



## ANÁLISE PARAMÉTRICA ENVOLVENDO VARIAÇÕES DE COEFICIENTES DE FORMA EM SLAMMING

Marcelo de Oliveira Predes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Paulo de Tarso Themistocles  
Esperança

Rio de Janeiro  
Maio de 2020

ANÁLISE PARAMÉTRICA ENVOLVENDO VARIAÇÕES DE COEFICIENTES DE  
FORMA EM SLAMMING

Marcelo de Oliveira Predes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA OCEÂNICA.

Orientador: Prof. Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Aprovada por: Prof. Paulo de Tarso Themistocles Esperança  
Prof. Claudio Alexis Rodriguez Castillo  
Dr. Mauro Costa de Oliveira  
Dr. Daniel Fonseca de Carvalho e Silva

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MAIO DE 2020

Predes, Marcelo de Oliveira

Análise Paramétrica Envolvendo Variações de Coeficientes de Forma em Slamming/ Marcelo de Oliveira Predes – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2020.

XII, 101p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Dissertação (mestrado)– UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2020.

Referências Bibliográficas: p. 66-68.

1. Slamming. 2. Variações de casco. 3. Teoria das faixas. 4. Comportamento no mar . I. Esperança, Paulo de Tarso Themistocles. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

Sou grato a todas as pessoas e instituições que de forma direta ou indireta tornaram possível a concretização de mais um sonho. Agradeço a Deus por toda a luz, paz e saúde, essenciais para a superação de qualquer desafio.

Também agradeço ao meu irmão, aos amigos e padrinhos por todas as palavras de incentivo. Aos meus afilhados, Paulo e Bianca, pelo apoio e compreensão durante o período de estudos.

Cito especialmente os meus pais pelo amor e carinho, bem como o esforço em sempre me proporcionar uma educação de qualidade.

Aos filhos Rafael e Danny, agradeço pela companhia inseparável. Vocês são minha fonte inspiradora por toda a vida.

A minha amada esposa pelo carinho e compreensão incondicionais. Suas palavras e gestos certamente formaram o meu principal alicerce ao longo deste período. Sempre serei grato por sonhar comigo.

Por último, ao professor Paulo de Tarso, pelos valiosos ensinamentos transmitidos nestes últimos 2 anos e pela orientação segura ao longo deste trabalho, muito obrigado!

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## ANÁLISE PARAMÉTRICA ENVOLVENDO VARIAÇÕES DE COEFICIENTES DE FORMA EM SLAMMING

Marcelo de Oliveira Predes

Maió/2020

Orientador: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Programa: Engenharia Oceânica

O trabalho propõe uma análise envolvendo a influência do formato de um casco no evento denominado *slamming*, para uma embarcação típica militar de médio porte.

Através de um modelo base com tais características, foram geradas variações de geometria, cada uma contando com determinado coeficiente de forma extremo. Com base nas respostas de mar, foi estimada a probabilidade de ocorrência e a pressão de impacto para o evento de *slamming*.

De acordo com os dados obtidos, houve maior variação na probabilidade do evento com a alteração dos coeficientes da área de flutuação. As predições de pressão apresentaram valores menores para modelos com maior ângulo de fundo na seção de impacto.

Os resultados do trabalho indicaram a possibilidade de melhorias significativas no desempenho operacional de uma embarcação através da adequada variação dos parâmetros de forma do casco.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PARAMETRIC ANALYSIS INVOLVING COEFFICIENT VARIATIONS IN  
SLAMMING

Marcelo de Oliveira Predes

May/2020

Advisor: Paulo de Tarso Themistocles Esperança

Department: Ocean Engineering

This research proposes an analysis involving the influence of hull shape in the event called slamming, for a typical medium-sized military vessel.

Through a base model with such characteristics, geometry variations were generated, each one having a determined coefficient in an extreme way. Based on sea responses, the probability of occurrence and impact pressure for the slamming event was estimated.

According to the data obtained, there was a greater variation in the probability of the event with the change in the waterplane area coefficients. The pressure predictions showed lower values for models with a greater deadrise angle in the impact section.

The results of the work indicated the possibility of significant improvements in the operational performance of a vessel through the adequate variation of the hull shape parameters.

# Sumário

1	Introdução .....	1
1.1	Motivação.....	2
1.2	Objetivo.....	3
1.3	Organização da dissertação .....	3
2	Revisão Bibliográfica .....	4
2.1	Variações de geometria .....	4
2.2	Movimentos do navio .....	5
2.3	Predições de <i>slamming</i> .....	6
3	Metodologia .....	11
3.1	Variações do casco .....	14
3.1.1	Modelo base.....	14
3.1.2	Plano de flutuação.....	16
3.1.3	Plano de balizas.....	18
3.1.4	Modelos gerados.....	19
3.2	Movimentos Do Navio.....	21
3.2.1	Respostas para ondas regulares.....	21
3.2.2	Respostas para ondas irregulares .....	23
3.3	Predições de <i>slamming</i> .....	27
3.3.1	Probabilidade de ocorrência .....	27
3.3.2	Pressão de impacto .....	29
4	Dinâmica do sistema .....	32
4.1	Fundamentação teórica .....	32
4.1.1	Considerações iniciais .....	32
4.1.2	Ondas regulares .....	33
4.1.3	Dinâmica do corpo rígido .....	34
4.1.4	Teoria das faixas.....	42
4.2	Frequência natural .....	43
5	Resultados e análise .....	45
5.1	Valores obtidos para as variações do casco.....	45
5.2	Forças e coeficientes gerados pelo Octopus.....	45
5.2.1	Considerações gerais.....	45
5.2.2	Variações de resultado mais expressivas entre extremos .....	48

5.3	Análise de movimentos .....	51
5.3.1	Deslocamento relativo .....	51
5.3.2	Velocidade relativa .....	55
5.4	Resultados das predições de <i>slamming</i> .....	56
5.4.1	Probabilidade do evento .....	56
5.4.2	Pressão de impacto .....	59
5.4.3	Comparativo geral .....	59
6	Conclusão e trabalhos futuros .....	63
7	Referências .....	66
	APÊNDICE A. PROGRAMA A .....	69
	APÊNDICE B. PROGRAMA B .....	75
	APÊNDICE C. CURVAS DE BÉZIER .....	80
	APÊNDICE D. TRANSFORMADA DE LEWIS .....	81
	APÊNDICE E. RESULTADOS DO PROCESSO DE VARIAÇÃO E DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE .....	83
	APÊNDICE F. GEOMETRIAS EXTREMAS .....	85
	APÊNDICE G. FORÇAS DE EXCITAÇÃO .....	89
	APÊNDICE H. COEFICIENTES DE RADIAÇÃO .....	92
	APÊNDICE I. COMPARATIVO DE FORÇAS E COEFICIENTES .....	94
	APÊNDICE J. DESLOCAMENTO RELATIVO .....	95



