



ESCOLA NAVAL

talant de bi-faire



Nelson Maneira Ramujane

Desenvolvimento de um algoritmo em matlab para determinar coeficientes hidrodinâmicos pelo método de mapeamento conforme multiparâmetro

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



Alfeite

2019



ESCOLA NAVAL

talant de bifaire



Nelson Maneira Ramujane

Desenvolvimento de um Algoritmo em Matlab para Determinar Coeficientes Hidrodinâmicos pelo Método de Mapeamento Conforme Multiparâmetro

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

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

Prof. Miguel Ângelo Pereira Bento Moreira

O Aluno Mestrando,

Nelson Maneira Ramujane

Nelson Maneira Ramujane
ASPOF EN-MEC

O Orientador,

Paulo Alexandre Marques Pires da Silva

Paulo Alexandre Marques Pires da Silva
CRF EN-ME

Alfeite

2019

"O que sabemos é uma gota, o que ignoramos é um oceano."
Isaac Newton

À minha querida Ana Maria Jorge Manjor e aos meus pais Maneira
Ramujane e Beatriz Olímpio Orombeira

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela vida e saúde, aos meus pais e irmãos pelo carinho e força que sempre transmitiram com bastante amor, aos meus orientadores, CFR EN MEC Paulo Pires da Silva e o Professor Miguel Bento Moreira que de forma incansável sempre estiveram dispostos e disponíveis para ensinar, ajudar e dar apoio em tudo que foi preciso. Um agradecimento muito especial vai a minha companheira de vida Ana Maria Jorge Manjor que sempre esteve do meu lado embora distante, inspirou-me aconselhou-me, motivou-me e sempre deu-me forças quando mais precisava ao longo de todo o percurso na Escola Naval.

Aos meus camaradas da Escola Naval, e amigos agradeço pelo espírito de camaradagem e apoio moral e por terem tornado os dias mais divertidos e transmitido coragem para continuar. Ao Guarda-Marinha Silva Ferreira pelo impulso inicial que foi muito importante.

A todos que direta e indiretamente contribuíram para que este sonho se tornasse uma realidade, vão os meus sinceros agradecimentos.

Resumo

Sob certas suposições, as forças hidrodinâmicas que atuam nos corpos esbeltos podem ser obtidas aplicando a teoria de faixas que permite reduzir o problema hidrodinâmico tridimensional a uma série de problemas bidimensionais mais fáceis de resolver. Nesta abordagem, o corpo esbelto é dividido num número finito de faixas que podem ser estudadas por métodos 2D usando mapeamento conforme como por exemplo o mapeamento conforme de dois parâmetros de Lewis ou a técnica de mapeamento conforme multiparâmetro. Esses parâmetros, baseados em formas truncadas de uma série de Laurent, transformam a seção submersa do corpo em estudo na forma semicircular na vizinhança do qual o problema hidrodinâmico é mais facilmente resolvido. Um dos aspectos chave na aplicação desta técnica reside na determinação rigorosa dos diferentes parâmetros que caracterizam o mapeamento conforme multiparâmetro. A determinação desses parâmetros baseia-se na minimização do quadrado da norma euclidiana do resíduo. Tipicamente, pode-se utilizar o algoritmo de Gauss-Newton, ou uma de suas variações, para minimizar a norma Euclidiana do resíduo acima mencionada e, assim, determinar os parâmetros desconhecidos do mapeamento conforme. Alternativamente, pode-se usar uma abordagem heurística de minimização, como, por exemplo, o método de recozimento simulado. O método de recozimento simulado explora a analogia entre recozimento em sólidos e otimização para aproximar o mínimo global de uma dada função. O algoritmo correspondente é robusto e sua implementação é relativamente simples. Neste trabalho, abordando seções de casco simétricas, desenvolveremos, apresentaremos, testaremos e discutiremos uma abordagem baseada em recozimento simulado para encontrar parâmetros desconhecidos de mapeamento conforme multiparâmetro, que posteriormente serão usados para calcular os coeficientes hidrodinâmicos $(\mathbf{A}_{jk}, \mathbf{B}_{jk})$ que também são apresentados e comparados com soluções já conhecidas. Todo o código é desenvolvido em *Matlab*[®].

Abstract

Under certain simplifying assumptions hydrodynamic forces on slender bodies can be obtained applying strip theory reducing the three-dimensional hydrodynamical problems to a series of two-dimensional problems easier to solve. In this approach the slender body is divided into a finite number of strips which can be studied by 2D methods using conformal mapping methods such as the Lewis two-parameter conformal mapping or the multi-parameter conformal mapping. These conformal mapping methods, based on truncated forms of a Laurent series, transform the boundary of the submerged section of the studied body into a semi-circular boundary in the vicinity of which the hydrodynamic problem is more easily solved. One of the key aspects in the application of this technique lies in the strict determination of the different parameters that characterize the selected multi-parameter conformal mapping. The determination of these parameters is based on the minimization of the square of the Euclidean norm of the residue. Typically, one can use the Gauss–Newton algorithm, or one of its variations, to minimize the above mentioned Euclidean norm of the residue and thus determine the conformal mapping unknown parameters. Alternatively one can use a minimization heuristic approach such as, for instance, the simulated annealing method. The simulated annealing method explores the analogy between annealing in solids and multivariate optimization to approximate the global minimum of a given function. The corresponding algorithm is robust and its implementation is relatively simple. In this work, addressing symmetric hull sections we will develop, present, test and discuss a simulated annealing based approach to find arbitrary multi-parameter conformal mapping unknown parameters. These parameters are also used to calculate the hydrodynamic coefficients (\mathbf{A}_{jk} , \mathbf{B}_{jk}) of this vessel whose results are also presented and compared with known solutions. All code developed in Matlab[®].

Índice Geral

Epígrafe	I
Dedicatória	III
Agradecimentos	V
Resumo	VII
Abstract	IX
Índice Geral	XI
Índice de Figuras	XV
Índice de Tabelas	XXI
Lista de Acrónimos e Abreviaturas	XXIII
Notação Técnica e Científica	XXV
Introdução	1
1 Estado de arte	3
1.1 Teoria de Faixas (Strip Teory)	3
1.2 Método do Painel	4
1.3 Método de Frank	4
1.4 Método <i>CFD</i>	5
2 Teoria potencial de escoamento de fluido	7
2.1 Condições de fronteira	9
3 Sistemas de coordenadas	11

4	Dinâmica de navio em ondas regulares	13
4.1	Forças hidrodinâmicas	16
5	Mapeamento Conforme Multiparâmetro	21
5.1	Transformações conforme	22
5.2	Formulação Numérica	24
5.3	Validação do método	28
5.4	Implementação do método a uma fragata da marinha Portuguesa	30
6	Cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos	33
6.1	Cálculo de Coeficientes Hidrodinâmicos pelo Método de Mapeamento Conforme MultiParâmetro	36
7	Comparação de Resultados do Algoritmo Desenvolvido	39
7.1	Comparação Preliminar dos Resultados Obtidos: Massa Acrescentada e Amortecimento	40
7.1.1	Análise e discussão dos resultados preliminares	44
7.2	Comparação de Resultados: Método de Mapeamento conforme Multiparâmetro vs método de Frank	45
7.2.1	Massa acrescentada e amortecimento em Arfagem	46
7.2.2	Massa acrescentada e amortecimento em Deriva	52
7.2.3	Massa acrescentada e amortecimento em Deriva devido a Balanço	57
7.2.4	Massa acrescentada e amortecimento em Balanço.	61
7.2.5	Massa acrescentada e amortecimento em Balanço devido a Deriva.	66
7.3	Comparação de dois algoritmos para o Método de Mapeamento Conforme Multiparâmetro	72
7.3.1	Massa acrescentada e amortecimento em Arfagem	72
8	Cálculos de Coeficientes Globais	77
8.1	Comparação dos resultados obtidos: Modo Vertical	78
8.2	Representação gráfica dos resultados obtidos no modo horizontal	80
9	Análise e Discussão de Resultados	85
10	Conclusões	87
11	Trabalhos Futuros	89
	Referências Bibliográficas	91

A	Expressões para cálculo de coeficientes hidrodinâmicos locais	93
A.1	Massa Acrescentada e Amortecimento em Arfagem	93
A.2	Massa Acrescentada e Amortecimento em Deriva e em Deriva devido ao Balanço	96
A.3	Massa Acrescentada e Amortecimento em Balanço e em Balaço devido a Deriva	99
B	Expressões para cálculo de coeficientes hidrodinâmicos globais	103
B.1	Modo Vertical	103
B.2	Modo Horizontal	104
C	Interface gráfica	105

Índice de Figuras

2.1	Secção ilustrando a superfície livre. Adaptado (Lewis,1989)	9
3.1	Sistema de coordenadas. adaptado de (Journée and Adegeest,2003)	11
5.1	Preservação do ângulo entre duas direções diferentes em um mapeamento conforme.	23
5.2	Relação de Mapeamento Conforme entre os dois Planos	24
5.3	Secções da Navio da Marinha Portuguesa	30
5.4	Secções da Navio da Marinha Portuguesa	31
5.5	Secções da Navio da Marinha Portuguesa	31
5.6	Representação 3D: Navio da Marinha Portuguesa	32
6.1	Exemplos de efeitos dinâmicos que afetam os navios (Journée and Pinkster, 1997)	34
7.1	Legenda das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos adimensionais (Lloyd,1998).	39
7.2	Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.	40
7.3	Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.	41
7.4	Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.	41
7.5	Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.	42
7.6	Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.	42
7.7	Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.	43
7.8	Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.	43
7.9	Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.	44
7.10	Secções 4, 12, 19 da Fragata da Marinha Portuguesa obtidas pelo mapeamento conforme multiparâmetro	45
7.11	Secções 4, 12, 19 da Fragata da Marinha Portuguesa obtidas pelo mapeamento conforme multiparâmetro	46
7.12	Secções 4, 12, 19 da Fragata da Marinha Portuguesa obtidas pelo mapeamento conforme multiparâmetro	46

7.13	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	47
7.14	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	47
7.15	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	48
7.16	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	48
7.17	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	49
7.18	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	49
7.19	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	50
7.20	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	50
7.21	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	51
7.22	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	52
7.23	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	53
7.24	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	53
7.25	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	54
7.26	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	54
7.27	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	55

7.28	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	55
7.29	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	56
7.30	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	56
7.31	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	57
7.32	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	58
7.33	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	58
7.34	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	59
7.35	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	59
7.36	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	60
7.37	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	60
7.38	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	61
7.39	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	61
7.40	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	62
7.41	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	62
7.42	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	63

7.43	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	63
7.44	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	64
7.45	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	64
7.46	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	65
7.47	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	66
7.48	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	66
7.49	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	67
7.50	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	67
7.51	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	68
7.52	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	68
7.53	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	69
7.54	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	69
7.55	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	70
7.56	Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank	70
7.57	Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST	71

7.58	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos do algoritmo elaborado na EN e IST	72
7.59	Evolução do Erro ao longo da Frequência: Método de MCM vs IST)	73
7.60	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos do algoritmo elaborado na EN e IST	73
7.61	Evolução do Erro ao longo da Frequência: Método de MCM vs IST)	73
7.62	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos do algoritmo elaborado na EN e IST	74
7.63	Evolução do Erro ao longo da Frequência: Método de MCM vs IST)	74
7.64	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos do algoritmo elaborado na EN e IST	74
7.65	Evolução do Erro ao longo da Frequência: Método de MCM vs IST)	75
7.66	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos do algoritmo elaborado na EN e IST	75
7.67	Evolução do Erro ao longo da Frequência: Método de MCM vs IST)	75
7.68	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos do algoritmo elaborado na EN e IST	76
7.69	Evolução do Erro ao longo da Frequência: Método de MCM vs IST)	76
8.1	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN e IST para A_{33} e B_{33}	78
8.2	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN e IST para A_{35} e B_{35}	78
8.3	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN e IST para A_{53} e B_{53}	79
8.4	Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN e IST para A_{55} e B_{55}	79
8.5	Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}	80
8.6	Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}	80
8.7	Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}	81
8.8	Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}	81

8.9	Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}	82
8.10	Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}	82
8.11	Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}	83
8.12	Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}	83
9.1	Erro relativo por secções	86

Índice de Tabelas

5.1	Coordenadas dos pontos da meia boca da secção a meio navio.	28
5.2	Comparação dos Coeficientes de Mapeamento Conforme . . .	29
5.3	Mapeamento Conforme Multimarâmto implemetando a secção transversal de um Cargueiro	29

Lista de Acrónimos e Abreviaturas

CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
IST	Instituto Superior Técnico
MCM	Mapeamento Conforme Multi-parâmetro

Notação Técnica e Científica

Latim

A	Área submersa da secção.
\mathbf{A}_{jk}	Coefficientes de massa acrescentada
$a_1, a_3, \dots, a_{2n+1}$	Parâmetros de mapeamento conforme.
B	Boca submersa da secção.
\mathbf{B}_{jk}	Coefficientes de amortecimento
B_0	Metade da boca submersa da secção.
\mathbf{C}_{jk}	Coefficientes da força de restituição hidrostática
D	Calado da secção.
$\mathbf{F}_j(t)$	Campo da força externa total na direção $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$
F_{Gj}	Componente da força gravítica que atua no casco na direção j .
F_{Hj}	Componente da força hidrodinâmica que atua no casco na direção j .
F_{HSj}	Componente da Força Hidrostática na direção j .
F_{HDj}	Componente das Força Hidrodinâmica na direção j .
\tilde{F}_{HDj}	Componente da Força instável da força hidrodinâmica na direção j .
F_{EXj}	Componente da Força de excitação na direção j .
F_j^I	Amplitude complexa da componente da força de excitação devido às ondas incidentes, denominada força de excitação de Froude-Krylov.
F_j^D	Amplitude complexa da componente da força de excitação devido às ondas difratadas, denominada força de excitação de difração.
F_{Rj}	Forças hidrodinâmicas na direção j devido ao movimento forçado denominadas forças de radiação.
f	Potencial complexo.
g	Aceleração da gravidade.
\mathbf{h}	Momento de impulso de um conjunto de partículas.
$I_{jj}, j = 4, 5, 6$	Momentos de inércia em torno dos eixos x, y e z .
i, j, k	Vetor unitário em x, y e z respectivamente
K, M e N	Equações dos momentos de balanço, cabeceio e guinada de um navio, respetivamente, considerando-o um corpo rígido.

XXVI

M	Momentos em relação a o (centróide) referentes à dinâmica do navio.
n	Vetor normal na face oblíquo $n = (n_x, n_y, n_z)$.
xyz	Sistema não inercial, fixo ao navio.
P	Pressão do fluído.
p, q e r	Componentes de velocidade angular dos movimentos de balanço, cabeceio e guinada.
S	Superfície das obras vivas do casco do navio.
\mathbf{T}_{jk}	Função transferência.
t	Instante de tempo.
\mathbf{U}_0	Velocidade média de avanço do navio

Grego

$\eta_j(t)$	Resposta do navio em ondas sinusoidais dependentes do tempo t .
$\ddot{\eta}_k$	Acelerações harmónica no modo k .
$\ddot{\eta}_j(t)$	Aceleração no grau de liberdade j , no sistema com os eixos fixos no navio, referindo-se $j = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ a avanço, deriva, arfagem balanço, cabeceio e guinada, respetivamente.
$\bar{\eta}_j$	Amplitude complexa da resposta do navio na direção j .
μ	Ângulo da onda.
ϕ_T	Potencial de perturbação instável.
Δ	Massa total do navio.
Δt	Intervalo de tempo.
Δ_{jk}	Matriz de inércia do navio.
ϕ	Potencial de velocidade
ϕ_j	Potencial de radiação do movimento oscilatório
ϕ_I	Potencial incidente da onda não perturbadora
ϕ_d	Potencial de difração ao redor do corpo
u, v, w	Componente da velocidade na direção x, y, z respectivamente
ψ	Função potencial de corrente
ω_e	Frequência de encontro
ω_0	Frequência de oscilação
ρ	Densidade da água

Introdução

A área do conhecimento desta dissertação de mestrado é a arquitetura naval e engenharia oceânica, que utiliza outras áreas do conhecimento, tais como a matemática, mecânica dos fluidos, programação, análise numérica, entre outras. A garantia de acesso, exploração e segurança no mar exige vastos conhecimentos científicos destas áreas de conhecimento para o desenvolvimento de projetos de construção e operação das várias formas de plataformas navais.

Esta dissertação, surge no seguimento de um trabalho anterior efetuado por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) em que estuda o problema da radiação, desenvolvendo um algoritmo em *Matlab*[®] usando as transformação de Lewis, para cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos referentes à massa acrescentada e amortecimento nos seus seis graus de liberdade. Neste sentido, pretende-se, desenvolver um algoritmo também em *Matlab*[®] que permitirá o cálculo de coeficientes hidrodinâmicos referentes à massa acrescentada e amortecimento nos seus seis graus de liberdade usando mais do que 3 parâmetros de mapeamento conforme (Mapeamento Conforme Multiparâmetro).

Antes de mais serão encontrados os parâmetros de mapeamento que a partir da série de Laurent truncada irá permitir uma descrição precisa das seções reais do casco. A técnica de mapeamento conforme descreve a transformação das coordenadas de um círculo unitário no plano de referência para coordenadas de seções arbitrárias no plano físico. O algoritmo de Mapeamento conforme aqui apresentado aplica-se apenas a seções simétricas. Os parâmetros de mapeamento conforme que melhor descrevem as seções serão obtidos através da minimização do quadrado da norma euclidiana do resíduo recorrendo ao método do método de recozimento simulado.

Iremos comparar os resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido com resultados de algoritmos conhecidos e resultados obtidos da tese anterior desenvolvido aplicando as formas de Lewis de 2 parâmetros.

Numa primeira fase aproximaremos as seções apenas com 2 parâmetros (formas de Lewis) os resultados serão comparados com os resultados que

constam nos livros *Principles of Naval Architecture* Vol. III (Lewis, 1989) e *Seakeeping: Ship behaviour in rough weather* (Lloyd, 1998). Posteriormente é utilizando mais do que 2 parâmetros e compararemos os resultados determinados pelo algoritmo de Frank do Instituto Superior Técnico (IST) e pelo algoritmo de Mapeamento conforme Multiparâmetro (MCM) também do IST.

Alguns capítulos importantes que ajudam a compreender os problemas da radiação podem ser consultados na dissertação do Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018).

Capítulo 1

Estado de arte

O navio no mar está submetido a perturbações provocadas por ondas e outras forças, o que faz com que a estrutura do navio oscile ou se deforme quando submetida a tais forças. Para evitar oscilações excessivas que comprometem estruturalmente a plataforma, o seu deslocamento, o desempenho da guarnição e evitar que ocorram deformações excessivas e ou permanentes, é necessário prever qual a resposta que o navio terá quando excitado pelas ondas. Para o efeito é preciso estimar os coeficientes hidrodinâmicos apropriados. Estes coeficientes podem ser determinados pelo método de teoria das faixas (da Silva Larsen, 2012), Mapeamento conforme (Lloyd, 1998), método dos painéis (de Arriaga and Chaves, 2012), método de Frank (Frank, 1967) e método de *Computational Fluid Dynamics (CFD)* (Albaali and Farid, 2006) constituindo técnicas aceites pela comunidade científica para obter o comportamento dinâmico do navio excitado pelas ondas, o denominado “comportamento no mar” ou *seakeeping*.

Prever o comportamento dinâmico do navio no mar quando excitado pelas ondas marítimas, um aspeto determinante para a análise da estabilidade, robustez e capacidade operacional do navio, assim sendo, estas qualidades náuticas não podem em nenhum momento serem postas de parte durante a fase de projeto, sob pena de consequências catastróficas. As técnicas ou métodos mencionados acima, irão ser seguidamente descritos de forma resumida.

1.1 Teoria de Faixas (Strip Theory)

O método da teoria das faixas é um método muito utilizado para determinar coeficientes hidrodinâmicos. Para a sua implementação considera-se que um navio é representado por um número finito de faixas, ou secções transversais uniformes independentes e ligadas rigidamente umas às outras

(da Silva Larsen, 2012). outras simplificações são considerados para a aplicação deste método tais como a consideração de que o navio é um corpo rígido flutuando um fluido ideal, isto é: homogêneo, incompressível, irrotacional e sem viscosidade. Importa referir que esta abordagem concentram-se apenas na parte do casco abaixo da linha de água, admitindo adicionalmente que os movimentos deste corpo flutuante em ondas pode ser linearizado (Journee and Adegeest, 2003). Os coeficientes hidrodinâmicos de cada faixa são obtidos assumindo que cada faixa se trata de um parte do segmento de um cilindro de comprimento longo, sobre o qual é calculado o potencial bidimensional. Os coeficientes globais calculam-se integrando os coeficientes de cada faixa (coeficientes locais) ao longo do comprimento do navio (Journee and Adegeest, 2003). Das ferramentas computacionais existentes no mercado e que utilizam o método de teoria de faixas destacam-se o Octopus Office elaborado por Amarcon INc. e ShipX (Veres) elaborado pela MARINTEK (Fossen and Smogeli, 2004)

1.2 Método do Painel

O método do painel é um método numérico baseado na teoria potencial de escoamento do fluido regido pela equação de Laplace nas condições de fluido ideal. O cálculo de potencial de escoamento de fluido ao longo da superfície é baseado no teorema integral de Green. O teorema possibilita a transformação de equação diferencial homogênea 3D para o integral 2D (de Arriaga and Chaves, 2012). Este método permite que a superfície (casco do navio) seja discretizada num número finito de painéis. O escoamento em cada um dos painéis caracterizado por uma fonte de intensidade a determinar e distribuição de dipolos sujeita às condições de fronteira correspondentes. Tendo em conta as condições de fronteira pode-se calcular a intensidade da fonte e gerar posteriormente o escoamento global. Existem numerosos estudos desenvolvidos nestas áreas seja no contexto aerodinâmico quer hidrodinâmico, implementados em diferentes linguagens de programação. De referir a aplicação comercial WAMIT (WAMIT Inc., 2010).

1.3 Método de Frank

O método de Frank é baseado na teoria de faixas e na teoria potencial de escoamento de fluido, não utilizando a técnica de mapeamento conforme para determinar os coeficientes hidrodinâmicos. Assim como se verifica na teoria de faixas várias simplificações são consideradas. Como se referiu, Frank

(Frank, 1967) utiliza a teoria potencial de escoamento de fluido para a aplicação da sua técnica.

Considerando pequenas amplitudes e velocidades, todos os termos não lineares da condição de superfície livre, condição fronteira cinemática e dinâmica podem ser desprezadas.

Frank usa a função de Green que satisfaz a condição fronteira linear na superfície livre para representar o potencial de velocidade.

Admitida a simetria longitudinal da secção em estudo, escolhem-se $N+1$ pontos da secção do navio do quarto quadrante. Os pontos da secção são sucessivamente unidos por retas. As secções do terceiro quadrante serão imagens das secções representadas no quarto quadrante visto que as secções são simétricas.

Este método determina no ponto médio de cada segmento de reta a intensidade da correspondente fonte.

1.4 Método *CFD*

Os métodos *CFD* são actualmente aplicados em várias áreas de engenharia. Trata-se de um método de cálculo pesado, exigindo a utilização computadores potentes para a realização dos cálculos. Segundo (Oliveira and Lopes, 2010) o método de volume controlado é dos mais usados para a discretização das equações diferenciais (transformar as equações diferenciais em algébricas). Este método, comparativamente aos anteriormente descritos não se baseia na teoria potencial de escoamento dos fluidos. Segundo (Albaali and Farid, 2006), no seu artigo *Fundamentals of Computation Fluid Dynamics*, podemos consultar os aspectos relevantes a considerar na sua aplicação.

Capítulo 2

Teoria potencial de escoamento de fluido

Neste capítulo iremos considerar algumas simplificações relativas às propriedades do fluido, às condições de fronteira e às características do corpo que servirá de base à aplicação da teoria potencial. Neste sentido assume-se que o escoamento ocorre no exterior de um corpo rígido esbelto e é irrotacional, invíscido e incompressível.

Nestas condições, o estudo do comportamento hidrodinâmico terá como base o cálculo do potencial de velocidade $\phi(x, y, z, t)$. Esta função satisfaz a equação de Laplace e as leis básicas da mecânica de fluidos (conservação da massa e de momento) (Tchet, 2005). De acordo com (Journée and Pinkster, 1997), a função potencial de velocidade é dividida em três partes ϕ_r ϕ_w ϕ_d onde:

ϕ_r é o potencial de radiação para o movimento oscilatório em águas calmas

ϕ_w é o potencial incidente da onda não perturbada

ϕ_d é o potencial de difração ao redor do corpo.

As derivadas parciais da função potencial de velocidade $\phi(x, y, z, t)$ permitem obter as componentes da velocidade:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial y} \quad \text{e} \quad w = \frac{\partial \phi}{\partial z}.$$

Sendo o fluido homogêneo e incompressível, o princípio da continuidade assume a forma (Journée and Adegeest, 2003).

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \tag{2.1}$$

Resultando daqui que $\phi(x, y, z, t)$ satisfaz a equação de Laplace

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (2.2)$$

Nos escoamentos bidimensionais, os campos de velocidade podem representar-se recorrendo a um campo vetorial do tipo,

$$\vec{V} = (u(x, y), v(x, y))$$

em que u e v representam respetivamente as componentes da velocidade segundo a direção dos eixos principais xx e yy .

Se o escoamento for homogéneo e incompressível, sabemos que

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \quad (2.3)$$

Se o escoamento for irrotacional então

$$\begin{aligned} \nabla \times \vec{V} = 0. \text{ implica} \\ \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Repare-se que as condições anteriores garantem que $udy - vdx = d\psi$ e $vdy + udx = d\phi$ são formas diferenciais exatas. Este facto assegura-nos a existência dos campos escalares $\psi = \psi(x, y)$ e $\phi = \phi(x, y)$ tais que

$$\begin{cases} \frac{\partial \psi}{\partial y} = u \text{ e } \frac{\partial \psi}{\partial x} = -v \\ \frac{\partial \phi}{\partial y} = v \text{ e } \frac{\partial \phi}{\partial x} = u \end{cases} \quad (2.5)$$

Admitindo que u e v são funções contínuas e com base nas equações 2.3, 2.4 e 2.5, verificamos que ψ e ϕ são funções harmónicas conjugadas, isto é,

$$f(x, y) = \phi(x, y) + i\psi(x, y)$$

é uma função holomórfica.

As funções f , ϕ e ψ designam-se respetivamente potencial complexo, função potencial de velocidade e função de corrente.

Observe-se que se um escoamento for incompressível e irrotacional existem então duas funções ψ e ϕ que descrevem o campo de velocidades

$$\vec{V} = (u(x, y), v(x, y))$$

e satisfazem a equação de Laplace, isto é, $\nabla^2 \psi = 0$ e $\nabla^2 \phi = 0$.

Conhecendo, por exemplo, a função potencial de velocidade $\phi(x, y)$ podemos determinar a distribuição de pressão pela equação de Bernoulli

$$P = \frac{1}{2} \rho V^2 - \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho (\nabla \phi \cdot \nabla \phi) - \rho g z.$$

2.1 Condições de fronteira

O cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos pelo método do mapeamento conforme exige a adoção de simplificações que viabilizam os cálculos. Consideraremos que o fluido é ideal, o navio é um corpo rígido flutuando em águas calmas e suficientemente profundas para que o efeito da perturbação no fundo não se sinta no casco (velocidade vertical no fundo é igual a zero) e a amplitude das ondas geradas pelo corpo tendem para zero a medida que elas se afastam do corpo que as gerou. O outro aspecto muito importante a considerar é a condição fronteira linearizada na superfície livre que postula que a velocidade vertical do fluido na superfície é igual à velocidade vertical do fluido na superfície livre. Por outro lado a condição de fronteira dinâmica linearizada postula que a pressão na superfície livre é igual a pressão atmosférica (Karlberg, 2014). Nestas condições a condição fronteira linearizada na superfície livre fica:

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\omega^2}{g} \phi = 0 \text{ quando } y = 0$$

Condição de fronteira no fundo estabelece

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \text{ quando } z = \infty \text{ e}$$

a condição de fronteira no infinito (longe do corpo) estabelece:

$$\nabla \Phi = 0 \text{ quando } r = \infty$$

onde r representa a distância dum ponto do corpo até um ponto arbitrário no seio do escoamento.

