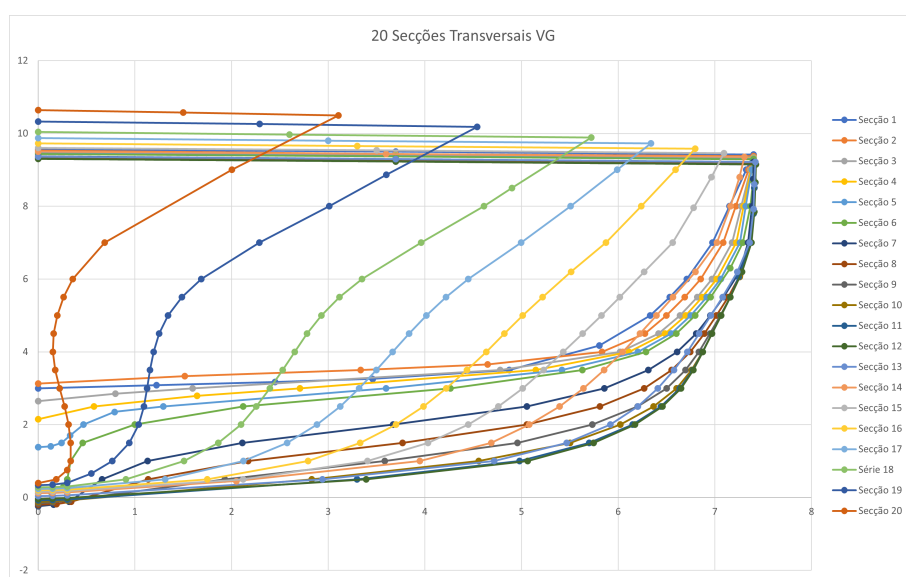


FIGURA 6.1: Secções transversais reais

Ao analisar a figura 6.1, observamos que, para o calado utilizado neste trabalho (4.08m), a representação das secções transversais reais é realizada por poucos pontos. O algoritmo implementado no interface gráfico ilustrado na figura 6.2 utiliza pontos reais da secção transversal e, através de um processo de interpolação, representa a secção por um número de pontos definidos pelo utilizador.

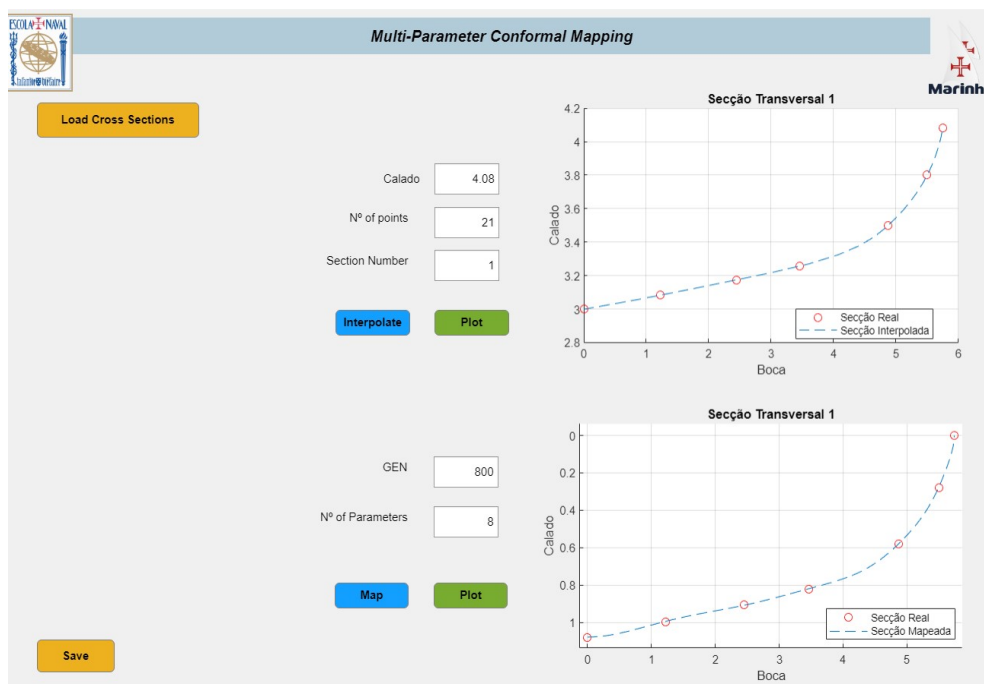


FIGURA 6.2: Interface Gráfica - Mapeamento Conforme Multiparâmetro

O programa elaborado apresenta as seguintes capacidades:

- Definir o calado e o número de pontos da secção que queremos representar;
- Definir o número de parâmetros e de gerações para efetuar o Mapeamento Conforme Multiparâmetro;
- Representação 2D da secção transversal em estudo. Representando a secção real, a interpolada e mapeada;
- Capacidade de gravar os resultados obtidos, nomeadamente as coordenadas das secções transversais interpoladas e os coeficientes de mapeamento que caracterizam a secção estudada.

A obtenção dos coeficientes de Mapeamento Conforme Multiparâmetro é feita a partir do Método de Recozimento Simulado. As secções reais, não são todas representadas pelo mesmo número de parâmetros.

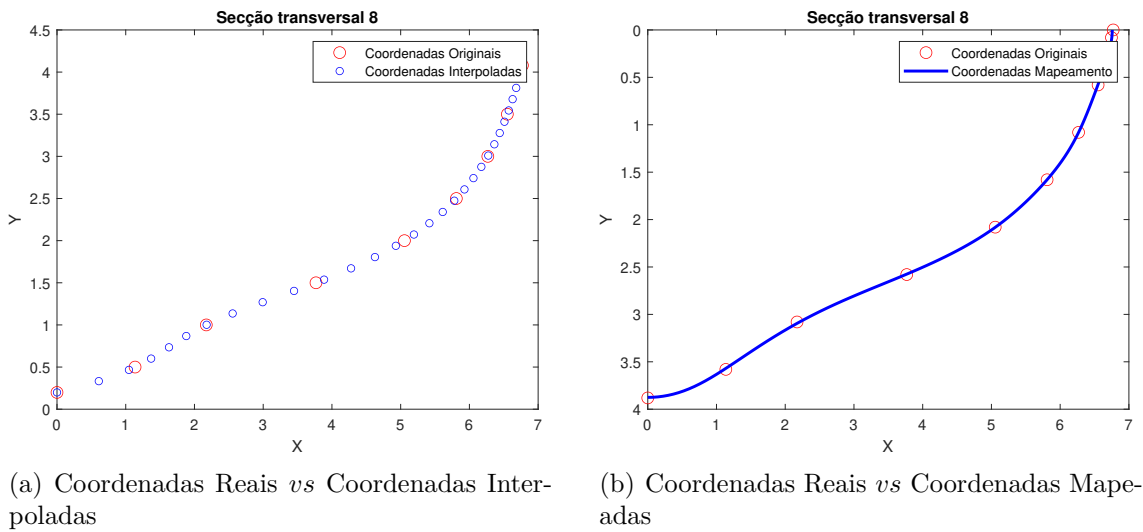


FIGURA 6.3: Secção transversal - Fragata da Classe Vasco da Gama

Importa referir que o número de parâmetros correto deve ser o maior número que, o seu mapeamento resulte numa representação mais aproximada da secção real (Ramujane, 2019). A figura 6.3 representa uma secção transversal do casco da Fragata Vasco da Gama aplicando 9 parâmetros de mapeamento conforme.

Após determinados os coeficientes de Mapeamento Conforme Multiparâmetro de cada secção transversal, é possível efetuar a representação do casco do navio.

Secções Transversais MCM- Fragata da Classe Vasco da Gama

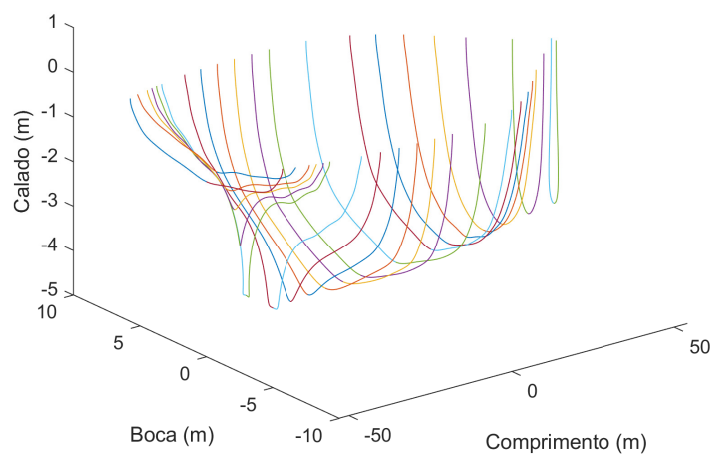


FIGURA 6.4: Representação do casco do navio do tipo fragata da classe Vasco da Gama

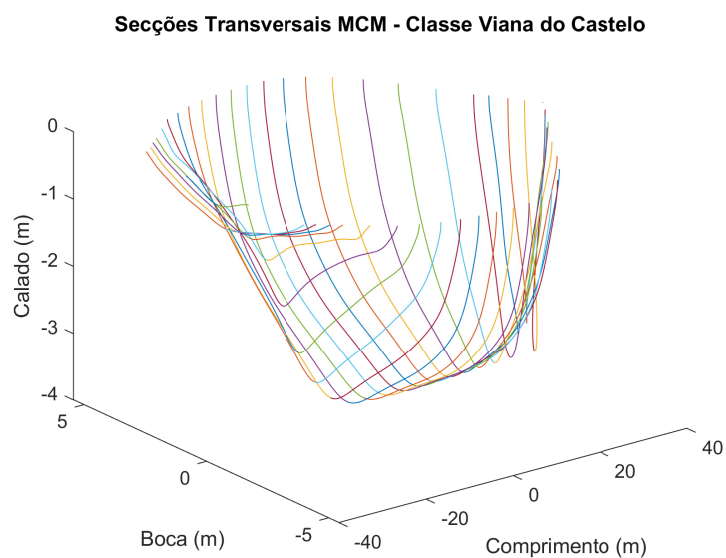


FIGURA 6.5: Representação do casco do navio da classe Viana do Castelo

No caso dos Navio de Patrulha Oceânica as secções transversais mais a vante têm um bolbo imerso bastante saliente (figura 6.6), pelo que a sua representação através do Mapeamento Conforme Multiparâmetro apresenta pouco rigor. Segundo Journée Adegeest (2003), as técnicas de Mapeamento Conforme são inválidas para secções transversais que apresentem bolbos e estabilizadores para além disso esta técnica pode falhar para secções cuja área seccional seja muito baixa, como é o caso das secções de proa.



FIGURA 6.6: Casco do Navio de Patrulha Oceânica NRP Setúbal, da classe Viana do Castelo

Fonte: <https://www.marinha.pt/pt/os-meios/patruhaseceanicos/Paginas/nrp-setubal.aspx>

A fragata da classe Vasco da Gama, também apresenta um bolbo na secção mais a vante, a sua representação segundo o Mapeamento Conforme Multiparâmetro encontra-se na figura 6.7

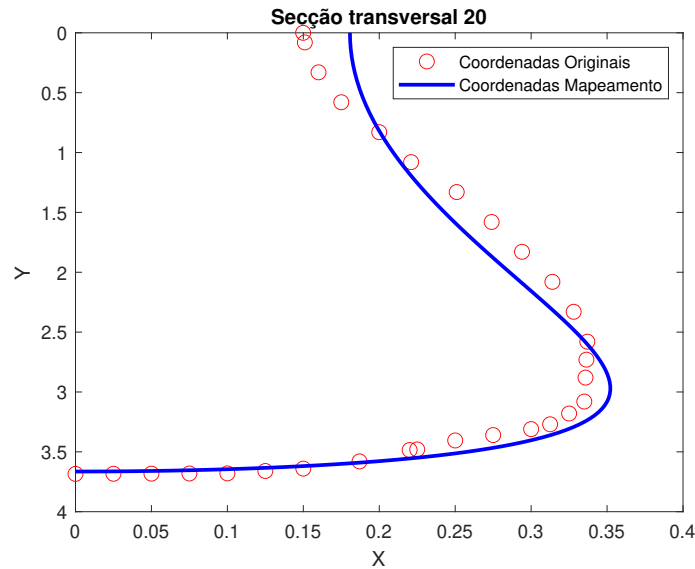


FIGURA 6.7: Secção transversal da proa - Fragata da Classe Vasco da Gama

Como referido anteriormente a representação das secções transversais dos navios da classe Viana do Castelo são afetadas pela presença do bolbo, como ilustrado na figura 6.8.

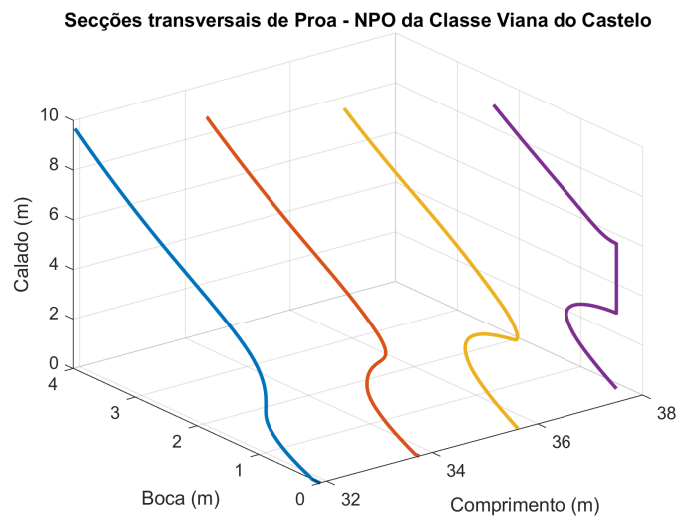


FIGURA 6.8: Secções transversais de proa - Navio Patrulha da Classe Viana do Castelo

Esta estrutura presente no casco influenciará a determinação dos coeficientes de Mapeamento Conforme Multiparâmetro. Como ilustrado na figura 6.9, a representação da secção transversal segundo este método, não é rigorosa.

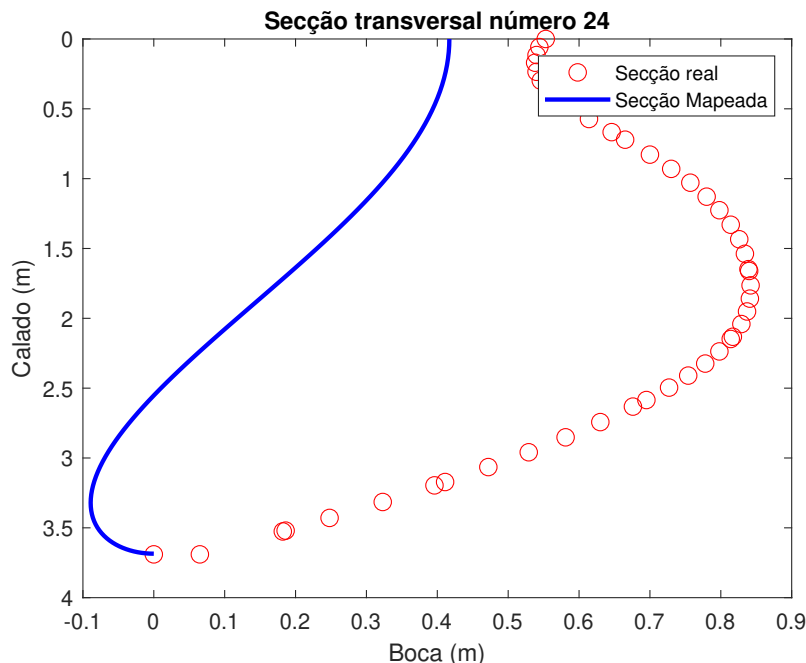


FIGURA 6.9: Secção transversal de proa - Navio Patrulha da Classe Viana do Castelo

Uma vez que quatro secções transversais são afetadas pelo bolbo o resultado do seu mapeamento irá influenciar na determinação dos coeficientes hidrodinâmicos, das forças de excitação e dos *Response Amplitude Operators*.