## Índice de Figuras

Figura 1.1 - Diagrama para predições de <i>slamming</i> .....	2
Figura 2.1 - Definição do ângulo de fundo.....	7
Figura 3.1 - Seleção de modelos.....	12
Figura 3.2 - Fluxograma de trabalho.....	14
Figura 3.3 - Obras vivas do casco base – Fragata “Friesland”.....	14
Figura 3.4 - Parâmetros constantes em destaque.....	15
Figura 3.5 - Interseção do plano de flutuação com o casco do modelo base.....	16
Figura 3.6 - Alteração com parâmetro $S_1$ .....	17
Figura 3.7 - Alteração com parâmetros $S_2$ e $S_3$ .....	17
Figura 3.8 - Limite das curvas até $B_{max}$ .....	18
Figura 3.9 - Ponto "P".....	21
Figura 3.10 - Transformação para frequência de encontro.....	25
Figura 3.11 - Espectros de resposta.....	26
Figura 3.12 - Áreas selecionáveis (Seaway Octopus).....	26
Figura 3.13 - Diagrama de dispersão fornecido pelo Octopus.....	27
Figura 3.14 - Transformação da seção.....	30
Figura 4.1 - Movimento orbital das partículas e o “Efeito Smith”.....	34
Figura 4.2 - Definição do sistema de referência.....	35
Figura 4.3 - Exemplo de cálculo das frequências naturais.....	44
Figura 5.1 - Exemplo do comportamento das amplitudes de excitação.....	47
Figura 5.2 - Exemplo do comportamento para amortecimento em <i>heave</i> .....	48
Figura 5.3 - Variação do amortecimento em função do $C_B$ .....	49
Figura 5.4 - Variação dos coeficientes de amortecimento ( $B_{33}$ e $B_{55}$ ) e de restauração ( $C_{33}$ e $C_{55}$ ) em função do $C_{WL}$ .....	50
Figura 5.5 - Variação das amplitudes de excitação ( $F_3$ e $F_5$ ) em função do $C_{WL}$ .....	50
Figura 5.6 - Exemplo para curvas de <i>heave</i> , <i>pitch</i> e deslocamento relativo.....	51
Figura 5.7 - Exemplo de componentes do deslocamento relativo.....	52
Figura 5.8 - Variação de amplitudes e deslocamento relativo em função do LCB...	53
Figura 5.9 - Variação de amplitudes e deslocamento relativo em função do $C_B$ .....	54
Figura 5.10 - Variação de amplitudes e deslocamento relativo em função do LCF.	54
Figura 5.11 - Variação de amplitudes e deslocamento relativo em função do $C_{WL}$ .	55

Figura 5.12 - Velocidade vertical relativa.....	56
Figura 5.13 - Relação entre probabilidade de ocorrência e variação do casco. ....	57
Figura 5.14 - Comparativo com modelos na faixa intermediária. ....	58
Figura 5.15 - Relação entre ângulo de fundo e $C_p$ . ....	59
Figura 5.16 - Relação entre $C_p$ e probabilidade de ocorrência. ....	62

## Índice de Tabelas

Tabela 3.1 - Características principais do modelo. ....	15
Tabela 3.2 - Requisitos estabilidade intacta IMO. ....	20
Tabela 5.1 - Valores extremos dos adimensionais. ....	45
Tabela 5.2 - Probabilidade de ocorrência. ....	56
Tabela 5.3 – Variação do casco e probabilidade de ocorrência. ....	58
Tabela 5.4 - Comparativo de pressões para o modelo Base, LCB(+), LCB(-), $C_B(+)$ e $C_B(-)$ . ....	60
Tabela 5.5 - Comparativo de pressões para o modelo Base, LCF(+), LCF(-), $C_{WL}(+)$ e $C_{WL}(-)$ . ....	60
Tabela 5.6 – Pressões pelo método de Ochi e limites da DNV-GL. ....	61

## Lista de Abreviaturas e Siglas

B	Boca
$C_B$	Coefficiente de bloco
CFD	Dinâmica dos fluidos computacional
CG	Centro de gravidade
$C_p$	Coefficiente de pressão
$C_{WL}$	Coefficiente da área de flutuação
$F_n$	Número de Froude
GM	Altura metacêntrica
GZ	Braço de endireitamento
KB	Altura do centro de carena
KG	Altura do centro de gravidade
LCB	Posição longitudinal do centro de carena
LCF	Centro longitudinal da área de flutuação
$L_{PP}$	Comprimento do casco entre perpendiculares
$M_s$	Fator de escala
$PP_{AV}$	Perpendicular de vante
$PP_{AR}$	Perpendicular de ré
RAO	Operador amplitude da resposta
RMS	Média quadrática
T	Calado normal
$T_p$	Calado no ponto de análise
$V_{CR}$	Velocidade crítica
WL	Linha d'água

# 1 INTRODUÇÃO

O emprego de uma embarcação em diversas tarefas está relacionado com o seu comportamento no mar, que é função das características do navio e das condições ambientais na área de operação. Os movimentos dos navios induzidos por excitações naturais são correlacionados à diversas ocorrências que limitam seu pleno emprego, designadas como eventos de *seakeeping*.

No caso de embarcações militares, tais limitações podem ser consideradas ainda mais severas, em virtude da grande quantidade de equipamentos sensíveis, como armamentos e sensores, além das próprias características operacionais deste tipo de embarcação, que em geral é projetada para desenvolver grandes velocidades, porém com dimensões consideravelmente inferiores à de grandes navios comerciais.

As unidades navais que melhor traduzem tais características seriam as de médio porte, como fragatas, corvetas e contratorpedeiros (ou destróieres). Em geral, essas unidades são empregadas para escolta de comboios ou unidades de grande valor, podendo navegar velozmente. Constituindo plataformas versáteis, comparativamente possuem armamento mais diversificado.

Dentre os eventos que afetam a operacionalidade dos meios no mar, o *slamming* tende a ser potencialmente nocivo para tal configuração de navio, impondo restrições operativas como redução voluntária de velocidade ou danos à equipamentos sensíveis do tipo radar, sonar, dentre outros. Também pode acarretar em danos à estrutura e aumentar o risco de detonação involuntária de explosivos.

Exposto o problema, a ideia principal deste trabalho consiste em avaliar a performance de um navio militar de acordo com determinadas alterações no formato de seu casco, com foco específico no fenômeno de *slamming*.

Para caracterização em termos de *slamming*, é interessante que sejam estimados a probabilidade de ocorrência do evento e a força de impacto à qual a estrutura pode estar sujeita. O diagrama básico contendo os dois tipos de predição é apresentado na Figura 1.1. Verifica-se que a análise de movimentos da embarcação engloba o formato do casco de modo geral, enquanto o estudo das forças de *slam* utiliza dados de resposta do navio e especificamente a geometria local da seção onde é considerado o impacto com a

superfície do mar. Em diversos métodos clássicos, a seção de impacto é simplificada como uma seção bidimensional com formato de cunha.



Figura 1.1 - Diagrama para predições de *slamming*.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Uma embarcação bem projetada deve ser capaz de operar considerando a menor quantidade de restrições possíveis, podendo navegar em velocidades desejadas mesmo em mares severos, além de preservar a funcionalidade de diversos sistemas à bordo.

Levando-se em conta os problemas envolvendo o comportamento no mar de uma embarcação, seria razoável analisar certas opções para minimizá-los em um caso específico. A alternativa selecionada consiste em avaliar a influência do formato do casco nos movimentos de uma embarcação e também sua caracterização para o evento de *slamming*, de modo a se obter configurações de casco com menores restrições operacionais.

Através desta pesquisa, buscou-se uma melhor compreensão dos efeitos gerados por alterações em coeficientes de forma da geometria submersa do navio no desempenho em comportamento no mar. É interessante verificar quais as implicações físicas de cada mudança e suas relações com as predições de *seakeeping*. A alteração de coeficientes pode gerar reduções consideráveis de resposta e atenuar o esforço de impacto da estrutura durante o contato com a água.

## 1.2 OBJETIVO

Diante das premissas citadas, a dissertação possui o seguinte objetivo: avaliar melhorias do desempenho em *slamming* através da variação geométrica do casco. Para tal fim, foram desenvolvidos os seguintes itens:

- Selecionar determinados coeficientes de forma do casco e verificar a relação destes com a dinâmica do navio;
- Com base teórica, justificar as mudanças verificadas no comportamento, quando possível; e
- Analisar quais destes coeficientes de forma podem influenciar o evento de *slamming* em um modo mais significativo.