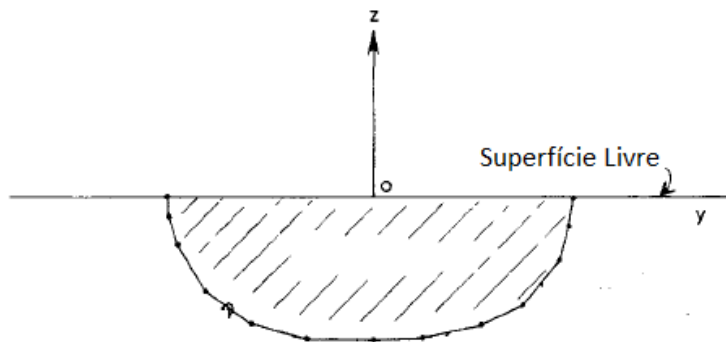


Figura 2.1: Secção ilustrando a superfície livre. Adaptado (Lewis,1989)

Capítulo 3

Sistemas de coordenadas

Consideramos três sistemas de coordenadas, representados na Figura 9.1, o primeiro dos quais (x_0, y_0, z_0) fixo em relação à terra, com z_0 orientado verticalmente, x_0 e y_0 definido num plano coincidente com a superfície da água sem ondulação. A orientação de x_0 coincide com a direção da propagação da onda. O segundo sistema de coordenadas $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$, fixo no navio, com origem no centro de gravidade G , e se move com todos os movimentos do navio sendo o eixo \bar{z} normal ao plano anterior O terceiro sistema (x, y, z) move-se com à velocidade constante U_0 na direção positiva do avanço do navio relativamente ao sistema fixo (x_0, y_0, z_0) e relaciona-se da seguinte forma:

$$(x_0, y_0, z_0) = (x + U_0t, y, z)$$

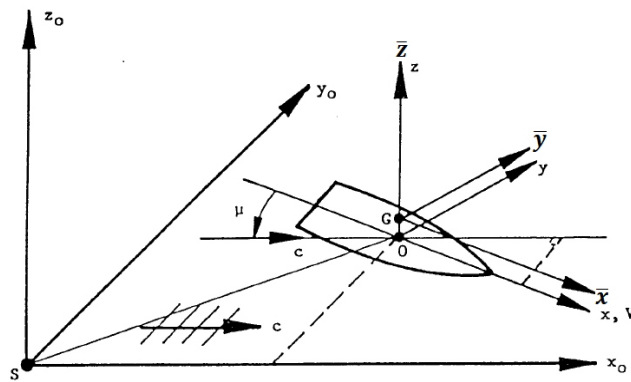


Figura 3.1: Sistema de coordenadas. adaptado de (Journée and Adegeest,2003)

Capítulo 4

Dinâmica de navio em ondas regulares

As equações apresentadas neste capítulo seguem a obra de *Principles of Naval Architecture* (Lewis, 1989) sendo apresentadas as deduções das equações hidrodinâmicas nos seus 6 graus de liberdade.

A dinâmica do navio em ondas regulares nos seus 6 graus de liberdade está sujeita a ações de várias forças, e conseqüentemente como resposta a estas forças o navio gera vários movimentos. Para o estudo dessa dinâmica torna-se necessário considerar todos os movimentos, daí que o estudo da dinâmica do comportamento do navio em ondas seja uma atividade bastante complexa se não considerarmos algumas aproximações, e linearização das equações do movimento. Estudos mostram que uma análise linear do movimento do navio produz resultados bastantes bons em amplas condições de mar e variedades de navios. (Lewis, 1989)

Se o navio move-se com uma velocidade constante U_0 , em ondas regulares com uma frequência de oscilação ω_0 e seguindo um ângulo μ com a popa do navio como indica a figura 3, a sua frequência de oscilação será definida pela frequência de encontro ω_e (Lewis, 1989) representada por:

$$\omega_e = \omega_0 - \frac{\omega_0^2}{g} U_0 \cos \mu. \quad (4.1)$$

A equação de movimento é expressa pela segunda lei de Newton na forma linearizada nos seus 6 graus de liberdade e é dada por

$$\sum_{k=1}^6 \Delta_{jk} \ddot{\eta}_k(t) = \mathbf{F}_j(t) \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4.2)$$

Onde Δ_{jk} é a matriz de inércia onde estão incluídas a massa e momentos de inércia; $\ddot{\eta}_k$ é a aceleração harmônica dependente de tempo t no modo k ; e

\mathbf{F}_j representa vetor força total, também harmônica e dependente de tempo t atuando na direção j . A linearização da equação 4.2, torna muitos dos termos de Δ_{jk} iguais à zero (Lewis, 1989). Abkowitz (1969) mostrou que para um navio com simetria lateral (bombordo estibordo), a equação 4.2 reduz-se às seguintes seis equações:

$$\begin{aligned}
\Delta(\ddot{\eta}_1 + \bar{z}_c \ddot{\eta}_5) &= \mathbf{F}_1 & \text{Avanço} \\
\Delta(\ddot{\eta}_2 - \bar{z}_c \ddot{\eta}_4 + \bar{x}_c \ddot{\eta}_6) &= \mathbf{F}_2 & \text{Deriva} \\
\Delta(\ddot{\eta}_3 - \bar{x}_c \ddot{\eta}_5) &= \mathbf{F}_3 & \text{Arfagem} \\
I_{44} \ddot{\eta}_4 - I_{46} \ddot{\eta}_6 - \Delta \bar{z}_c \ddot{\eta}_2 &= \mathbf{F}_4 & \text{Balanço} \\
I_{55} \ddot{\eta}_5 + \Delta(\bar{z}_c \ddot{\eta}_1 - \bar{x}_c \ddot{\eta}_3) &= \mathbf{F}_5 & \text{Cabeceio} \\
I_{66} \ddot{\eta}_6 - I_{64} \ddot{\eta}_4 + \Delta \bar{x}_c \ddot{\eta}_2 &= \mathbf{F}_6 & \text{Guinada}
\end{aligned} \tag{4.3}$$

Comparando as equações 4.2 e 4.3 e assumindo equação linearizada, muitos termos tornam-se zero, daí que a matriz de inércia Δ_{jk} fica:

$$\Delta_{jk} = \begin{bmatrix} \Delta & 0 & 0 & 0 & +\Delta \bar{z}_c & 0 \\ 0 & \Delta & 0 & -\Delta \bar{z}_c & 0 & +\Delta \bar{x}_c \\ 0 & 0 & \Delta & 0 & -\Delta \bar{x}_c & 0 \\ 0 & -\Delta \bar{z}_c & 0 & I_{44} & 0 & -I_{46} \\ +\Delta \bar{z}_c & 0 & -\Delta \bar{x}_c & 0 & I_{55} & 0 \\ 0 & +\Delta \bar{x}_c & 0 & -\Delta \bar{x}_c & 0 & I_{66} \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

Onde Δ é a massa total do navio e $(\bar{x}_c, 0, \bar{z}_c)$ é a coordenada de centro de gravidade.

Daqui em diante iremos considerar o sistema de coordenadas (x, y, z) para o cálculo de coeficientes hidrodinâmicos.

Agora escrevendo a equação 4.2 considerando apenas as forças gravitacionais e do fluido exercendo sobre o casco, resulta.

$$\sum_{k=1}^6 \Delta_{jk} \ddot{\eta}_k(t) = \mathbf{F}_j(t) = F_{Gj} + F_{Hj} \quad j = 1, 2, \dots, 6 \tag{4.5}$$

onde:

- F_{Gj} é a componente da força gravitacional atuando na direção j ;
- F_{Hj} é a componente da força que o fluido exerce sobre o casco na direção j , nelas estão associadas as forças hidrodinâmicas e hidrostáticas
- Δ_{jk} é a matriz massa e de inércia dada pela equação 4.4.

Com base na teoria linear, a resposta do navio quando excitado por uma onda, será diretamente proporcional à amplitude de onda e ocorre à frequência com que a onda incide ao navio (Lewis, 1989). Considerando ondas sinusoidais, a resposta do navio $\eta_j(t)$ também será sinusoidal na frequência de encontro e escreve-se em notação complexa:

$$\eta_j(t) = \bar{\eta}_j e^{i\omega_e t} \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4.6)$$

Onde

- ω_e (frequência de encontro) é definida pela equação 4.1;
- $\bar{\eta}_j$ é a amplitude da resposta do navio na direção j .

As forças hidrodinâmicas e hidrostáticas que atuam sobre o casco nos seus seis graus de liberdade são dadas por integração da pressão que o fluido exerce sobre o casco somente na parte submersa:

$$F_{Hj} = \iint_S P n_j ds \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (4.7)$$

Onde:

- n_j é a normal unitária ao casco;
- P é a pressão que o fluido exerce sobre o casco;
- S é a área do casco na parte submersa (abaixo da linha de água).

Assumindo que o fluido é invíscido e irrotacional, a pressão pela equação de Bernoulli é dada pela seguinte expressão:

$$P = \frac{1}{2}\rho V^2 - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2}\rho(\nabla \Phi \times \nabla \Phi) - \rho g z \quad (4.8)$$

Que substituindo a equação 4.8 em 4.7 obtemos:

$$F_{Hj} = \iint_S \left(\frac{1}{2}\rho V^2 - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2}\rho(\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) - \rho g z \right) n_j ds \quad (4.9)$$

Agora, separando a equação 4.9 em componente hidrostática F_{HSj} e componente hidrodinâmica F_{HDj} obtemos:

$$F_{HSj} = -\rho g \iint_S z n_j ds \quad (4.10)$$

$$F_{HDj} = \iint_S \left(\frac{1}{2} \rho V^2 - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \frac{1}{2} \rho (\nabla \Phi \cdot \nabla \Phi) n_j \right) ds \quad (4.11)$$

Note que, neste estudo a determinação de forças hidrostáticas não são tomadas em consideração, entretanto, está dedicado apenas ao estudo das forças hidrodinâmicas. Para acompanhar o desenvolvimento das forças hidrostáticas veja (Lewis, 1989).

4.1 Forças hidrodinâmicas

Para determinar as forças hidrodinâmicas atuando sobre o navio e definidas pela equação 4.11, neste sentido, é necessário que se conheça a velocidade total de fluido $\Phi(x, y, z, t)$, no entanto caso não seja conhecido pode-se assumir que a velocidade potencial total pode ser subdividida na soma de várias componentes (Lewis, 1989) como se segue:

$$\Phi(x, y, z, t) = [V_x + \phi_s(x, y, z)] + \phi_T e^{i\omega_e t} \quad (4.12)$$

A equação 4.12 pode-se separar em duas componentes nomeadamente a componente estática

$$V_x + \phi_s(x, y, z) \quad (4.13)$$

e a componente dinâmica

$$\phi_T e^{i\omega_e t}. \quad (4.14)$$

Com

$$\phi_T = [\phi_I + \phi_D + \sum_{j=1}^6 \phi_j \bar{\eta}_j],$$

onde :

- ϕ_I é o potencial da onda incidente
- ϕ_D é o potencial da onda difratada
- ϕ_j é o potencial da radiação devido ao movimento unitário na direção j
- ϕ_I, ϕ_D, ϕ_j dependente somente de espaço.

Forças de radiação: um navio que se desloca com velocidade média constante e sujeito a uma oscilação forçada, gera uma radiação de ondas que se propagam para longe. Essas ondas propagam-se para o infinito e o seu potencial decresce à medida que elas se afastam do navio $\lim_{x \rightarrow \infty} \Phi_j = 0$, de mesmo modo que o efeito do distúrbio do fluido no fundo decresce a medida que a profundidade aumenta

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \Phi_j = 0$$

Adoptando uma aproximação linear da equação 4.8 obtém-se:

$$P \approx -\rho \left[i\omega_e - V \frac{\partial}{\partial x} \right] \phi_T e^{i\omega_e t} \quad (4.15)$$

Assim a equação 4.11 fica aproximada a:

$$\tilde{F}_{HDj} \approx -\rho \iint_S n_j \left[i\omega_e - V \frac{\partial}{\partial x} \right] \phi_T e^{i\omega_e t} ds \quad (4.16)$$

Agora, a força hidrodinâmica na direção j devido ao movimento forçado fica:

$$F_{Rj} = -\rho \iint_S n_j \left(i\omega_e - V \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(\sum_{k=1}^6 \phi_k \bar{\eta}_k e^{i\omega_e t} \right) ds, \quad (4.17)$$

ou

$$F_{Rj} = \sum_{k=1}^6 \left[-\rho \iint_S n_j \left(i\omega_e - V \frac{\partial}{\partial x} \right) \phi_k ds \right] \bar{\eta}_k e^{i\omega_e t}. \quad (4.18)$$

Se o termo entre os parenteses reto é

$$T_{jk} = -\rho \iint_S n_j \left(i\omega_e - V \frac{\partial}{\partial x} \right) \phi_k ds, \quad (4.19)$$

então

$$F_{Rj} = \sum_{k=1}^6 T_{jk} \bar{\eta}_k e^{i\omega_e t}. \quad (4.20)$$

Note-se que $T_{jk} \bar{\eta}_k$ é a amplitude complexa da força hidrodinâmica na direção j devido o movimento forçado na direção k .

Então, separando a parte imaginária da parte real da função T_{jk} fica:

$$T_{jk} = \omega_e^2 A_{jk} - i\omega_e B_{jk} \quad (4.21)$$

Substituindo a equação 4.21 em

$$F_{Rj} = \sum_{k=1}^6 (\omega_e^2 A_{jk} - i\omega_e B_{jk}) \bar{\eta}_k e^{i\omega_e t} \quad (4.22)$$

onde

- A_{jk} é a massa acrescentada no modo j devido ao movimento unitário na direção k e
- B_{jk} é o coeficiente de amortecimento no modo j devido ao movimento unitário na direção k

Partindo da equação 4.6

$$\ddot{\eta}_k = -\omega_e^2 \bar{\eta}_k e^{i\omega_e t} \quad (4.23)$$

Linearizando a equação de movimento, a equação 4.5 fica:

$$\mathbf{F}_j(t) = \sum_{k=1}^6 -\omega_e^2 \Delta_{jk} \bar{\eta}_k e^{i\omega_e t} = F_{Gj} + F_{HSj} + F_{EXj} + F_{Rj} \quad (4.24)$$

$$F_{HSj}^* = F_{Gj} + F_{HSj} \quad (4.25)$$

$$\mathbf{F}_j(t) = F_{HSj}^* + F_{EXj} + F_{Rj} \quad (4.26)$$

onde

$$F_{HSj}^* = -\sum_{j=1}^6 C_{jk} \bar{\eta}_k e^{i\omega_e t} \text{ ver (Lewis, 1989).}$$

$$\text{com } F_{Rj} + F_{EXj} = \tilde{F}_{HDj},$$

a equação 4.24 fica:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_j(t) &= \sum_{k=1}^6 -\omega_e^2 \Delta_{jk} \bar{\eta}_k e^{i\omega_e t} \\ &= -\sum_{j=1}^6 C_{jk} \bar{\eta}_k e^{i\omega_e t} + F_j^I e^{i\omega_e t} \\ &\quad + F_j^D e^{i\omega_e t} + \sum_{k=1}^6 (\omega_e^2 A_{jk} - i\omega_e B_{jk}) \bar{\eta}_k e^{i\omega_e t} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Para termos a equação do movimento linearizado, de qualquer navio nos seus 6 graus de liberdade eliminemos $e^{i\omega_e t}$ da equação 4.27 e obtemos:

$$\begin{aligned} & \sum_{k=1}^6 [-\omega_e^2(\Delta_{jk} + A_{jk}) + i\omega_e B_{jk} + C_{jk}] \bar{\eta}_k \\ & = F_j^I + F_j^D \quad j = 1, 2 \dots 6 \end{aligned} \quad (4.28)$$

Daqui em diante iremos nos dedicar somente no cálculo do coeficientes de massa acrescentada A_{jk} e do amortecimento B_{jk} . Existem vários métodos de cálculos destes coeficientes, contudo, nesta tese será utilizado o de mapeamento conforme, que aplicando a teoria de faixas nos ira permitir reduzir o problema tridimensional para uma série de problemas bidimensionais, o que significa que o navio será dividido em um número finito de faixas e sobre cada uma delas é calculado os coeficientes de potencial 2D.

Capítulo 5

Mapeamento Conforme Multiparâmetro

O estudo do comportamento de navio no mar nos seus seis graus de liberdade é necessário calcular a massa acrescentada A_{jk} e o respetivo coeficiente de amortecimento B_{jk} que podem ser determinados por diferentes métodos tal como o método de *Computational Fluid Dynamics* (CFD) (Çengel and Cimbala, 2007), método de Frank (Frank, 1967), método dos painéis (de Arriaga and Chaves, 2012) e o método de mapeamento conforme multiparâmetro (Journee and Adegeest, 2003). sob certas simplificações pode-se aplicar a teoria das faixas para determinar as forças hidrodinâmicas que atuam em corpos esbeltos. A teoria das faixas permitirá a redução do problema $3D$ na forma mais complicada para uma série de problemas $2D$ mais fáceis de resolver. Nesta aproximação o corpo esbelto é dividido num número finito de faixas capazes de serem estudados por métodos $2D$ usando o mapeamento conforme, tal como o mapeamento conforme de 2 parâmetros (formulas de Lewis). ou o mapeamento conforme multiparâmetro. Portanto os coeficientes hidrodinâmicos globais serão encontrados por integração dos coeficientes locais correspondentes de cada faixa ao longo do comprimento de todo o navio (Thein, 2011). Os parâmetros de mapeamento conforme substituídos na fórmula truncada da série de Laurent permitirão a transformação da fronteira da parte submersa da secção em estudo numa forma semicircular no qual as forças hidrodinâmicas são mais fáceis de resolver. De facto, de acordo com Westlake (Westlake and Wilson, 2000) a fórmula do potencial de multipolo usado para representar as condições de fronteira, ao longo do perímetro do círculo não é aplicado a secções transversais dos navios, razão pela qual surge a necessidade de transformar a secção transversal real na forma complexa numa secção circular no qual se pode aplicar a fórmula de potencial de multipolo. Esta transformação consiste numa aproximação que será baseada

no trabalho de Ursell (Ursell, 1949) para a determinação do potencial do escoamento $2D$ usando o mapeamento conforme. Um dos principais aspectos da aplicação desta técnica reside na determinação dos vários parâmetros de mapeamento conforme pela minimização do quadrado da norma euclidiana do resíduo. Tipicamente podemos usar o algoritmo de Gauss-Newton ou uma das suas variantes para minimizar o quadrado da norma euclidiana do resíduo mencionado acima e conseqüentemente determinamos os coeficientes de mapeamento conforme desconhecidos. Alternativamente podemos aproximar a secção real por minimização heurística, como por exemplo o método de recozimento simulado. Este método é uma analogia entre o recozimento de metais e à análise multivariada de otimização para minimizar o mínimo global de uma dada função. Trata-se de um algoritmo robusto cuja implementação é relativamente simples. Nesta dissertação o algoritmo foi desenvolvido para secções simétricas. O algoritmo será testado para várias secções arbitrárias com vista a sua validação. Os parâmetros de mapeamento obtidos serão à seguir aplicados no cálculos de A_{jk} e B_{jk} .

5.1 Transformações conforme

O efeito provocado por um fluido em escoamento na superfície de uma estrutura pode ser determinado por integração directa da pressão p ao longo da sua fronteira. Notemos que a pressão p de um fluido irrotacional e incompressível em escoamento pode ser inferida a partir da solução de um problema de Dirichlet. Estes tipos de problemas consistem em encontrar uma função harmónica f tal que $\nabla^2 f = 0$ na fronteira da região A (Lamb, 1916). Nesta secção apresentaremos alguns aspectos básicos que sustentam a teoria de mapeamento conforme cujo os detalhes podem ser consultados em Marsden (Marsden and Hoffman, 1999).

Uma função holómórfica é uma função complexa de variáveis complexas. Funções holómórficas também são funções harmónicas. Uma característica importante das funções holómórficas é que elas também são transformações de mapeamento conforme. De grosso modo, a escala e o ângulo de uma transformação conforme entre duas direcções diferentes são preservados. Na figura 5.1 mostramos o esboço que ilustra a preservação angular. Esta propriedade desempenha um papel importante da construção de funções harmónicas no domínio complexo.

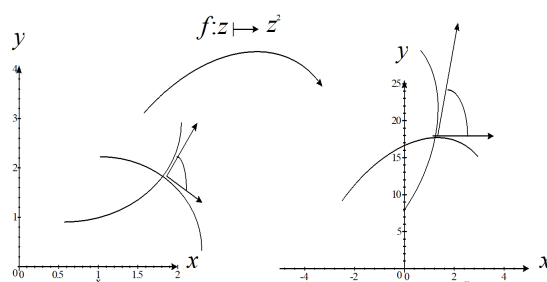


Figura 5.1: Preservação do ângulo entre duas direções diferentes em um mapeamento conforme.

De facto, suponhamos que conhecemos a solução Ψ_0 do problema de Dirichlet numa dada região B (região esta normalmente mais simples). Portanto para conhecer a solução na região A do problema de Dirichlet acima mencionado, torna-se apenas necessário conhecer uma transformação holomórfica bijectiva

$$f : A \rightarrow B \quad (5.1)$$

$$(x,y) \rightarrow f(x,y)=(\tilde{x},\tilde{y})$$

o mapeamento da região A para a região B pois a aplicação $\Psi(x,y) = \Psi_0(f(x,y))$ que será harmônico e resolverá o problema de Dirichlet na região desejada A .

Tipicamente, a transformação bijectiva holomórfica usada para aplicar a metodologia descrita, em seções transversais simétricas é uma série Laurent truncada com termos ímpares:

$$z = x + iy = a_0 \left(\zeta + \sum_{n=1}^N a_{2n-1} \zeta^{-(2n-1)} \right). \quad (5.2)$$

A transformação de Lewis (que é o mapeamento conforme, transformação da expressão 5.2 com três termos, ou seja, com $N = 2$), apesar de preservar o calado e a área da seção transversal do navio, não fornece uma representação adequada de uma ampla classe de navios reais. Então, para obter representações mais confiáveis é necessário escolher uma transformação de mapeamento conforme multiparâmetro, isto é mais do que 2 parâmetros. Seja $g(\zeta) = x + iy$ ser a transformação de mapeamento conforme:

$$g(\zeta) = a_0 \left(\zeta + \sum_{n=1}^N a_{2n-1} \zeta^{-(2n-1)} \right). \quad (5.3)$$

A figura 5.2 mostra um exemplo genérico da transformação da equação 5.3, que transforma a fronteira de um semicírculo unitário no plano complexo

$\zeta = \xi + i\eta$ para uma secção transversal genérica de um navio no plano complexo
 $z = x + iy$

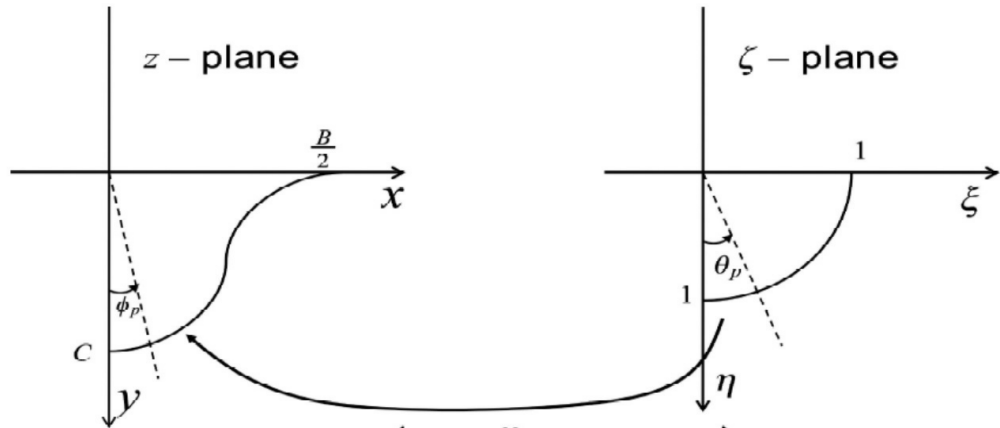


Figura 5.2: Relação de Mapeamento Conforme entre os dois Planos

5.2 Formulação Numérica

Para encontrar os parâmetros de transformação que definem o mapeamento necessário do círculo unitário para a secção transversal real de um navio, seja $\zeta = ie^{i\theta}$, na expressão 5.3

$$x + iy = a_0 \left(ie^{i\theta} + \sum_{n=1}^N a_{2n-1} (ie^{i\theta})^{-(2n-1)} \right) \quad (5.4)$$

podemos, separando a parte real da parte imaginária e obter

$$x = a_0 \sum_{n=0}^N (-1)^{n+1} \{ a_{2n-1} \cdot e^{-(2n-1)\alpha} \cdot \sin(2n-1)\theta \} \quad (5.5)$$

$$y = a_0 \sum_{n=0}^N (-1)^n \{ a_{2n-1} \cdot e^{-(2n-1)\alpha} \cdot \cos(2n-1)\theta \} \quad (5.6)$$

Partindo do princípio que se trata de uma secção simétrica em relação aos eixos coordenados x e y , uma simplificação pode ser feita (de Jong, 1969). Agora, pontos x e y da secção transversal do casco vêm:

$$x = a_0 \left(\sin \theta + \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} a_{2n-1} \sin (2n-1) \theta \right), \quad (5.7)$$

$$y = a_0 \left(\cos \theta + \sum_{n=1}^N (-1)^n a_{2n-1} \cos (2n-1) \theta \right). \quad (5.8)$$

Estas equações relacionam o ângulo θ correspondente ao semicírculo no plano ζ com as coordenadas x e y de cada ponto ao longo da secção transversal no plano físico z onde a_0 representa o fator de escala.