6.1.2 Ferramenta de cálculo dos *Response Amplitude Operators*

O algoritmo desenvolvido contém algum código adaptado de Nuno (2021) para o cálculo das Forças de Froude-Krylov e de Ramujane (2019) para o cálculo dos coeficientes de massa acrescentada e de amortecimento.

Estes algoritmos foram implementados numa interface gráfica em Matlab[®] como ilustrado na figura 6.10. Este permite ao utilizador definir o intervalo de frequências a estudar, e visualizar os gráficos correspondentes aos coeficientes hidrodinâmicos, às forças de excitação e aos *Response Amplitude Operators*.

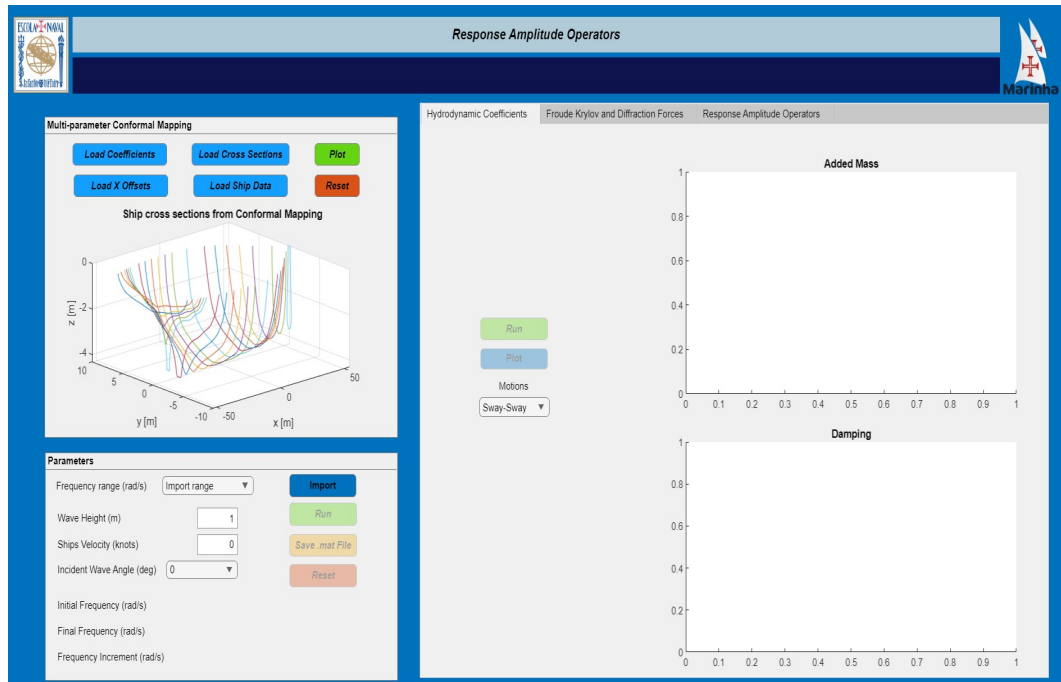


FIGURA 6.10: Interface Gráfica do Programa Desenvolvido

O programa desenvolvido tem como ficheiros de entrada:

- Um ficheiro com os coeficientes de Mapeamento Conforme Multiparâmetro. Este ficheiro deve ser introduzido em formato .txt, numa matriz onde cada coluna corresponde a uma secção de popa para proa, e cada linha será um coeficiente de Mapeamento Conforme Multiparâmetro. A matriz deverá ter o número de colunas correspondente ao número de secções caracterizadas, e o número de linhas deve ser igual ao maior número de coeficientes que caracterizam uma secção. Nas secções remanescentes, as restantes linhas devem ser preenchidas com zeros.
- Um ficheiro com as coordenadas x de cada secção. Este ficheiro deverá encontrar-se em formato .txt, num vetor linha onde cada coluna corresponde a uma secção de popa para a proa.
- Um ficheiro com as coordenadas xyz das secções transversais, com alturas da quilha à linha da água representadas no quarto quadrante. As coordenadas são definidas para um determinado calado, para este trabalho foi usado o calado de projeto 4.08 m, para a fragata da classe Vasco da Gama e de 3.69 m para o navio de patrulha oceânica da classe Viana do Castelo. Este ficheiro pode ser obtido através do interface representado na figura 6.3.

- Um ficheiro .txt com as características do navio em estudo. Este ficheiro deve conter a boca máxima do navio, o calado, o comprimento, a altura metacêntrica transversal e a altura metacêntrica longitudinal, em metros. Para além disso deve conter os momentos de inércia (em relação ao centro de massa do navio), a massa do navio e a posição do centro de massa (relativa à metade da distância entre as perpendiculares a ré e a vante).

Os ficheiros de entrada acima descritos permitem caracterizar o navio em estudo. A caracterização das ondas incidentes pode ser feita de duas formas: definindo o vetor de frequências indicando a frequência inicial, a frequência final e o incremento da frequência, ou através da importação de um ficheiro no formato .txt com frequências pretendidas. Em ambos os modos tem de se definir como parâmetros de entrada, a amplitude da onda, a velocidade do navio e o ângulo de incidência da onda.

Caracterizado o navio e a força de excitação, o programa elaborado apresenta as seguintes capacidades:

- Representação 3D do casco do navio usando os coeficientes do mapeamento Conforme Multiparâmetro
- Visualização de diversos gráficos:
 - Coeficientes de massa acrescentada e de amortecimento
 - Forças de Froude-Krylov e de difração
 - *Response Amplitude Operators*
- Capacidade de gravar os resultados obtidos

6.2 Verificação do Software

6.2.1 Verificação do Software para frequências limite

A verificação das variáveis utilizadas na determinação dos *Response Amplitude Operators* presentes na Equação 5.10 desempenha um papel fundamental na garantia da confiabilidade e da qualidade dos resultados obtidos. A verificação de variáveis permite identificar e corrigir erros, incoerências ou valores extremos que possam comprometer a análise e interpretação de resultados. Para verificar os coeficientes de restituição e as forças de excitação foram considerados os valores assintóticos quando $\omega \rightarrow \infty$ e para $\omega \rightarrow 0$. Para águas profundas, o número de onda pode ser escrito da seguinte forma (Faltinsen, 1990):

$$k = \frac{\omega^2}{g} \quad (6.1)$$

Esta expressão pode ser reescrita em função de λ , o comprimento de onda:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\omega^2 g} \quad (6.2)$$

Na equação 6.2 verifica-se que o comprimento de onda diminui rapidamente à medida que a frequência aumenta. Para comprimentos de onda reduzidos, não existem ondas altas (Falnes & Kurniawan, 2020), portanto, é compreensível que a força de excitação tenda para zero à medida que a frequência aumenta.

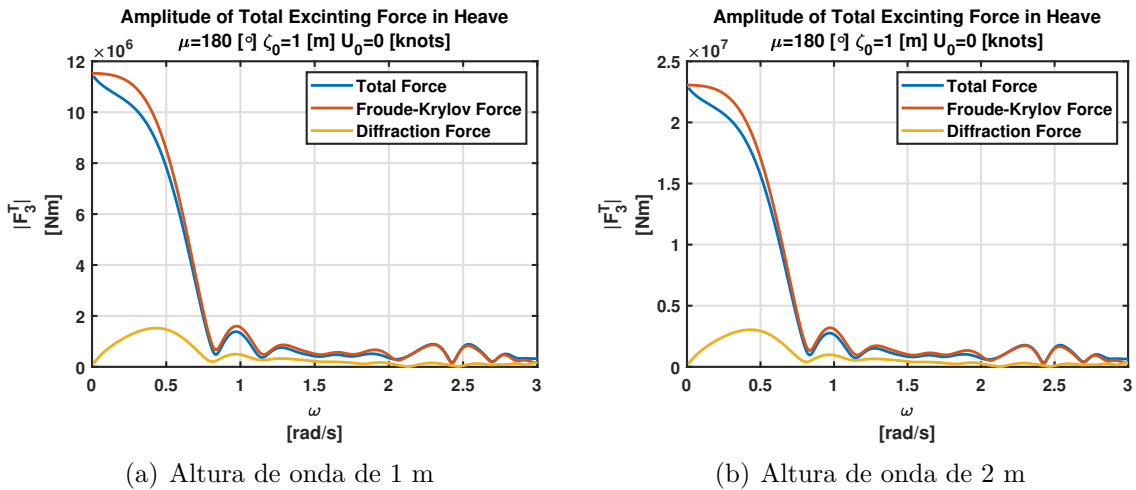


FIGURA 6.11: Amplitude da Força total em Arfagem - Fragata da Classe Vasco da Gama

Quando o comprimento de onda é muito grande, com frequência próxima de zero, o navio acompanha o movimento da onda, resultando em forças predominantemente hidrostáticas. No que diz respeito às forças de excitação no movimento de arfagem, essas são equilibradas pelos coeficientes de restituição. Os termos presentes na matriz de inércia, na matriz das massas acrescentadas e na matriz dos coeficientes de amortecimento presentes nas equações 5.5, 5.6 e 5.7, respectivamente, anulam-se quando a frequência tende para zero. No caso da arfagem, a F_3 é dada pela expressão:

$$C_{33}\eta_3 + C_{35}\eta_5 \approx F_3 \quad (6.3)$$

Quando o navio segue o movimento das ondas, ou seja, $\omega \rightarrow 0$, a amplitude da resposta em arfagem é igual à altura de onda enquanto que a resposta no cabeceio é igual à inclinação da onda. A inclinação da onda é dada por $\zeta_a k$, em que ζ_a corresponde à altura de onda e k corresponde ao número de onda definido pela expressão 6.1 (Martinussen, 2011). A expressão 6.4 pode ser escrita da seguinte forma:

$$C_{33}\zeta_a + C_{35}\zeta_a k \approx F_3 \quad (6.4)$$

Se considerarmos duas alturas de onda, 1m e 2m. Os resultados da comparação podem ser expressos na tabela 6.1.

TABELA 6.1: Comparação entre o valor estimado dos Coeficientes de Restituição e da Força de Excitação em Arfagem para uma condição "quasi-estática"

Altura de onda de 1m	Altura de onda de 2m
$C_{33}\eta_3 + C_{35}\eta_5 = 1.1591 \times 10^7 \text{ N}$	$C_{33}\eta_3 + C_{35}\eta_5 = 2.3182 \times 10^7 \text{ N}$
$F_3 = 1.1538 \times 10^7 \text{ N}$	$F_3 = 2.3077 \times 10^7 \text{ N}$
$E_r = 0.457\%$	$E_r = 0.453\%$

O cálculo do coeficiente C_{33} é dado pela equação 4.15 em que o integral representa a área de flutuação.

O valor da área de flutuação representada na figura 6.12, bem como a posição do centro de flutuação, LCF, foram comparados com os dados obtidos a partir do Manual de Estabilidade das Fragatas da Classe Vasco da Gama.

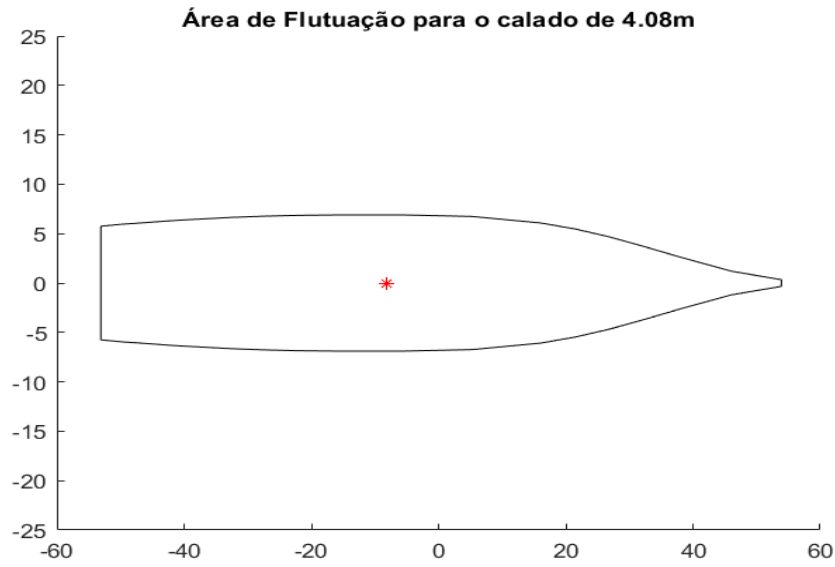


FIGURA 6.12: Ilustração da área de flutuação para o calado em estudo

TABELA 6.2: Comparação da área de flutuação e da posição do centro de flutuação

	Matlab	Real	Desvio relativo
Área de Flutuação	$1.1527 \times 10^3 m^2$	$1.1643 \times 10^3 m^2$	$E_r = 0.997\%$
LCF	$-8.2753 m$	$-8.8272 m$	$E_r = 6.2527\%$

A força de excitação em cabeceio, para as condições "quasi-estática" é dada pela expressão 6.5. Se considerarmos novamente uma altura de onda de $\zeta_a = 1m$, a força de excitação em cabeceio quando $\omega \rightarrow 0$ tem o valor ilustrado no gráfico 6.13.

$$C_{53}\eta_3 + C_{55}\eta_5 \approx F_5 \quad (6.5)$$

TABELA 6.3: Comparação entre o valor estimado dos Coeficientes de restituição e a força de excitação em cabeceio para a condição "quasi-estática"

Momento em Cabeceio na condição <i>Quasi-steady</i>
$C_{53}\eta_3 + C_{55}\eta_5 = -9.6980 \times 10^7 N$
$F_5 = -9.7979 \times 10^7 N$
$E_r = 1.0196\%$

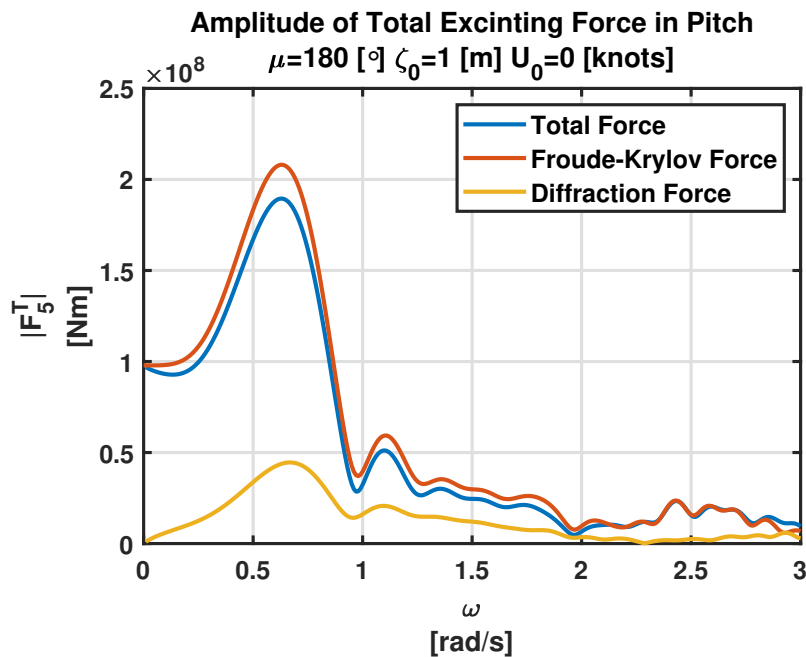


FIGURA 6.13: Amplitude da Força total em Cabeceio - Fragata da Classe Vasco da Gama

O coeficiente de restituição C_{55} foi obtido através de dois modos distintos e compararam-se os resultados obtidos. O valor de C_{55} pode ser calculado segundo a expressão 4.19 e segundo uma expressão empírica 4.18 presente no *Principles of Naval Architecture* de Lewis (1989). A tabela 6.4 compara o valor do coeficiente C_{55} segundo os dois métodos.