## 1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está dividido em outros 5 capítulos, de acordo com a seguinte sequência:

- O Capítulo 2 aborda a revisão bibliográfica, enumerando os principais estudos publicados sobre variações de forma do casco, dinâmica de navios e *slamming*, com enfoque especial para trabalhos baseados em formulações analíticas;
- O Capítulo 3 expõe a metodologia empregada na dissertação, incluindo os procedimentos para variação do casco, estudo de movimentos e predições de *slamming*;
- O Capítulo 4 cobre a fundamentação teórica sobre a dinâmica de movimentos do navio;
- O Capítulo 5 apresenta os resultados e análises sobre forças e coeficientes obtidos, respostas da embarcação e estimativas de *slamming* (frequência e pressão de impacto); e
- O Capítulo 6 contém as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O trabalho aborda um estudo que engloba alterações na geometria de um casco e seus efeitos na dinâmica da embarcação, bem como suas características em termos de *slamming*. Em geral, as fontes de referência costumam vincular apenas um ou dois destes temas em um mesmo texto, destarte a revisão literária foi dividida em três itens.

Inicialmente foi abordada a questão das variações nos formatos de casco, em seguida um tópico voltado ao estudo de movimentos e finalmente os conceitos sobre o impacto do navio na superfície do mar.

### 2.1 VARIAÇÕES DE GEOMETRIA

A avaliação sobre implicações da alteração na geometria submersa já foi o alvo de variadas pesquisas. BALES (1980) apresenta um texto que relaciona o formato do casco com seu correspondente desempenho no comportamento no mar. Um total de seis parâmetros de forma foram selecionados para a avaliação da geometria, contando como fonte de dados informações sobre vinte cascos de navio do tipo destróier. Foram mensuradas neste trabalho respostas de deslocamento e aceleração em alguns pontos dos cascos, para os movimentos de *heave* e *pitch*. Os cálculos de movimento foram realizados através de um programa, utilizando a teoria das faixas. Através dos resultados obtidos, foi derivada uma fórmula que correlacionava o desempenho em *seakeeping* com os parâmetros de forma analisados.

GRIGOROPOULOS e LOUKAKIS (1988) estabeleceram um método analítico para otimização em comportamento no mar. Foi utilizado um código que gerava alterações de casco a partir de um modelo base, indicando em seguida qual variação apresentava o melhor desempenho, de acordo com uma função objetivo que incluía algumas respostas de movimentos. Posteriormente, os resultados foram validados através de experimentos com modelos do casco base e da variante otimizada, ambos com as mesmas dimensões principais.

A obra de LLOYD (1989) inclui um estudo que contempla o efeito da variação de tamanho e forma no casco de uma fragata em seus movimentos de resposta no plano vertical. Foram avaliados os movimentos de aceleração vertical absoluta e



deslocamento relativo na proa, sendo o primeiro vinculado ao conforto da tripulação e o último às ocorrências de *slamming*. A pesquisa conclui que modelos com maior tamanho (para o mesmo formato) apresentam movimentos verticais atenuados. Ao avaliar o efeito da razão entre calado e comprimento, foi verificado que a redução do calado em geral é favorável à redução dos movimentos, enquanto a probabilidade de emersão da quilha aumenta consideravelmente. Por fim, o texto aponta os efeitos no aumento do coeficiente da área de flutuação à vante. Tal incremento mostrou-se benéfico na redução dos movimentos verticais absolutos e relativos, além de diminuir a probabilidade de emersão da quilha.

Em sua pesquisa, KAPSENBERG (2005) desenvolveu uma metodologia que resultava no formato de casco otimizado para certas características de *seakeeping*. A geometria era definida conjuntamente através de curvas polinomiais e transformadas de Lewis, resultando em um total de 21 parâmetros de controle. As estimativas de resposta foram obtidas com o uso de código baseado na teoria das faixas. A geometria otimizada não apresentou um formato válido na prática, o que pode indicar a necessidade de maior controle nas variações de forma do casco. Em uma de suas considerações, o estudo conclui que alterações pontuais na porção submersa de uma embarcação são pouco significativas em termos de *seakeeping*, o que revela a necessidade de mudanças globais no formato do casco.

O trabalho de BELGA (2017) envolve a melhoria da performance em comportamento no mar de uma embarcação do tipo catamarã. Alterações foram geradas a partir de um modelo base através do algoritmo de Lackenby (transformações paramétricas), variando coeficiente de bloco e posição longitudinal do centro de carena entre limites de 10%. Além da análise de movimentos em ondas regulares, o estudo também considera as características de mar em uma região de interesse para cálculos em mar irregular. As variações de casco são submetidas à verificação de estabilidade e de resistência ao avanço. Em uma de suas conclusões, foi verificado que variações no LCB e  $C_{WL}$  do casco afetam o seu comportamento no mar de modo significativo. Alterações no  $C_B$ , entretanto, mostraram-se pouco significativas.

## 2.2 MOVIMENTOS DO NAVIO

Diversos estudos experimentais e teóricos foram desenvolvidos com o intuito de

estimar as respostas de um navio submetido à ação de ondas. Fatores como elevados custos e grande demanda de tempo na execução de ensaios com modelos influenciaram no desenvolvimento de métodos numéricos para estimativa destes movimentos. Nesse contexto, códigos baseados na teoria das faixas constituem os elementos básicos para cálculos envolvendo *seakeeping*.

URSELL (1949) elaborou uma técnica baseada na teoria potencial para determinação dos coeficientes hidrodinâmicos em seções de semi círculos oscilando em águas profundas. TASAI (1959) utilizou a metodologia anterior para obter a massa adicionada e o amortecimento em seções oscilantes com o uso de formulações de mapeamento. Por meio destas formulações, que possibilitam a transformação de curvas com geometria semelhantes à seções de casco em círculos, foi possível empregar o método de Ursell para cálculos relacionados aos movimentos dos navios em ondas regulares, sem velocidade de avanço.

A primeira ferramenta com possibilidade de emprego prático foi desenvolvida por KORVIN-KROKOUVISKY e JACOBS (1957), com base na teoria das faixas para computar as respostas lineares de uma embarcação com velocidade de avanço e incidência de ondas pela proa, nos movimentos de *heave* e *pitch*. A teoria foi sendo continuamente explorada através de outros pesquisadores, como no trabalho de GERRITSMAN e BEUKELMAN (1967), que basicamente abordou com êxito a validação dos resultados obtidos com o método das faixas por meio de diversos ensaios com modelos.

O estudo de SALVESEN, TUCK e FALTINSEN (1970) incorporou alguns novos conceitos ao tema, englobando os cálculos de movimento para *heave*, *pitch*, *sway*, *roll* e *yaw*. Também possibilita a estimativa das forças e momentos induzidos pelas ondas, incidindo em aproamentos arbitrários, considerando o navio com velocidade constante. O método gerado passou a constituir a base para a grande maioria dos códigos de comportamento no mar que empregam a teoria das faixas.

## 2.3 PREDIÇÕES DE *SLAMMING*

Pesquisas envolvendo o impacto de estruturas na superfície da água vêm sendo desenvolvidas por meio de experimentos, modelos estatísticos, formulações analíticas e, no período mais recente, com auxílio de métodos numéricos.

De forma simplificada, um estudo sobre *slamming* envolve a busca por dois tipos de estimativa: pressão do impacto e frequência de ocorrência. O primeiro grupo destes resultados foi objeto de diversos trabalhos que simplificavam o problema, considerando o impacto vertical de um corpo rígido bidimensional na superfície da água com determinado ângulo de fundo, designado  $\beta$  (Figura 2.1).