Seja B é a boca da secção transversal do casco referido na linha de água e C o calado, quando $\theta = \frac{\pi}{2}$ e $\theta = 0$, da equação 5.7 e 5.8 são reduzidas respectivamente para

$$\frac{B}{2} = a_0 \left(1 + \sum_{n=1}^N a_{2n-1} \right), \quad (5.9)$$

$$C = a_0 \left(1 + \sum_{n=1}^N (-1)^n a_{2n-1} \right). \quad (5.10)$$

onde a_0 é o factor de escala e é calculado da seguinte forma:

$$a_0 = \frac{B}{2 \left(1 + \sum_{n=1}^N \{a_{2n-1}\} \right)} = \frac{C}{\left(1 + \sum_{n=1}^N (-1)^n \{a_{2n-1}\} \right)} \quad (5.11)$$

Considerando a figura 5.2 e considerando que a secção real do navio por P pontos (x_p, y_p) tal que os seus ângulos correspondentes satisfazem $0 \leq \phi_p \leq \frac{\pi}{2}$ com $p = 1, \dots, P$. Com $p = 1$ e $p = P$ teremos respectivamente $(x_1, y_1) = (0, C)$ e $(x_P, y_P) = (\frac{B}{2}, 0)$ portanto, o ponto $(0, C)$ e $(\frac{B}{2}, 0)$ no plano físico z complexo corresponde respectivamente aos pontos $(1, 0)$ e $(1, \frac{\pi}{2})$ no plano ζ -complexo e consequentemente $\phi_1 = \theta_1 = 0$ e $\phi_P = \theta_P = \frac{\pi}{2}$. Os parâmetros de mapeamento conforme que necessitamos devem transformar P pontos no círculo unitário no plano complexo ζ com os ângulos

$$\theta_1 = 0, \theta_2, \dots, \theta_p, \dots, \theta_{P-1}, \theta_P = \frac{\pi}{2} \quad (5.12)$$

para P pontos (x_p, y_p) previamente conhecidos no plano complexo z tal que os respectivos ângulos correspondentes são:

$$\phi_1 = 0, \phi_2, \dots, \phi_p, \dots, \phi_{P-1}, \phi_P = \frac{\pi}{2}. \quad (5.13)$$

das expressões (5.5) e (5.6) formam-se os $2P - 2$ equações:

$$\begin{cases} x_2 = a_0 \left(\sin \theta_2 + \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} a_{2n-1} \sin (2n-1) \theta_2 \right) \\ \vdots \\ x_p = a_0 \left(\sin \theta_p + \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} a_{2n-1} \sin (2n-1) \theta_p \right) \end{cases} \quad (5.14)$$

e

$$\begin{cases} y_1 = a_0 \left(\cos \theta_1 + \sum_{n=1}^N (-1)^n a_{2n-1} \cos (2n-1) \theta_1 \right) \\ \vdots \\ y_{P-1} = a_0 \left(\cos \theta_{P-1} + \sum_{n=1}^N (-1)^n a_{2n-1} \cos (2n-1) \theta_{P-1} \right) \end{cases} \quad (5.15)$$

Note que para x_1 e y_p , $\theta_1 = 0$ e $\theta_P = \frac{\pi}{2}$.

Para determinar os coeficientes de mapeamento conforme, não será somente necessário conhecer os $N + 1$ parâmetros $a_0, a_1, a_3, \dots, a_{2N-1}$ mas também os $P - 2$ ângulos desconhecidos $\theta_2, \dots, \theta_p, \dots, \theta_{P-1}$. Note que para resolver as equações (5.14) e (5.15), o número $(N + 1) + (P - 2)$ deve ser inferior ou igual à $2P - 2$, isto é, o grau de sobre-determinação do problema $P - N - 1$, deve ser um inteiro e positivo.

Enão seja

$$E = E(a_0, a_1, a_3, \dots, a_{2N-1}; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p, \dots, \theta_{P-1}, \theta_P) \quad (5.16)$$

o quadrado da norma euclidiana do resíduo em relação às equações (5.14) e (5.15). Fazendo

$$\alpha_p = x_p - \left(a_0 \sin \theta_p + a_0 \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} a_{2n-1} \sin (2n-1) \theta_p \right)$$

e

$$\beta_p = y_p - \left(a_0 \cos \theta_p + a_0 \sum_{n=1}^N (-1)^n a_{2n-1} \cos (2n-1) \theta_p \right).$$

então

$$E = \sum_{p=1}^P (\alpha_p^2 + \beta_p^2). \quad (5.17)$$

Os parâmetros de mapeamento conforme serão determinados resolvendo as equações (5.14) e (5.15) isto é, minimizando a equação (5.17) com respeito aos parâmetros $a_0, a_1, a_3, \dots, a_{2N-1}$ e os ângulos $\theta_2, \dots, \theta_p, \dots, \theta_{P-1}$.

Método de Recozimento Simulado

Tipicamente, pode-se utilizar o algoritmo de Gauss-Newton, ou uma das suas variantes, para minimizar o quadrado da norma euclidiana do resíduo mencionado acima, e assim determinar os parâmetros de mapeamento conforme desconhecidos. Alternativamente, pode-se usar uma abordagem de minimização heurística, como, por exemplo, o método de recozimento simulado. O método de recozimento simulado explora a analogia entre recozimento em metais e otimização multivariada para aproximar mínimo global de uma dada função. O termo recozimento é assim chamado por analogia com o processo de recozimento de metal no qual um metal é aquecido a altas temperaturas para derreter e depois é resfriado lentamente. Durante o processo de resfriamento lento, as moléculas se rearranjam até alcançar a configuração de uma rede cristalina regular em um estado de energia mínima. Note que se o processo de resfriamento não for lento o suficiente, a configuração atingida pode não ser aquela que minimiza a energia final do arranjo molecular. Portanto, a estratégia apropriada da diminuição da temperatura é muito importante no uso deste processo. Na implementação deste método, adotaremos a metodologia descrita por Press (Press et al., 2007).

Em primeiro lugar, uma configuração admissível deve ser definida. Uma configuração admissível é uma sequência de:

$(a_0, a_1, a_3, \dots, a_{2N-1}; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p, \dots, \theta_{P-1}, \theta_P)$ tal que

- $a_0 < a_1 < \dots < a_{2N-1}$;
- $\frac{B}{2} = a_0 \left(1 + \sum_{n=1}^N a_{2n-1} \right)$;
- $\theta_1 = 0$ e $\theta_P = \frac{\pi}{2}$;
- $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \dots < \theta_P$.

Em segundo lugar, um espaço de configurações admissíveis deve ser gerado aleatoriamente, e o mínimo de E de cada elemento deve ser calculado de acordo com a equação 5.17, portanto, um subconjunto das melhores configurações admissíveis serão considerados e usados para construir uma nova geração que dela também serão consideradas as melhores configurações admissíveis.

Em terceiro lugar, cada configuração admissível no espaço recém-criado é perturbada usando uma perturbação gerada aleatoriamente de intensidade I . O desempenho de E de cada elemento é novamente reavaliado e criado um subconjunto das melhores configurações admissíveis e é usado para construir um novo espaço (com melhor desempenho) de configurações admissíveis.

O último procedimento é repetido sucessivamente diminuindo a intensidade I da perturbação aplicada em cada passo (nunca esquecendo de preservar em cada passo as configurações admissíveis que foram determinadas) até que uma configuração admissível satisfatória (perto de um ótimo absoluto) seja obtida. O papel de I na minimização de E é análogo ao papel da temperatura no processo de recozimento do metal.

Portanto, a estratégia de diminuir a intensidade I da perturbação é um fato chave no uso deste processo de otimização.

5.3 Validação do método

O algoritmo implementado foi testado usando os dados retirados de Journée (Journee and Adegeest, 2003) referente a um navio cargueiro com boca igual a 25.40 metros e calado de 9.00 metros, como indica a tabela na tabela 5.1. A figura 5.3 mostra que os pontos reais ajustam-se perfeitamente à curva gerada pelo algoritmo desenvolvido. Tal pode também verificar-se através da tabela 5.2 em que está ilustrada a comparação dos parâmetros de mapeamento conforme de dois métodos diferentes: método de recozimento simulado e o *close fit conformal mapping*

Tabela 5.1: Coordenadas dos pontos da meia boca da secção a meio navio.

i	$D - y_i$ [m]	x_i
0	0.000	0.000
1	0.135	4.950
2	0.270	9.900
3	0.500	10.960
4	1.000	11.740
5	2.000	12.440
6	3.050	12.700
7	6.000	12.700
8	9.000	12.700

Coeficientes de Mapeamento Conforme Multiparâmetro		
<i>Close Fit Conformal Mapping</i>	Recozimento Simulado	
a_0	12,3191	12,3270
a_1	0,1633	0,1633
a_3	-0,1244	-0,1241
a_5	-0,0108	-0,0114
a_7	0,0030	0,0030
a_9	-0,0024	-0,0038
a_{11}	0,0022	0,0013
a_{13}	0,0002	0,0020
RMS/Resíduo	0,018	8.5036e-06

Tabela 5.2: Comparação dos Coeficientes de Mapeamento Conforme

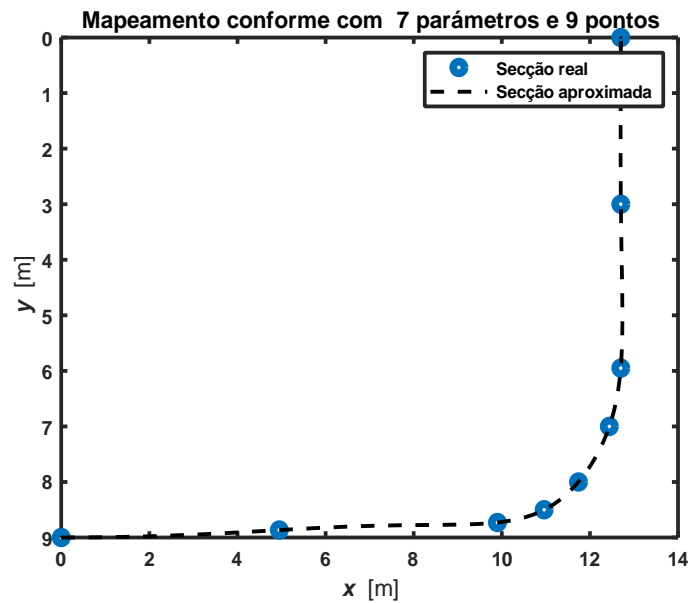


Tabela 5.3: Mapeamento Conforme Multimarâmro implemetando a secção transversal de um Cargueiro

5.4 Implementação do método a uma fragata da marinha Portuguesa

As figuras 5.3, 5.4, 5.5 representam as secções transversais do casco de uma navio da marinha portuguesa aplicando os parâmetros de mapeamento conforme. A figura 5.6 é a representação 3D do navio dividido em 20 secções. Os resultados obtidos foram comparados com as secções reais, importa referir que para cada secção foram utilizados diferentes números de parâmetros, sendo que representam, o máximo número de parâmetros que melhor representam a secção transversal, o que significa que, para valores inferiores ou superiores a estes resulta numa representação menos aproximada à secção real.

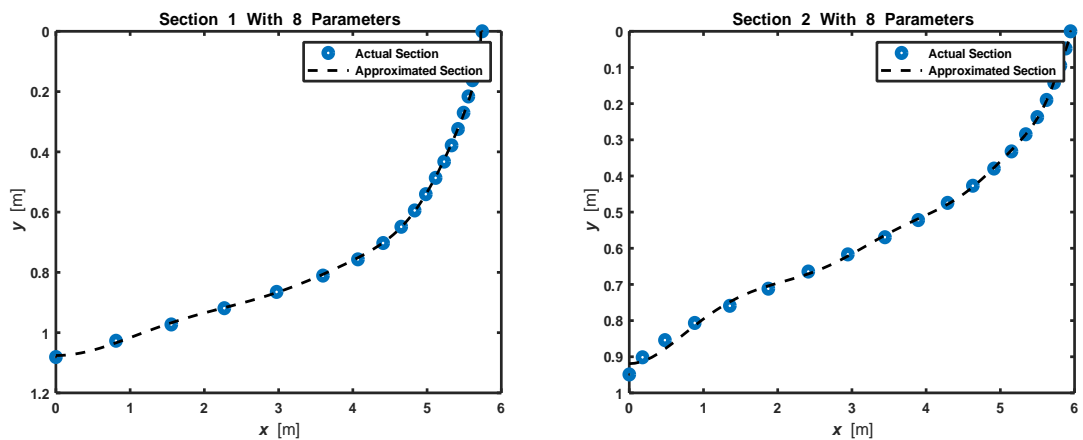


Figura 5.3: Secções da Navio da Marinha Portuguesa

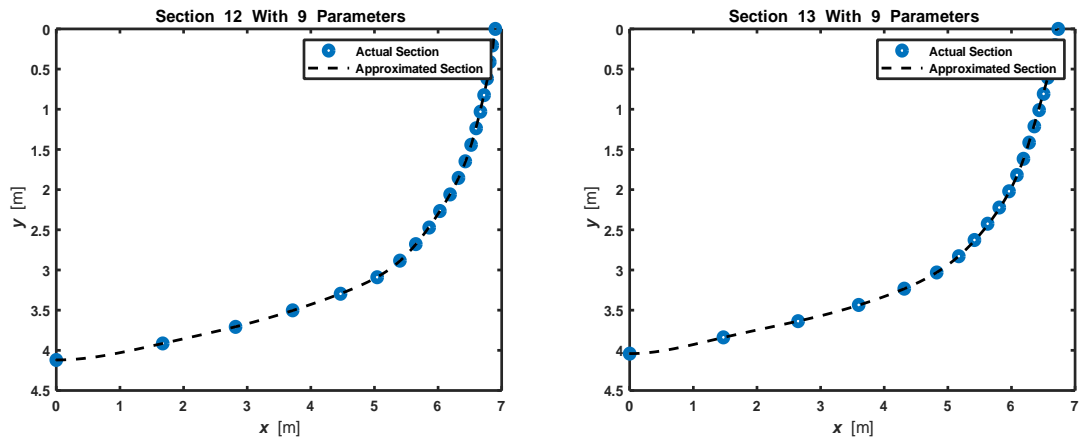


Figura 5.4: Secções da Navio da Marinha Portuguesa

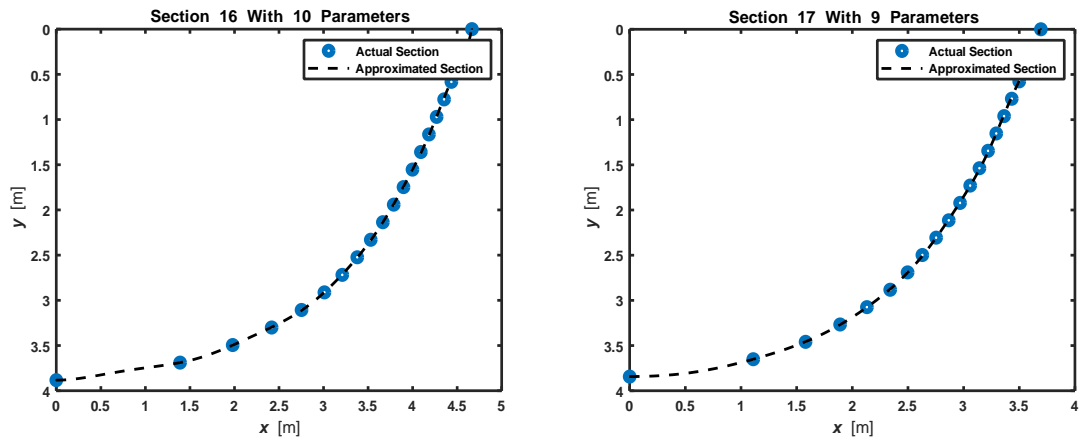


Figura 5.5: Secções da Navio da Marinha Portuguesa

Mapeamento Conforme Multiparâmetro das Secções da Fragata

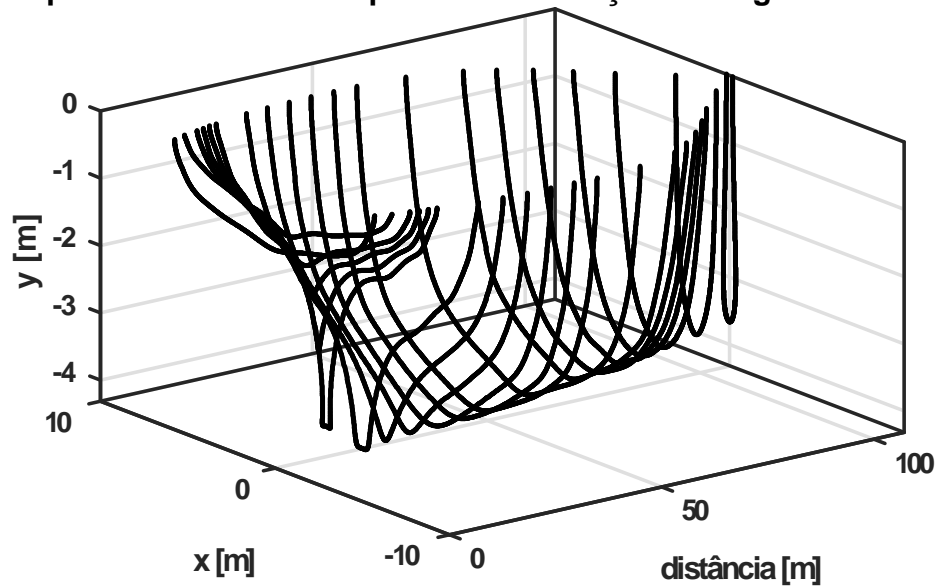


Figura 5.6: Representação 3D: Navio da Marinha Portuguesa

O algoritmo de recozimento simulado que desenvolvemos permite o cálculo dos parâmetros de mapeamento conforme de uma seção transversal simétrica arbitrária de um navio. A aplicação do algoritmo desenvolvido para a determinação dos parâmetros em relação aos diferentes casos de teste foi direta e bem-sucedida, mostrando sua estabilidade e robustez. Note que estes coeficientes serão no próximo capítulo aplicados para cálculos coeficientes hidrodinâmicos $2D$, massa acrescentada e amortecimentos, (A_{jk} e B_{jk}) das seções transversais correspondentes.

Capítulo 6

Cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos

Como havíamos referido anteriormente, o comportamento dinâmico do navio no mar torna-se um aspeto muito determinante para a estabilidade e capacidade operacional do navio bem como o conforto da guarnição e ou tripulantes. Visto que grande parte de tempo os navios andam em condições de estado de mar adversas, torna-se importante que as qualidades náuticas não sejam em nenhum momento postas de parte para garantir que a missão seja cumprida, o que pode-se observar na imagem que segue, retratando problemas que mais afetam os navios.

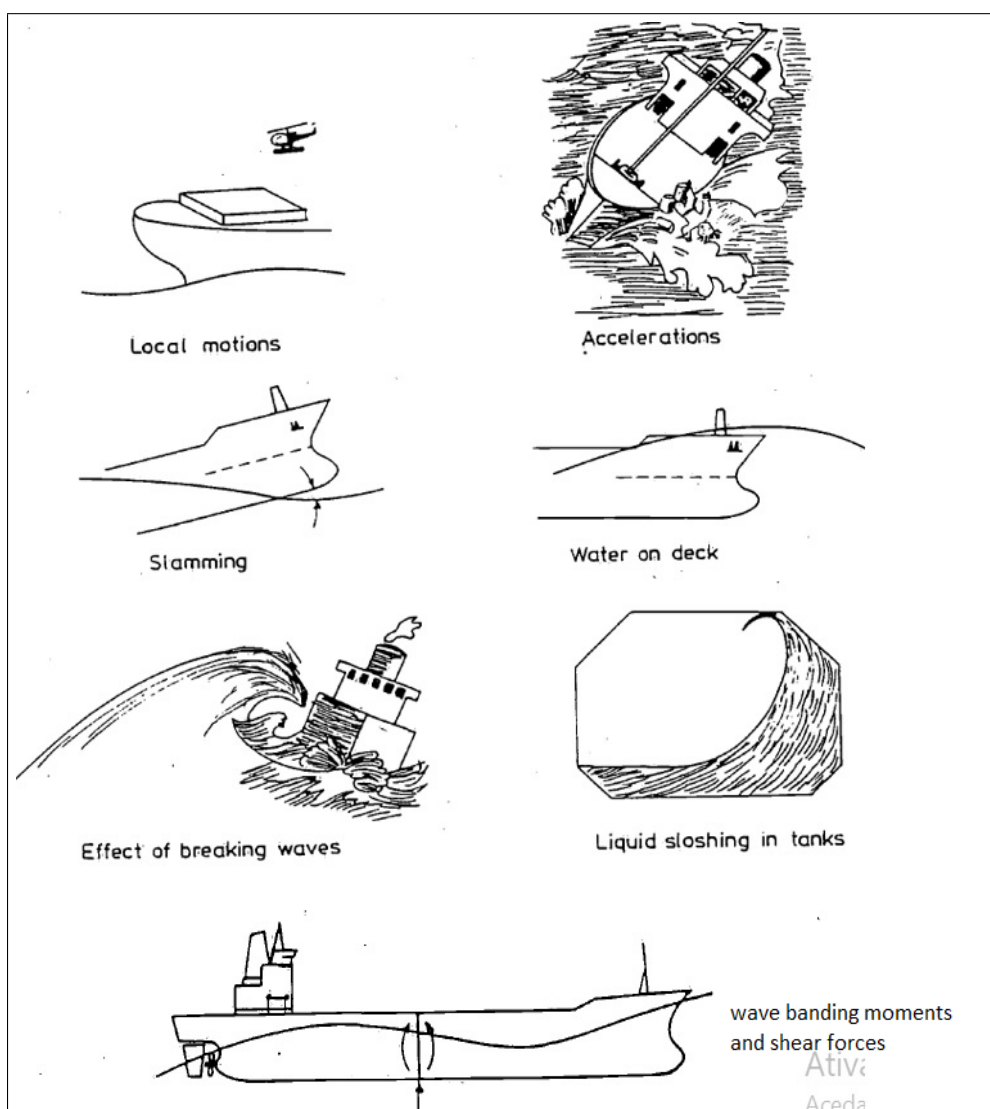


Figura 6.1: Exemplos de efeitos dinâmicos que afetam os navios (Journée and Pinkster, 1997)

É necessário que os problemas ilustrados na figura 6 seja identificados de modo que logo na fase inicial de projeto (projeto preliminar) sejam pensados e minimizados

Na fase de projeto preliminar são definidos com detalhe a forma do casco e o método adequado de cálculos de comportamento no mar por meio de determinação dos coeficientes hidrodinâmicos de forma numérica ou experi-

mental, que não são fáceis de determinar e geralmente não estão facilmente disponíveis. Se existirem, podem não ser os desejáveis e adequados para o nosso navio (Westlake and Wilson, 2000), daí a importância de cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos para cada navio.

Dada a complexidade do escoamento tridimensional vários autores criaram a teoria de faixas, que permitem tratar um problema tridimensional assumindo inicialmente como sendo bidimensional, o que permite efetuar cálculos para cada faixa e no final integrá-los ao longo do comprimento para obter coeficientes globais.

Para os cálculos dos coeficientes hidrodinâmicos locais, é comumente usada a teoria das faixas (Salvesen et al., 1970) que acrescenta às suposições anteriores as seguintes:

- O navio tem pequenos movimentos;
- A boca é menor comparada com a imersão e o comprimento;
- Mudanças na secção transversal são graduais ao longo do comprimento. Assim a componente longitudinal do vetor unitário normal à superfície do casco pode ser negligenciado;
- O escoamento em cada faixa não afeta as faixas adjacentes;
- O problema hidrodinâmico $3D$ é reduzido a um conjunto de problemas hidrodinâmicos $2D$;
- Os coeficientes hidrodinâmicos associados a cada faixa são dados pela solução de um problema de valor na fronteira $2D$ para as secções transversais que definem as faixas do casco;
- Para obter o efeito total no navio, os efeitos de todas as faixas individuais são integradas ao longo do comprimento;
- O escoamento não-estacionário é assumido ser harmónico. Para os problemas de radiação/difração tal significa que os movimentos forçados/ondas incidentes (tal como as respectivas respostas) são harmónicas no tempo;
- Os coeficientes hidrodinâmicos estão relacionados somente com a velocidade de avanço e resultam do ângulo de ataque do escoamento no infinito com o casco;

- É um problema de valor de fronteira linearizada.

Dos vários métodos dedicados à determinação dos coeficientes hidrodinâmicos mencionados anteriormente esta tese irá dedicar-se à determinação de coeficientes hidrodinâmicos pelo método de mapeamento conforme multiparâmetro.

6.1 Cálculo de Coeficientes Hidrodinâmicos pelo Método de Mapeamento Conforme MultiParâmetro

Para responder ao objetivo principal do tema (cálculo de coeficientes hidrodinâmicos) foi desenvolvido um algoritmo com recurso à ferramenta *Matlab*[®]. O código desenvolvido teve como suporte os estudos desenvolvidos por Lewis (Lewis, 1989), de Jong (de Jong, 1969), Thein (Thein, 2011), Journée (Journée and Adegeest, 2003), Ferreira (da Silva Ferreira, 2018) e Lloyd (Lloyd, 1998), na qual desenvolvem estudos para o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos, massa acrescentada e amortecimento aplicando o método de mapeamento conforme.

Os resultados do algoritmo desenvolvido foi numa primeira fase implementado para dois parâmetros (formas de Lewis) com objetivo de testar o código desenvolvido. De seguida foi testado e comparado com resultados teóricos e experimentais desenvolvidos por (Lewis, 1929) e (Lloyd, 1998). A segunda fase consistiu na validação dos resultados desenvolvidos para N parâmetros, comparando-os com resultados obtidos por método de Frank, algoritmo do IST e o algoritmo desenvolvido pelo método de MCM também do IST e por fim aplicamos o algoritmo às secções reais de uma Fragata da Marinha Portuguesa.

Os cálculos dos 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 desenvolvidos em teoria potencial de Tasai, cujos os detalhes pode-se ver no apêndice A

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

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

$$\begin{aligned}
a_{22} &= \frac{\rho B^2}{2} \left[\frac{p_0 N_0 + q_0 M_0}{p_0^2 + q_0^2} \right] \left[\frac{\text{kg}}{m} \right] \\
b_{22} &= \frac{\rho B^2}{2} \left[\frac{p_0 M_0 - q_0 N_0}{p_0^2 + q_0^2} \omega \right] [Ns] \\
a_{42} &= -\frac{\rho B^3}{2} \left[\frac{Y_r q_0 + X_r p_0}{p_0^2 + q_0^2} \right] [Ns^2] \\
b_{42} &= -\frac{\rho B^3}{2} \left[\frac{Y_r p_0 - X_r q_0}{p_0^2 + q_0^2} w \right] [Ns] \\
a_{44} &= \frac{\rho B^4}{8} \left[\frac{Y_r q_0 + X_r p_0}{p_0^2 + q_0^2} \right] [\text{kg m}] \\
b_{44} &= \frac{\rho B^4 \pi^2}{64} \left[\frac{\omega}{p_0^2 + q_0^2} \right] \left[\frac{Ns}{rad} \right] \\
a_{24} &= -\frac{\rho B^3}{8} \left[\frac{M_0 q_0 + N_0 p_0}{p_0^2 + q_0^2} \right] \left[\frac{Ns^2}{radm} \right] \\
b_{24} &= -\frac{\rho B^3}{8} \left[\frac{M_0 p_0 - N_0 q_0}{p_0^2 + q_0^2} w \right] \left[\frac{Ns}{radm} \right].
\end{aligned}$$

Capítulo 7

Comparação de Resultados do Algoritmo Desenvolvido

Como havia referido anteriormente, antes da implementação do algoritmo a uma secção real iremos aplicar o método às figuras de Lewis para arfagem e balanço, utilizando apenas dois parâmetros





<i>Form</i>	<i>Key H</i>	σ	<i>Symbol</i>
Rectangle D	2	1.0	
Rectangle E	4	1.0	
Rectangle F	8	1.0	
Triangle G	1.155	0.5	

Figura 7.1: Legenda das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos adimensionais (Lloyd,1998).

7.1 Comparação Preliminar dos Resultados Obtidos: Massa Acrescentada e Amortecimento

A primeira validação com objetivo de testar a funcionalidade do algoritmo aplicando apenas dois parâmetros, mostra que as curvas obtidas pelo algoritmo elaborado em *Matlab*[®], seguem a mesma tendência e forma das curvas obtidas por outros autores como se pode observar no gráfico da esquerda da figura 7.1 (curvas obtidas por Lloyd (Lloyd, 1998) e por Lewis (Lewis, 1989). Adireita encontram-se as curvas obtidas pelo algoritmo desenvolvido para massa acrescentada em arfagem (a_{33}) e amortecimento (b_{33}).