TABELA 6.4: Comparação entre o valor estimado dos valores do coeficiente C_{55} obtidos por dois métodos distintos de cálculo

Expressão 4.19	Expressão 4.18	Desvio Relativo
$C_{55} = 8.7511 \times 10^9$	$C_{55} = 8.3652 \times 10^9$	$E_r = 4.4097\%$

6.2.2 Verificação dos Coeficientes de amortecimento e de massa acrescentada

A presente verificação tem como objetivo testar a funcionalidade do algoritmo para secções transversais menos complexas. A obtenção dos coeficientes globais de massa acrescentada e de amortecimento dependem dos coeficientes a_{22} , b_{22} , a_{33} , b_{33} , a_{42} , b_{42} , a_{44} e b_{44} de cada secção, como descrito no apêndice A. As curvas dos coeficientes enumerados anteriormente foram comparadas com as apresentadas por Vugts (Vugts, 1968). As curvas de massa acrescentada (a_{22}), (a_{33}) e de amortecimento (b_{22}), (b_{33}) foram obtidas para um círculo de 0.15m de raio.

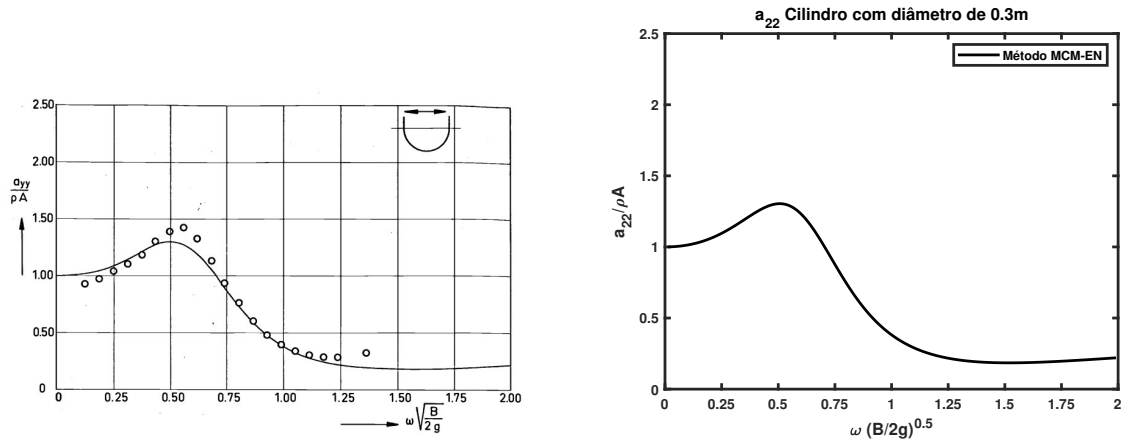


FIGURA 6.14: Comparação dos coeficientes de massa acrescentada em deriva- Resultados obtidos por (Vugts,1968) *vs.* algoritmo elaborado

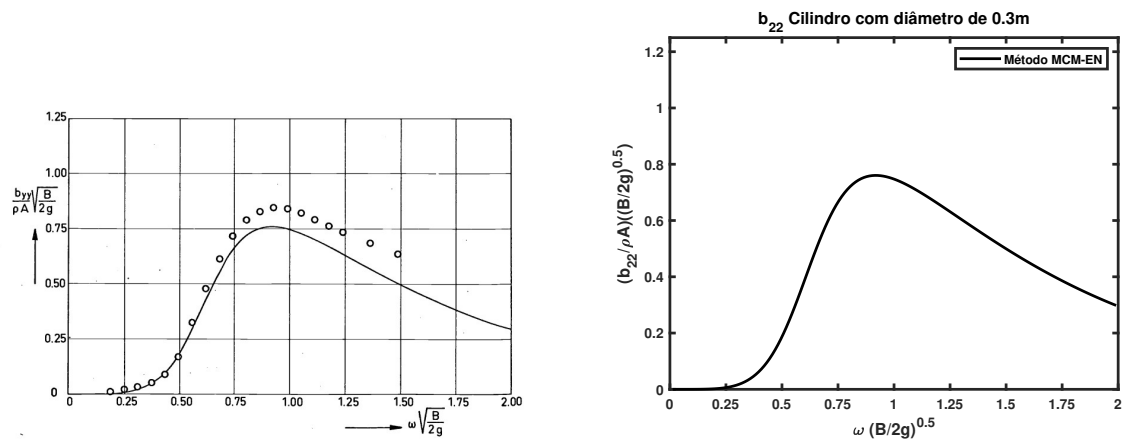


FIGURA 6.15: Comparação dos coeficientes de amortecimento em deriva- Resultados obtidos por (Vugts,1968) *vs.* algoritmo elaborado

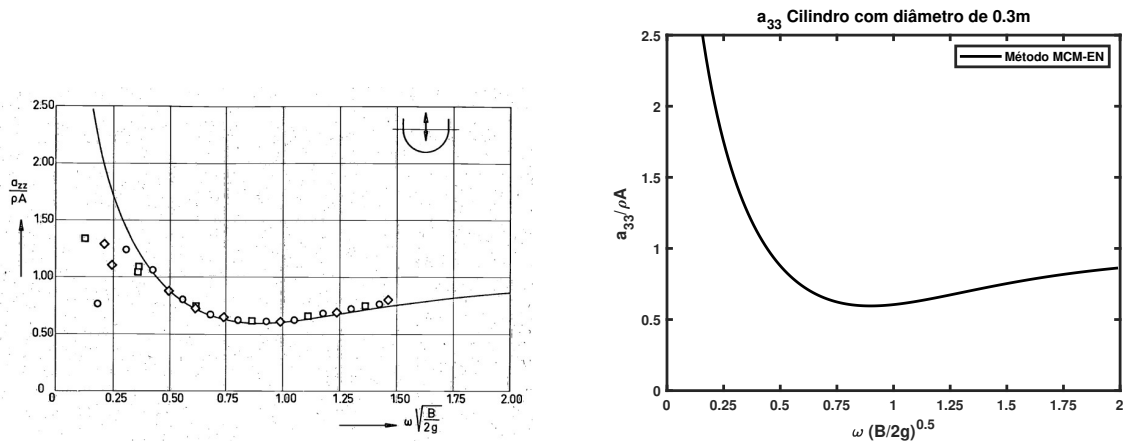


FIGURA 6.16: Comparação dos coeficientes de massa acrescentada em arfagem- Resultados obtidos por (Vugts,1968) *vs.* algoritmo elaborado

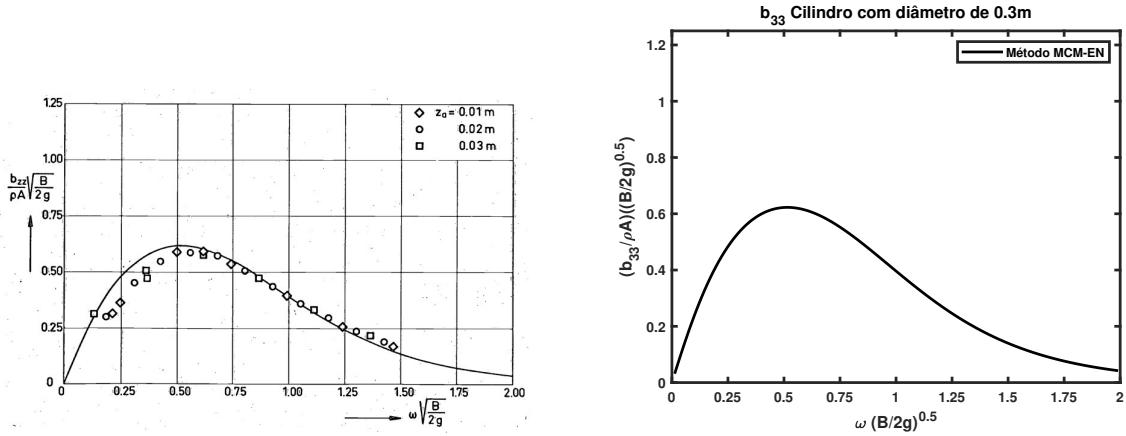


FIGURA 6.17: Comparação dos coeficientes de amortecimento em arfagem- Resultados obtidos por (Vugts,1968) *vs.* algoritmo elaborado

Quanto à obtenção das curvas de massa acrescentada (a_{42}), (a_{44}) e de amortecimento (b_{42}), (b_{44}) foram obtidas para um retângulo de 0.40m de boca e 0.20m de calado. Para mapear a secção transversal retangular foram usados 4 coeficientes de mapeamento, a_1 , a_3 , a_5 e a_7 .

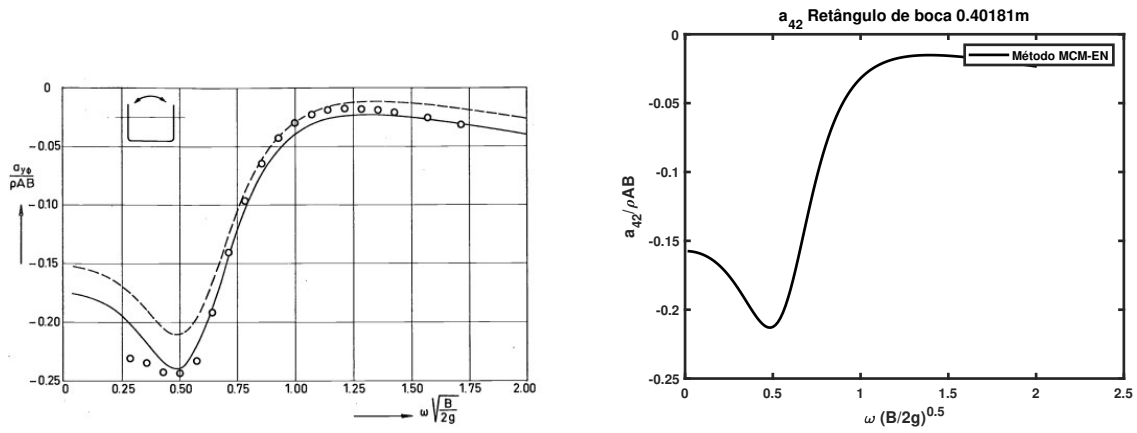


FIGURA 6.18: Comparação dos coeficientes de massa acrescentada no movimento de balanço devido à deriva- Resultados obtidos por (Vugts,1968) *vs.* algoritmo elaborado

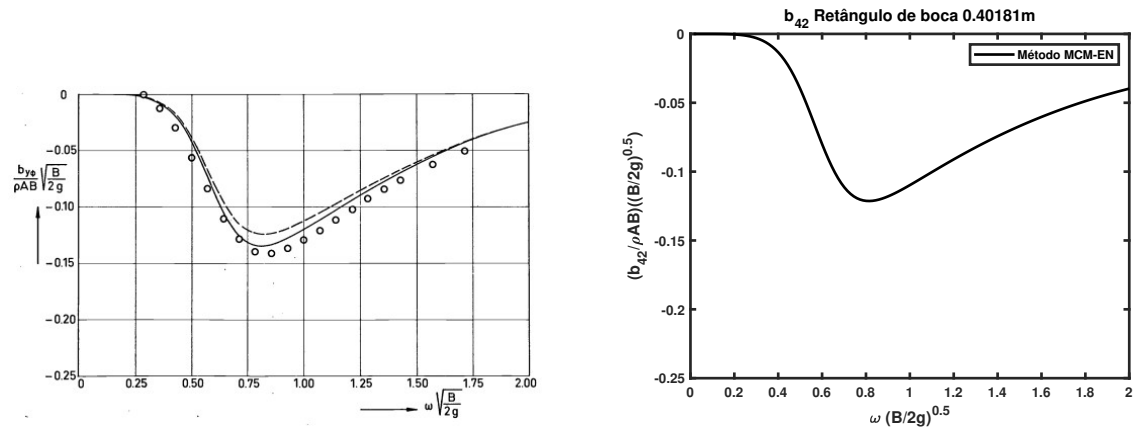


FIGURA 6.19: Comparação dos coeficientes de amortecimento no movimento de balanço devido à deriva- Resultados obtidos por (Vugts,1968) *vs.* algoritmo elaborado

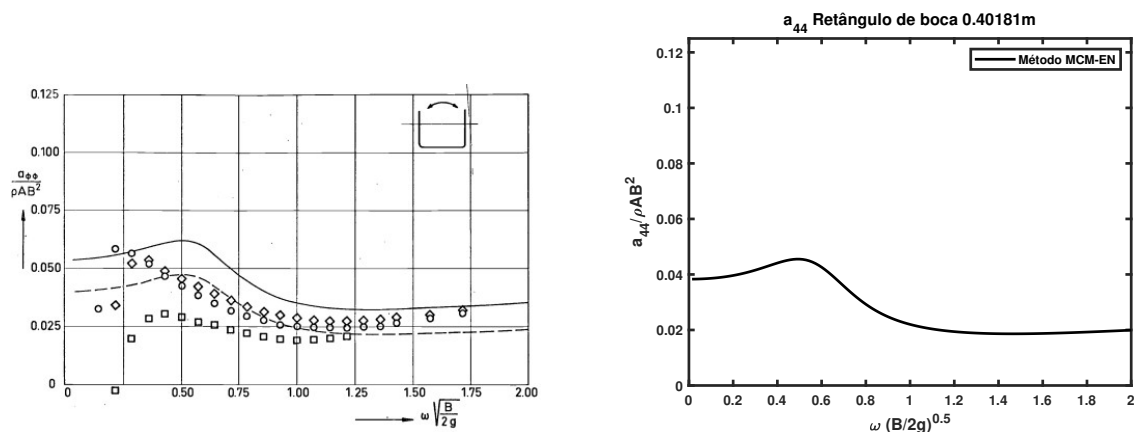


FIGURA 6.20: Comparação dos coeficientes de massa acrescentada em balanço- Resultados obtidos por (Vugts,1968) *vs.* algoritmo elaborado