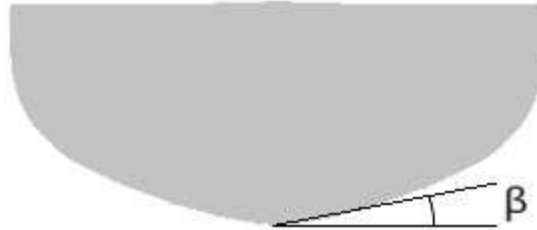


Figura 2.1 - Definição do ângulo de fundo.

O trabalho de VON KARMAN (1929), com o objetivo de analisar o impacto de hidroaviões na água, inicia os estudos analíticos nesta vertente. O método era baseado na conservação da quantidade de movimento e não considerava a elevação da água durante a batida, permanecendo a superfície líquida inalterada. Para ângulos de fundo próximos de zero, a pressão de impacto estimada tende ao infinito, logo a formulação proposta não apresenta funcionalidade prática nestes casos.

Posteriormente, WAGNER (1932) desenvolveu a sua teoria assintótica, que já levava em conta a elevação da superfície líquida. A aceleração do fluido durante o impacto foi adotada como muito superior à da gravidade, sendo a última desprezada. O conceito era válido para seções com pequeno ângulo de fundo, considerando a imersão da seção extremamente pequena em relação à largura na superfície, o que possibilitava a sua aproximação para uma placa plana e por fim estimar as cargas de *slamming*. Sua formulação, ainda muito empregada atualmente, fundamentou diversas outras teorias e serviu como base para validação de novos métodos e experimentos, conforme apresentado a seguir.

CHUANG (1966) conduziu uma série de experimentos para investigar as forças de impacto em seções com as mesmas características (no caso, entre  $1^\circ$  e  $15^\circ$ ). Ao analisar o efeito da formação de bolsões de ar durante a batida na superfície da água, foi concluído ser expressivo apenas para a cunha com ângulo de  $1^\circ$ , ocorrendo rápida dissipação do efeito a partir de  $3^\circ$ . Este trabalho fornece a relação entre os ângulos da quilha e a máxima pressão, com resultados indicando razoável aderência aos métodos citados anteriormente.

Empregando a função de WAGNER (1932), DOBROVOL'SKAYA (1969) desenvolveu a teoria da similaridade, considerando a velocidade de entrada do corpo constante e podendo ser aplicada para variados ângulos de fundo. Entretanto, tal solução baseada na similaridade não pode ser aplicada à geometrias aleatórias, sendo precisa apenas para ângulos no fundo superiores a  $30^\circ$ .

O estudo de ZHAO et al. (1993) resultou em um trabalho que generalizava a teoria de WAGNER (1932), baseado em um modelo numérico (método de elementos de contorno não-linear) para um problema bidimensional de entrada vertical de seção arbitrária com velocidade constante. Empregava a formulação sugerida por DOBROVOL'SKAYA (1969), porém com algumas alterações na solução numérica, de modo a poder ser empregada uma maior faixa de  $\beta$ . Na pesquisa subsequente, ZHAO e FALTINSEN (1996) desenvolveram dois novos métodos, também baseados nas formulações de WAGNER (1932), um com tratamento totalmente não-linear, que considerava a separação de fluido, e outro baseado em um modelo simplificado da teoria generalizada.

Trabalhos recentes passaram a considerar o problema de impacto tridimensional, como o método generalizado de WAGNER (1932) para caso 3D de FALTINSEN e CHEZHIAN (2005). YETTOU (2007), propôs um novo modelo analítico, considerando o efeito de redução da velocidade do corpo após o impacto na água. Portanto, o fenômeno passa a ser analisado com o efeito transitório.

ENGLE e LEWIS (2003) publicaram resultados de um estudo comparativo entre métodos preditivos analíticos 2D, métodos numéricos 3D e dados experimentais sobre ensaios de impacto com seções de cunha para pressão de *slam*. A análise foi conduzida para diferentes velocidades de impacto vertical, com dois modelos de seção (ângulo de fundo com  $10^\circ$  e  $20^\circ$ ). Houve maior aderência de resultados para as menores velocidades e o modelo de maior ângulo de fundo.

Empregando um código comercial baseado em elementos finitos para cálculo do domínio fluido, WANG (2011) analisou os valores extremos de pressão e sua distribuição ao longo de geometrias com diferentes ângulos, com resultados próximos aos disponíveis em ensaios e obtidos por métodos analíticos. Sua pesquisa também inclui a simulação de entrada não simétrica da seção de proa de um modelo, indicando que os métodos numéricos já disponíveis possibilitam a análise de casos consideravelmente complexos, cada vez mais próximos de situações reais do fenômeno

em estudo.

KAPSENBERG (2011) publicou um artigo que resumia os principais estudos elaborados em torno da estimativa para a pressão de impacto. São apresentados os seguintes métodos: conservação da quantidade de movimento, elementos de contorno, estatísticos, analíticos e por fim os baseados em CFD. Além disso foram descritas técnicas experimentais e os resultados obtidos com medições na escala real. Suas conclusões indicam que o futuro das predições numéricas certamente estaria vinculado ao uso de CFD, por possibilitar a inclusão de um maior número de fenômenos ao modelo físico. O modo de operação do navio, visando evitar cargas extremas de impacto (como por exemplo redução de velocidade e mudança de aproamento), exerce grande influência nas cargas de slamming. O autor sugere que este aspecto deve ser melhor explorado em futuras pesquisas.

DOUSSET (2015) avaliou experimentalmente o impacto na água de uma seção em formato de cunha, além de investigar e abordar detalhadamente as metodologias de Von Karman e Wagner para estimativa da pressão de impacto. O estudo enumera as diversas dificuldades enfrentadas durante a obtenção de dados experimentais de qualidade, que por fim puderam ser comparados com as formulações empíricas detalhadas em seu trabalho. Mesmo em uma simulação simplificada, com apenas as variáveis de pressão e velocidade sendo aferidas, a pesquisa ilustra a complexidade inerente ao fenômeno de *slamming*.

Além das análises de força de impacto, foram publicados por OCHI (1964) estudos sobre estimativas da frequência de *slamming*. A ocorrência do evento dependeria de duas condições na região de impacto: sua saída da água e reentrada com velocidade vertical acima de um valor crítico, a formulação era baseada em distribuições estatísticas de Rayleigh. Neste estudo foi introduzida uma formulação para a velocidade crítica, aplicando a similaridade de Froude. OCHI e MOTTER (1971), também forneceram predições sobre a pressão de impacto, com expressão empírica obtida através de múltiplas análises de regressão, de acordo com o formato da seção do casco.

Posteriormente, OCHI e MOTTER (1973) apresentam um método que descreve as principais características do fenômeno de *slamming*, incluindo além das predições citadas, estimativas como o intervalo entre os impactos, velocidade máxima para ausência de *slam*, distribuição da pressão e respostas da estrutura ao evento.

Em um estudo voltado às características de *seakeeping* para navios do tipo fragata e destróier com incidência de ondas pela proa, CONOLLY (1974) apresenta três pontos sensíveis que afetam a plena operacionalidade dessas embarcações: acelerações verticais excessivas, embarque de água na proa, pressão de impacto e velocidade durante a reentrada no mar. Em sua conclusão, é fornecido graficamente um comparativo de modelos de casco indicando as limitações de velocidade relacionadas aos três parâmetros, para determinada faixa de frequência de ondas.

Conforme constatado nos itens anteriores, os experimentos e as soluções numéricas recentes demonstram que o emprego de formulações clássicas, resguardadas suas devidas limitações, podem ser empregadas com razoável acurácia.