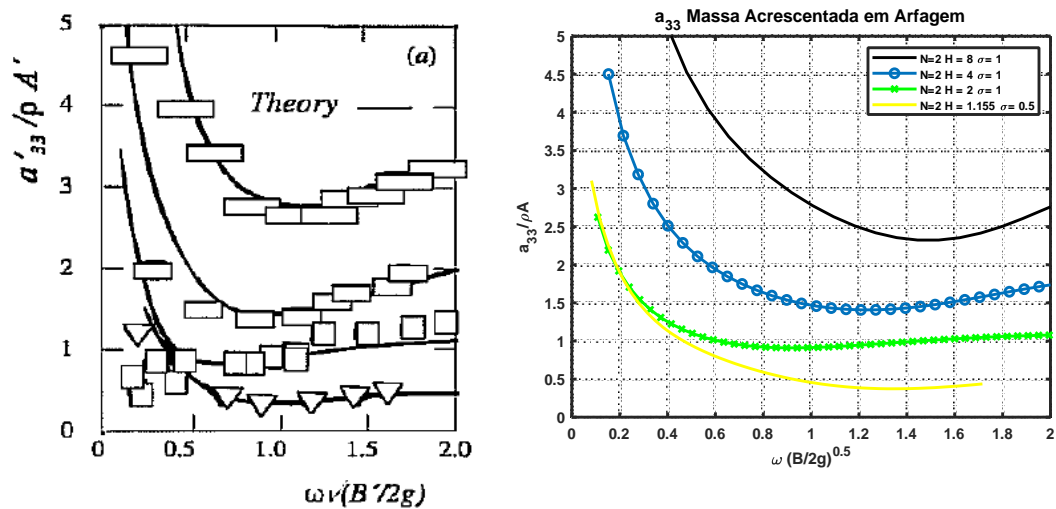


Figura 7.2: Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.

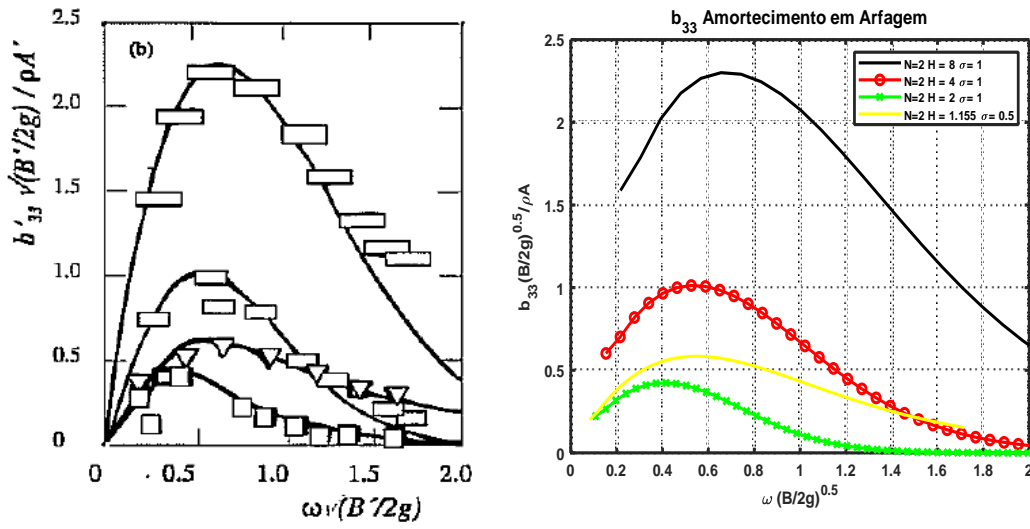


Figura 7.3: Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.

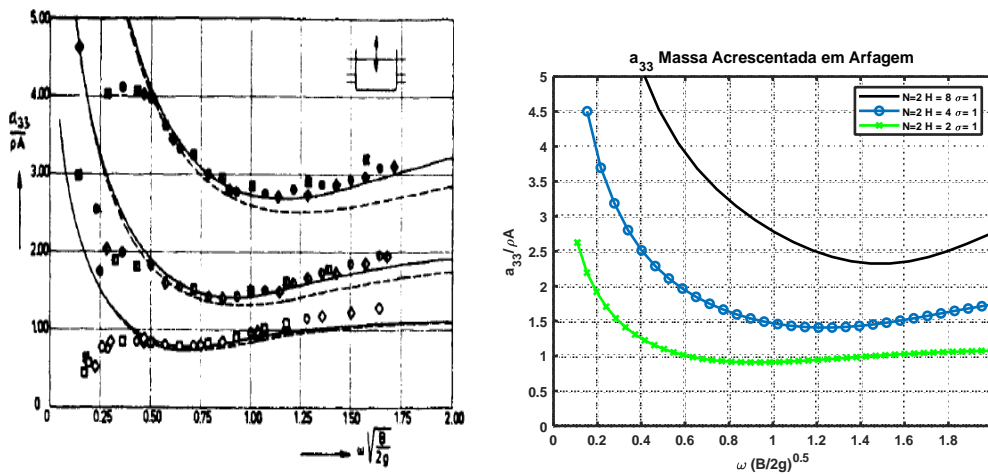


Figura 7.4: Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.

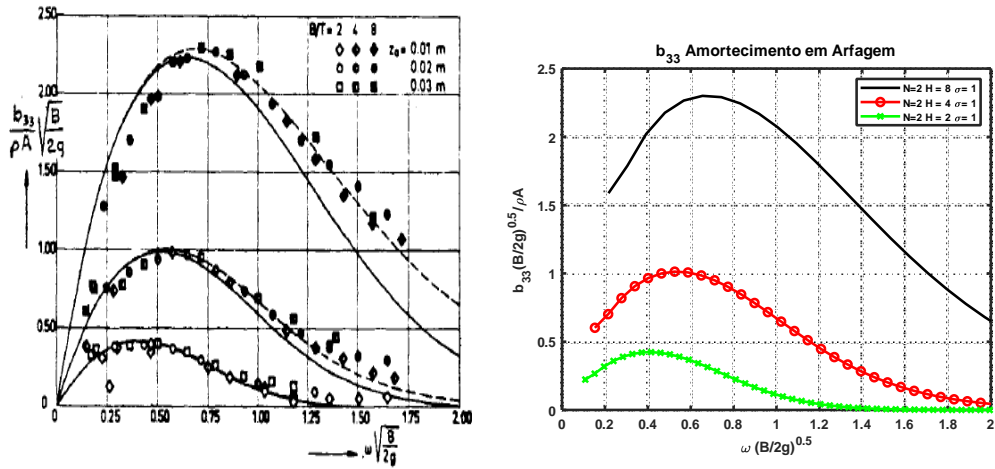


Figura 7.5: Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.

De igual forma segue a validação preliminar dos resultados obtidos para deriva, massa acrescentada (a_{22}) e amortecimento (b_{22}) das formas de Lewis que se encontram representados à esquerda pelas curvas retiradas das obras de *Principles of Naval Architecture* (Lewis, 1989), e *Ship Behaviour in Rough Weather* (Lloyd, 1998). À direita encontram-se as curvas obtidas pelo algoritmo desenvolvido nesta dissertação.

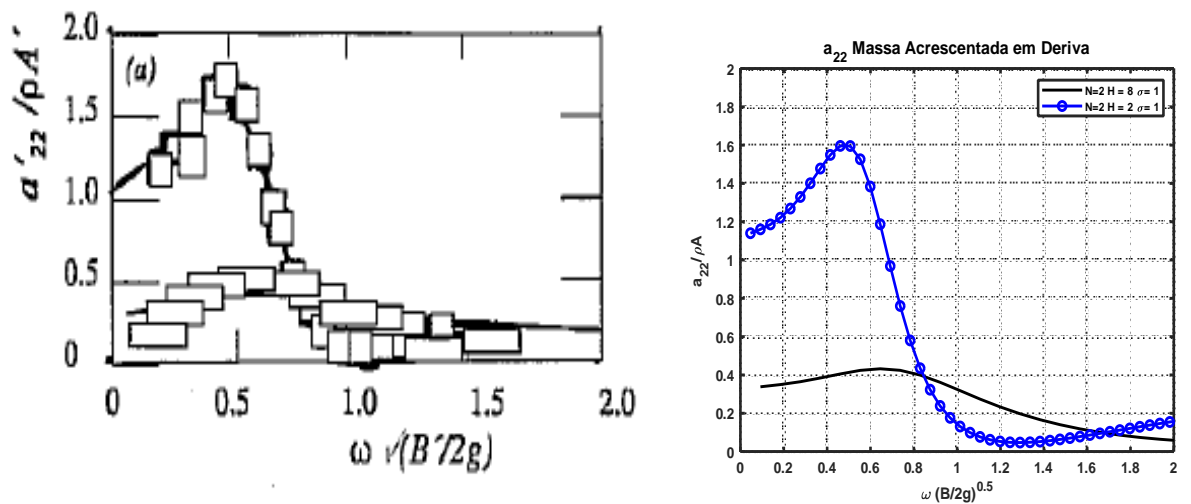


Figura 7.6: Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.

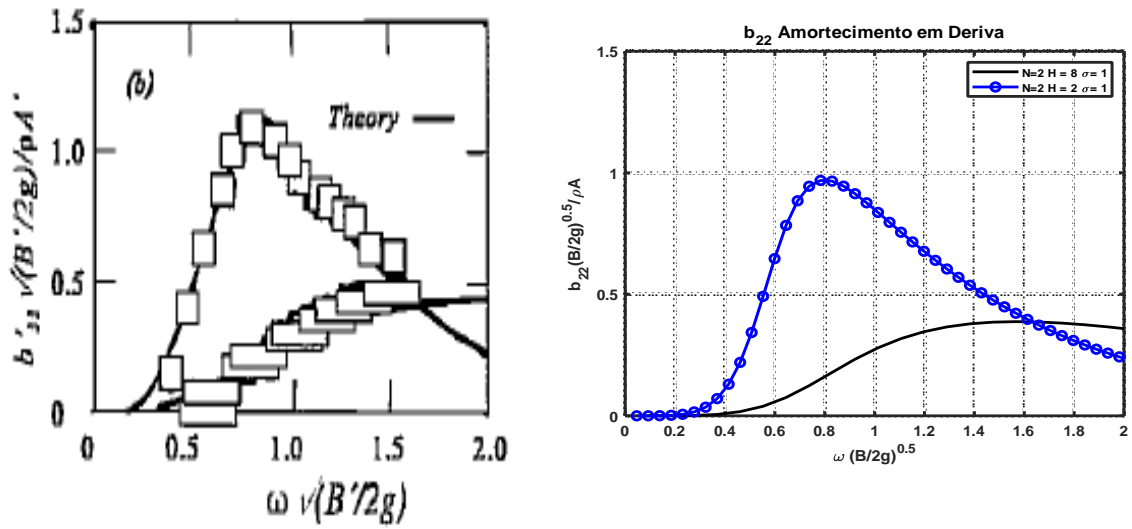


Figura 7.7: Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.

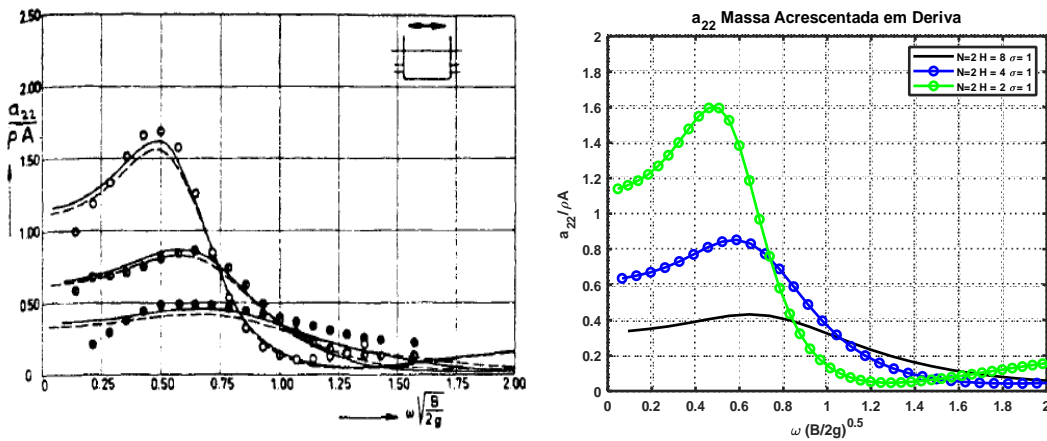


Figura 7.8: Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.

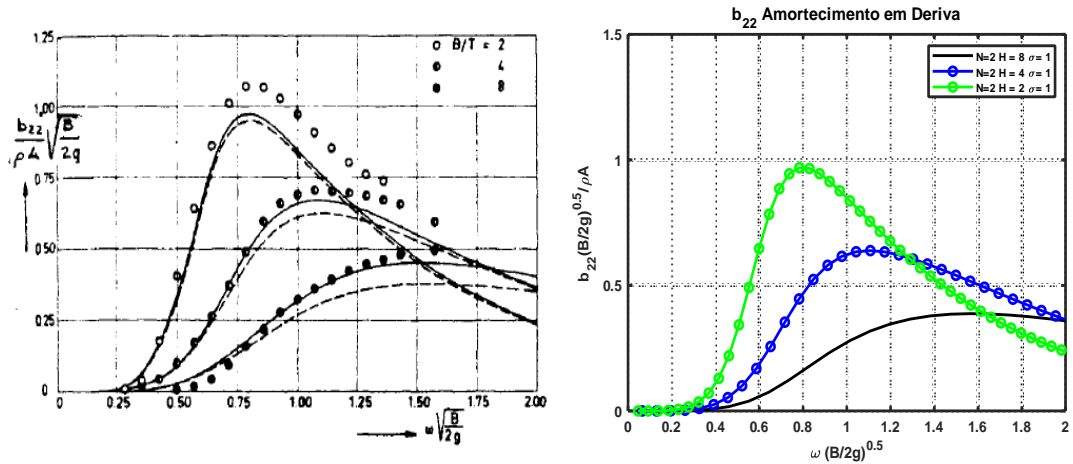


Figura 7.9: Resultados obtidos por (Lloyd,1998) vs. algoritmo elaborado.

7.1.1 Análise e discussão dos resultados preliminares

As curvas obtidas por algoritmo desenvolvido em *Matlab*[®], estão graficamente representados para diferentes coeficientes de área da seção ($\sigma = \frac{A}{BD}$) e diferentes relação boca calado ($H = B/D$) das figuras de Lewis. Pode-se observar nas figuras acima que existe uma ligeira diferença entre os resultados obtidos pelo algoritmo desenvolvido e as figuras do Lloyd (Lloyd, 1998), relativos a massa acrescentada em arfagem. Olhando para as curvas de amortecimento, observa-se que existe uma ligeira diferença, apesar da curva obtida não representar graficamente as frequências abaixo de 0.2 rad/s . Importa referir que os erros aqui constatados não diferem da constatação feita por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018).

Na mesma abordagem fez-se outra comparação com os resultados de Lewis (Lewis, 1989) no qual estão representados graficamente resultados das curvas experimentais representados por pontos, resultados de mapeamento conforme representado por linha cheia e a curva a tracejada representa as formas de Lewis. Neste sentido pode-se observar que a curva a tracejada aproxima-se bastante bem a curva obtida pelo algoritmo desenvolvido para massa acrescentada e amortecimento em arfagem, já para deriva, as curvas obtidas para massa acrescentada e amortecimento apresentam resultados muito semelhantes tanto para figuras de Lewis (Lewis, 1989) como para figuras de Lloyd (Lloyd, 1998)

7.2 Comparação de Resultados: Método de Mapeamento conforme Multiparâmetro vs método de Frank

Após uma primeira validação com as formas de Lewis, agora segue a validação mais precisa por comparação por método de Frank. Segundo (Lewis, 1989), o método de Frank 1967 é muito preferido para a computação de dinâmica de navios, fornecendo resultados mais precisos que os resultados de Lewis. Os dados utilizados para a comparação foram obtidos de um algoritmo existente no IST que aplica o método dos painéis bidimensionais de Frank ou simplesmente método de Frank.

Esta tese insere-se no âmbito da continuação da tese anterior desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018), no qual usa apenas dois parâmetros, daí que surge a necessidade de utilizar os mesmos dados e secções de comparação. Nesta ordem de ideia, utilizaram-se as secções 4, 12, 19 correspondentes as secções da popa, meio navio e proa da Fragata da Marinha Portuguesa. Os cálculos efetuados para 14 pontos da frequência de encontro a 15 nós, $\omega_e = [0.29, 0.34, 0.39, 0.45, 0.5, 0.56, 0.61, 0.72, 0.84, 0.98, 1.12, 1.17, 1.78, 2.58]$ retirados do (da Silva Ferreira, 2018) referente ao documento NATO ANEP II (NATO,1983).

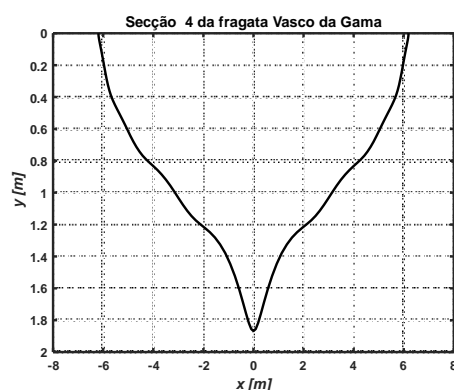


Figura 7.10: Secções 4, 12, 19 da Fragata da Marinha Portuguesa obtidas pelo mapeamento conforme multiparâmetro

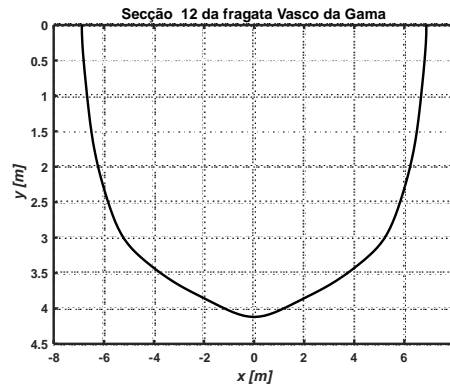


Figura 7.11: Secções 4, 12, 19 da Fragata da Marinha Portuguesa obtidas pelo mapeamento conforme multiparâmetro

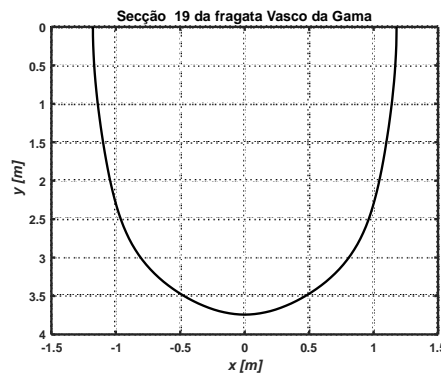


Figura 7.12: Secções 4, 12, 19 da Fragata da Marinha Portuguesa obtidas pelo mapeamento conforme multiparâmetro

7.2.1 Massa acrescentada e amortecimento em Arfagem

À esquerda apresentam-se os resultados das curvas de massa acrescentada (a_{33}) e amortecimento (b_{33}) obtidos pelo método de Mapeamento Conforme Multiparâmetro (MCM) desenvolvido nesta tese, e à direita estão representados as curvas obtidas a partir do método de Lewis (Lewis, 1989) desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018). Ambos os algoritmos foram comparados com os resultados obtidos a partir do método de Frank do IST para as secções 4, 12 e 19 da Fragata da Marinha Portuguesa. Para a secção 4 obteve-se erros médios na ordem de 5.51% para a_{33} e 5.2% para b_{33} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 5.68% para a_{33} e 8.65% para b_{33} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira,

2018). Também pode-se observar a evolução do erro relativo ao longo da frequência na figura 7.15

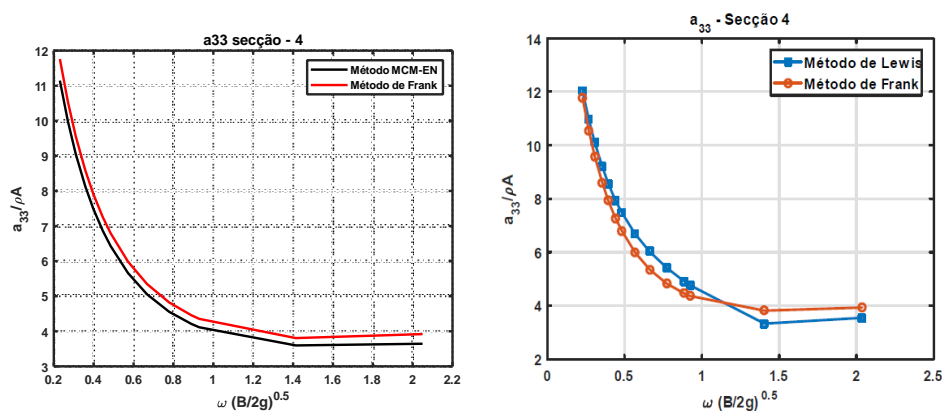


Figura 7.13: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

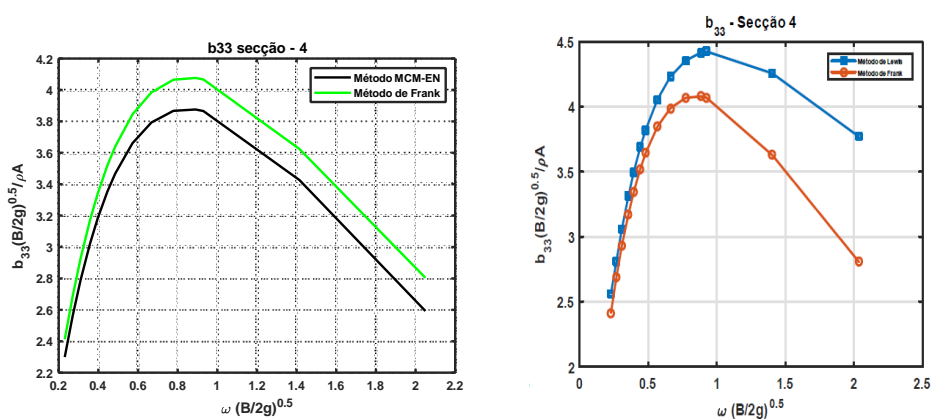


Figura 7.14: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

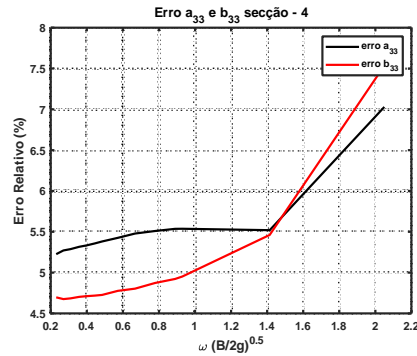


Figura 7.15: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

Para a secção 12 da Fragata da Marinha Portuguesa, obtiveram-se erros médios na ordem dos 2.46% para a_{33} e 6.62% para b_{33} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 85.91% para a_{33} e 167.46% para b_{33} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018). Também pode-se observar a evolução do erro relativo ao longo da frequência na figura 7.18

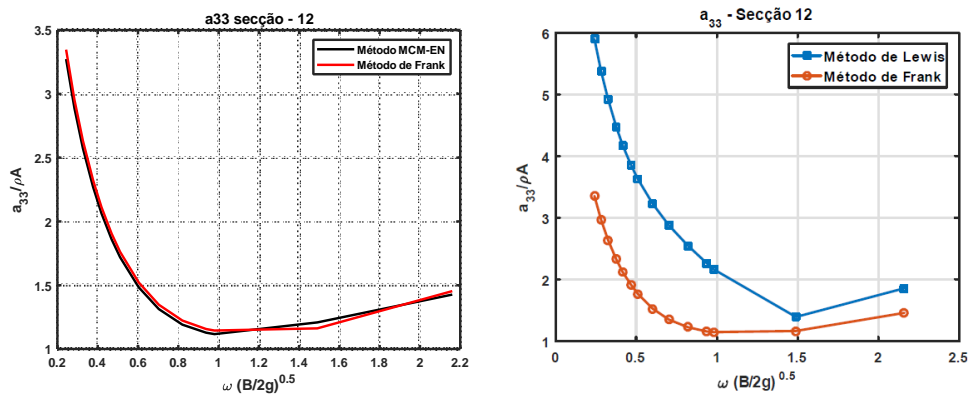


Figura 7.16: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

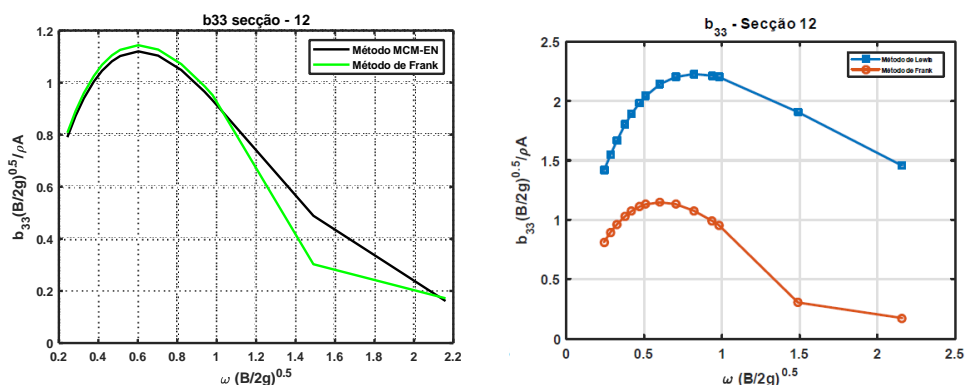


Figura 7.17: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

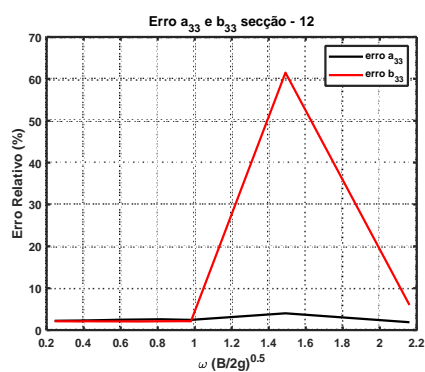


Figura 7.18: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

Para a secção 19 da Fragata da Marinha Portuguesa, obtiveram-se erros médios na ordem dos 5.02% para a_{33} e 7.16% para b_{33} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 95.88% para a_{33} e 121.27% para b_{33} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018). Também pode-se observar a evolução do erro relativo ao longo da frequência na figura 7.21