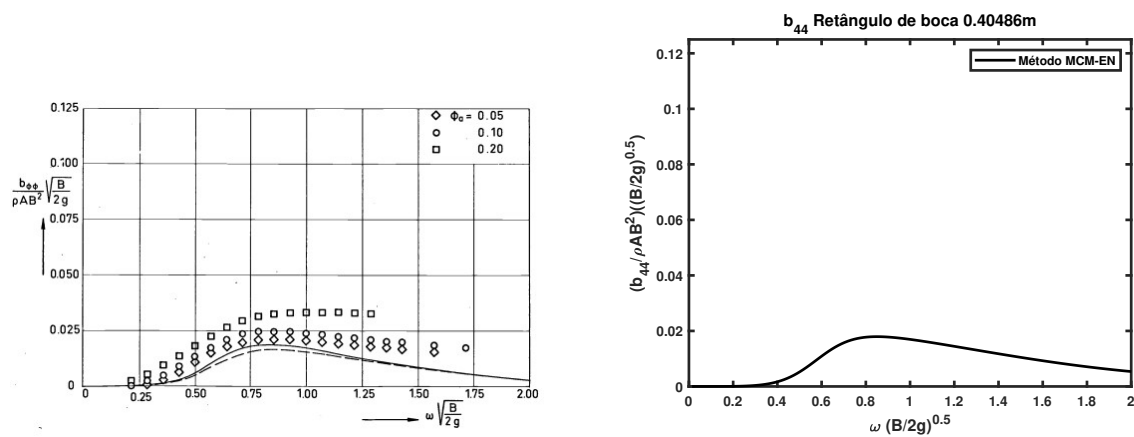


FIGURA 6.21: Comparação dos coeficientes de amortecimento em balanço- Resultados obtidos por (Vugts,1968) *vs.* algoritmo elaborado

6.3 Comparação de Resultados: *Software elaborado vs Software MaxSurf*

A comparação dos resultados obtidos através do programa desenvolvido neste trabalho e do Software MaxSurf[®], permite verificar numa primeira fase o algoritmo elaborado em Matlab[®]. No software MaxSurf[®], procurou-se simular um mar regular com uma amplitude de onda de $\zeta_a = 1$ metro e para uma velocidade de avanço de $U_0 = 10$ nós. No software em questão analisou-se um conjunto de 40 frequências específicas, comparando-as com um algoritmo que foi desenvolvido. Estas frequências foram definidas pelo software segundo o espectro de onda Bretschneider, uma modificação do espectro Pierson-Moskowitz, desenvolvido por Bretschneider em 1988. O espectro incorpora um fator de escala adicional para representar de forma mais precisa a altura significativa de onda (Holthuijsen, 2007). De todos os espectros disponibilizados pelo software, este era o único com possibilidade de alterar a altura de onda. Os coeficientes de massa acrescentada e de amortecimento para os modos verticais de cabeceio e de arfagem podem ser determinados segundo as expressões presentes no Apêndice A. Os coeficientes hidrodinâmicos A_{33} , B_{33} , A_{35} , B_{35} , A_{53} , B_{53} , A_{55} , B_{55} foram comparados para as seguintes condições: considerando um mar de proa, ou seja, $\mu = 180^\circ$, e um intervalo de frequências de onda, $\omega_0 = [0.354, 3.2]$ e para um mar de través, $\mu = 90^\circ$ e um intervalo de frequências de onda $\omega_0 = [0.4, 7]$. As forças de excitação em arfagem e em cabeceio foram comparadas para um mar de proa, nas condições descritas anteriormente e para um mar de popa, ou seja, $\mu = 0^\circ$ num intervalo de frequências de onda, $\omega_0 = [0.2, 4.762]$.

A figura 6.22 representa a comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{33} e B_{33} .

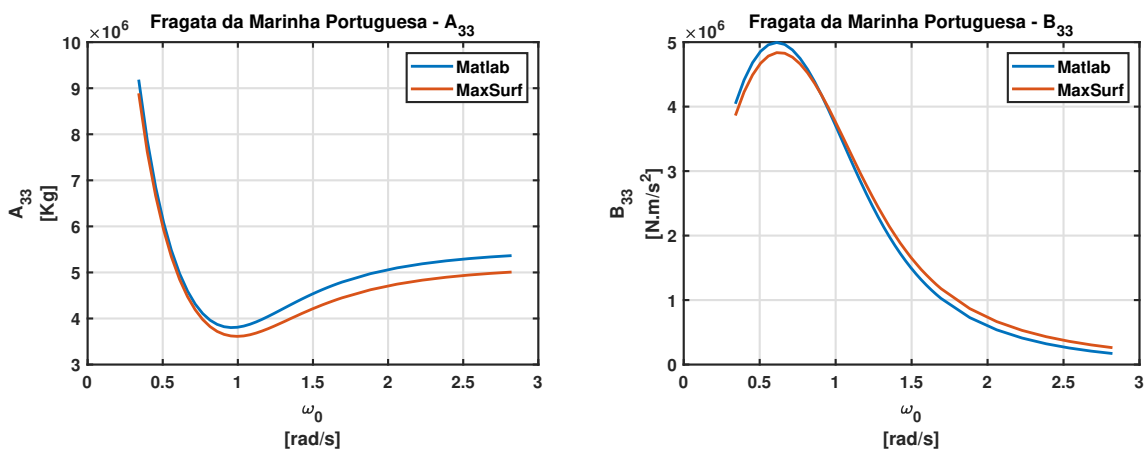


FIGURA 6.22: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{33} e B_{33} - Mar de Proa

A figura 6.23 representa a evolução do erro relativo em função da frequência de encontro para os dois coeficientes hidrodinâmicos globais A_{33} e B_{33} .

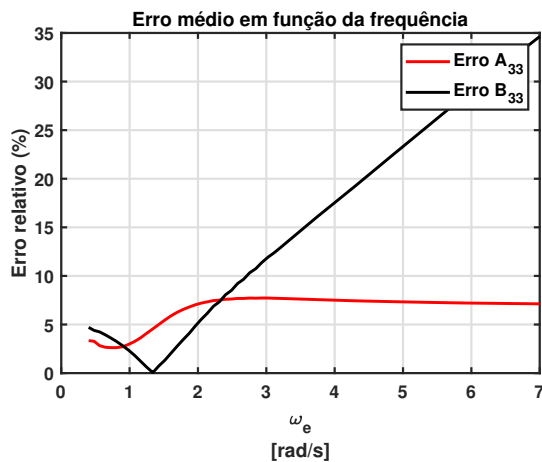


FIGURA 6.23: Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{33} e B_{33}

A figura 6.24 representa a comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{35} e B_{35} .

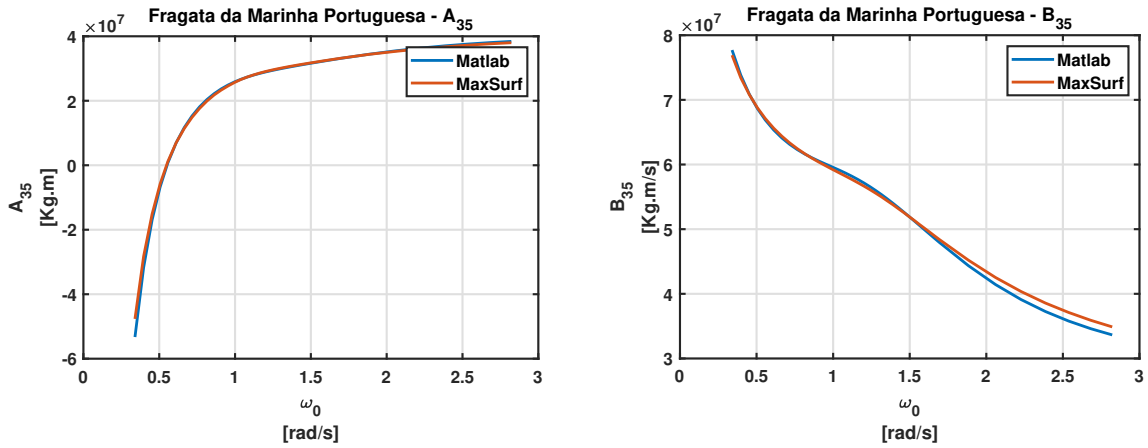


FIGURA 6.24: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{35} e B_{35} - Mar de Proa

A figura 6.25 representa a evolução do erro relativo em função da frequência de encontro para os dois coeficientes hidrodinâmicos globais A_{35} e B_{35} .

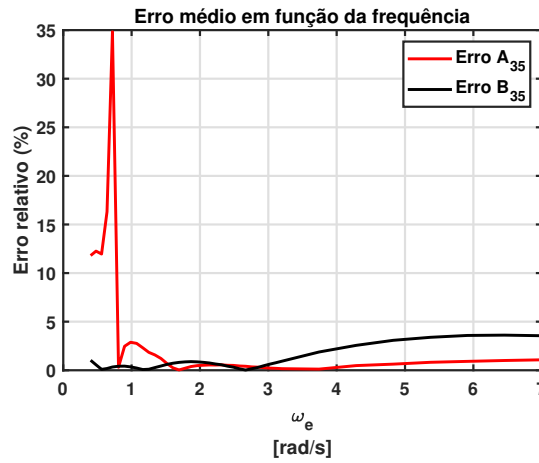


FIGURA 6.25: Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{35} e B_{35}

A figura 6.26 representa a comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{53} e B_{53} .

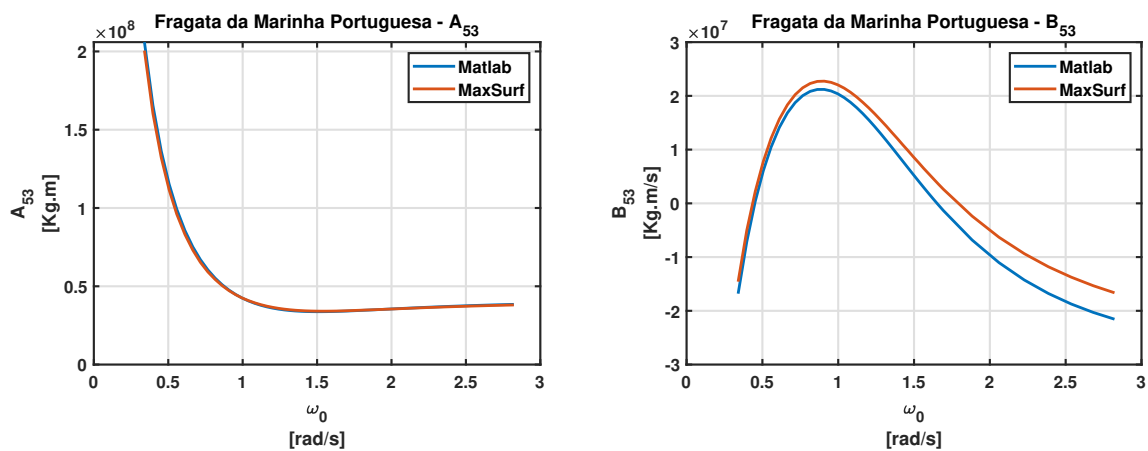


FIGURA 6.26: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{53} e B_{53} - Mar de Proa

A figura 6.27 representa a evolução do erro relativo em função da frequência de encontro para os dois coeficientes hidrodinâmicos globais A_{53} e B_{53} .

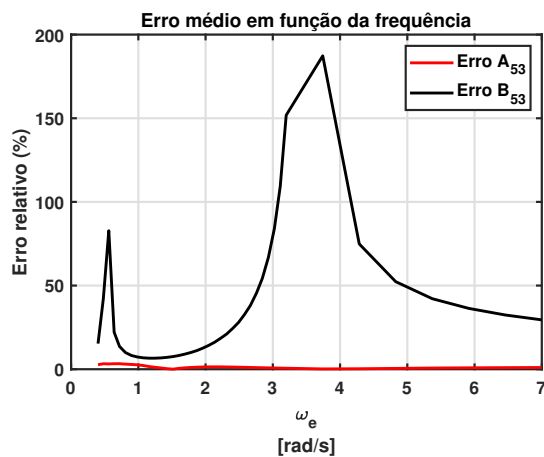


FIGURA 6.27: Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{53} e B_{53}

A figura 6.28 representa a comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{55} e B_{55} .

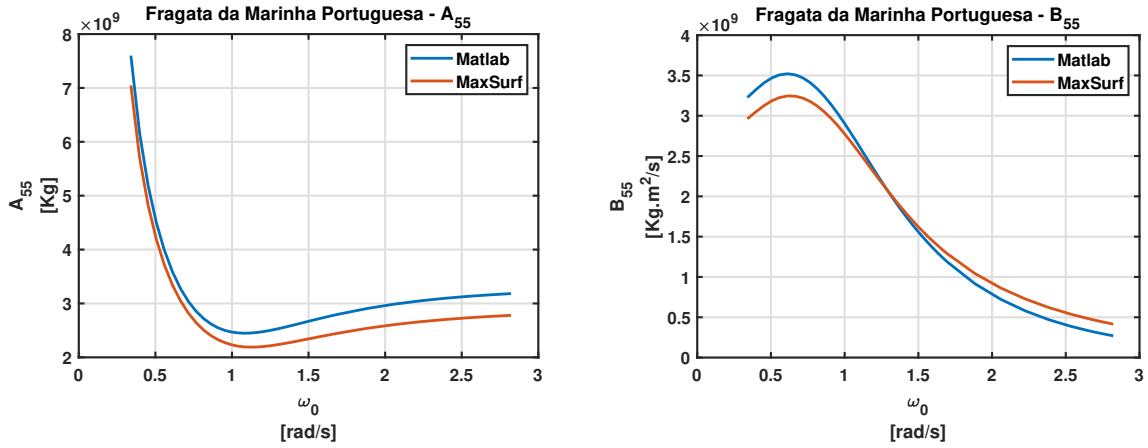


FIGURA 6.28: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{55} e B_{55} - Mar de Proa

A figura 6.29 representa a evolução do erro relativo em função da frequência de encontro para os dois coeficientes hidrodinâmicos globais A_{55} e B_{55} .

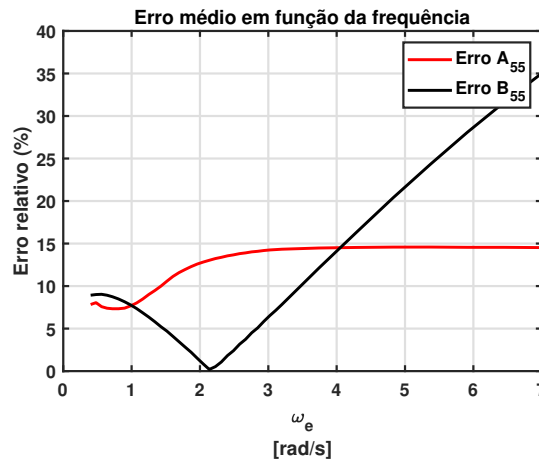


FIGURA 6.29: Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{55} e B_{55}

As curvas representativas dos coeficientes hidrodinâmicos globais também foram comparadas para a condição de mar de través. A figura 6.30 representa a comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{33} e B_{33} , para essa condição de mar.

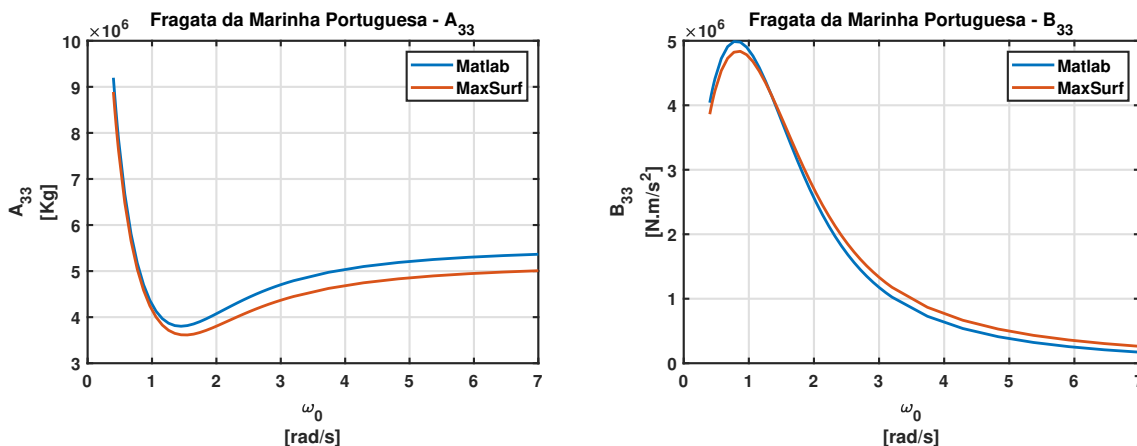


FIGURA 6.30: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{33} e B_{33} - Mar de través

A figura 6.31 representa a evolução do erro relativo em função da frequência de encontro para os dois coeficientes hidrodinâmicos globais A_{33} e B_{33} .