### 3 METODOLOGIA

Tratando-se de um estudo voltado ao fenômeno de *slamming* para um navio militar de médio porte, foram adotadas as hipóteses a seguir:

- Casco típico de um navio militar do tipo escolta, como uma fragata;
- Navio com velocidade constante de 18 nós ( $F_n$  de 0,28), um valor razoável para a velocidade de cruzeiro deste tipo de embarcação;
- Incidência de ondas apenas pela proa, que configura a condição com maior potencial do evento;
- Estudo dos movimentos de *heave* e *pitch*; e
- Simulação da dinâmica do navio com base na teoria potencial, que fornece resultados satisfatórios para as hipóteses citadas.

De modo a avaliar o efeito de forma do casco, foram selecionados quatro adimensionais considerados de grande importância na caracterização da geometria submersa de uma embarcação:

- Adimensional da posição longitudinal do centro de carena ( $LCB/L_{pp}$ );
- Coeficiente de bloco ( $C_B$ );
- Adimensional do centro de flutuação longitudinal ( $LCF/L_{pp}$ ); e
- Coeficiente da área de flutuação ( $C_{WL}$ ).

Desse modo, a idéia consiste em analisar as consequências da variação destes parâmetros nas respostas do navio e nas predições de *slamming*, comparando pares de cascos com variações extremas em cada adimensional. Para tal, utilizando um modelo base de casco, foram geradas diversas variantes, e em seguida selecionadas aquelas que apresentaram apenas um dos parâmetros alterado em relação à geometria original. Em seguida, os modelos escolhidos foram classificados dentro do correspondente item de variação ( $LCB$ ,  $C_B$ ,  $LCF$  ou  $C_{WL}$ ), sendo extraídas as geometrias de casco com valores máximo e mínimo de cada adimensional.

O método empregado gerou oscilações nos adimensionais apresentados de forma indireta, através de outros parâmetros que serão detalhados na próxima seção. Não sendo empregado um modo de controle direto, é interessante que haja um número elevado de variações, pois muitas não serão selecionadas de acordo com os critérios

mencionados anteriormente.

Em resumo, ao fim da primeira etapa foram obtidas oito alterações do casco original (duas para cada item), cada uma contando com apenas um adimensional alterado, para valor máximo ou mínimo, dentro das variações geradas. Estas variantes foram assim designadas:

- LCB(+)<sup>1</sup>, com o centro de carena mais próximo da proa;
- LCB(-), com o centro de carena mais próximo da popa;
- C<sub>B</sub>(+), com o maior coeficiente de bloco;
- C<sub>B</sub>(-), com o menor coeficiente de bloco;
- LCF(+), com o centro de flutuação mais próximo da proa;
- LCF(-), com o centro de flutuação mais próximo da popa;
- C<sub>WL</sub>(+), com o maior coeficiente da área de flutuação; e
- C<sub>WL</sub>(-), com o menor coeficiente da área de flutuação.

A Figura 3.1 apresenta o esquema básico para obtenção das oito variantes da geometria. A primeira caixa representa todo o conjunto de variações do casco. As quatro caixas seguintes simbolizam subconjuntos que contém apenas variantes de casco com três parâmetros constantes. Por fim, foram extraídos os oito modelos com valores máximo e mínimo para cada parâmetro.

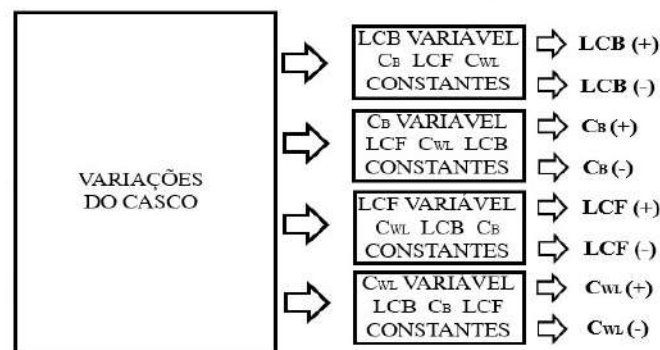


Figura 3.1 - Seleção de modelos

As alterações do casco base foram executadas por meio de um código elaborado em

<sup>1</sup> Optou-se por representar as variantes dos adimensionais de LCB e LCF neste formato quando citadas de forma individual, para evitar que a nomenclatura destas fique muito extensa.



Fortran (Apêndice A), denominado Programa A. No primeiro momento, o código gerou novas geometrias através de um número reduzido de parâmetros na entrada, além de calcular os coeficientes de forma para cada uma.

Na etapa seguinte, o programa processou as variações do casco através de 4 filtros. Cada um possibilita a oscilação livre de um dos 4 adimensionais, enquanto restringe os demais à no máximo 0.5% dos valores baseados no modelo original. Em seguida foram selecionados os modelos com valores máximo e mínimo de cada adimensional e finalmente foram extraídos os arquivos de casco para os oito modelos resultantes, conforme a Figura 3.1.

No passo seguinte, os arquivos com a geometria das oito variantes extremas do modelo foram inseridos no programa Seaway Octopus. Esta ferramenta utiliza a teoria das faixas, sendo empregada para o cálculo das forças de excitação, coeficientes das forças de radiação e funções de transferência - ou Operadores amplitude da resposta (RAOs) - dos movimentos de interesse no centro de gravidade. Também foram extraídos do programa dados estatísticos sobre as características de mar em uma determinada região de interesse.

Tais informações obtidas no Octopus foram utilizadas por um segundo código, também escrito em Fortran (Programa B – Apêndice B), que calculou os movimentos no ponto de análise (designado “P” e situado na porção de vante da quilha) em relação ao centro de gravidade, além dos espectros de mar, espectros de resposta, probabilidade de ocorrência do impacto e a pressão estimada, para todas as 8 variações.

Optou-se neste trabalho por estimar as pressões de impacto através das formulações analíticas de KARMAN (1929) e WAGNER (1932) e empíricas por OCHI e MOTTER (1971). Já a probabilidade esperada de ocorrência do impacto foi fundamentada de acordo com conceitos fornecidos por OCHI (1964).

Os dados de resposta e desenhos de casco gerados em cada passo foram representados graficamente através de rotinas escritas em Matlab. Por meio dos gráficos gerados neste programa, foram discutidas as causas físicas dos resultados, comparando os valores obtidos para cada geometria analisada neste trabalho. A Figura 3.2 contém a descrição resumida das atividades.

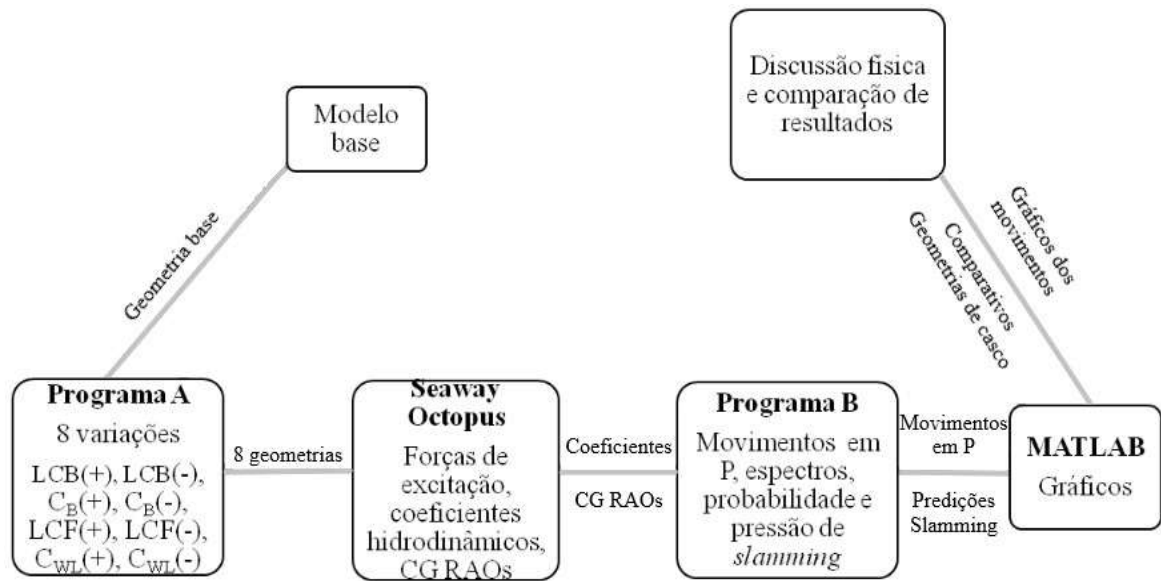


Figura 3.2 - Fluxograma de trabalho.