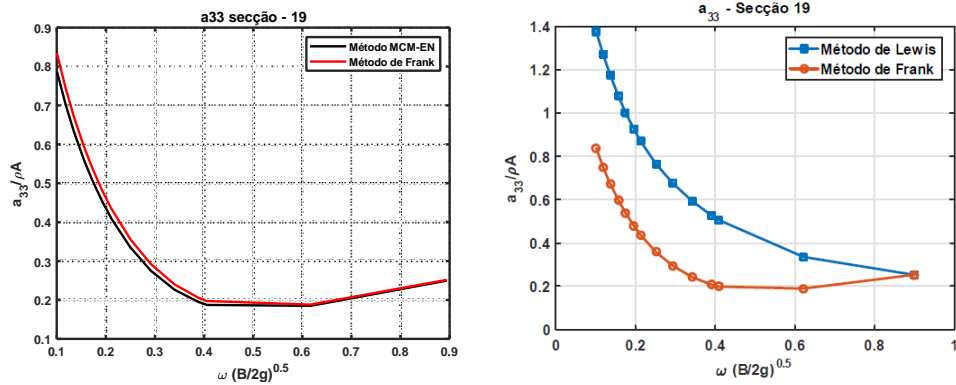


Figura 7.19: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

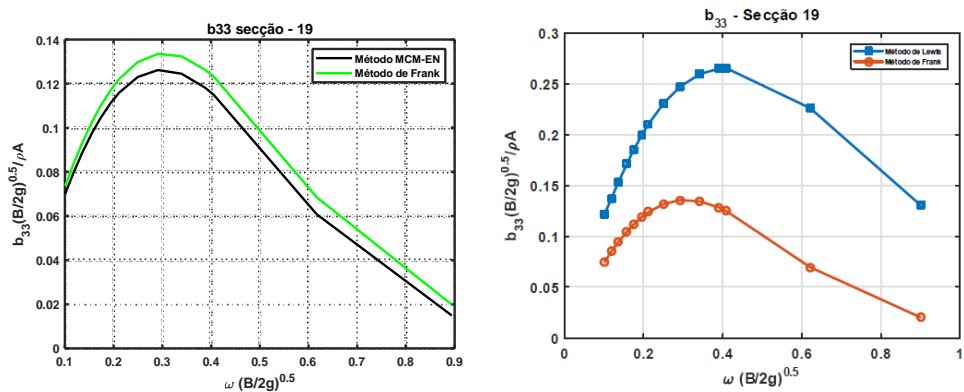


Figura 7.20: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

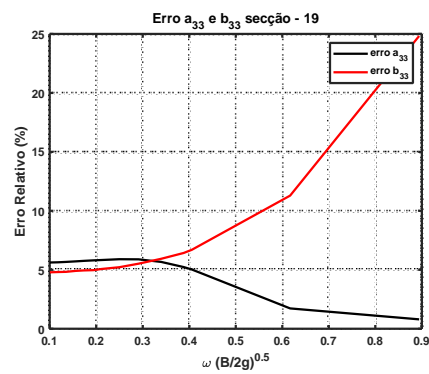


Figura 7.21: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

7.2.2 Massa acrescentada e amortecimento em Deriva

Segue à esquerda a representação gráfica da curva de a_{22} e b_{22} pelo método de Mapeamento Conforme Multiprâmetro, resultado obtido pelo algoritmo desenvolvido neste trabalho (MCM-EN), e à direita o algoritmo desenvolvido a partir do método de Lewis (da Silva Ferreira, 2018). Ambos os algoritmos foram comparados com os resultados obtidos a partir do método de Frank do IST para as secções 4, 12 e 19 da Fragata da Marinha Portuguesa. Para a secção 4 obtiveram-se erros médios na ordem de 3.52% para a_{22} e 3.02% para b_{22} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 439.56% para a_{22} e 230.41% para b_{22} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018). Também pode-se observar a evolução do erro relativo ao longo da frequência na figura 7.24

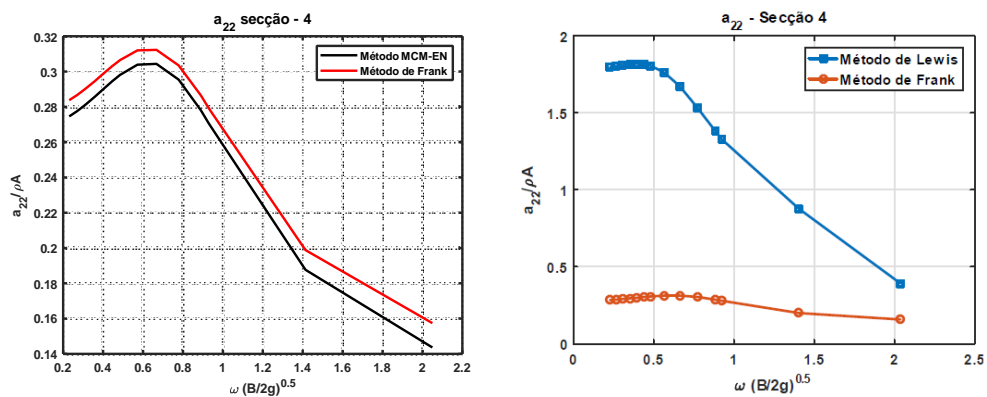


Figura 7.22: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

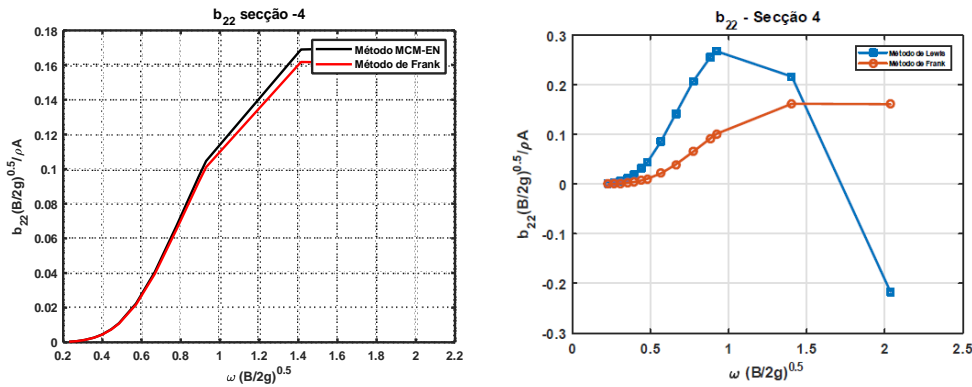


Figura 7.23: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

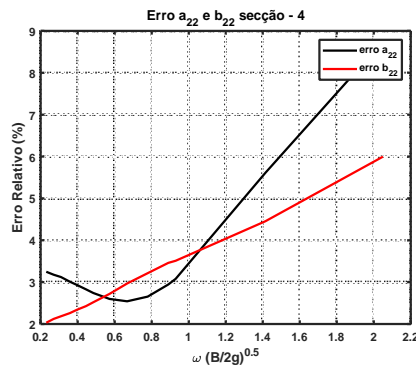


Figura 7.24: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

Para a secção 12 da Fragata da Marinha Portuguesa, obtiveram-se erros médios na ordem de 2.25% para a_{22} e 1.24% para b_{22} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 26.23% para a_{22} e 43.23% para b_{22} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018). Também pode-se observar a evolução do erro relativo ao longo da frequência na figura 7.27

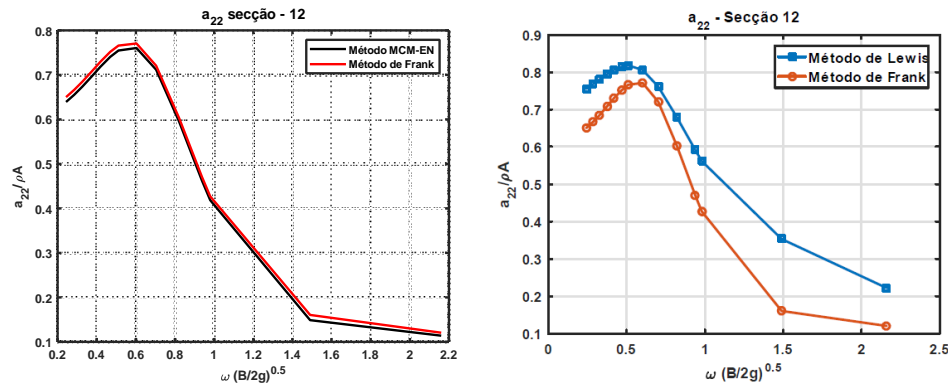


Figura 7.25: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

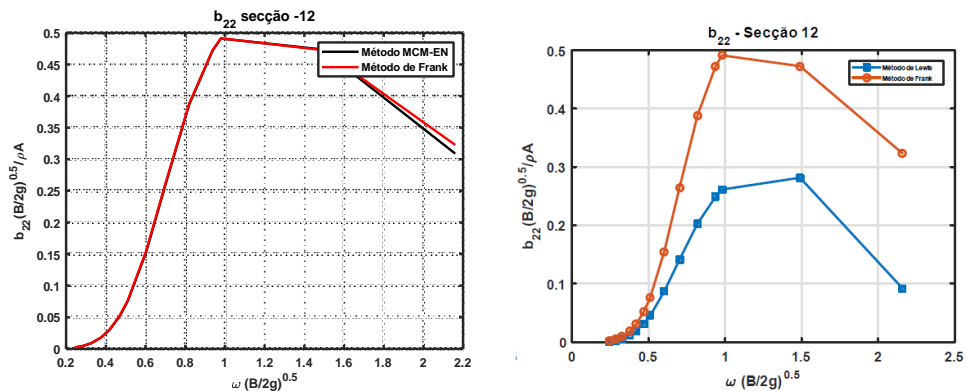


Figura 7.26: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

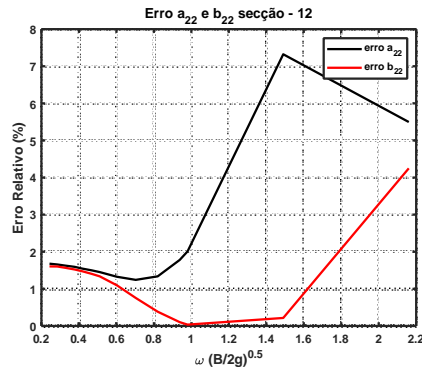


Figura 7.27: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

Para a seção 19 da Fragata da Marinha Portuguesa, obtiveram-se erros médios na ordem de 1.42% para a_{22} e 2.53% para b_{22} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 51.89% para a_{22} e 11.08% para b_{22} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018). Também pode-se observar a evolução do erro relativo ao longo da frequência na figura 7.30

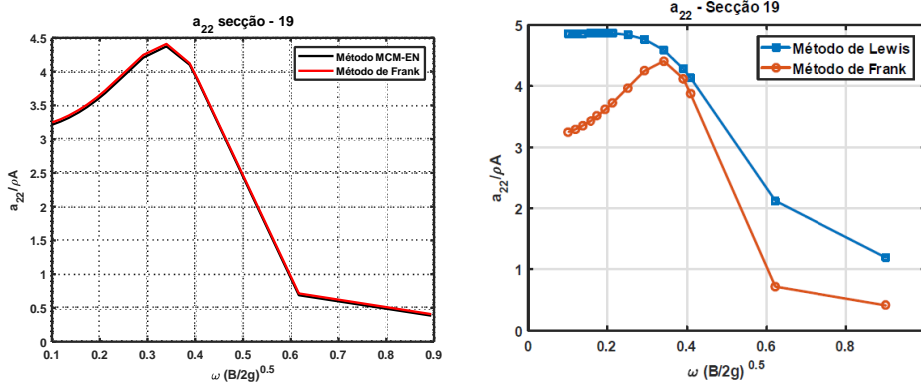


Figura 7.28: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

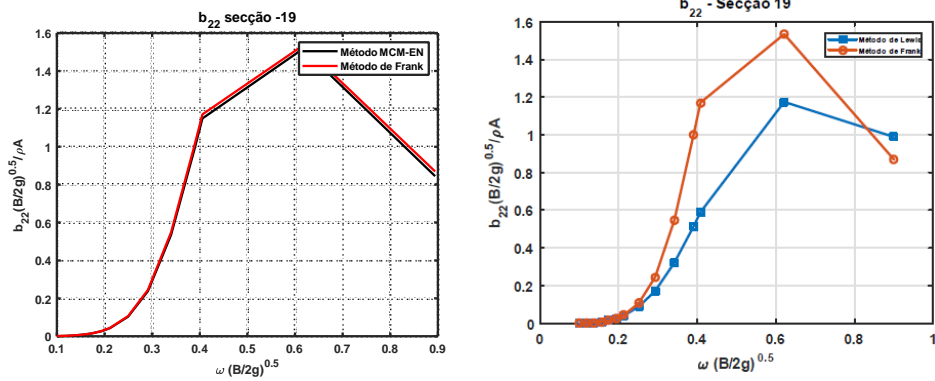


Figura 7.29: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

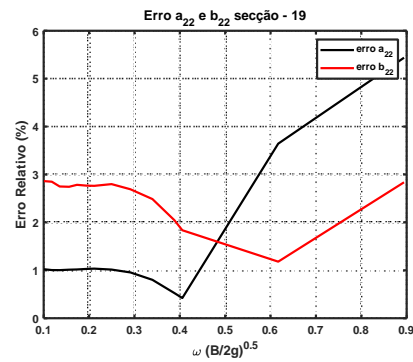


Figura 7.30: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

7.2.3 Massa acrescentada e amortecimento em Deriva devido a Balanço

Da mesma forma como em arfagem e em deriva, a validação para deriva devido a balanço segue os mesmos critérios de comparação, assim a computação da deriva devido o balanço para a secção 4 da Fragata da Marinha Portuguesa, obtiveram-se erros médios na ordem dos 7.18% para a_{24} e 11.64% para b_{24} referente ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 323.57% para a_{24} e 27.95% para b_{24} referente ao algoritmo desenvolvido por (da Silva Ferreira, 2018). Também pode-se observar a evolução do erro relativo ao longo da frequência na figura 7.33.

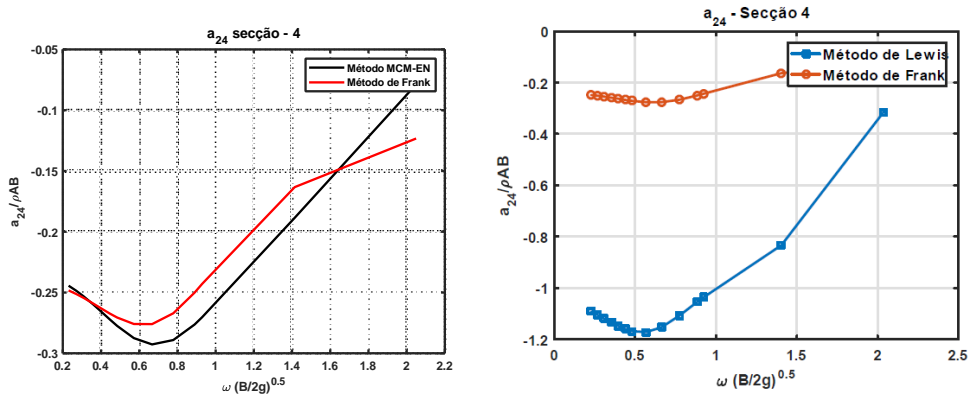


Figura 7.31: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

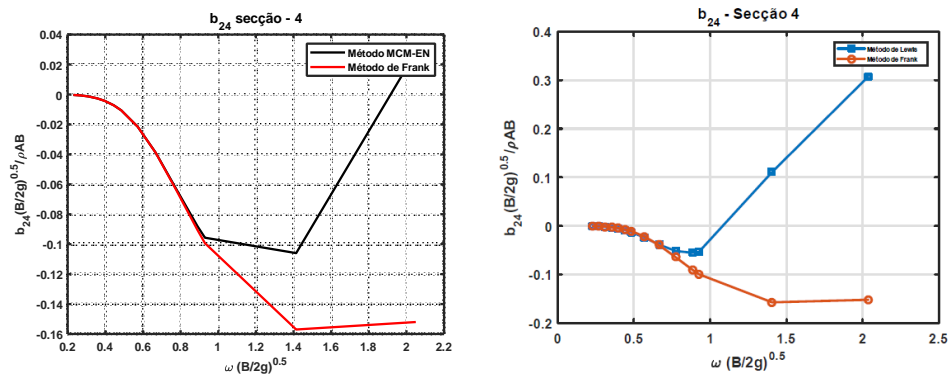


Figura 7.32: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

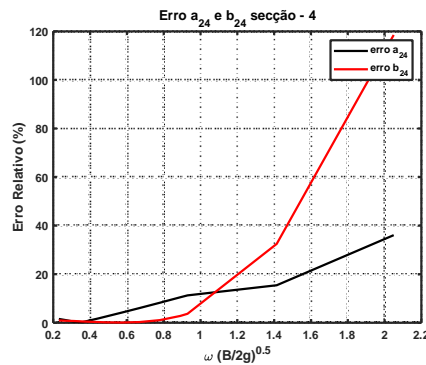


Figura 7.33: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

A computação da deriva devido o balanço para a secção 12 da Fragata da Marinha Portuguesa, obtiveram-se erros médios na ordem de 13.06% para a_{24} e 8.62% para b_{24} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 185.68% para a_{24} e 35.75% para b_{24} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018). Também pode-se observar a evolução do erro relativo ao longo da frequência na figura 7.36.

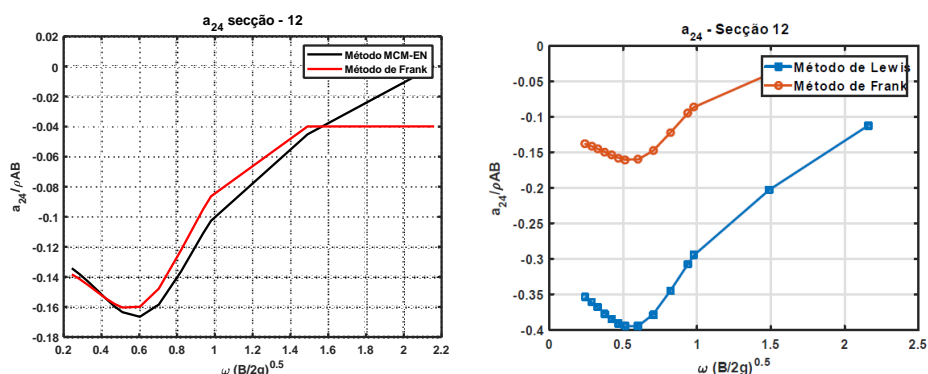


Figura 7.34: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

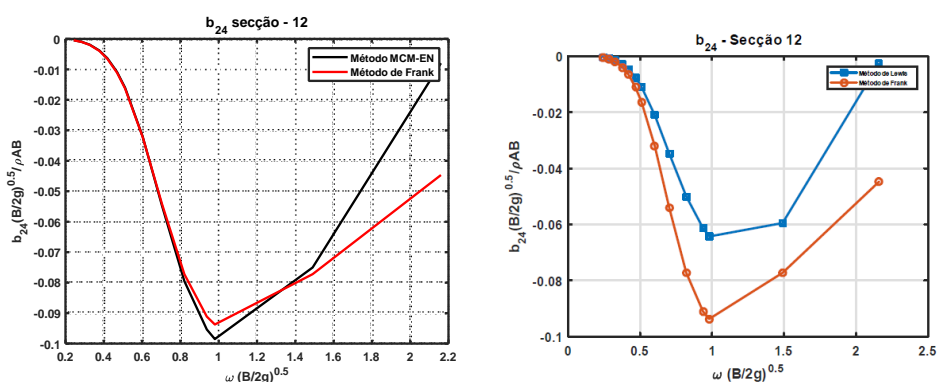


Figura 7.35: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

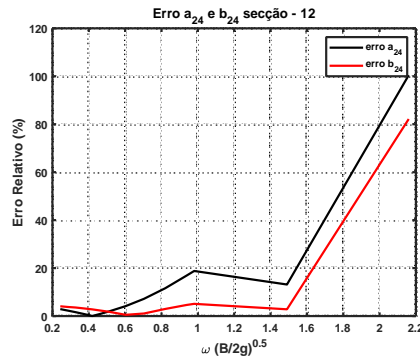


Figura 7.36: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

A computação da deriva devido o balanço para a secção 19 da Fragata da Marinha Portuguesa, obteve-se erros médios na ordem dos 19.95% para a_{24} e 7.79% para b_{24} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 59.97% para a_{24} e 46.07% para b_{24} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018). Também pode-se observar a evolução do erro relativo ao longo da frequência na figura 7.39.

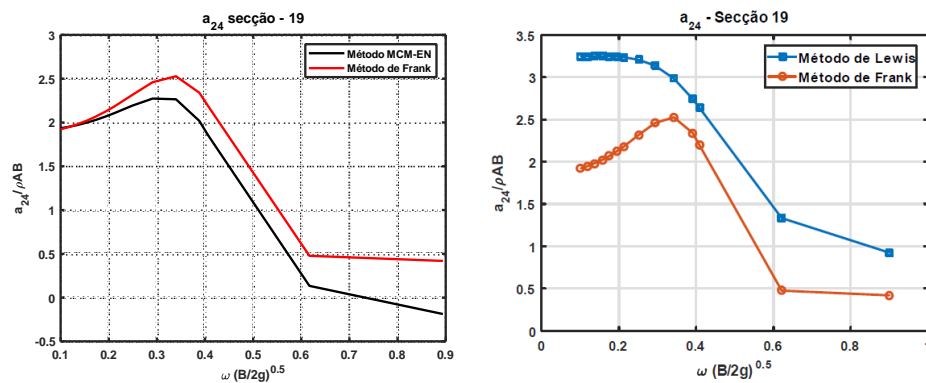


Figura 7.37: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

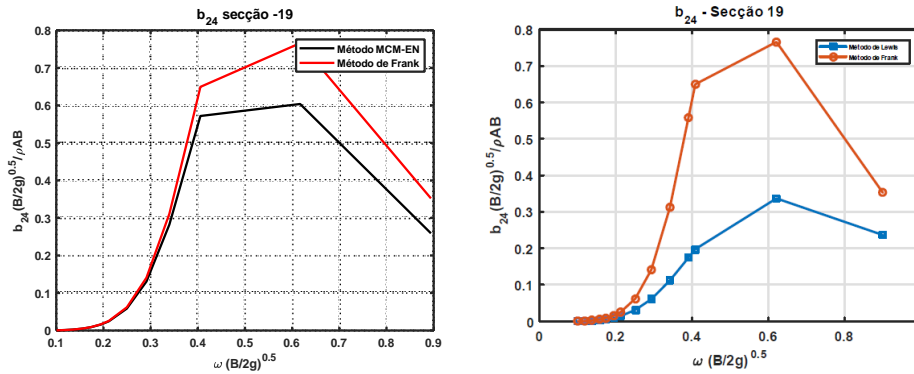


Figura 7.38: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

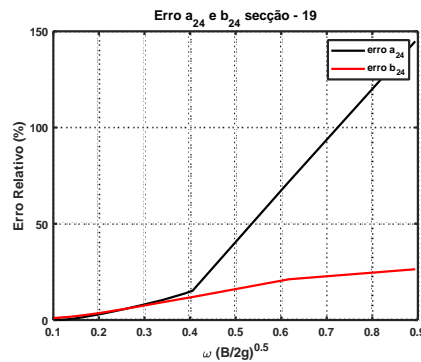


Figura 7.39: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

7.2.4 Massa acrescentada e amortecimento em Balanço.

Relativamente ao balanço os resultados obtidos da sua computação também apresentam erros relativos comparados com o método de Frank como indicam os gráficos que se seguem. Para a secção 4 da Fragata da Marinha Portuguesa, obtiveram-se erros médios na ordem dos 9.45% para a_{44} e 78.09% para b_{44} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 23.26% para a_{44} e 163.00% para b_{44} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018). Embora visualmente o gráfico apresenta um

pico que parece insignificante, importa referir que o erro para b_{44} é influenciado pelo pico na frequência de 0.39rad/s que chega a atingir um erro relativo próximo dos 1000% como pode-se observar na figura 7.42.

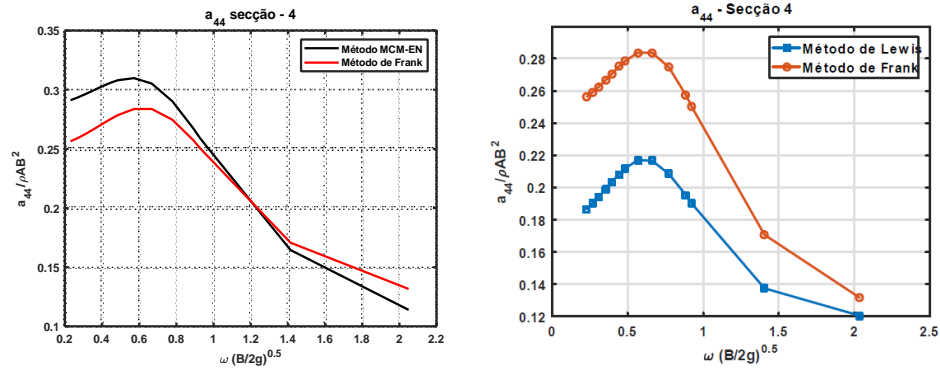


Figura 7.40: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

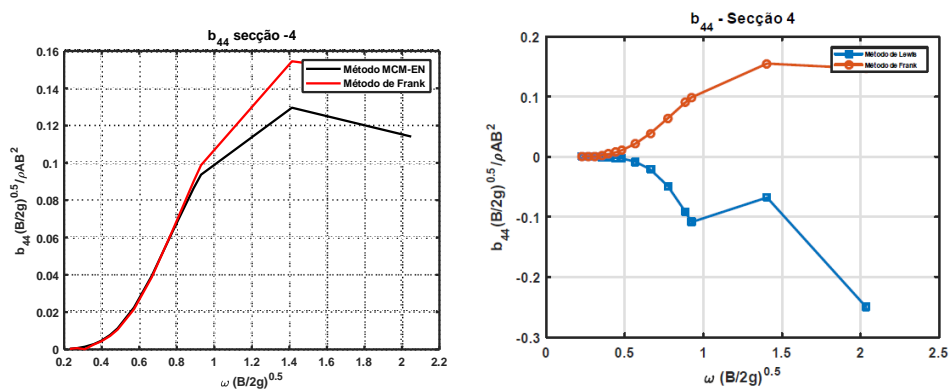


Figura 7.41: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

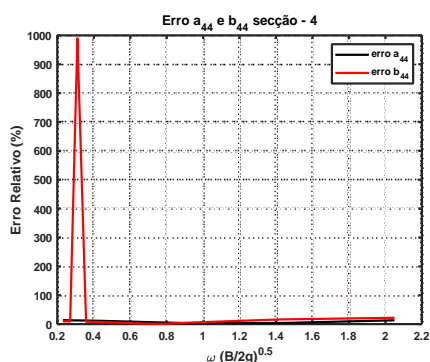


Figura 7.42: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

Para a secção 12 da Fragata da Marinha Portuguesa, obteve-se erros médios na ordem dos 7.11% para a_{44} e 12.75% para b_{44} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 89.71% para a_{44} e 270.17% para b_{44} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018). Embora visualmente o gráfico apresenta um pico que parece insignificante, importa referir que o erro para b_{44} é influenciado pelo pico na frequência de 0.29rad/s que chega a atingir um erro relativo próximo dos 90% como pode-se observar na figura 7.45.