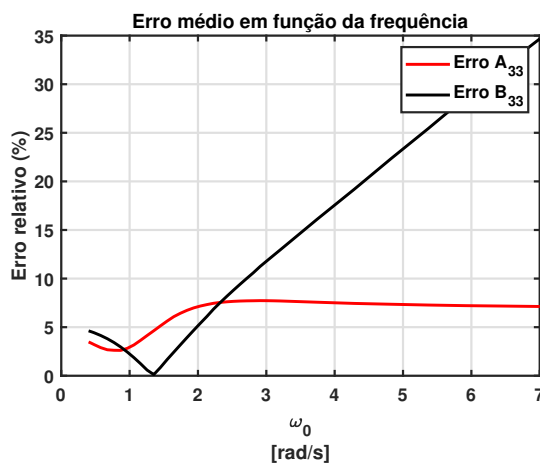


FIGURA 6.31: Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{33} e B_{33}

A figura 6.32 representa a comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{35} e B_{35} .

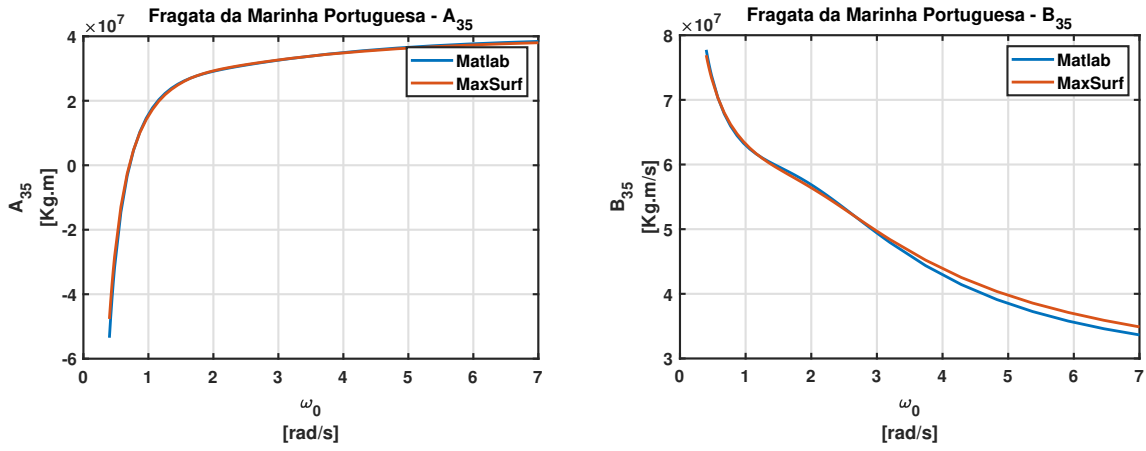


FIGURA 6.32: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{35} e B_{35} - Mar de través

A figura 6.33 representa a evolução do erro relativo em função da frequência de encontro para os dois coeficientes hidrodinâmicos globais A_{35} e B_{35} .

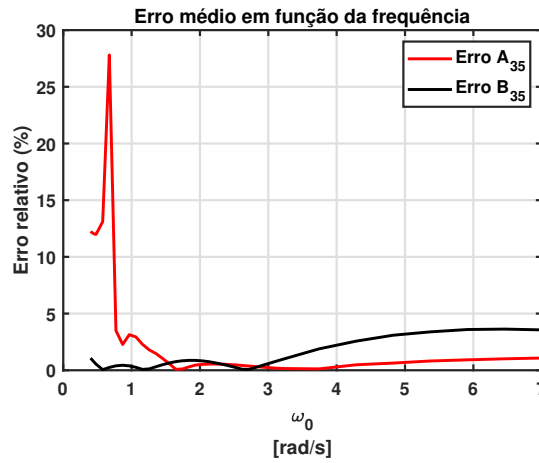


FIGURA 6.33: Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{35} e B_{35}

A figura 6.34 representa a comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{53} e B_{53} .

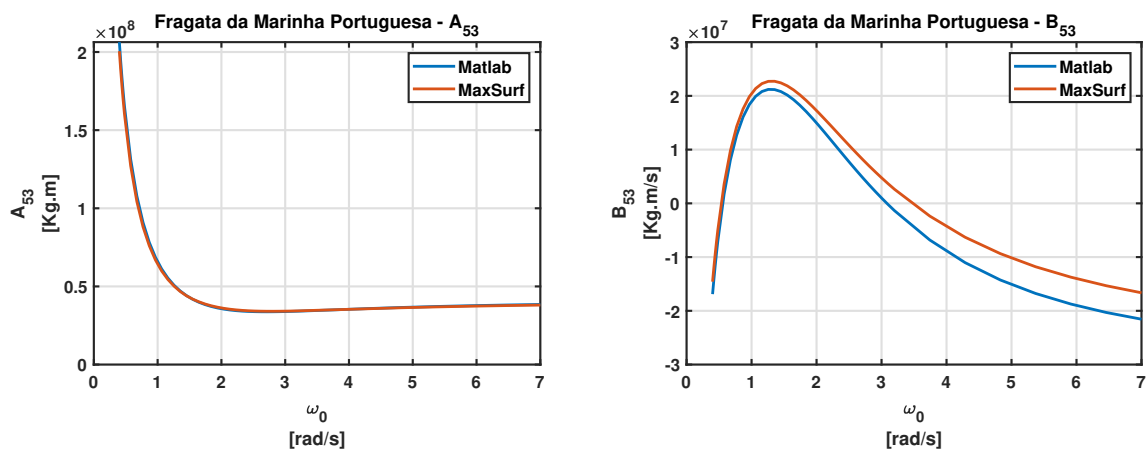


FIGURA 6.34: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{53} e B_{53} - Mar de través

A figura 6.35 representa a evolução do erro relativo em função da frequência de encontro para os dois coeficientes hidrodinâmicos globais A_{53} e B_{53} .

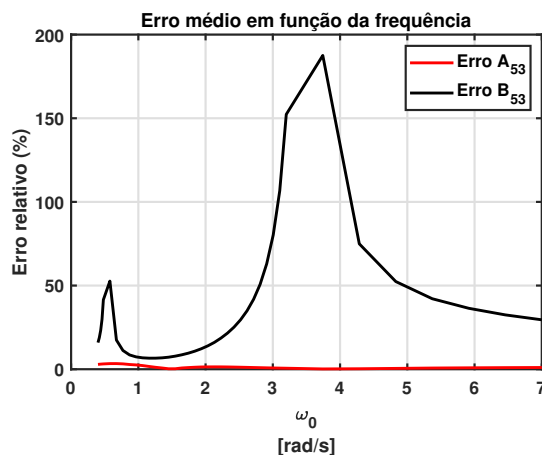


FIGURA 6.35: Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{53} e B_{53}

A figura 6.36 representa a comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{55} e B_{55} .

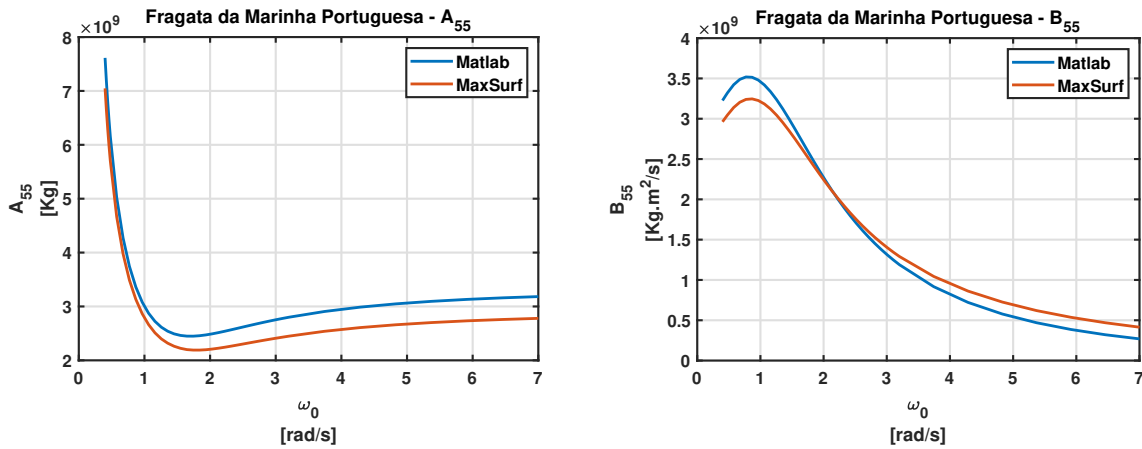


FIGURA 6.36: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais obtidos recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf A_{55} e B_{55} - Mar de través

A figura 6.37 representa a evolução do erro relativo em função da frequência de encontro para os dois coeficientes hidrodinâmicos globais A_{55} e B_{55} .

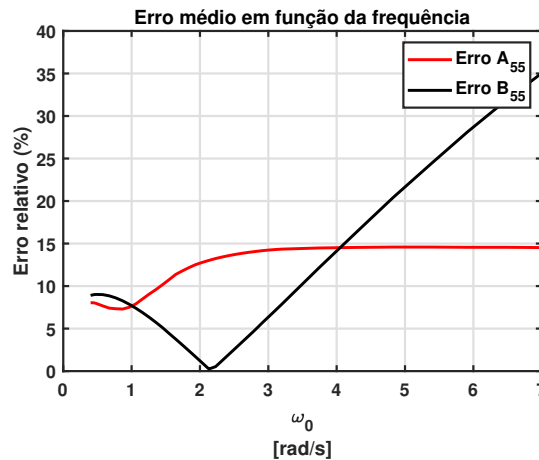


FIGURA 6.37: Evolução do erro relativo para os coeficientes hidrodinâmicos globais A_{55} e B_{55}

Depois de determinados e comparados os coeficientes hidrodinâmicos globais, foram comparadas as forças de excitação no caso de arfagem e de cabeceio, nas condições de mar de proa e mar de popa. A figura 6.38 representa a comparação das forças na condição de mar de proa, em função da frequência de encontro:

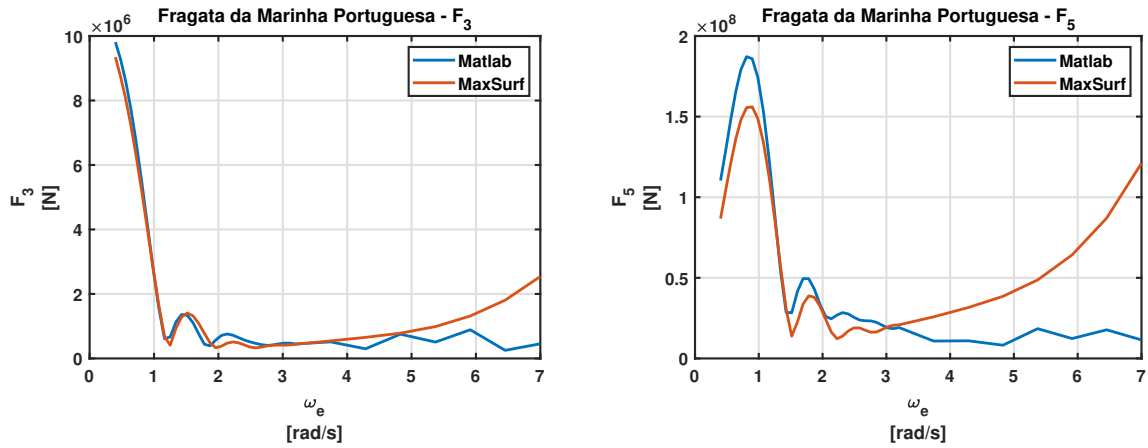


FIGURA 6.38: Comparação das curvas correspondentes às forças de excitação em arfagem e cabeceio recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf - Mar de Proa

A figura 6.39 representa a comparação das forças na condição de mar de popa:

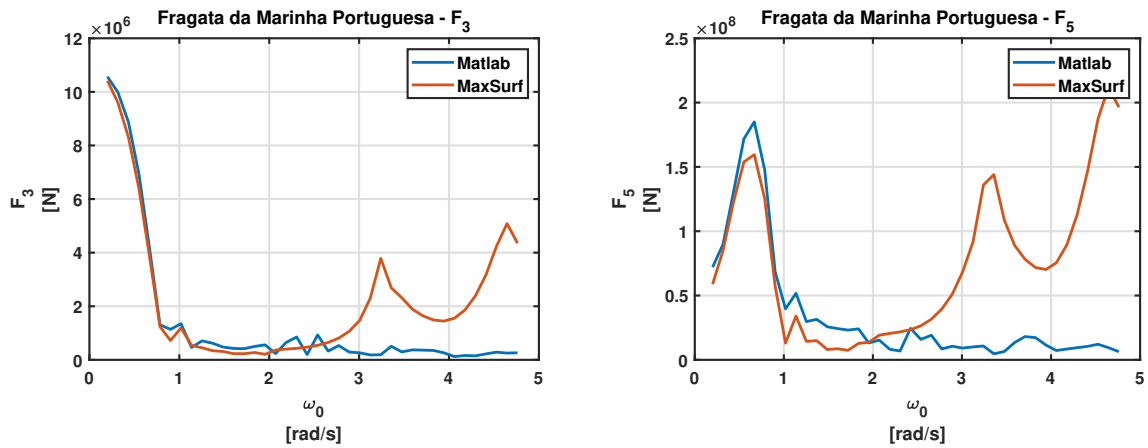


FIGURA 6.39: Comparação das curvas correspondentes às forças de excitação em arfagem e cabeceio recorrendo ao Matlab e ao MaxSurf - Mar de Popa

Comparados os coeficientes hidrodinâmicos, as forças de excitação no modo vertical e verificados os coeficientes de restituição, procedeu-se à comparação das curvas correspondentes aos *Response Amplitude Operators*. A imagem 6.40 representa a comparação das curvas para a condição de mar de popa.