## 3.1 VARIAÇÕES DO CASCO

Após selecionado o modelo base, a etapa seguinte consistiu na geração de variantes do casco original, de modo que cada uma possua um coeficiente de forma extremo.

### 3.1.1 Modelo base

Para a configuração base de casco, foi selecionado o modelo de uma fragata holandesa da classe “Friesland” (Figura 3.3), que possui um considerável volume de dados publicados, incluindo seu plano de balizas, bem como estudos sobre sua performance no mar (SMITH, 1966) e (GERRITSMA, 1967).

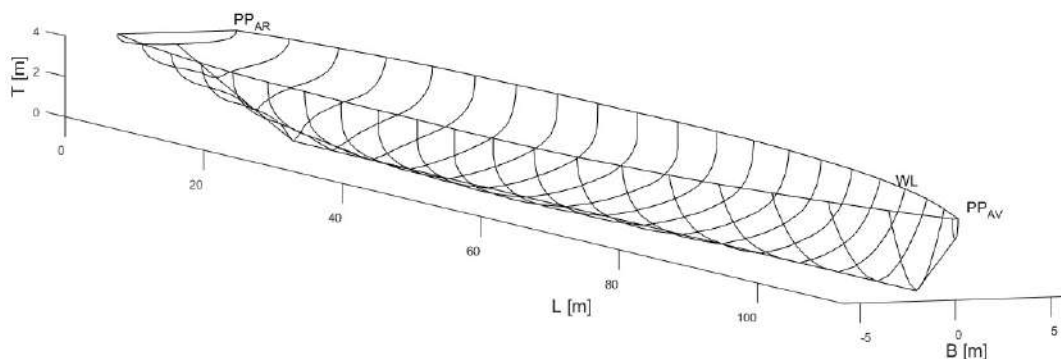


Figura 3.3 – Obras vivas do casco base – Fragata “Friesland”.

A Tabela 3.1 contém as características básicas da embarcação, em geral próximas

àquelas observadas nos meios de escolta em atividade.

Tabela 3.1 - Características principais do modelo.

Comprimento entre perpendiculares	$L_{PP}$	112,4 m
Boca máxima	B	11,74 m
Calado normal	T	4,01 m
Coefficiente de bloco	$C_B$	0,562
Centro de massa	CG	(55; 0; 5) m
Raio de giração (eixo y)	$I_{YY}$	26,2 m
Deslocamento normal	$\Delta$	3046 ton

Como premissas do processo, serão mantidos constantes para todas as novas variantes do casco os seguintes itens:

- O calado normal, boca máxima e comprimento entre perpendiculares;
- Perfil do plano diametral ou longitudinal; e
- Altura do CG e raio de giração em relação ao eixo transversal.

Estas limitações estão representadas graficamente em vermelho na Figura 3.4. As novas geometrias não poderão exceder o paralelepípedo, tampouco alterar o perfil longitudinal em destaque.

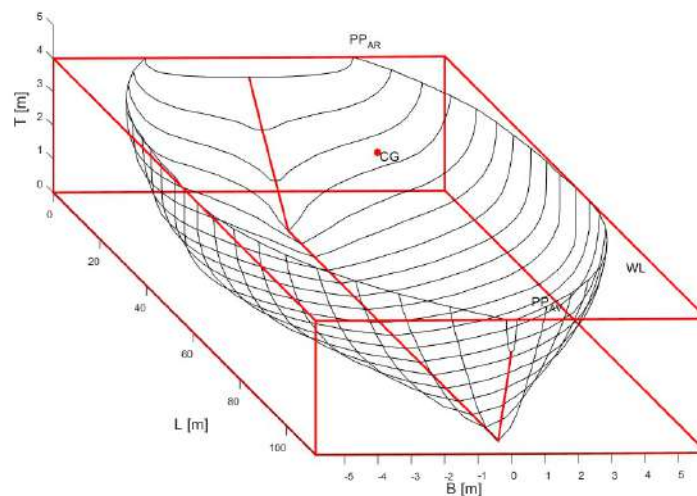


Figura 3.4 - Parâmetros constantes em destaque.

Adicionalmente, foi considerada a ausência de banda e trim (flutuação direita), e no

sentido longitudinal o CG oscilou de modo a coincidir com o LCB.

À luz destas considerações, foram geradas alterações baseadas no modelo original do casco através de 6 parâmetros de entrada, divididos em 2 grupos:

- Plano de flutuação: 3 parâmetros ( $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ ) para definir a interseção do plano de flutuação (calado normal) com o contorno do casco, através de alteração na largura da popa e do uso de curvas paramétricas de Bézier; e
- Plano de balizas: 3 parâmetros ( $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$ ) para definir as seções das balizas do casco, empregando as técnicas baseadas em transformações de Lewis.

### 3.1.2 Plano de flutuação

Empregando 3 parâmetros ( $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ ) serão definidas as curvas de interseção do plano de flutuação com o casco. O ponto de partida para as alterações será o contorno do modelo base, apresentado na Figura 3.5.

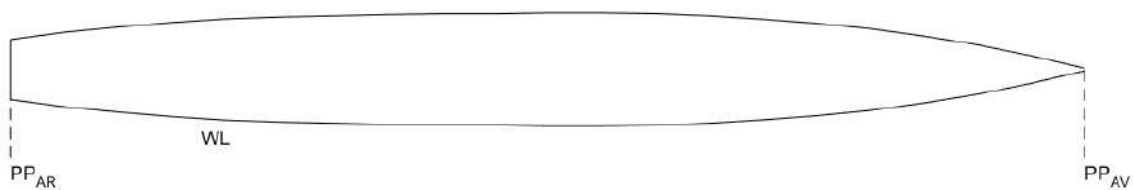


Figura 3.5 - Interseção do plano de flutuação com o casco do modelo base.

Inicialmente, foi estabelecida uma nova largura da popa na perpendicular de  $ré^2$ , através do parâmetro  $S_1$ , sendo o valor limite igual à máxima boca na linha d'água. A Figura 3.6 ilustra a substituição da popa original pelo valor gerado neste primeiro momento.

---

<sup>2</sup> Seguindo a nomenclatura adotada por FONSECA (2002), as perpendiculares são obtidas com a interseção entre a linha d'água projetada (referente à flutuação normal) e os contornos do casco na proa ( $PP_{AV}$ ) e na popa ( $PP_{AR}$ ).