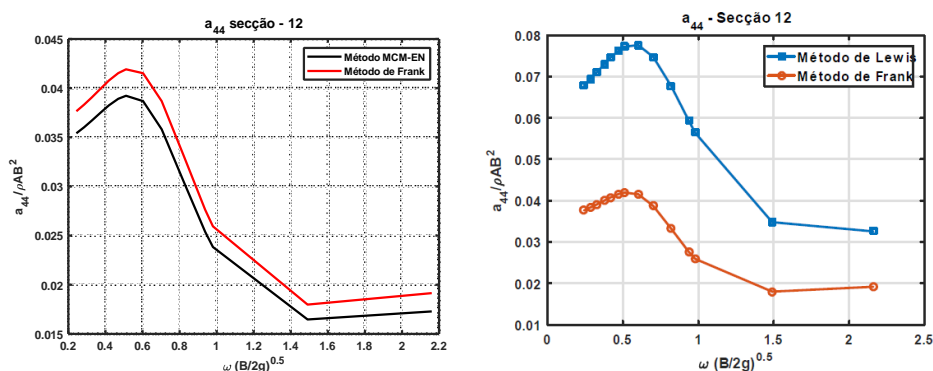


Figura 7.43: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

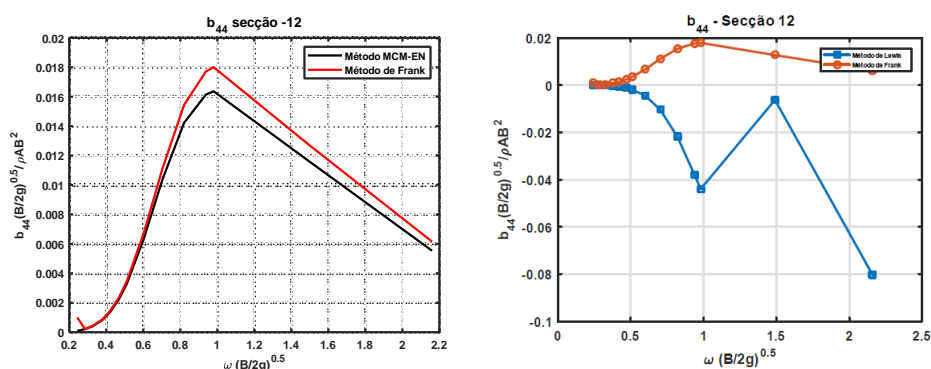


Figura 7.44: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

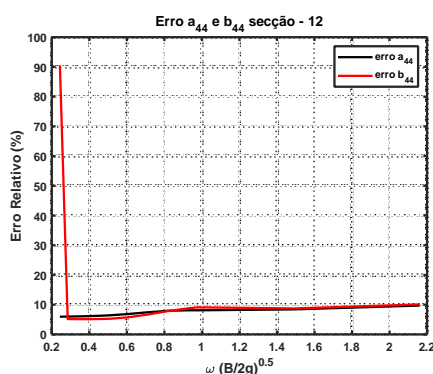


Figura 7.45: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

Para a secção 19 da Fragata da Marinha Portuguesa, obtiveram-se erros médios na ordem dos 20.90% para a_{44} e 31.60% para b_{44} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 16.10% para a_{44} e 25.41% para b_{44} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018). Também pode-se observar a evolução do erro relativo ao longo da frequência na figura 7.48.

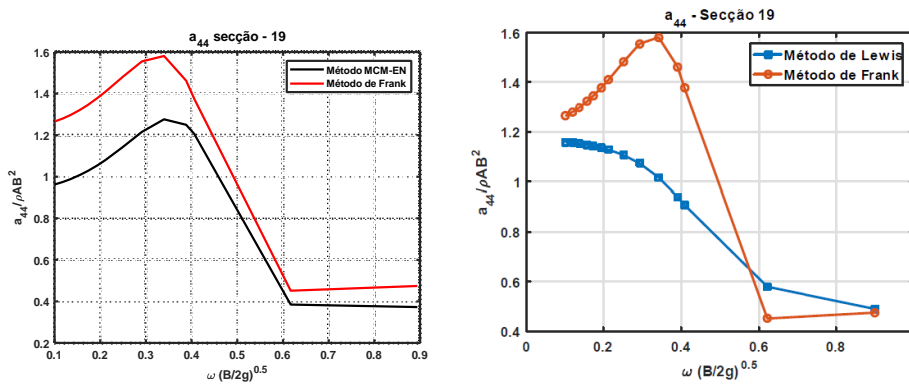


Figura 7.46: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank
 b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

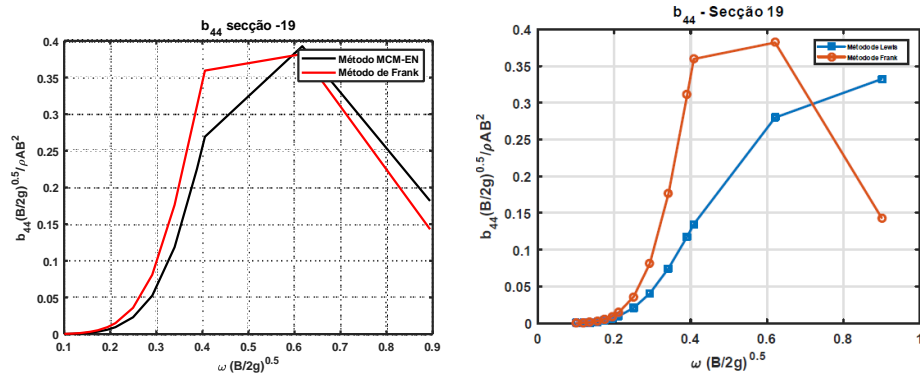


Figura 7.47: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

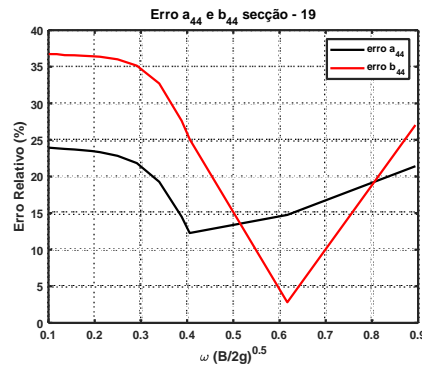


Figura 7.48: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

7.2.5 Massa acrescentada e amortecimento em Balanço devido a Deriva.

Por fim resta validar os coeficientes hidrodinâmicos, balanço devido a deriva cujas curvas se seguem. Para a secção 4 da Fragata da Marinha Portuguesa, obteve-se erros médios na ordem dos 3.08% para a_{42} e 26.12% para b_{42} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 50.92% para a_{44} e 177.01% para b_{42} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018). Importa referir que o elevado erro médio de b_{42}

é influenciado pelo pico que ocorre na frequência de 0.56 rad/s , onde o erro chega próximo dos 300%, como se pode ver na figura 7.51

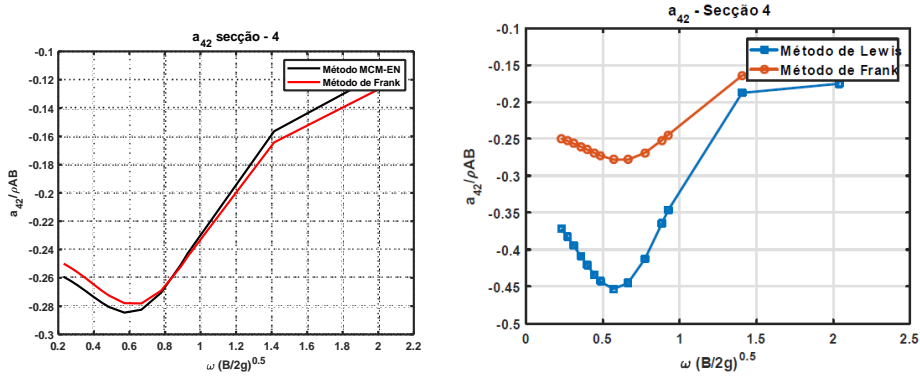


Figura 7.49: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

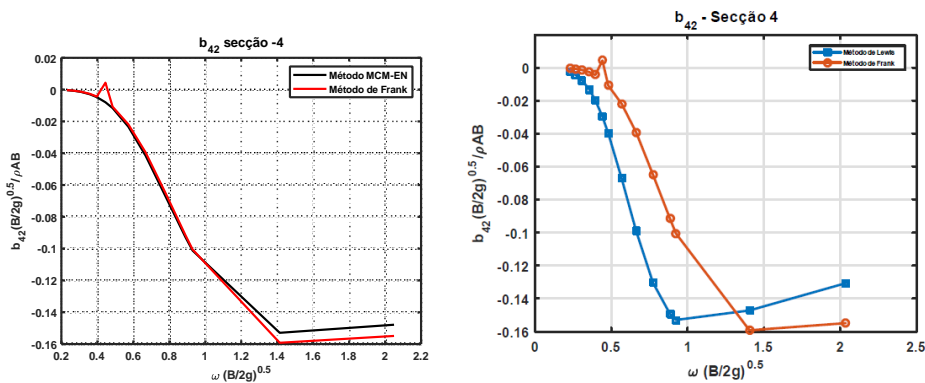


Figura 7.50: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

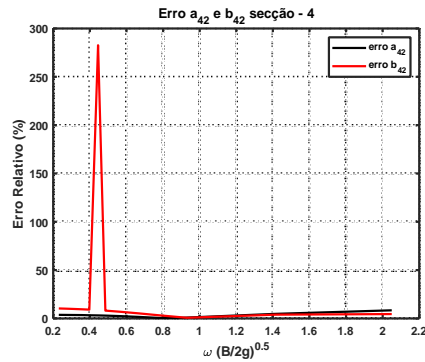


Figura 7.51: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

Para a secção 12 da Fragata da Marinha Portuguesa, obtiveram-se erros médios na ordem dos 8.77% para a_{42} e 4.41% para b_{42} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 111.25% para a_{42} e 118.73% para b_{42} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) Também pode-se observar a evolução do erro relativo ao longo da frequência na figura 7.54

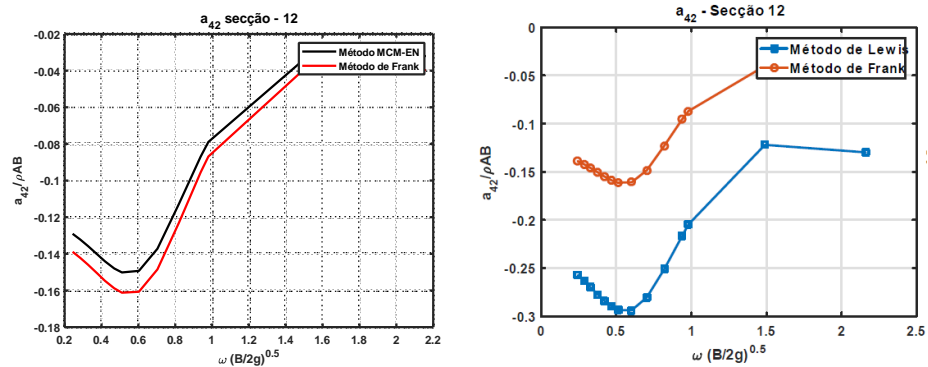


Figura 7.52: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

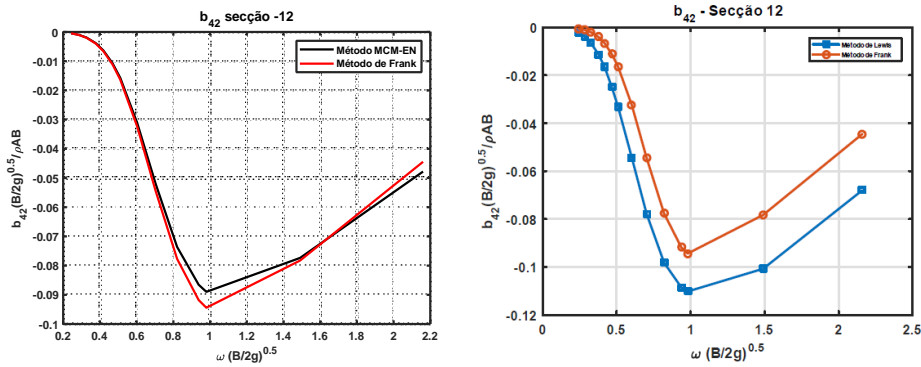


Figura 7.53: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

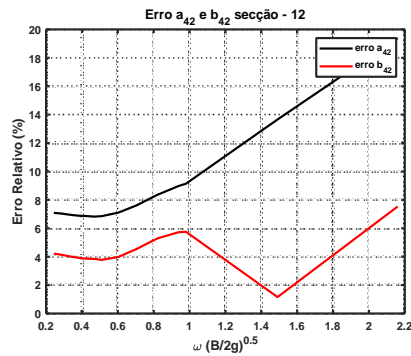


Figura 7.54: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

Para a secção 19 da Fragata da Marinha Portuguesa, obtiveram-se erros médios na ordem dos 22.24% para a_{42} e 32.40% para b_{42} referentes ao algoritmo desenvolvido neste trabalho e 50.96% para a_{42} e 53.06% para b_{42} referente ao algoritmo desenvolvido por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) Também pode-se observar a evolução do erro relativo ao longo da frequência na figura 7.57

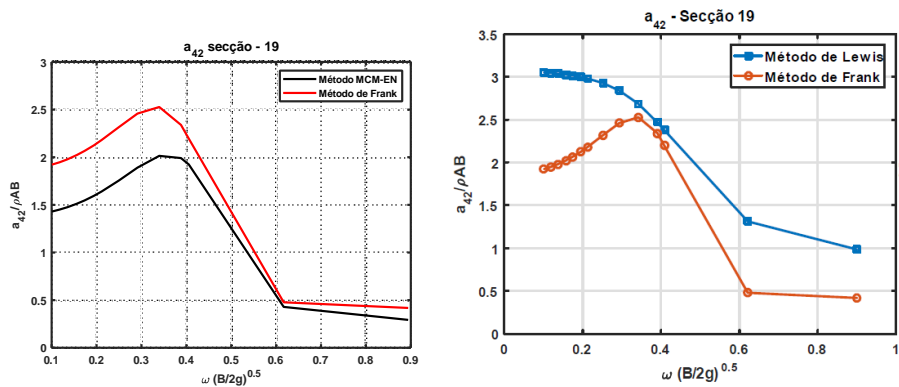


Figura 7.55: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank
b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

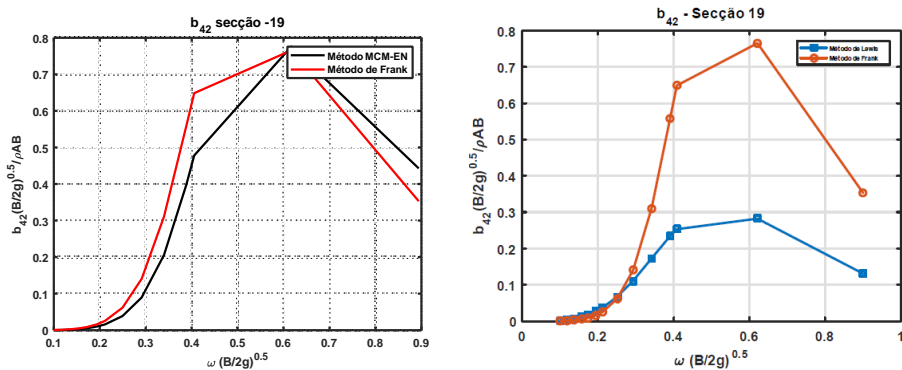


Figura 7.56: Resultados obtidos: a) Algoritmo EN MCM vs Método de Frank
b) Método de Lewis por Ferreira da Silva (da Silva Ferreira, 2018) vs Método de Frank

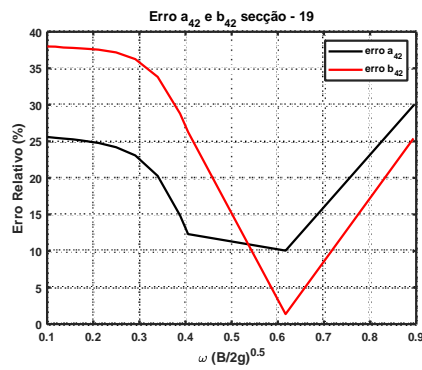


Figura 7.57: Evolução do Erro ao longo da Frequência do algoritmo MCM EN vs. Método de Frank do IST

Observando os gráficos pode-se concluir que as curvas apresentam a mesma tendência e formato e sem irregularidades ao longo da frequência, embora as curvas de Frank apresentem picos em algumas frequências, o que faz com que os erros nessas frequências sejam muito alto, acabando por influenciar a média do erro relativo. Os picos que aparecem nas curvas obtidas pelo método de Frank, pode-se dever ao facto de existência de frequências de ressonância neste método.

7.3 Comparação de dois algoritmos para o Método de Mapeamento Conforme Multiparâmetro

Sob as mesmas condições e dados utilizados para comparação com o método de Frank, agora ira-se comparar os mesmos resultados obtido anteriormente com os resultados obtidos por um algoritmo do IST que utiliza o método de mapeamento conforme multiparâmetro, um método igual ao utilizado neste trabalho.

7.3.1 Massa acrescentada e amortecimento em Arfagem

As curvas dos coeficientes hidrodinâmicos para arfagem, massa acrescentada e amortecimento obtidos a partir do algoritmo do IST mostram uma elevada aproximação às curvas obtidas a partir do algoritmo desenvolvido neste trabalho (MCM-EN). Visto que ambos os algoritmos usam o método de mapeamento conforme multiparâmetro, considera-se ser esta a melhor comparação. Das 20 secções da Fragata da Marinha Portuguesa foram utilizadas as secções 2, 3, 12, 13, 16 e 17, representadas por duas a popa, duas a meio-navio e duas a proa respectivamente. Para cada secção escolhida têm 8, 7, 9, 9, 10 e 9 parâmetros de mapeamento conforme.

Pode-se observar nas figuras que se seguem que às curvas que representam os coeficientes hidrodinâmicos, massa acrescentada e amortecimento ajustam-se quase que perfeitamente às curvas obtidas através do algoritmo do IST, não apresentando irregularidades ao longo da frequência, assim como apresentam erros relativo muito baixo. A massa acrescentada é a curva que sempre apresenta menor erro relativo ao longo das 20 secções.

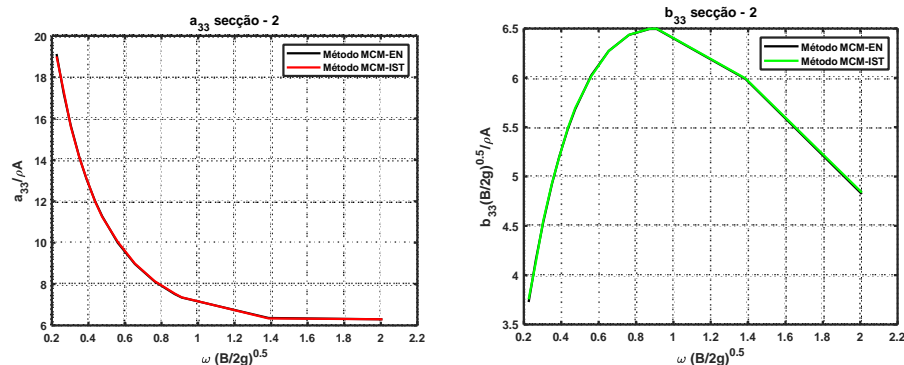


Figura 7.58: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos do algoritmo elaborado na EN e IST

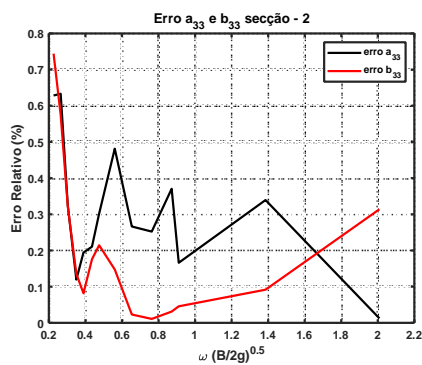


Figura 7.59: Evolução do Erro ao longo da Frequência: Método de MCM vs IST)

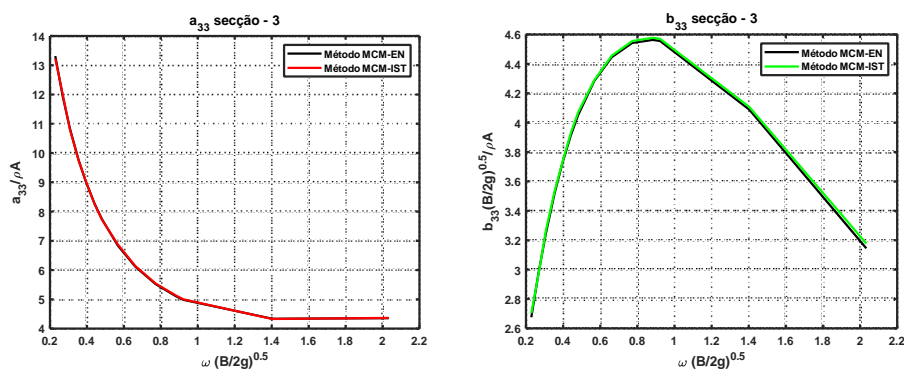


Figura 7.60: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos do algoritmo elaborado na EN e IST

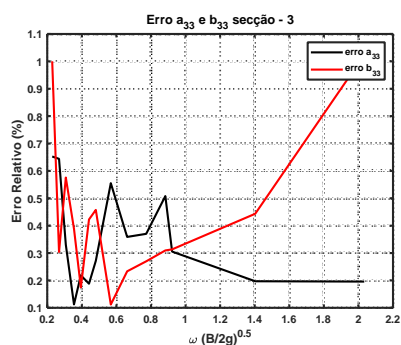


Figura 7.61: Evolução do Erro ao longo da Frequência: Método de MCM vs IST)

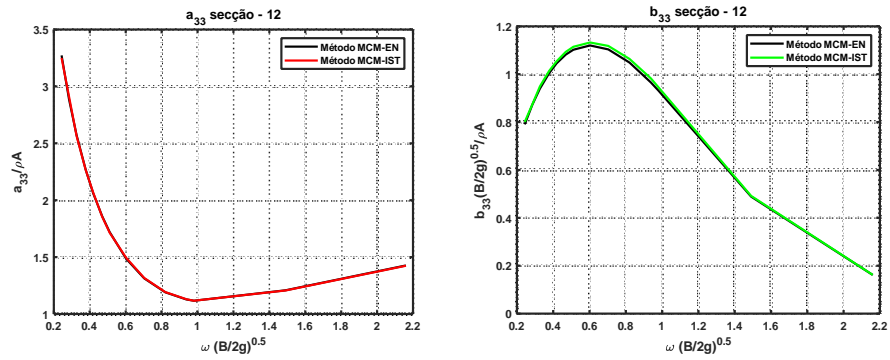


Figura 7.62: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos do algoritmo elaborado na EN e IST

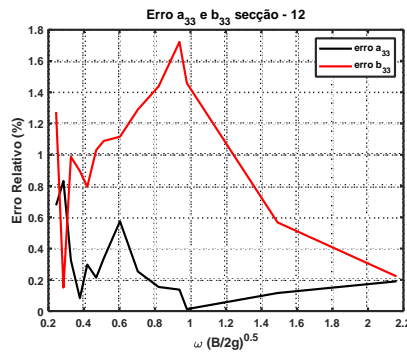


Figura 7.63: Evolução do Erro ao longo da Frequência: Método de MCM vs IST)

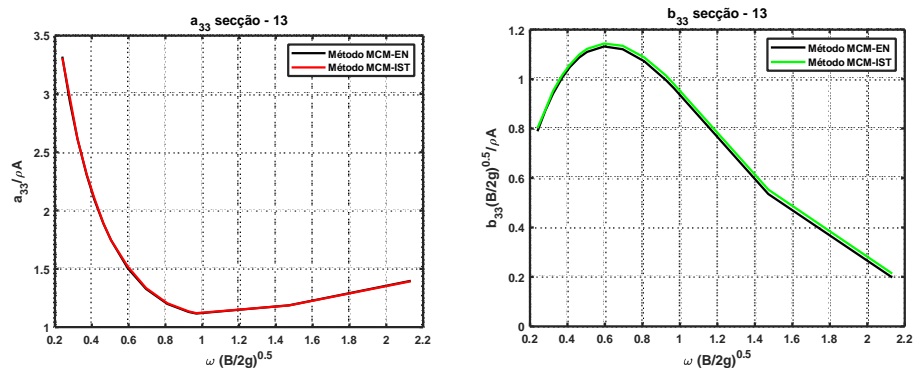


Figura 7.64: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos do algoritmo elaborado na EN e IST

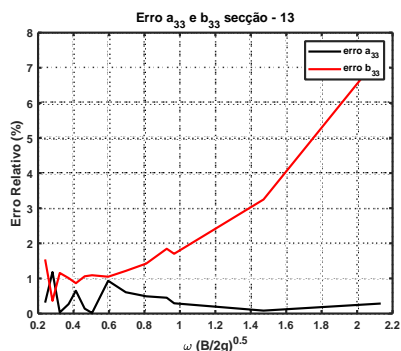


Figura 7.65: Evolução do Erro ao longo da Frequência: Método de MCM vs IST)

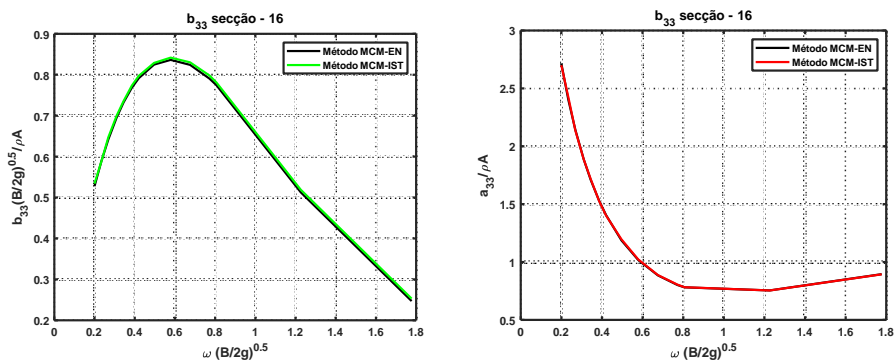


Figura 7.66: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos do algoritmo elaborado na EN e IST

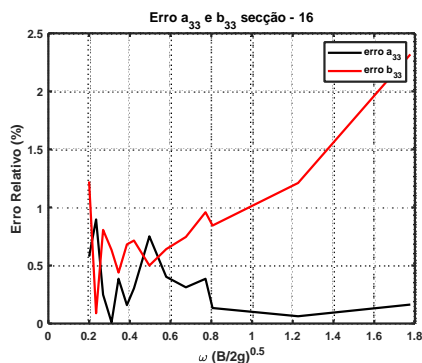


Figura 7.67: Evolução do Erro ao longo da Frequência: Método de MCM vs IST)

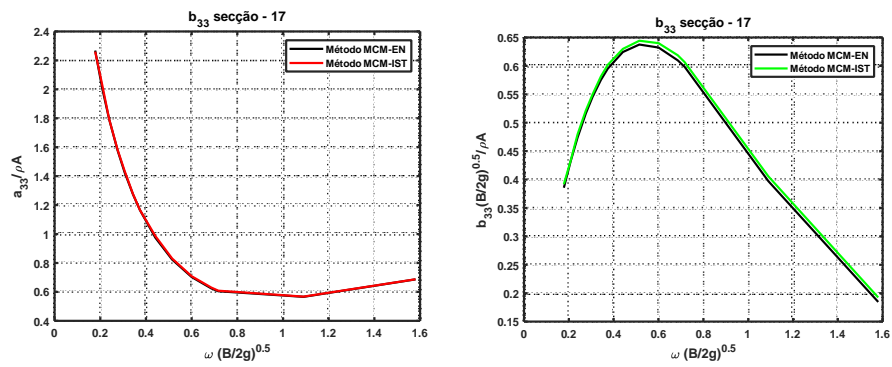


Figura 7.68: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos do algoritmo elaborado na EN e IST

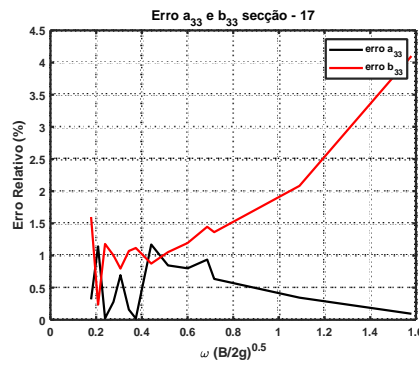


Figura 7.69: Evolução do Erro ao longo da Frequência: Método de MCM vs IST)

Capítulo 8

Cálculos de Coeficientes Globais

Como havia referido anteriormente em teoria de faixas, o navio foi dividido em 20 secções, o que permitiu reduzir o problema de cálculo hidrodinâmico 3D para 2D e posteriormente o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos para cada uma das secções. Para obter os coeficientes globais, massa acrescentada e amortecimento total ao longo do navio os coeficientes hidrodinâmicos 2D de cada secção (20 secções) calculados anteriormente serão integrados ao longo do comprimento de todo o navio, assim obteremos os coeficientes hidrodinâmicos globais.