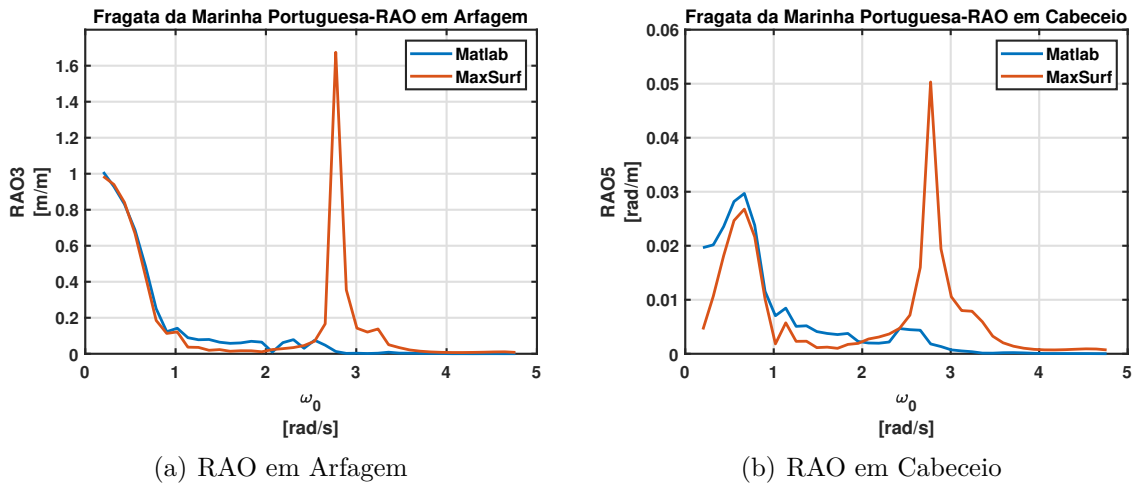


FIGURA 6.40: Comparação das curvas dos *Response Amplitude Operators* para um mar de Popa

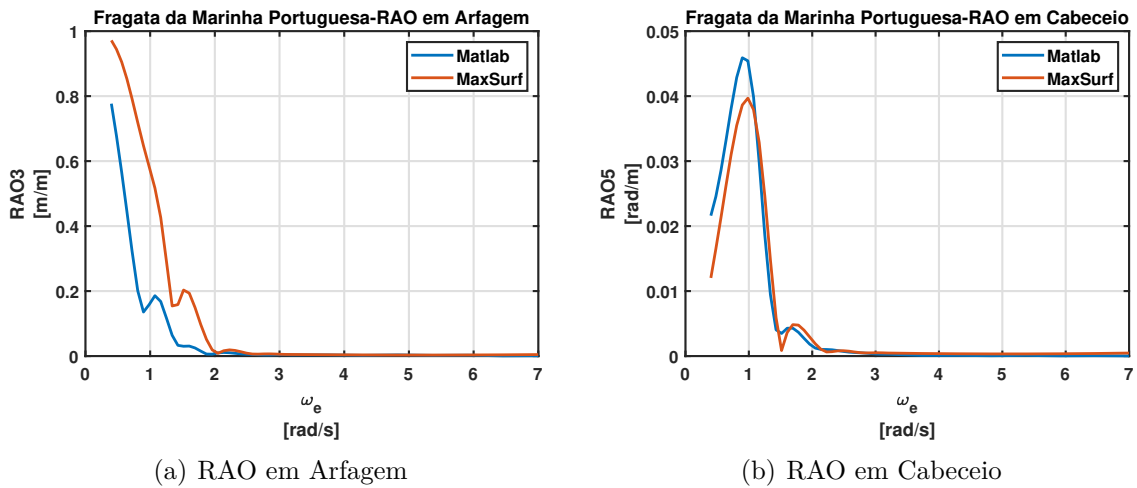


FIGURA 6.41: Comparação das curvas dos *Response Amplitude Operators* para um mar de Proa

Visualizando os gráficos apresentados anteriormente é possível verificar que as curvas obtidas pelo algoritmo apresentam a mesma tendência que as curvas obtidas pelo software usado para efetuar a verificação.

6.3.1 Variação da posição das secções transversais

A posição longitudinal das secções transversais da Fragata da classe Vasco da Gama é atribuída em função do ponto médio da distância entre perpendiculares, a perpendicular a vante e a perpendicular a ré. Na legenda das figuras seguintes, este centro é denominado por centro de representação. O cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos globais depende da posição longitudinal das secções transversais relativamente à origem.

As curvas foram obtidas considerando como origem o centro de representação, o centro de massa e o centro de flutuação. A posição longitudinal do centro de massa foi retirada do Manual de Estabilidade dos navios da classe Vasco da Gama e a posição do centro de flutuação corresponde ao centro geométrico da área de flutuação.

A figura 6.42 representa a comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{33} e B_{33} para as diferentes posições das secções transversais.

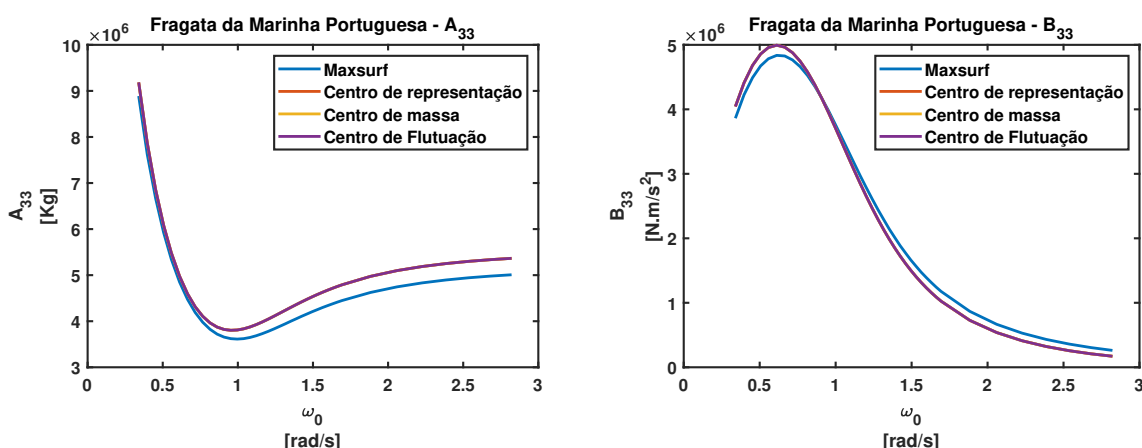


FIGURA 6.42: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{33} e B_{33} para diferentes posições longitudinais das secções transversais

Analisando a figura 6.42 verificamos que existe uma sobreposição das curvas uma vez que, os coeficientes hidrodinâmicos globais em arfagem não dependem da posição longitudinal das secções transversais.

A figura 6.43 representa a comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{35} e B_{35} para as diferentes posições das secções transversais.

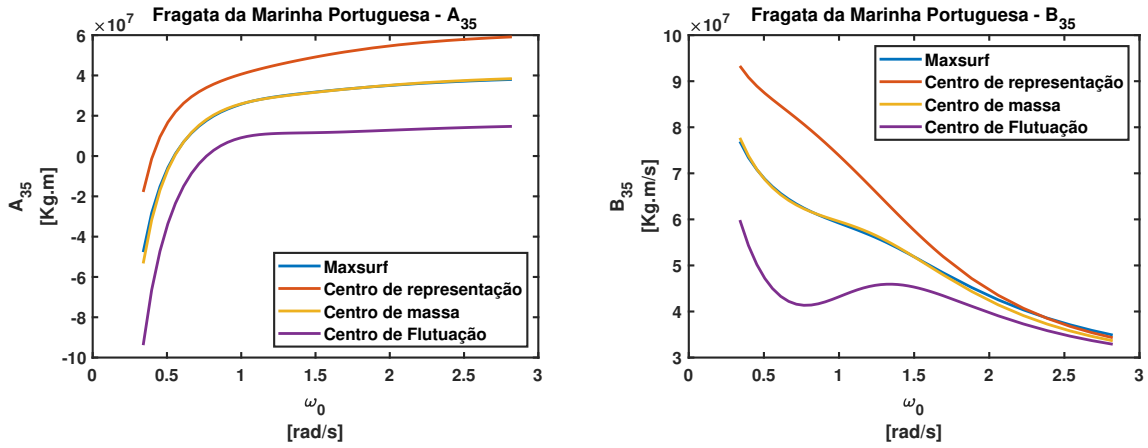


FIGURA 6.43: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{35} e B_{35} para diferentes posições longitudinais das secções transversais

A figura 6.44 representa a comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{53} e B_{53} para as diferentes posições das secções transversais.

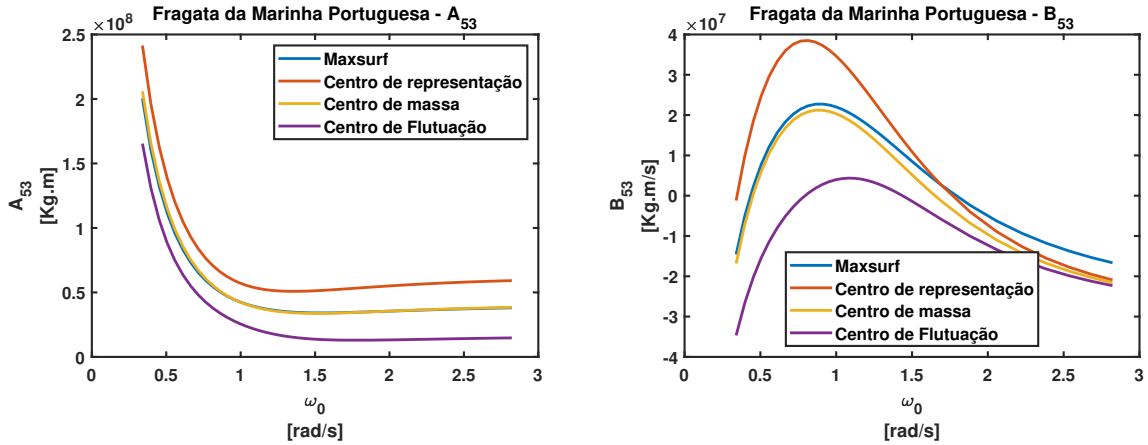


FIGURA 6.44: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{53} e B_{53} para diferentes posições longitudinais das secções transversais

A figura 6.45 representa a comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{55} e B_{55} para as diferentes posições das secções transversais.

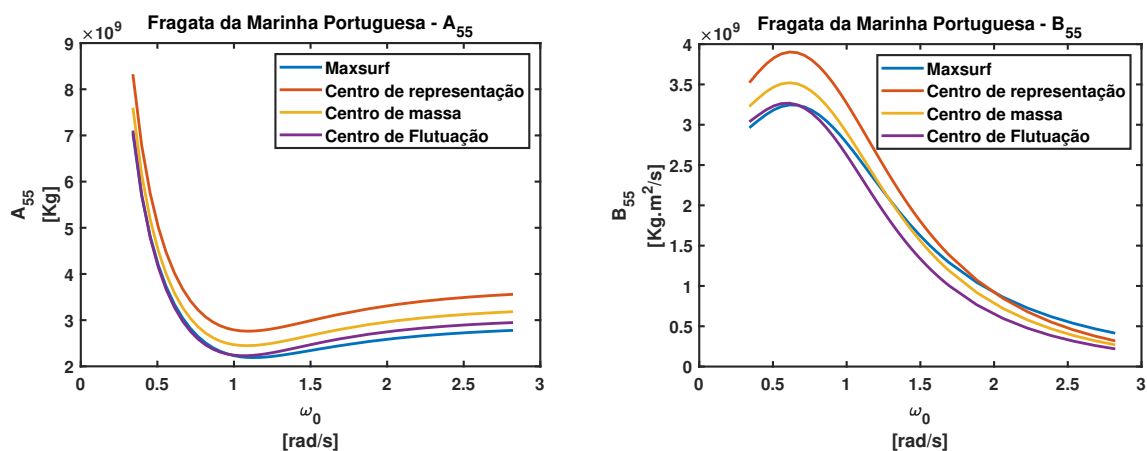
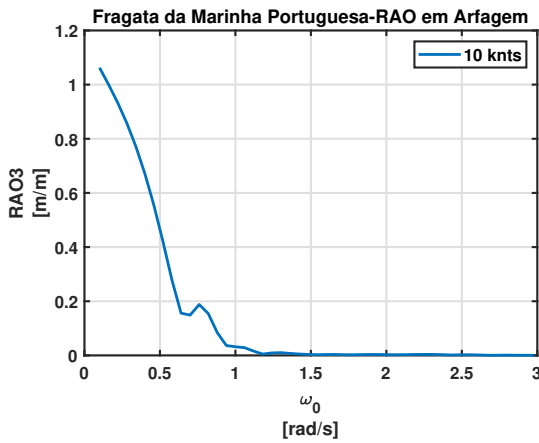


FIGURA 6.45: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais A_{55} e B_{55} para diferentes posições longitudinais das secções transversais

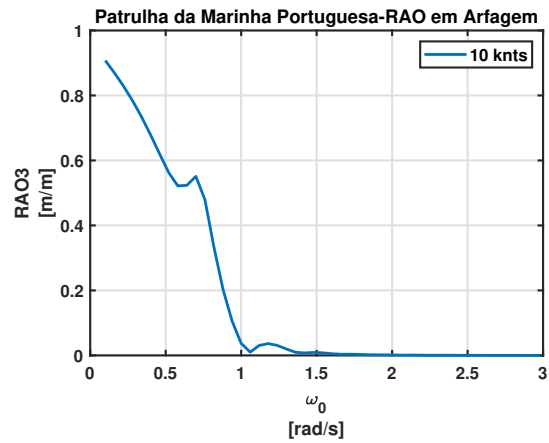
Comparando os gráficos representados nas figuras 6.43, 6.44 e 6.45 verificamos que as curvas correspondentes ao cálculo recorrendo ao MaxSurf[®] e as curvas obtidas para o centro de massa são praticamente coincidentes.

6.4 Cálculo dos RAO's: Navios da Marinha Portuguesa

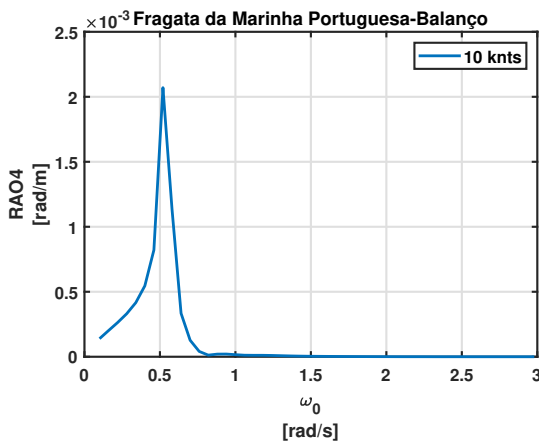
Os *Response Amplitude Operators* foram determinados para a Fragata da classe Vasco da Gama e para o navio de patrulha oceânica da classe Viana do Castelo. Segundo o *Principles of Naval Architecture* os principais movimentos a estudar na área do *Seakeeping* são a arfagem, o cabeceio e o balanço (Lewis, 1989). Os cálculos foram efetuados para uma amplitude de onda de $\zeta_a = 1$ metro, ângulos de incidência das ondas de proa ($\mu = 180^\circ$), de través ($\mu = 90^\circ$) e na popa ($\mu = 0^\circ$) para uma velocidade $U_0 = 10$ nós.