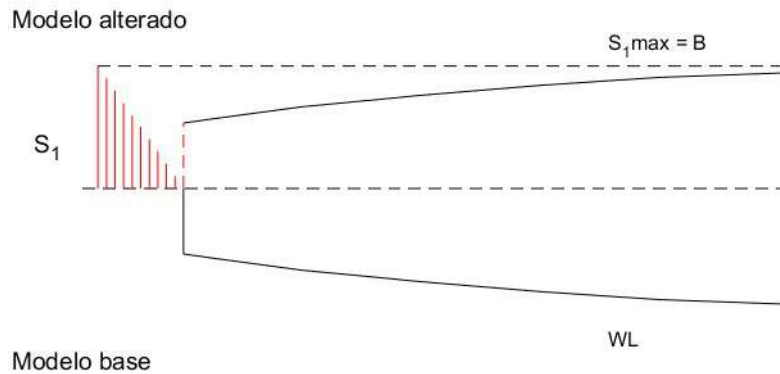


Figura 3.6 - Alteração com parâmetro  $S_1$ .

Em seguida, são efetuadas alterações para as demais linhas de contorno na interseção com o plano de flutuação. As modificações foram obtidas com o auxílio de curvas polinomiais de Bézier, cuja descrição teórica está inserida no Apêndice C.

Foram empregados dois polinômios de 3º grau (ilustrados na Figura 3.7 em azul e verde), que requerem 4 pontos de controle. Cada uma das curvas possui apenas um ponto de controle variável:

- O ponto definido pelo parâmetro  $S_2$  para a primeira curva, em azul; e
- O ponto definido pelo parâmetro  $S_3$  para a segunda curva, em verde.

Estes pontos variam exclusivamente na direção transversal da área de flutuação. O posicionamento destes irá tornar o contorno do casco mais afilado ou bojudo no plano de flutuação.

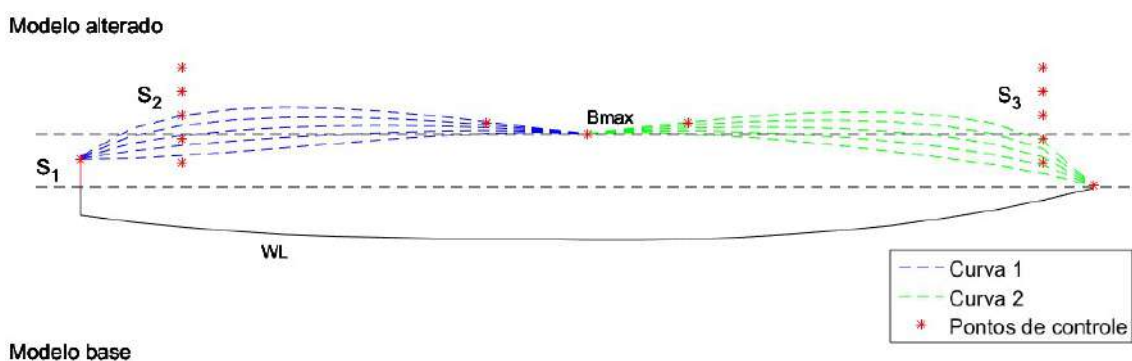
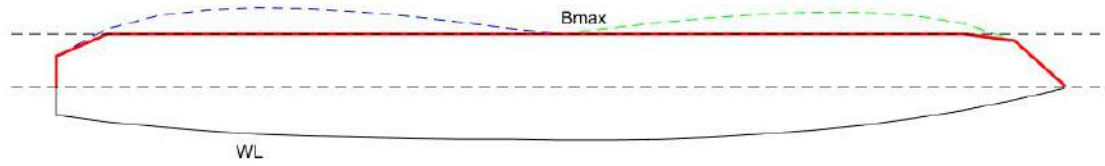


Figura 3.7 - Alteração com parâmetros  $S_2$  e  $S_3$ .

Em tempo, cabe ressaltar que o código gerador limitou as curvas na direção transversal, até o valor estabelecido como a boca máxima original no plano de flutuação (linha tracejada indicada por  $B_{max}$ ), conforme exemplo ilustrado na Figura 3.8. O contorno do casco, após aplicada a restrição, é apresentado em vermelho.

Modelo alterado



Modelo base

Figura 3.8 – Limite das curvas até Bmax.

### 3.1.3 Plano de balizas

Definidas as curvas de contorno do casco no plano de flutuação, são geradas novas balizas, encerrando o processo de alteração da geometria do casco. As curvas destas seções serão obtidas através da técnica de mapeamento conforme com 2 parâmetros, como proposto por LEWIS (1929), com a respectiva descrição teórica apresentada no Apêndice D.

De forma sucinta, com o método é possível obter curvas semelhantes à seções de balizas de um casco com apenas 2 variáveis de entrada: a razão entre boca e calado ( $H_0$ ) e o coeficiente de área ( $\sigma_S$ ). Estes correspondem às relações apresentadas na Eq. 3.1 e na Eq. 3.2.

$$H_0 = \frac{B_S/2}{T_S} \quad (3.1)$$

$$\sigma_S = \frac{A_S}{B_S T_S} \quad (3.2)$$

Sendo:

- $H_0$  a razão entre meia boca e calado na seção;
- $\sigma_S$  o coeficiente de área na seção;
- $B_S$  a boca na seção;
- $T_S$  o calado na seção; e
- $A_S$  a área da seção.

Para cada seção, a variável  $H_0$  já está previamente determinada, pois  $B_S$  foi definida com o contorno do casco na etapa anterior (seção 3.1.2) e  $T_S$  não sofreu alteração (o perfil do plano diametral é considerado constante). Logo, é necessário apenas a entrada

de  $\sigma_5$  para que seja definida a baliza em cada seção.

Como o modelo foi dividido em 21 seções, optou-se por definir diretamente apenas os coeficientes das seções correspondentes à perpendicular de ré (seção 1), meia nau (seção 11) e perpendicular de vante (seção 21), correspondendo aos parâmetros  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$ . Os adimensionais das seções intermediárias foram obtidos por interpolação polinomial (2° grau).

### 3.1.4 Modelos gerados

Através dos 6 parâmetros de entrada, foi obtida uma enorme variedade de alterações do modelo original, totalizando 10.368.000 cascos.

Deste montante, 2.111 variações foram aprovadas em uma das 4 faixas de variação para cada coeficiente de forma (vide Figura 3.1). O tempo de execução foi de aproximadamente 1 hora, rodando em um Intel Pentium com 1.60 GHz e 4GB de memória RAM.

#### 3.1.4.1 Análise de estabilidade

Esta etapa possui a finalidade de evitar que modelos de casco inviáveis em termos de estabilidade sejam considerados nos próximos passos. Para tanto, foram conduzidas verificações de estabilidade inicial e intacta, restritas à perturbações transversais (adernamento).

##### 3.1.4.1.1 Estabilidade inicial

Um navio é considerado estável sendo capaz de retornar à sua posição de equilíbrio quando excitado externamente. Considerando a condição crítica (estabilidade transversal), caso seu centro de gravidade (KG) esteja abaixo do metacentro transversal, a embarcação terá a condição de equilíbrio estável. Para pequenos ângulos de emborcamento, pode-se aproximar o braço de endireitamento conforme apresentado na Eq. 3.3, além do correspondente momento (Eq. 3.4).

$$GZ = GM \sin \alpha \quad (3.3)$$

$$M(\alpha) = \rho g \nabla GM \sin \alpha \quad (3.4)$$

A atenção logo recai sobre a altura metacêntrica (GM), que para condição de equilíbrio inicial pode ser determinada pela Eq. 3.5.

$$GM = KB + BM - KG \quad (3.5)$$

O valor de KB foi calculado de acordo com a geometria submersa do casco, enquanto KG foi previamente estabelecido e fixo (seção 3.1.1). O raio metacêntrico (BM), pode ser obtido pela relação da Eq. 3.6, para pequenos ângulos:

$$BM = \frac{I}{\nabla} \quad (3.6)$$

Sendo:

- $\alpha$  o ângulo de emborcamento;
- $I$  o momento de área do plano de flutuação em relação ao eixo longitudinal do navio; e
- $\nabla$  o volume deslocado pelo navio.