Segue a representação gráfica que ilustra uma comparação dos resultados desenvolvidos neste trabalho e os resultados obtidos no IST para modo vertical A_{33} , B_{33} , A_{35} , B_{35} , A_{53} , B_{53} e A_{55} , B_{55} . e também uma ilustração gráfica dos coeficientes globais no modo Horizontal A_{22} , B_{22} , A_{44} , B_{44} , A_{24} , B_{24} , A_{26} , B_{26} , A_{46} , B_{46} , A_{62} , B_{62} , A_{64} , B_{64} , A_{66} , B_{66} , cuja as equações se encontram no apêndice *B*.

8.1 Comparação dos resultados obtidos: Modo Vertical

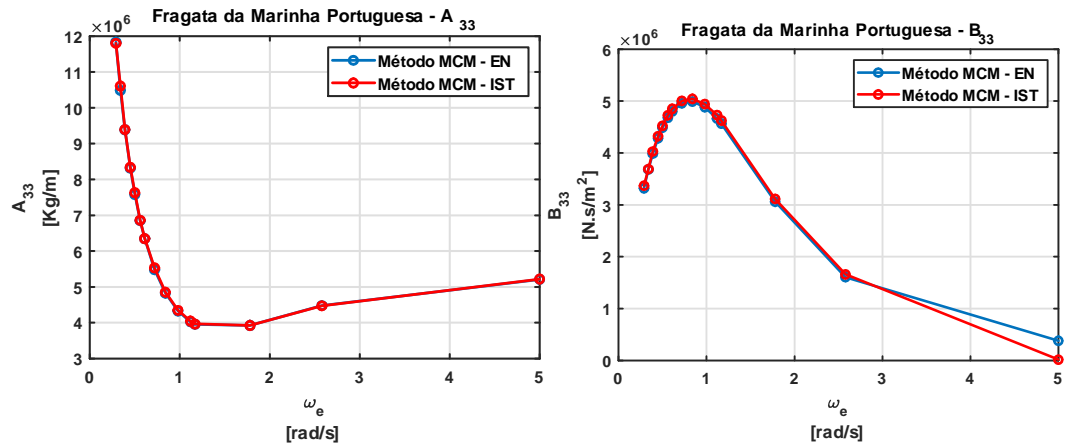


Figura 8.1: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN e IST para A_{33} e B_{33}

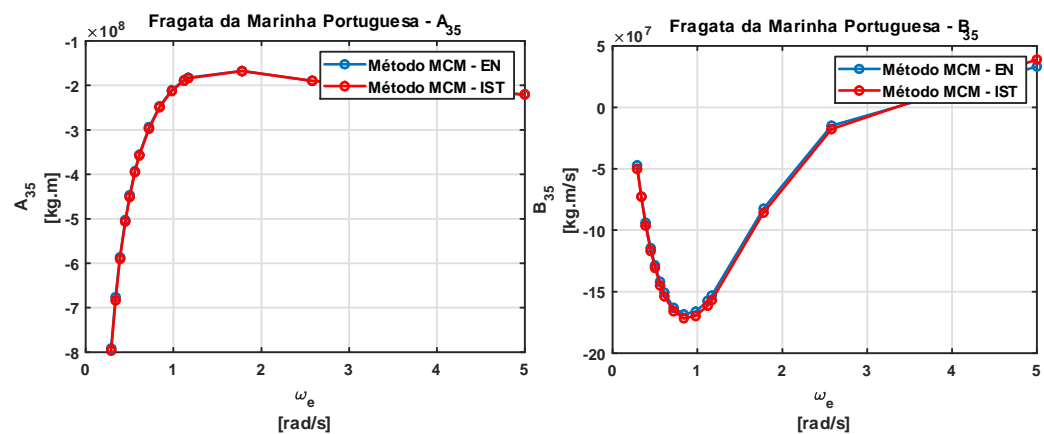


Figura 8.2: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN e IST para A_{35} e B_{35}

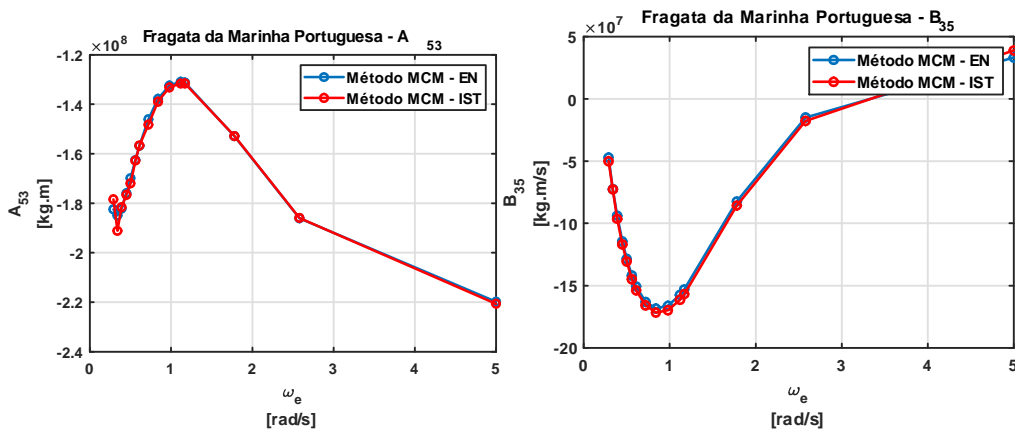


Figura 8.3: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN e IST para A_{53} e B_{53}

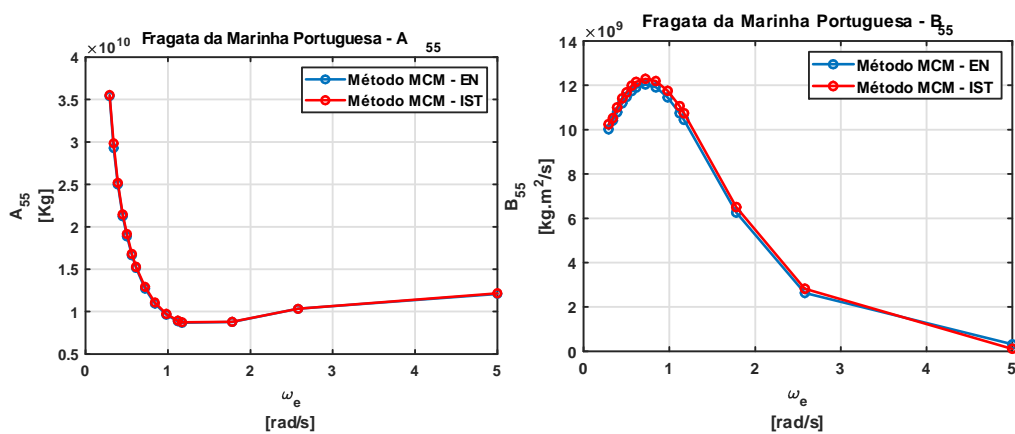


Figura 8.4: Comparação das curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN e IST para A_{55} e B_{55}

8.2 Representação gráfica dos resultados obtidos no modo horizontal

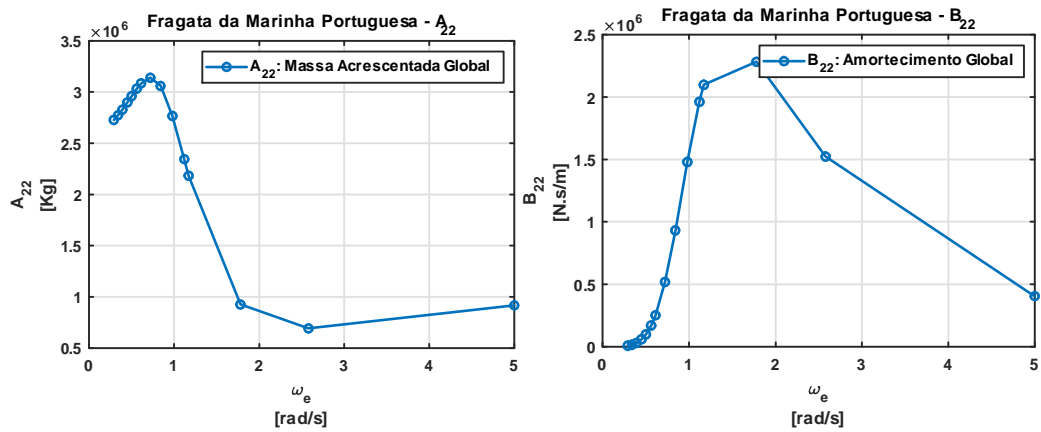


Figura 8.5: Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}

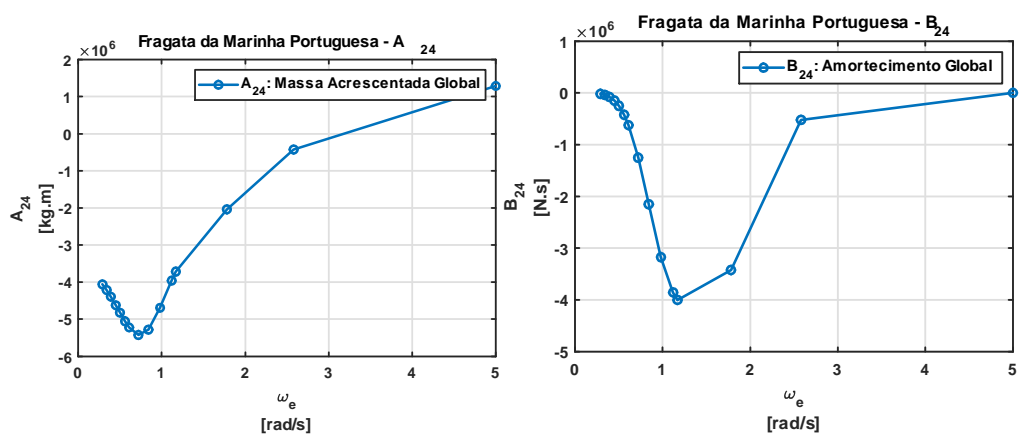


Figura 8.6: Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}

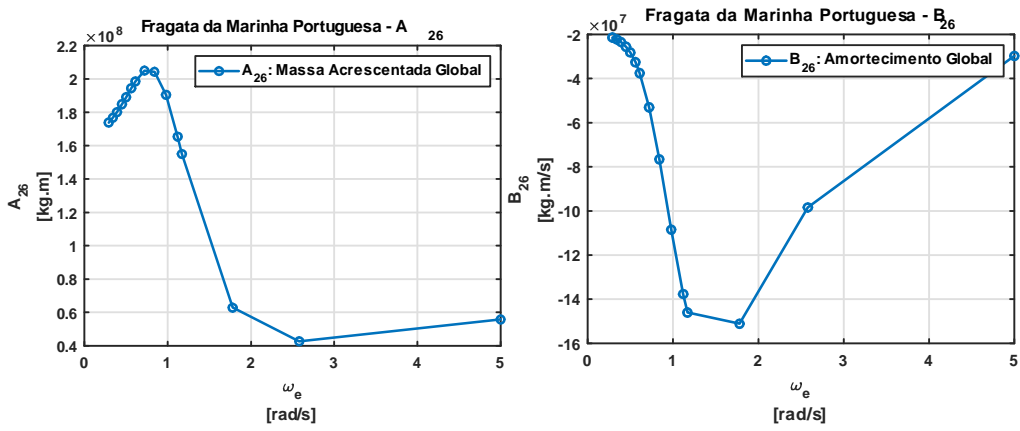


Figura 8.7: Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}

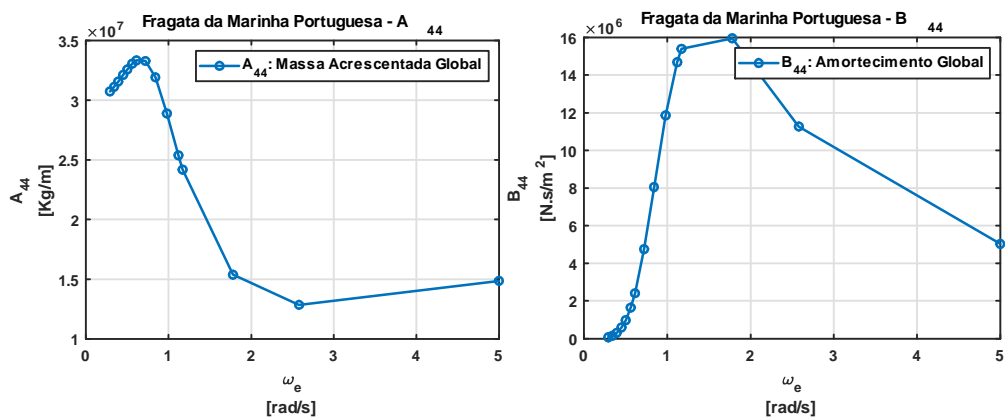


Figura 8.8: Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}

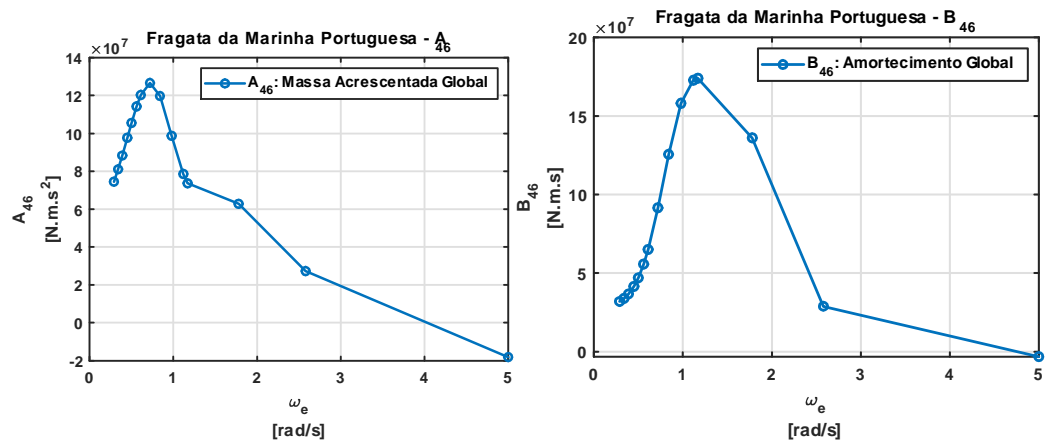


Figura 8.9: Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}

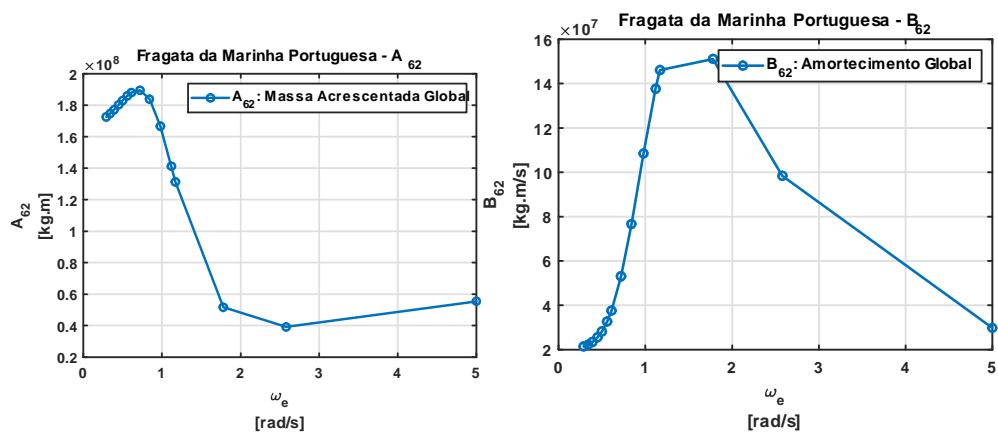


Figura 8.10: Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}

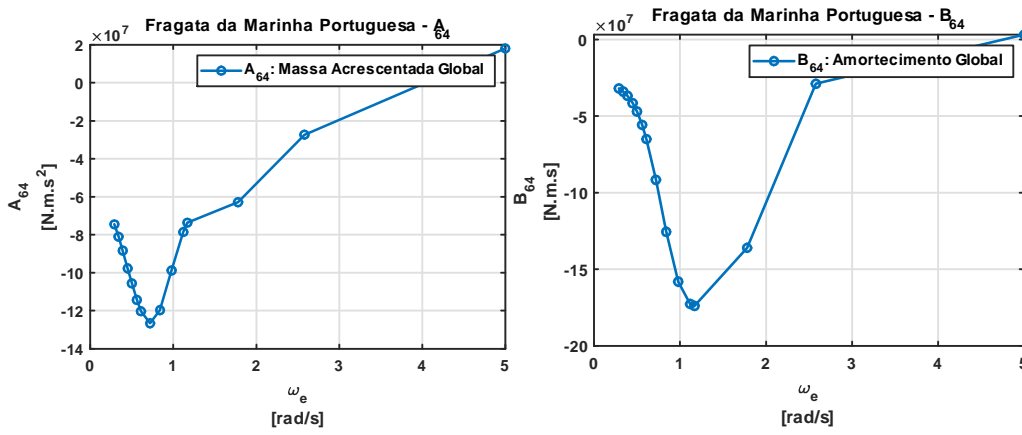


Figura 8.11: Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}

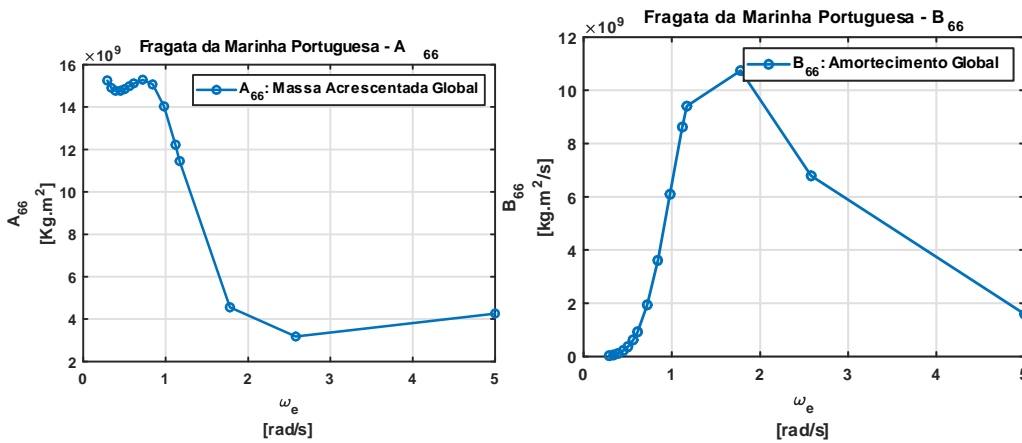


Figura 8.12: Curvas dos coeficientes hidrodinâmicos globais elaborado na EN A_{22} e B_{22}

Capítulo 9

Análise e Discussão de Resultados

O método desenvolvido neste trabalho apresenta resultados bastantes satisfatórios com erros bastante menores embora existam erros muito significativos para os coeficientes a_{33} e b_{33} na secção 20. O elevado erro justifica-se pelo facto de a secção 20 ser a secção mais avante com uma Boca bastante menor o que faz com que não se consiga mapear da melhor forma, podendo ser possível com apenas 2 parâmetros e observa-se que quanto maior for o número de parâmetro melhor será o mapeamento da secção e consequentemente serão obtidos melhores coeficientes hidrodinâmicos locais. As secções que foram mapeadas com número de parâmetros inferiores a 5 (secção 18, 19, 20) são as que apresentam maior erro relativo, como se pode ver na figura 9.

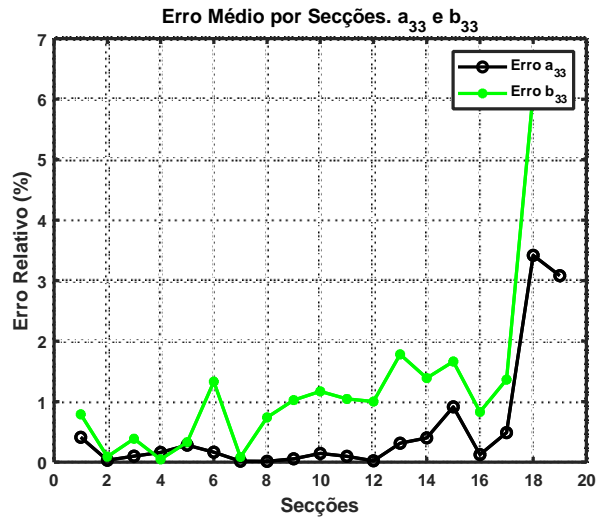


Figura 9.1: Erro relativo por secções

Importa referir que por questões de visualização o erro da secção 20 não se encontra representada no gráfico por ser um erro na ordem dos 10^3 e faz com que os outros erros não se consigam visualizar por serem da ordem dos 10^3 mais baixos.

A comparação dos resultados pelo método de Frank apresenta uma diferença maior em relação a comparação aos resultados do IST com método de MCM, a pesar de ser um método de cálculo diferente, os erros médios são na sua maioria influenciados por irregularidades nos resultados de Frank que ocorrem nas baixas e altas frequências, a pesar de ter estas desvantagem o método de Frank tem a vantagem de representar muito bem a secção transversal do casco (Lewis, 1989).

O outro fator importante que influenciou bastante na melhoria dos resultados foi pela alternativa escolhida no cálculo integral da expressão $\phi_s(\theta)$, o cálculo numérico desta expressão converge lentamente, o que produz resultados pouco satisfatórios, podendo ser aplicado alternativamente a série de Poter que se pode ver no apêndice A.

Os resultados obtidos no trabalho anterior desenvolvido por (da Silva Ferreira, 2018) apresentam diferenças bastante significativas pelo facto deste usar somente 2 parâmetros e se ter verificado um erro no valor da boca utilizado nos cálculos.

Capítulo 10

Conclusões

A presente tese de mestrado dedica-se ao desenvolvimento de uma ferramenta em *Matlab*[®] para cálculo de coeficientes hidrodinâmicos 2D A_{jk} e B_{jk} por método de Mapeamento Conforme Multiparâmetro usando a teoria de faixas, abordando os mais variados temas como o problema de radiação, teoria potencial de escoamento de fluido e a dinâmica de navios em ondas. Numa primeira fase desenvolveu-se um algoritmo em *Matlab*[®] que se dedica a encontrar os parâmetros de mapeamento conforme para as 20 secções do navio, um algoritmo bastante robusto e otimizado por método de recozimento simulado. Os parâmetros obtidos nesta fase foram posteriormente usados para o cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos locais que no final foram integrados ao longo do comprimento para a obtenção dos coeficientes globais. Nesta fase constatou-se que o algoritmo representa bastante bem as secções reais de um navio, porem as secções com relação boca calado bastante menor são de difícil mapeamento. Os erros provenientes de mapeamento da secções acabam afetando os coeficientes hidrodinâmicos, contudo os resultados dos coeficientes hidrodinâmicos obtidos são bastante satisfatórios quando comparados com os resultados já existentes seja os desenvolvidos por métodos iguais como por métodos de Frank. O algoritmo foi comparado em três fases; a primeira com os resultados de Lewis, a segunda com os resultados obtidos com o método de Frank e por último foi comparado com os resultados obtidos por método de mapeamento conforme multiparâmetro desenvolvido no IST. Constatou-se que em todas as fases as curvas seguem a mesma tendência e apresentam valores muito próximos. Também foi desenvolvido uma interface gráfica que permite ao utilizador introduzir os dados, calcular, visualizar os resultados e guarda-los para uma posterior consulta, no sentido de facilitar o utilizador e tornar o programa mais interativo e intuitivo.

Capítulo 11

Trabalhos Futuros

Para desenvolvimento de trabalhos futuros recomenda-se:

1. A validação do algoritmo com dados reais;
2. Desenvolvimento de um algoritmo para cálculo das Forças de Froude-Krilov e Forças de Difração;
3. Desenvolvimento de um algoritmo para cálculo dos RAOs (*Response Amplitude Operators*);
4. Validação de resultados e sua verificação relativamente a normas existentes sobre comportamento no mar - *seakeeping*.

Bibliography

- Albaali, G. and Farid, M. M. (2006). Fundamentals of computational fluid dynamics. *Reports of Research in ResearchGate*.
- Çengel, Y. A. and Cimbala, J. M. (2007). *Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações*. AMGH.
- da Silva Ferreira, H. (2018). Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o cálculo de coeficientes hidrodinâmicos. Master's thesis, Escola Naval.
- da Silva Larsen, H. T. (2012). Análise do comportamento de um navio utilizando a teoria das faixas. Master's thesis, FCT/UNL.
- de Arriaga, D. and Chaves, C. M. (2012). Método de painel para o cálculo do escoamento potencial em torno de vários perfis sustentadores. Master's thesis, Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa.
- de Jong, B. (1969). Computation of the hydrodynamic coefficients of oscillating cylinders. Technical report, Shipbuilding Laboratory, Delft University of Technology.
- Fossen, T. I. and Smogeli, O. N. (2004). Nonlinear time domain strip theory formulation for low speed manoeuvring and station keeping. *CESOS Norwegian University of Science and Technology, NO-7491 Trondheim, Norway*.
- Frank, W. (1967). Oscillation of cylinders in or below the free surface of deep fluids. *NAVAL SHIP RESEARCH AND DEVELOPMENT CENTER*.
- Journee, J. and Adegeest, L. (2003). Theoretical manual of strip theory program. *Ship Hydromechanics Laboratory Delft University of Technology*.
- Journée, J. and Pinkster, J. (1997). *Offshore Hydromechanics*. University of Technology.

- Karlberg, D. (2014). The effect of three-dimensionality on the radiation forces of surface piercing bodies. Master's thesis, Aalto University School of Engineering.
- Lamb, H. (1916). *Hydrodynamics*. Cambridge University Press, fourth edition.
- Lewis, E. V. (1989). *Principles of Naval Architecture (Second Revision), Volume III - Motions in Waves and Controllability*. Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME).
- Lewis, F. M. (1929). The inertia of the water surrounding a vibrating ship. *The Society of Naval Architects and Marine Engineers*.
- Lloyd, A. R. J. M. (1998). *Seakeeping: Ship Behaviour in Rough Weather*. Ellis Hordwood.
- Marsden, J. E. and Hoffman, M. J. (1999). *Basic Complex Analysis*. W.H.Freeman.
- Oliveira, L. A. and Lopes, A. G. (2010). *Mecânica dos Fluidos*. Edições Técnicas e Profissionais.
- Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P. (2007). *Numerical Recipes The Art of Scientific Computing*. Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Salvesen, N., Tuck, E. O., and Faltinsen, O. (1970). *Ship motions and sea loads*. SNAME.
- Techet, A. (2005). Hydrodynamics. MIT.
- Thein, Z. (2011). Practical source code for ship motions time domain numerical analysis and its mobile device application. *Chalmers University of Technology*.
- Ursell, F. (1949). On the heaving motion of a circular cylinder on the surface of a fluid. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics*.
- Westlake, P. C. and Wilson, P. (2000). A new conformal mapping technique for ship sections. Technical report, International Shipbuilding Progress.