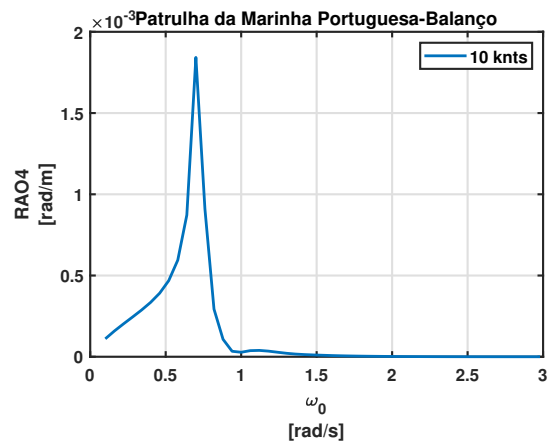
(a) Classe Vasco da Gama



(b) Classe Viana do Castelo

FIGURA 6.46: RAO em Arfagem - Mar de Proa ($\mu = 180^\circ$)

(a) Classe Vasco da Gama



(b) Classe Viana do Castelo

FIGURA 6.47: RAO em Balanço - Mar de Proa ($\mu = 180^\circ$)

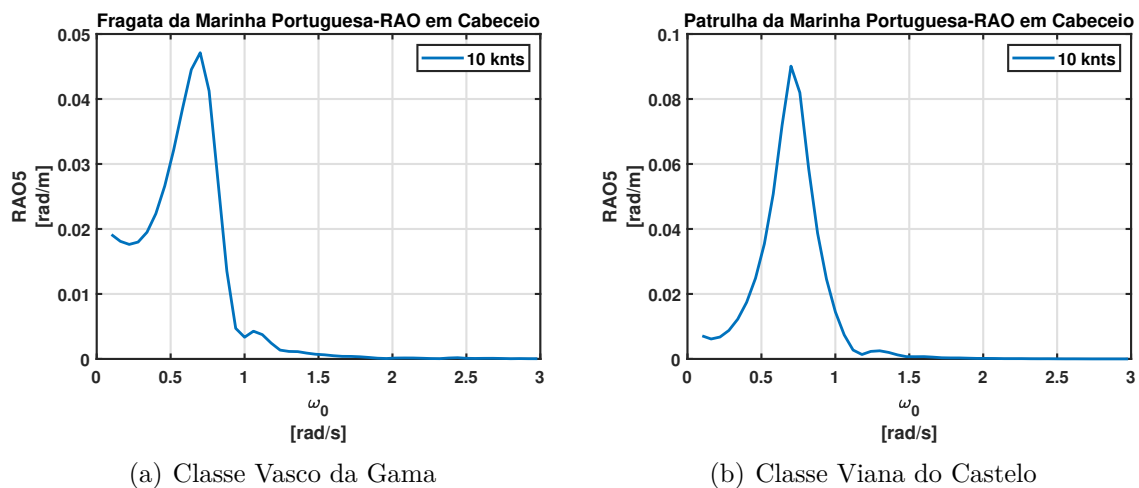


FIGURA 6.48: RAO em Cabeceio - Mar de Proa ($\mu = 180^\circ$)

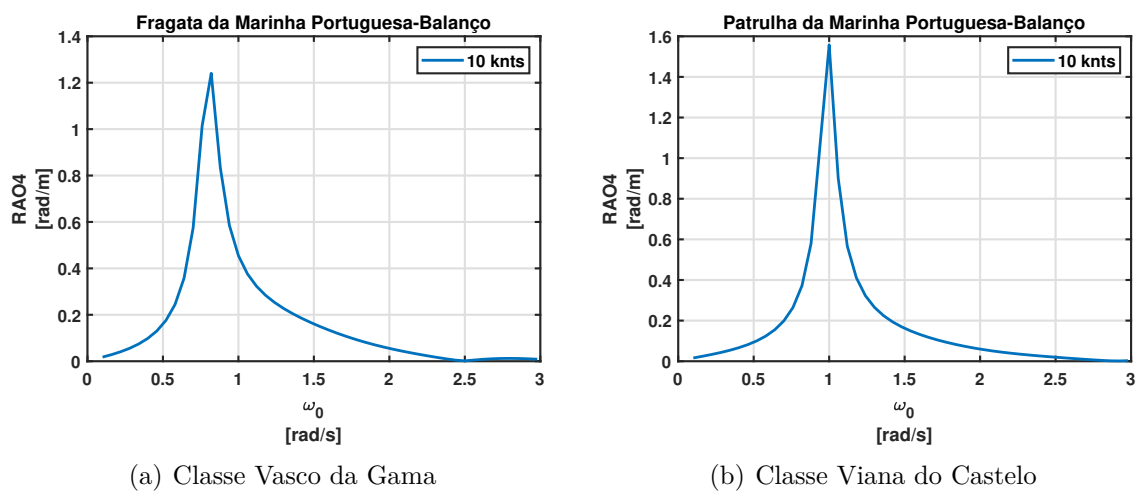


FIGURA 6.49: RAO em Balanço - Mar de través ($\mu = 90^\circ$)

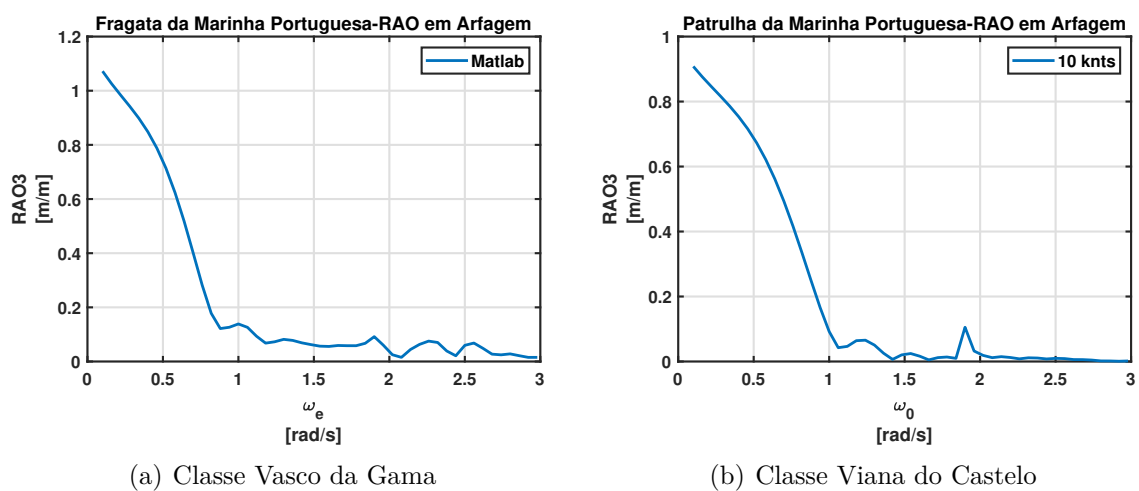
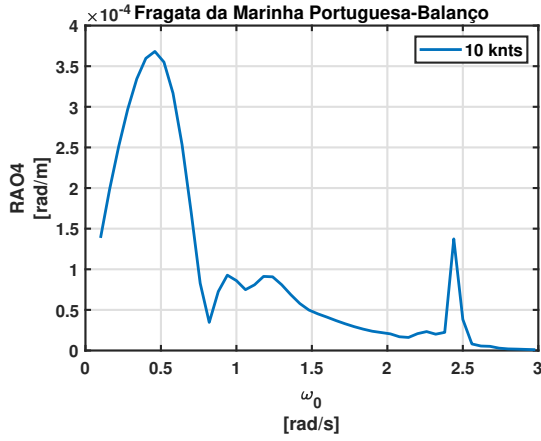
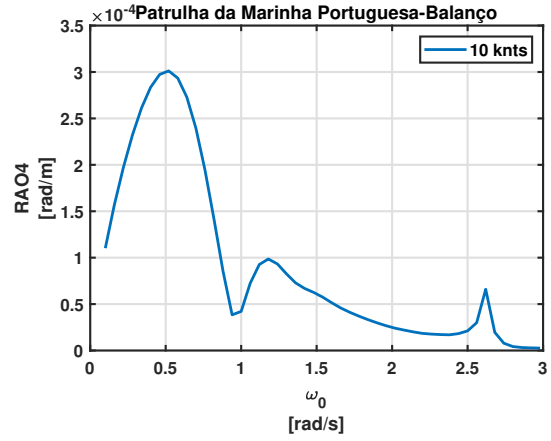


FIGURA 6.50: RAO em Arfagem - Mar de popa ($\mu = 0^\circ$)

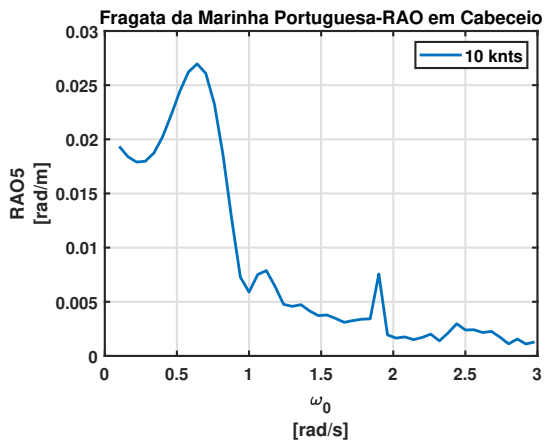


(a) Classe Vasco da Gama

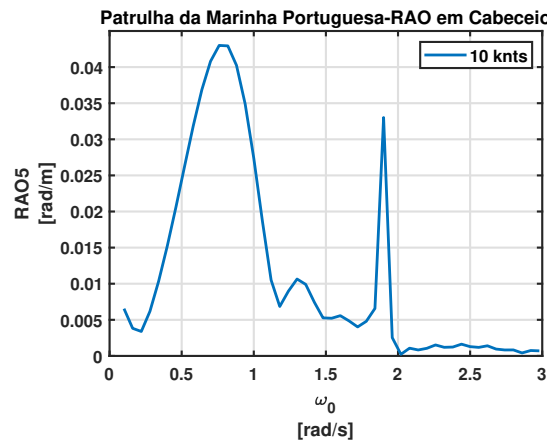


(b) Classe Viana do Castelo

FIGURA 6.51: RAO em Balanço - Mar de popa ($\mu = 0^\circ$)



(a) Classe Vasco da Gama



(b) Classe Viana do Castelo

FIGURA 6.52: RAO em Cabeceio - Mar de popa ($\mu = 0^\circ$)

Capítulo 7

Análise e Discussão de Resultados

A verificação da ferramenta de cálculo apresentada na Secção 2 do Capítulo 6, iniciou-se com a comparação entre as forças de excitação e os coeficientes de restituição determinados. No caso do coeficiente de restituição C_{33} , este depende da área de flutuação. A área de flutuação calculada, foi comparada com o valor presente no Manual de Estabilidade das Fragatas da Classe Vasco da Gama, o erro relativo nesta comparação pode estar relacionado com o facto da área calculada considerar apenas as 20 bocas associadas às secções transversais usadas neste trabalho, um maior número de secções transversais aumentaria o rigor nesse cálculo.

A comparação da posição do centro de flutuação encontra-se presente na Tabela 6.2 e podemos verificar que o valor obtido é diferente do valor real. Isto deve-se ao facto de o valor presente no Manual de Estabilidade considerar o caimento a ré do navio em questão. A verificação na condição "quasi-estática" apresenta erros relativos muito baixos validando assim o cálculo das forças de excitação, para uma frequência nula, e dos coeficientes de restituição.

A verificação do algoritmo para o cálculo dos coeficientes de massa acrescentada e de amortecimento seccionais foi efetuada para figuras geométricas mais simples. Os valores adimensionais destes coeficientes encontram-se presentes em Vugs (1968), ao comparar as curvas verificamos que são bastante semelhantes.

As curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais encontram-se ilustradas nas figuras, 6.22, 6.24, 6.26 e 6.28 para um mar com direção de proa e nas figuras 6.30, 6.32, 6.34 e 6.36 para um mar com direção de través. Analisando as curvas e os gráficos de erro relativo em função da frequência verificamos que o erro médio dos coeficientes hidrodinâmicos A_{33} é de 5,98% e o de B_{33} tem o valor de 9,03%, no entanto os coeficientes A_{53} , B_{53} , A_{35} e B_{35} têm erros superiores. Estes coeficientes dependem da posição longitudinal das secções transversais e uma vez que as secções transversais utilizadas pelo software MaxSurf® são desconhecidas, e possivelmente

diferentes das utilizadas na ferramenta de cálculo desenvolvida, esta diferença pode justificar o erro relativo existente.

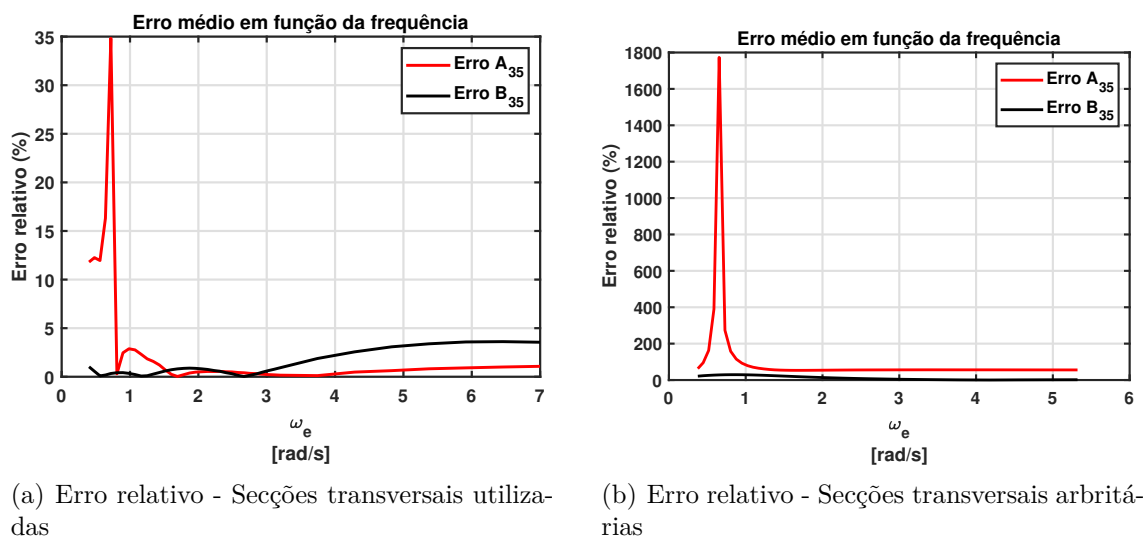


FIGURA 7.1: Comparação dos erros relativos em função da frequência para secções transversais diferentes

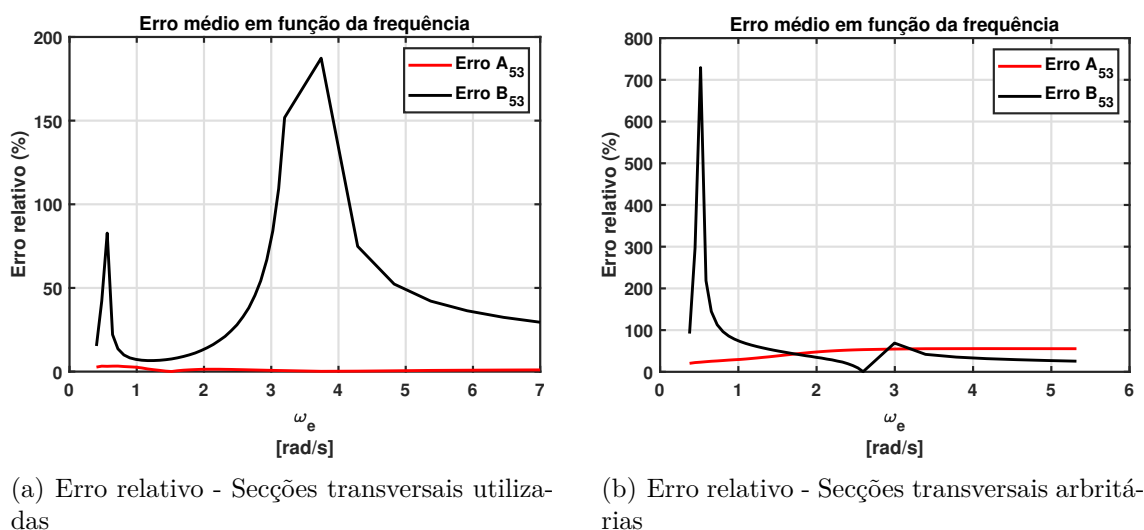


FIGURA 7.2: Comparação dos erros relativos em função da frequência para secções transversais diferentes

As figuras 7.1 e 7.2 ilustram a variação do erro relativo alterando a posição longitudinal das secções transversais. Para obter o gráfico 7.2(b), manteve-se a posição das secções transversais de proa e de popa (conservando assim o comprimento entre perpendiculares do navio) e variou-se dois metros, para ré, a posição das restantes secções.