Apêndice A

Expressões para cálculo de coeficientes hidrodinâmicos locais

A.1 Massa Acrescentada e Amortecimento em Arfagem

$$x = a_0 \left(\sin \theta + \sum_{n=1}^N (-1)^{n+1} a_{2n-1} \sin (2n - 1) \theta \right) [m] \quad (\text{A.1})$$

$$y = a_0 \left(\cos \theta + \sum_{n=1}^N (-1)^n a_{2n-1} \cos (2n - 1) \theta \right) [m] \quad (\text{A.2})$$

$$a_{33} = \frac{\rho B^2}{2} \left[\frac{M_0 B + N_0 A}{A^2 + B^2} \right] \left[\frac{\text{kg}}{m} \right] \quad (\text{A.3})$$

$$b_{33} = \frac{\rho B^2}{2} \left[\frac{M_0 A - N_0 B}{A^2 + B^2} \omega \right] \left[\frac{Ns}{m^2} \right] \quad (\text{A.4})$$

$$A = \Psi_c \left(\frac{\pi}{2} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \{ p_{2m} \Psi_{2m} \left(\frac{\pi}{2} \right) \} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.5})$$

$$B = \Psi_s \left(\frac{\pi}{2} \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \{ q_{2m} \Psi_{2m} \left(\frac{\pi}{2} \right) \} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.6})$$

$$\Psi_c(\theta) = \pi e^{-ky} \sin(k|x|) \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.7})$$

$$\Phi_s(\theta) = \pi e^{-ky} \sin(k|x|) + \int_0^\infty \frac{k \sin(\beta y) - \beta \cos(\beta y)}{\beta^2 + k^2} e^{-\beta|x|} d\beta \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.8})$$

Pela série de Poter:

$$\Phi_s(\theta) = \pi e^{-ky} \sin(k|x|) + \{Q \cos(kx) + (S - \pi) \sin(kx)\} e^{-ky} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.9})$$

$$\Psi_s(\theta) = -\pi e^{-ky} \cos(kx) + \int_0^\infty \frac{k \cos(\beta y) + \beta \sin(\beta y)}{\beta^2 + k^2} e^{-\beta|x|} d\beta \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.10})$$

Pela série de Poter:

$$\Psi_s(\theta) = -\pi e^{-ky} \cos(kx) + \{Q \sin(kx) - (S - \pi) \cos(kx)\} e^{-ky} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.11})$$

O integral das equações A.8 e A.10 convergem lentamente quando resolvido numericamente, pode se optar pelo uso da série de Poter A.9 e A.11 para resolver o integral, neste caso o integral irá convergir rapidamente.

Onde:

$$Q = \gamma + \ln(k\sqrt{x^2 + y^2}) + \sum_{n=1}^{\infty} \{P_n \cos(n\chi)\} \quad (\text{A.12})$$

$$S = \chi + \sum_{n=1}^{\infty} \{P_n \sin(n\chi)\} \quad (\text{A.13})$$

$$P_n = \frac{(k\sqrt{x^2 + y^2})^2}{n.n!} \quad (\text{A.14})$$

$\gamma = 0.57722\dots$ constante de Euler.

$\chi = \arctan\left(\frac{x}{y}\right)$

$n = 1 : N$

$$\Psi_{2m}(\theta) = \sin(2m\theta) - \frac{kB}{2Q2} \sum_{n=0}^N \{(-1)^n \frac{2n-1}{2m+2n-1} a_{2n-1} \sin((2m+2n-1)\theta)\} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.15})$$

$$\Psi_{2m}\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{kB}{2Q2}(-1)^m \sum_{n=0}^N \left\{ \frac{2n-1}{2m+2n-1} a_{2n-1} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \right\} \quad (\text{A.16})$$

$$\Phi_{2m}(\theta) = \cos(2m\theta) + \frac{kB}{2Q2} \sum_{n=0}^N \left\{ (-1)^n \frac{2n-1}{2m+2n-1} a_{2n-1} \cos((2m+2n-1)\theta) \right\} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.17})$$

$$f_{2m}(\theta) = -\Psi_{2m}(\theta) + h\Psi_{2m}\left(\frac{\pi}{2}\right) \quad (\text{A.18})$$

$$h(\theta) = \frac{1}{Q2} \sum_{n=0}^N (-1)^n a_{2n-1} \sin((2n-1)\theta) \quad (\text{A.19})$$

$$Q2 = 1 + \sum_{n=1}^N a_{2n-1} \quad (\text{A.20})$$

$$\Psi_c(\theta) - h(\theta)\Psi_c\left(\frac{\pi}{2}\right) = \sum_{m=1}^{\infty} \{f_{2m}(\theta)p_{2m}\} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.21})$$

$$\Psi_s(\theta) - h(\theta)\Psi_s\left(\frac{\pi}{2}\right) = \sum_{m=1}^{\infty} \{f_{2m}(\theta)q_{2m}\} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.22})$$

$$\begin{aligned} M_0 &= -\frac{1}{Q2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \phi_s(\theta) \sum_{n=0}^N \{(-1)^{-n}(2n-1)a_{2n-1} \cos((2n-1)\theta)\} d\theta \\ &\quad - \frac{\pi}{Q2} \sum_{m=1}^M \{(-1)^m q_{2m} \sum_{n=0}^N \left\{ \frac{(2n-1)^2}{(2m)^2 - (2n-1)^2} a_{2m-1} \right\}\} \\ &\quad + \frac{\pi kB}{8(Q2)^2} \left\{ q_2 + \sum_{m=1}^M \{(-1)^{-m} q_{2m} \sum_{n=0}^N \{(2n-1)a_{2n-1} a_{2m+2n-1}\}\} \right\} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.23})$$

E, N_0 obtêm-se a partir de expressão M_0 mediante a substituição de $\Phi_s(\theta)$ por $\Phi_c(\theta)$ e q_{2m} por p_{2m} .

A.2 Massa Acrescentada e Amortecimento em Deriva e em Deriva devido ao Balanço

$$a_{22} = \frac{\rho B^2}{2} \left[\frac{p_0 N_0 + q_0 M_0}{p_0^2 + q_0^2} \right] \left[\frac{\text{kg}}{m} \right] \quad (\text{A.24})$$

$$b_{22} = \frac{\rho B^2}{2} \left[\frac{p_0 M_0 - q_0 N_0}{p_0^2 + q_0^2} \omega \right] [Ns] \quad (\text{A.25})$$

$$b_{22} = \frac{\rho B^2}{4} \left[\frac{\pi^2}{p_0^2 + q_0^2} \omega \right] \left[\frac{Ns}{m^2} \right] \quad (\text{A.26})$$

$$a_{24} = -\frac{\rho B^3}{2} \left[\frac{Y_r q_0 + X_r p_0}{p_0^2 + q_0^2} \right] [Ns^2] \quad (\text{A.27})$$

$$b_{24} = -\frac{\rho B^3}{2} \left[\frac{Y_r p_0 - X_r q_0}{p_0^2 + q_0^2} \omega \right] [Ns] \quad (\text{A.28})$$

$$\phi_c(\theta) = -\pi e^{-ky} \sin(k|x|) \quad (\text{A.29})$$

$$\begin{aligned} \phi_s(\theta) = & -\pi e^{-ky} \cos(kx) - \int_0^\infty \frac{k \cos(\beta y) + \beta \sin(\beta y)}{\beta^2 + k^2} e^{-\beta|x|} d\beta \quad (\text{A.30}) \\ & + \frac{|x|}{k(x^2 + y^2)} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \end{aligned}$$

$$\Psi_c(\theta) = \pi e^{-ky} \cos(kx) \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.31})$$

$$\begin{aligned} \Psi_s(\theta) = & \pi e^{-ky} \sin(k|x|) + \int_0^\infty \frac{k \sin(\beta y) - \beta \cos(\beta y)}{\beta^2 + k^2} e^{-\beta|x|} d\beta \\ & - \frac{|y|}{k(x^2 + y^2)} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.32}) \end{aligned}$$

Os integrais das equações A.30 e A.32 convergem lentamente quando resolvidos numericamente pode se recorrer a série de Poter para resolver o integral, neste caso o integral converge rapidamente

$$\int_0^\infty \frac{k \cos(\beta y) + \beta \sin(\beta y)}{\beta^2 + k^2} e^{-\beta|x|} d\beta = \{Q \sin(kx) - (S - \pi) \cos(kx)\} e^{-ky} \quad (\text{A.33})$$

$$\int_0^\infty \frac{k \sin(\beta y) - \beta \cos(\beta y)}{\beta^2 + k^2} e^{-\beta|x|} d\beta = \{Q \cos(kx) + (S - \pi) \sin(kx)\} e^{-ky} \quad (\text{A.34})$$

onde:

$$Q = \gamma + \ln(k\sqrt{x^2 + y^2}) + \sum_{n=1}^{\infty} \{P_n \cos(n\chi)\} \quad (\text{A.35})$$

$$S = \chi + \sum_{n=1}^{\infty} \{P_n \sin(n\chi)\} \quad (\text{A.36})$$

$$P_n = \frac{(k\sqrt{x^2 + y^2})^2}{n.n!} \quad (\text{A.37})$$

$\gamma = 0.57722\dots$ constante de Euler.

$\chi = \arctan\left(\frac{x}{y}\right)$

$n = 1 : N$

$$\begin{aligned} \Psi_{2m}(\theta) &= -\cos((2m + 1)\theta) \\ &+ \frac{kB}{2Q2} \sum_{n=0}^N \left\{ (-1)^n \frac{2n - 1}{2m + 2n} a_{2n-1} \cos((2m + 2n)\theta) \right\} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.38})$$

$$\Psi_{2m}\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{kB}{2Q2} (-1)^m \sum_{n=0}^N \left\{ \frac{2n - 1}{2m + 2n} a_{2n-1} \right\} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.39})$$

$$\Psi_c(\theta) - \Psi_c\left(\frac{\pi}{2}\right) = \sum_{m=0}^{\infty} \{f_{2m}(\theta) p_{2m}\} \quad (\text{A.40})$$

$$\Psi_s(\theta) - \Psi_s\left(\frac{\pi}{2}\right) = \sum_{m=0}^{\infty} \{f_{2m}(\theta) q_{2m}\} \quad (\text{A.41})$$

$m = 0 : f_0(\theta) = g(\theta)$

$m > 0 : f_{2m}(\theta) = -\Psi_{2m}(\theta) + \Psi_{2m}\left(\frac{\pi}{2}\right)$

$$g(\theta) = \frac{1}{Q2} \sum_{n=0}^N \{(-1)^{-n} a_{2n-1} \cos((2n - 1)\theta)\} \quad (\text{A.42})$$

$$Q2 = 1 + \sum_{n=1}^N a_{2n-1} \quad (\text{A.43})$$

$$\begin{aligned}
M_0 &= -\frac{1}{Q2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \phi_s(\theta) \sum_{n=0}^N \{(-1)^{-n} (2n-1) a_{2n-1} \sin((2n-1)\theta)\} d\theta \\
&+ \frac{\pi}{4Q2} \sum_{m=1}^{N-1} \{(-1)^{-n} q_{2m} (2m+1) a_{2m-1}\} \\
&+ \frac{kB}{2(Q2)^2} \sum_{m=1}^M \{(-1)^{-m} q_{2m} \\
&\sum_{n=0}^N \sum_{i=0}^N \left\{ \frac{(2n-1)(2i-1)}{(2m+2i)^2 - (2n-1)^2} a_{2n-1} a_{2i-1} \right\} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right]
\end{aligned} \tag{A.44}$$

N_0 é igual a expressão M_0 substituindo $\phi_s(\theta)$ por $\phi_c(\theta)$ e q_{2m} por p_{2m}

$$\begin{aligned}
Y_r &= \frac{1}{2(Q2)^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \phi_s(\theta) \sum_{n=0}^N \sum_{i=0}^N \{(-1)^{n+i} (2i-1) a_{2n-1} a_{2i-1} \sin((2n-2i)\theta)\} d\theta \\
&+ \frac{1}{2(Q2)^2} \sum_{m=1}^M \{(-1)^{-m} q_{2m} \sum_{n=0}^N \sum_{i=0}^N \left\{ \frac{(2i-1)(2n-2i)}{(2m+1)^2 - (2n-2i)^2} a_{2n-1} a_{2i-1} \right\}\} \\
&+ \frac{\pi kB}{16(Q2)^3} \sum_{m=1}^N \{(-1)^{-m} q_{2m} \\
&\left\{ \sum_{n=m}^N \sum_{i=0}^{n-m} \left\{ \frac{(-2m+2n-2i-1)(2i-1)}{(2n-2i)} a_{2n-1} a_{2i-1} a_{-2m+2n-2i-1} \right\} \right. \\
&\left. + \sum_{n=0}^{N-m} \sum_{i=m+n}^N \left\{ \frac{(-2m-2n+2i-1)(2i-1)}{(2n-2i)} a_{2n-1} a_{2i-1} a_{-2m-2n+2i-1} \right\} \right\}
\end{aligned} \tag{A.45}$$

X_r é igual a expressão Y_r substituindo $\phi_s(\theta)$ por $\phi_c(\theta)$ e q_{2m} por p_{2m}

A.3 Massa Acrescentada e Amortecimento em Balanço e em Balaço devido a Deriva

$$a_{44} = \frac{\rho B^4}{8} \left[\frac{Y_r q_0 + X_r p_0}{p_0^2 + q_0^2} \right] [\text{kg m}] \quad (\text{A.46})$$

$$b_{44} = \frac{\rho B^4 \pi^2}{64} \left[\frac{\omega}{p_0^2 + q_0^2} \right] \left[\frac{Ns}{rad} \right] \quad (\text{A.47})$$

$$a_{42} = -\frac{\rho B^3}{8} \left[\frac{M_0 q_0 + N_0 p_0}{p_0^2 + q_0^2} \right] \left[\frac{Ns^2}{radm} \right] \quad (\text{A.48})$$

$$b_{42} = -\frac{\rho B^3}{8} \left[\frac{M_0 p_0 - N_0 q_0}{p_0^2 + q_0^2} w \right] \left[\frac{Ns}{radm} \right] \quad (\text{A.49})$$

$$\phi_c(\theta) = -\pi e^{-ky} \sin(k|x|) \quad (\text{A.50})$$

$$\begin{aligned} \phi_s(\theta) = & -\pi e^{-ky} \cos(kx) - \int_0^\infty \frac{k \cos(\beta y) + \beta \sin(\beta y)}{\beta^2 + k^2} e^{-\beta|x|} d\beta \\ & + \frac{|x|}{k(x^2 + y^2)} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.51})$$

$$\Psi_c(\theta) = \pi e^{-ky} \cos(kx) \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.52})$$

$$\begin{aligned} \Psi_s(\theta) = & \pi e^{-ky} \sin(k|x|) + \int_0^\infty \frac{k \sin(\beta y) - \beta \cos(\beta y)}{\beta^2 + k^2} e^{-\beta|x|} d\beta \\ & - \frac{|y|}{k(x^2 + y^2)} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.53})$$

Os integrais das equações A.51 e A.53 convergem lentamente quando resolvidos numericamente pode se recorrer a serie de Poter para resolver o integral, neste caso o integral converge rapidamente

$$\int_0^\infty \frac{k \cos(\beta y) + \beta \sin(\beta y)}{\beta^2 + k^2} e^{-\beta|x|} d\beta = \{Q \sin(kx) - (S - \pi) \cos(kx)\} e^{-ky} \quad (\text{A.54})$$

$$\int_0^\infty \frac{k \sin(\beta y) - \beta \cos(\beta y)}{\beta^2 + k^2} e^{-\beta|x|} d\beta = \{Q \cos(kx) + (S - \pi) \sin(kx)\} e^{-ky} \quad (\text{A.55})$$

onde:

$$Q = \gamma + \ln(k\sqrt{x^2 + y^2}) + \sum_{n=1}^{\infty} \{P_n \cos(n\chi)\} \quad (\text{A.56})$$

$$S = \chi + \sum_{n=1}^{\infty} \{P_n \sin(n\chi)\} \quad (\text{A.57})$$

$$P_n = \frac{(k\sqrt{x^2 + y^2})^2}{n.n!} \quad (\text{A.58})$$

$\gamma = 0.57722\dots$ constante de Euler.

$\chi = \arctan(\frac{x}{y})$

$n = 1 : N$

$$\begin{aligned} \Psi_{2m}(\theta) &= -\cos((2m+1)\theta) \\ &+ \frac{kB}{2Q2} \sum_{n=0}^N \left\{ (-1)^n \frac{2n-1}{2m+2n} a_{2n-1} \cos((2m+2n)\theta) \right\} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \end{aligned} \quad (\text{A.59})$$

$$\Psi_{2m}\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{kB}{2Q2} (-1)^m \sum_{n=0}^N \left\{ \frac{2n-1}{2m+2n} a_{2n-1} \right\} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.60})$$

$$\Psi_c(\theta) - \Psi_c\left(\frac{\pi}{2}\right) = \sum_{m=0}^{\infty} \{f_{2m}(\theta) p_{2m}\} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.61})$$

$$\Psi_s(\theta) - \Psi_s\left(\frac{\pi}{2}\right) = \sum_{m=0}^{\infty} \{f_{2m}(\theta) q_{2m}\} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (\text{A.62})$$

$m = 0 : f_0(\theta) = \mu(\theta) - 1$

$m > 0 : f_{2m}(\theta) = -\Psi_{2m}(\theta) + \Psi_{2m}\left(\frac{\pi}{2}\right)$

$$\begin{aligned} \mu(\theta) &= \frac{x_0^2 + y_0^2}{\left(\frac{B}{2}\right)^2} = \left(-\frac{1}{Q2} \sum_{n=0}^N \{(-1)^{-n} a_{2n-1} \sin((2n-1)\theta)\}\right)^2 \\ &+ \left(\frac{1}{Q2} \sum_{n=0}^N \{(-1)^{-n} a_{2n-1} \cos((2n-1)\theta)\}\right)^2 \end{aligned} \quad (\text{A.63})$$

$$Q2 = 1 + \sum_{n=1}^N a_{2n-1} \quad (\text{A.64})$$

$$\begin{aligned}
 M_0 = & -\frac{1}{Q^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \phi_s(\theta) \sum_{n=0}^N \{(-1)^{-n} (2n-1) a_{2n-1} \sin((2n-1)\theta)\} d\theta \\
 & + \frac{\pi}{4Q^2} \sum_{m=1}^{N-1} \{(-1)^{-n} q_{2m} (2m+1) a_{2m-1}\} \\
 & + \frac{kB}{2(Q^2)^2} \sum_{m=1}^M \{(-1)^{-m} q_{2m} \\
 & \sum_{n=0}^N \sum_{i=0}^N \left\{ \frac{(2n-1)(2i-1)}{(2m+2i)^2 - (2n-1)^2} a_{2n-1} a_{2i-1} \right\}\}
 \end{aligned} \tag{A.65}$$

N_0 é igual a expressão M_0 substituindo $\phi_s(\theta)$ por $\phi_c(\theta)$ e q_{2m} por p_{2m}

$$\begin{aligned}
 Y_r = & \frac{1}{2(Q^2)^2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \phi_s(\theta) \sum_{n=0}^N \sum_{i=0}^N \{(-1)^{n+i} (2i-1) a_{2n-1} a_{2i-1} \sin((2n-2i)\theta)\} d\theta \\
 & + \frac{1}{2(Q^2)^2} \sum_{m=1}^M \{(-1)^{-m} q_{2m} \sum_{n=0}^N \sum_{i=0}^N \left\{ \frac{(2i-1)(2n-2i)}{(2m+1)^2 - (2n-2i)^2} a_{2n-1} a_{2i-1} \right\}\} \\
 & - \frac{\pi kB}{16(Q^2)^3} \sum_{m=1}^N \{(-1)^{-m} q_{2m} \left\{ \sum_{n=m}^N \sum_{i=0}^{n-m} \left\{ \frac{(-2m+2n-2i-1)(2i-1)}{(2n-2i)} a_{2n-1} a_{2i-1} a_{-2m+2n-2i-1} \right\} \right\}\} \\
 & + \sum_{n=0}^{N-m} \sum_{i=m+n}^N \left\{ \frac{(-2m-2n+2i-1)(2i-1)}{(2n-2i)} a_{2n-1} a_{2i-1} a_{-2m-2n+2i-1} \right\}\}
 \end{aligned} \tag{A.66}$$

X_r é igual a expressão Y_r substituindo $\phi_s(\theta)$ por $\phi_c(\theta)$ e q_{2m} por p_{2m}

Apêndice B

Expressões para cálculo de coeficientes hidrodinâmicos globais

B.1 Modo Vertical

$$\begin{aligned}A_{33} &= \int a_{33} dx & B_{33} &= \int b_{33} dx \\A_{35} &= - \int x a_{33} dx - \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{33} & B_{35} &= - \int x b_{33} dx + U_0 A_{33} \\A_{53} &= - \int x a_{33} dx + \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{33} & B_{53} &= - \int x b_{33} dx - U_0 A_{33} \\A_{55} &= \int x^2 a_{33} dx + \frac{U_0^2}{\omega_e^2} A_{33} & B_{55} &= \int x^2 b_{33} dx + \frac{U_0^2}{\omega_e^2} B_{33}\end{aligned}$$

B.2 Modo Horizontal

$$A_{22} = \int a_{22} dx$$

$$B_{22} = \int b_{22} dx$$

$$A_{24} = A_{42} = \int a_{24} dx$$

$$B_{24} = B_{42} = \int b_{24} dx$$

$$A_{26} = \int x a_{22} dx + \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{22}$$

$$B_{26} = \int x b_{22} dx - U_0 A_{22}$$

$$A_{44} = \int a_{44} dx$$

$$B_{44} = \int b_{44} dx + B_e = B_{44}^*$$

$$A_{46} = \int x a_{24} dx + \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{24}$$

$$B_{46} = \int x b_{24} dx - U_0 A_{24}$$

$$A_{62} = \int x a_{22} dx - \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{22}$$

$$B_{62} = \int x b_{22} dx + U_0 A_{22}$$

$$A_{64} = \int x a_{24} dx - \frac{U_0}{\omega_e^2} B_{24}$$

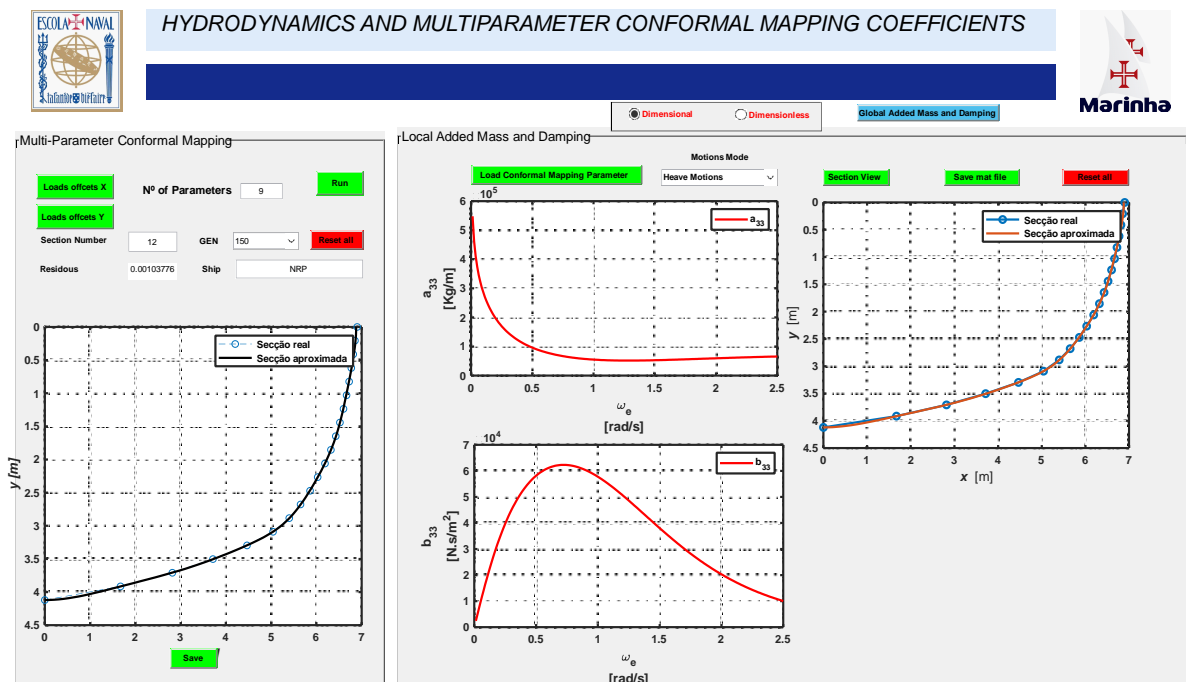
$$B_{64} = \int x b_{24} dx + U_0 A_{24}$$

$$A_{66} = \int x^2 a_{22} dx + \frac{U_0^2}{\omega_e^2} A_{22}$$

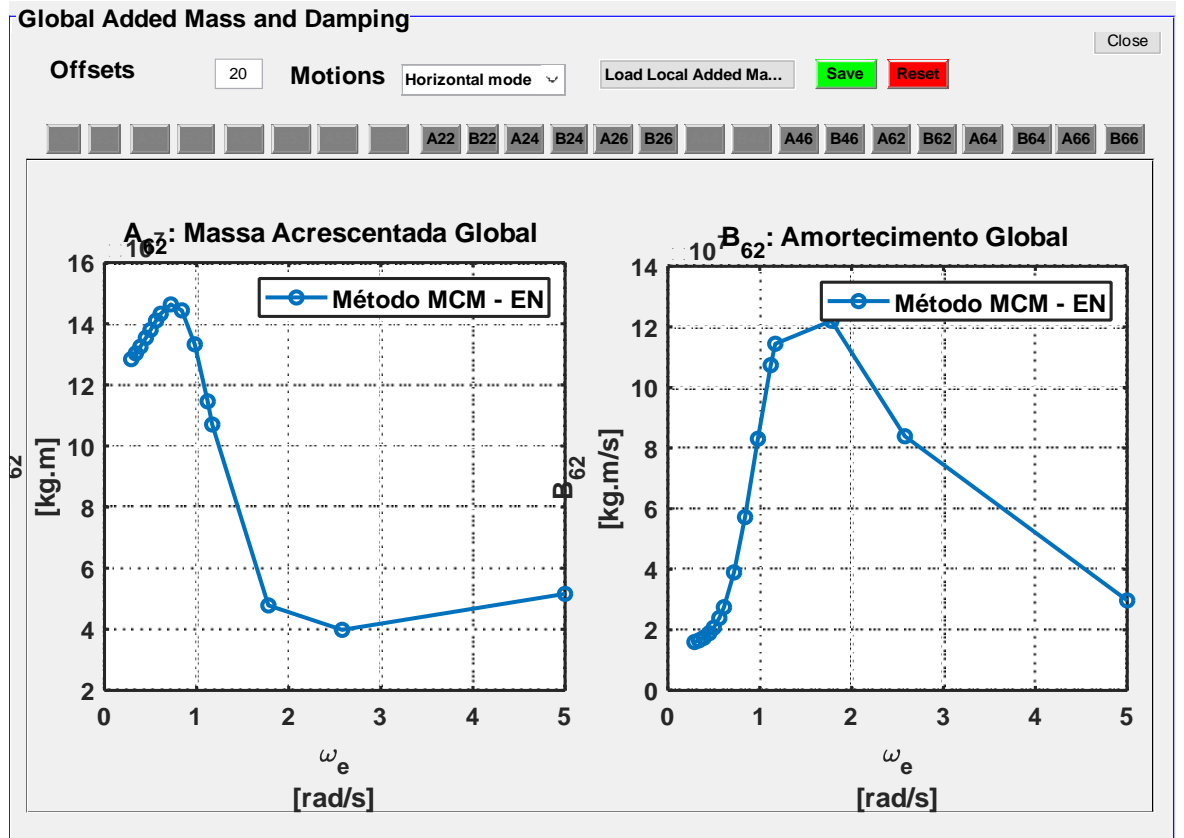
$$B_{66} = \int x^2 b_{22} dx + \frac{U_0^2}{\omega_e^2} B_{22}$$

Apêndice C

Interface gráfica



Interface gráfica do algoritmo desenvolvido



Interface gráfica do algoritmo desenvolvido