A obtenção dos *Response Amplitude Operators*, foi feita recorrendo à Teoria das Faixas e da técnica de Mapeamento Conforme Multiparâmetro. Estes dois métodos encontram-se implementados no Software MaxSurf[®] pelo que as curvas, ilustradas nas figuras 6.40(a), 6.40(b), 6.41(a) e 6.41(b) são obtidas de forma semelhante. No entanto, as curvas não são coincidentes, estas discrepâncias podem ser causadas por:

- No método da Teoria das Faixas há alguma instabilidade no cálculo para frequências baixas, $\omega_e < 0.25$;
- O Software MaxSurf[®] utiliza secções transversais arbitrárias, podendo estas serem diferentes das utilizadas no algoritmo desenvolvido;
- O número coeficientes de Mapeamento Conforme Multiparâmetro determinados pelo MaxSurf[®] não são conhecidos, pelo que podem ser diferentes dos utilizados;
- Os valores de I_{44} e I_{55} utilizados na ferramenta cálculo foram calculados recorrendo a fórmulas empíricas retiradas do *Principles of Naval Architecture*.

Uma vez calculados os *Response Amplitude Operators* para a fragata da Classe Vasco da Gama e para o navio de patrulha oceânica da classe Viana do Castelo, é possível verificar o seguinte:

- Os gráficos RAO em Balanço para mares de proa e de popa, apresentam valores numa ordem de grandeza 10^{-3} e de 10^{-4} , sendo valores insignificativos;
- Os gráficos RAO em Arfagem para todos os mares estudados, quando a frequência de encontro tende para 0 ($\omega_e \rightarrow 0$), a resposta tende para 1, ou seja quando o navio acompanha o movimento da onda, a altura da resposta é igual à altura da onda;
- Quando as frequências tendem para infinito ($\omega_e \rightarrow \infty$) os gráficos de RAO tendem todos para 0;
- Em arfagem, considerando um mar com direção de proa ou de popa, as curvas são semelhantes contudo, os navios de patrulha oceânica apresentam um intervalo maior de frequências até a sua resposta ser praticamente nula;
- Para ambas as classes de navio, o pico de ressonância em cabeceio considerando um mar de proa ocorre perto dos 1 rad/s , no entanto a resposta do navio patrulha é duas vezes superior;

- O pico de ressonância em balanço para um mar de través também ocorre perto dos 1 rad/s e com uma resposta superior por parte do NPO.

Conclusão

A presente dissertação de mestrado aborda o desenvolvimento de uma ferramenta computacional (em Matlab[®]) para o cálculo de *Response Amplitude Operators*. Este trabalho foi o culminar dos trabalhos desenvolvidos por Ramujane (2019) e por Balixa (2021). No trabalho elaborado por Ramujane (2019) foi utilizada a Teoria das Faixas, por forma a abordar um problema 3D de uma perspetiva 2D. A resolução do problema 2D foi obtida recorrendo ao método de Mapeamento Conforme Multiparâmetro, esta abordagem permitiu calcular os coeficientes de massa acrescentada, os coeficientes de amortecimento e o potencial da velocidade para deriva, arfagem e balanço, para determinação das forças de difração.

Ao analisar a figura 6.9 verificamos que a técnica utilizada é pouco rigorosa para navios com diversas secções transversais afetadas por estruturas como bolbos ou robaletes. No caso do bolbo dos navios de patrulha oceânica da classe Viana do Castelo, este situa-se na proa do navio a uma distância do centro de gravidade superior a 30 m. Por exemplo, na determinação do coeficiente global A_{35} ao multiplicarmos esta distância pelo valor do coeficiente a_{33} da secção mais a vante, resultará num erro que afetará bastante o resultado. Para colmatar este erro, um dos métodos a considerar é o método de Frank. Este também é baseado na Teoria das Faixas e na teoria potencial do escoamento, contudo as secções transversais são representadas por um determinado número de pontos, unidos entre si por segmentos de reta.

A ferramenta de cálculo desenvolvida compreende algum código desenvolvido pelos autores acima mencionados. Para tal, foi necessário efetuar algumas alterações para que houvesse compatibilidade entre os resultados obtidos, nomeadamente na frequência a que os coeficientes hidrodinâmicos estavam a ser determinados. O programa elaborado neste trabalho permite determinar os *Response Amplitude Operators* para navios em que o seu comprimento seja maior que a sua boca e calado e que a boca seja muito menor que o comprimento de onda. Para além disso a ferramenta desenvolvida apresenta valores com menos erro até uma frequência de encontro inferior a 3 rad/s. Para frequências de encontro negativas a teoria implementada na ferramenta de cálculo não se aplica. Como podemos verificar nas figuras 6.40 e 6.39 a partir da frequência de 1,838 rad/s, o valor da frequência de

encontro para a velocidade de 10 nós é negativa, alterando bastante a veracidade dos resultados.

Para determinar os *Response Amplitude Operators* é necessário efetuar o mapeamento conforme das secções transversais recorrendo à ferramenta auxiliar. Estes valores serão ficheiro de entrada na ferramenta de cálculo principal. A validação dos resultados obtidos foi efetuada recorrendo à literatura clássica existente e ao software comercial MaxSurf[®]. No entanto, não foi possível efetuar a validação com dados reais.

Trabalhos Futuros

Como possíveis trabalhos futuros, realça-se:

- Validação da ferramenta desenvolvida, comparando com dados reais;
- Validação e verificação relativamente a normas existentes para o comportamento dos navios no mar, *Seakeeping*, como por exemplo o STANAG 4154.
- Evolução da ferramenta desenvolvida, implementando espetros de onda.

Bibliografia

- American Bureau of Shipping. (2016). Guidance notes on selecting design wave by long term stochastic method. *Guidance notes - American Bureau of Shipping*, (October), 1–20.
- Arriaga, D., & Matos, C. (2012). *Método de Painel para o Cálculo do Escoamento Potencial em Torno de Vários Perfis Sustentadores* Diogo de Arriaga e Cunha Matos Chaves Engenharia Mecânica Júri (Dissertação para obtenção do Grau de Mestre). Instituto Superior Técnico.
- Balixa, N. (2021). *Desenvolvimento de um Algoritmo de Cálculo das Forças de Froude-Krylov e de Difração* (Dissertação para obtenção do grau Mestre). Escola Naval, Alfeite.
- Belga, F., Sutulo, S., & Guedes Soares, C. (2018). Comparative study of various strip-theory seakeeping codes in predicting heave and pitch motions of fast displacement ships in head seas. *Progress in Maritime Technology and Engineering - Proceedings of the 4th International Conference on Maritime Technology and Engineering, MARTECH 2018*, (April), 599–610.
- Bernard Le Méhauté. (1976). *An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves*. Springer science business media, llc 1976.
- Bertram, V. (2000). *Practical Ship Hydrodynamics*. Butterworth Heinemann.
- Chung, T. J. (1978). *Finite element analysis in fluid dynamics / T. J. Chung*. McGraw-Hill International Book Co.
- Denis, M., & Pierson, W. (1953). *On the Motions of Ships in Confused Seas*, The Society of Naval Architecture e Marine Engineers in New York.
- Falnes, J., & Kurniawan, A. (2020). *Ocean waves and oscillating systems Linear interactions including waveenergy extraction* (2^a ed., Vol. 8). Cambridge University Press.
- Faltinsen, O. M. (1990). *Sea Loads on ships and offshore structures*. Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Fossen, T. I. (2011). *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control* (First Edit). John Wiley; Sons Ltd.
- Frank, W. (1967). *Oscillation of cylinders in or below the free surface of deep fluids* (rel. téc.). Naval Ship Research e Development Center. Washington, D.C.

- Granger, C. W. J. (1962). Statistical theory of communication, by Y. W. Lee. John Wiley and Sons, New York, 1960. pp. xviii + 510. *Naval Research Logistics Quarterly*, 9(2), 161–162.
- Grigoropoulos, G. J. (2010). *On the Seakeeping Operability of Naval Ships*, National Technical University of Athens, School of Naval Architecture e Marine Engineering 9 Heroon Polytechniou.
- Hasselmann, K., Barnett, T., Bouws, E., Carlson, H., Cartwright, D., Enke, K., Ewing, J., Gienapp, H., Hasselmann, D., Kruseman, P., Meerburg, A., Muller, P., Olbers, D., Richter, K., Sell, W., & Walden, H. (1973). Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deut. Hydrogr. Z.*, 8, 1–95.
- Hess, J. L., & Smith, A. M. O. (1967). Calculation of potential flow about arbitrary bodies. *Progress in Aerospace Sciences*.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *References*. Cambridge University Press.
- Ibinabo, I., & Tamunodukobipi, D. T. (2019). Determination of the Response Amplitude Operator (s) of an FPSO.
- Ion, A., & Ticu, I. (2015). The finite element method for calculating the marine structural design. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 95(1), 0–6.
- Islam, M. R., Rahaman, M. M., & Kumar, A. (2019). Study of a TLP motions and forces using 3D source technique. *Journal of Naval Architecture and Marine Engineering*.
- J.N.Newman. (1977). *Marine Hydrodynamics*. Massachusetts Institute of Technology All.
- Journée, J. (2001). *Theoretical Manual of SEAWAY* (rel. téc. February). Delft University of Technology Shiphydromechanics Laboratory. Mekelweg 2, 2628 CD Delft The Netherlands Report1216a.
- Journée, J., & Adegeest, L. (2003). *Theoretical Manual of Strip Theory Program SEAWAY for Windows* (rel. téc.). Ship Hydromechanics Laboratory Delft University of Technology.
- Journée, J., & Massie, W. (2001). *Offshore Hydromecanics* (First Edit). Delft University of Techonology.
- Kaklis, P. D., Politis, C. G., Belibassakis, K. A., Ginnis, A. I., Kostas, K. V., & Gerostathis, T. P. (2017). Boundary Element Methods and Wave Loading on Ships. Em E. Stein, R. de Borst & T. J. Hughes (Eds.), *Encyclopedia of Computational Mechanics Second Edition*. John Wiley; Sons, Ltd.

- Lewis, E. V. (1989). *Principles of Naval Architecture*. The Society of Naval Architects; Marine Engineers.
- Lloyd, A. (1998). *SEAKEEPING: Ship behaviour in rough weather* (First Edit). British Library.
- Mantzaris, D. A. (1998). *A Rankine Panel Method as a Tool for the Hydrodynamic Design of Complex Marine Vehicles* (Degree of Doctor of Philosophy in Hydrodynamics). Massachusetts Institute of Technology.
- Martinussen, M. (2011). *Parametric Roll Resonance of a Fishing Vessel as function of Forward Speed and Sea State* (Dissertation for obtaining the Marter's degree). Norwegian University of Science e Technology.
- Pacuraru, F., Domnisoru, L., & Pacuraru, S. (2020). On the comparative seakeeping analysis of the full scale kcs by several hydrodynamic approaches. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(12), 1–32.
- Pedersen, T. (2000). *Wave Load Prediction-A Design Tool* (PhD Thesis). Technical University of Denmark.
- Ramujane, N. M. (2019). *Desenvolvimento de um algoritmo em Matlab para determinar coeficientes hidrodinâmicos pelo método de mapeamento conforme multi-parâmetro* (Dissertação para obtenção do grau mestre). Escola Naval,Alfeite.
- Salvatore, F., Sarichloo, Z., & Calcagni, D. (2018). Marine turbine hydrodynamics by a boundary element method with viscous flow correction. *Journal of Marine Science and Engineering*, 6(2).
- Salvesen, N., Tuck, E., & Faltinsen, O. (1970). *Ship motions and sea loads*, The Society of Naval Architects e Marine Engineers.
- Skandali, D. (2015). *Identification of response amplitude operators for ships based on full scale measurements* (Dissertation for obtaining the Marter's degree). Delft University of Techology, Netherlands.
- Stewart, R. H. (1987). Physical oceanography. *Deep Sea Research Part B. Oceanographic Literature Review*, 34(8), 629–645.
- Ursell, F. (1949). *On the heaving motion of a circular cylinder on the surface of a fluid* (April 1948), Department of Mathematics, The University.
- Vugts, J. H. (1968). *The Hydrodynamic Coefficients for Sway, Heaving and Rolling Cylinders in a free surface* (rel. téc.). Delft University of Techology. Netherlands.

Apêndice A - Expressões para cálculo de coeficientes hidrodinâmicos globais

A.1 Modo Vertical

$$A_{33} = \int a_{33} dx$$

$$B_{33} = \int b_{33} dx$$

$$A_{35} = - \int x a_{33} dx - \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{33}$$

$$B_{35} = - \int x b_{33} dx + U_0 A_{33}$$

$$A_{53} = - \int x a_{33} dx + \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{33}$$

$$B_{53} = - \int x b_{33} dx - U_0 A_{33}$$

$$A_{55} = \int x^2 a_{33} dx + \frac{U_0^2}{\omega_e^2} A_{33}$$

$$B_{55} = \int x^2 b_{33} dx + \frac{U_0^2}{\omega_e^2} B_{33}$$

A.2 Modo Horizontal

$$\begin{aligned}
 A_{22} &= \int a_{22} dx \\
 B_{22} &= \int b_{22} dx \\
 A_{24} &= A_{42} = \int a_{24} dx \\
 B_{24} &= B_{42} = \int b_{24} dx \\
 A_{26} &= \int x a_{22} dx + \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{22} \\
 B_{26} &= \int x a_{22} dx - U_0 A_{22} \\
 A_{44} &= \int a_{44} dx \\
 B_{44} &= \int b_{44} dx + B_e = B_{44}^* \\
 A_{46} &= \int x a_{24} dx - \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{24} \\
 B_{46} &= \int x b_{24} dx - U_0 A_{24} \\
 A_{62} &= \int x a_{22} dx - \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{22} \\
 B_{62} &= \int x b_{22} dx + U_0 A_{22} \\
 A_{64} &= \int x b_{24} dx - \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{24} \\
 B_{64} &= \int x b_{24} dx + U_0 A_{24} \\
 A_{66} &= \int x^2 a_{22} dx + \frac{U_0^2}{\omega_e^2} A_{22} \\
 B_{66} &= \int x^2 b_{22} dx + \frac{U_0^2}{\omega_e^2} B_{22}
 \end{aligned}$$

Apêndice B - Coordenadas de uma das secções transversais reais da Fragata Vasco da Gama

As coordenadas em Apêndice representam os pontos que caracterizam a primeira secção transversal real da Fragata Vasco da Gama situada na perpendicular a ré. A coluna 1 contém a coordenada x , a coluna 2 as coordenadas y e a coluna 3 as coordenadas z .

– 53.1	0.000	2.999
– 53.1	1.225	3.082
– 53.1	2.450	3.175
– 53.1	2.450	3.175
– 53.1	3.460	3.256
– 53.1	4.875	3.500
– 53.1	5.500	3.800
– 53.1	5.806	4.175
– 53.1	6.330	5.000
– 53.1	6.535	5.500
– 53.1	6.710	6.000
– 53.1	6.975	7.000
– 53.1	7.151	8.000
– 53.1	7.326	9.000
– 53.1	7.400	9.417

Apêndice C - Código em Matlab da Ferramenta de cálculo

<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/135787-response-amplitude-operator-s-app>