O momento da Eq. 3.4 atua como um momento de endireitamento quando  $GM > 0$  e como momento de emborcamento caso contrário.

#### 3.1.4.1.2 Estabilidade intacta

Os critérios adotados seguiram as diretrizes estabelecidas pela *International Maritime Organization* (IMO), de acordo com a resolução A749(18), (IMO, 1993), que contém critérios de recomendação geral para estabilidade.

No tópico de estabilidade intacta, basicamente são empregados cálculos com base na curva de estabilidade estática para um determinado casco, resumidamente descritos na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Requisitos estabilidade intacta IMO.

Critério	Requisito
area GZ $\alpha < 30^\circ$ (m.rad)	0,055
area GZ $\alpha < 40^\circ$ (m.rad)	0,09
area GZ $30^\circ < \alpha < 40^\circ$ (m.rad)	0,03
ang. Max GZ ( $^\circ$ )	25
GZ a $30^\circ$ (m)	0,2



GMt inicial (m)	0,15
Âng. eq. concentração tripulantes (°)	10
Âng. eq. Guinada (°)	10

## 3.2 MOVIMENTOS DO NAVIO

Os arquivos das variações do casco obtidas na etapa anterior foram utilizados pelo programa Octopus, para o início da análise de movimentos.

### 3.2.1 Respostas para ondas regulares

#### 3.2.1.1 Deslocamento relativo

Após inseridos os dados sobre as propriedades de massa do sistema, o Octopus fornece um arquivo contendo as funções de transferência para os movimentos de *heave* e *pitch*, no centro de gravidade do navio. Através destas informações o programa B efetua o cálculo dos RAOs de deslocamento absoluto e relativo em um ponto situado à 10%  $L_{PP}$  da perpendicular de vante na quilha, denominado ponto “P” (Figura 3.9). O centro do movimento escolhido coincide com o centro de gravidade, desse modo a distância do ponto P ao CG ( $x_p, y_p, z_p$ ) foi empregada nos cálculos. De acordo com OCHI (1964), esta seria uma região da estrutura adequada para estimativas de *slamming*.

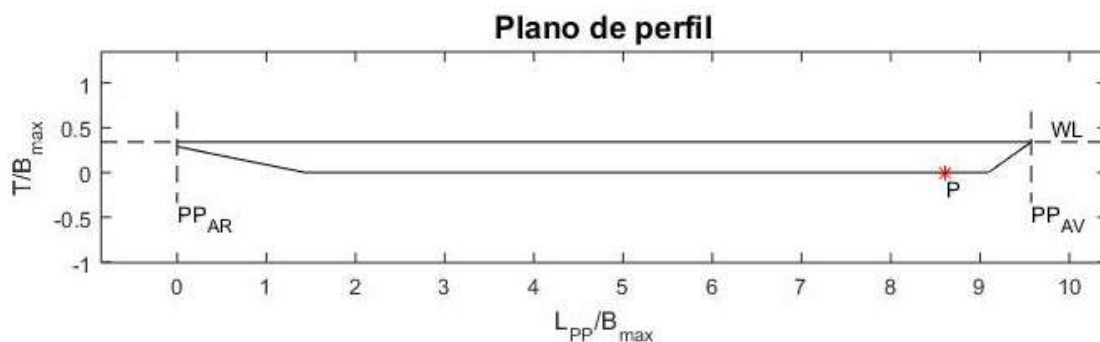


Figura 3.9 - Ponto "P".

O deslocamento absoluto em P pode ser obtido pela Eq. 3.7 ou a Eq. 3.8. Levando-se em conta a elevação da superfície das ondas, o deslocamento do ponto em relação à

superfície foi calculado através da Eq. 3.9 ou da Eq. 3.10.

$$s_3 = \eta_3 + y_p \eta_4 - x_p \eta_5 \quad (3.7)$$

$$s_3 = s_{3A} \cos(\omega_e t + \varepsilon_{s3}) \quad (3.8)$$

$$r_3 = \zeta_p - \eta_3 - y_p \eta_4 + x_p \eta_5 \quad (3.9)$$

$$r_3 = r_{3A} \cos(\omega_e t + \varepsilon_{r3}) \quad (3.10)$$

Sendo:

- $\eta_3$  o deslocamento em heave;
- $\eta_{4,5}$  as rotações em roll e pitch;
- $s_3$  o deslocamento vertical absoluto no ponto P;
- $s_{3A}$  a amplitude do deslocamento vertical absoluto no ponto P;
- $\varepsilon_{s3}$  a fase do deslocamento absoluto;
- $\zeta_p$  a elevação de onda no ponto P;
- $r_3$  o deslocamento vertical relativo no ponto P ;
- $r_{3A}$  a amplitude do deslocamento vertical relativo no ponto P; e
- $\varepsilon_{r3}$  a fase do deslocamento relativo.

O terceiro termo da Eq. 3.9 foi desprezado (movimento de *roll* não considerado), sendo necessário efetuar a combinação das 3 parcelas restantes. É importante que sejam analisadas tanto a amplitude quanto a fase dos componentes, pois ambas irão determinar a amplitude dos movimentos de interesse no ponto P (deslocamento e velocidade relativos à superfície do mar).

### 3.2.1.2 Velocidade relativa

Também é importante em um estudo sobre *slamming* se obter uma estimativa da velocidade no ponto P em relação à superfície do mar. Os cálculos de velocidade também foram executados pelo programa B. A velocidade pode ser obtida derivando-se o deslocamento, conforme Eq. 3.11, resultando na Eq. 3.12 ou Eq. 3.13. O termo da derivada da parcela de onda é dado pela Eq. 3.14.

$$v_3 = \frac{D}{Dt} \{ \zeta_p - \eta_3 + x_p \eta_5 - y_p \eta_4 \} \quad (3.11)$$

$$v_3 = \dot{\zeta}_p - \dot{\eta}_3 + x_p \dot{\eta}_5 - U\eta_5 - y_p \dot{\eta}_4 \quad (3.12)$$

$$v_3 = v_{3A} \cos(\omega_e t + \varepsilon_{v3}) \quad (3.13)$$

$$\dot{\zeta}_p = -\omega \zeta_a \sin(\omega_e t - kx_b \cos \mu - ky_b \sin \mu) \quad (3.14)$$

sendo:

- $v_3$  a velocidade vertical relativa no ponto P;
- $v_{3A}$  a amplitude da velocidade vertical relativa no ponto P; e
- $\varepsilon_{v3}$  a fase da velocidade relativa.

### 3.2.2 Respostas para ondas irregulares

A representação do mar através de ondas regulares não traduz a realidade observada nos oceanos, tipicamente com características aleatórias. De acordo com FALTINSEN (1990), em concordância com a teoria linear, a elevação da onda de cristas longas para mar irregular pode ser obtida através do somatório de diversas ondas sinusoidais regulares (Eq. 3.15).

$$\zeta = \sum \zeta_{an} \sin(\omega_n t - k_n x + \varepsilon_n) \quad (3.15)$$

Sendo:

- $\zeta_{an}$  a amplitude do componente n;
- $\omega_n$  a frequência circular do componente n;
- $k_n$  o número de onda do componente n; e
- $\varepsilon_n$  a fase aleatória do componente n.

A amplitude  $\zeta_{an}$  pode ser definida em termos do espectro de onda, de acordo com a Eq. 3.16.

$$S_\zeta(\omega_n) \Delta\omega = \sum_{\omega_n}^{\omega_n + \Delta\omega} \frac{1}{2} \zeta_{an}^2(\omega) \quad (3.16)$$

Assumindo  $\Delta\omega \rightarrow 0$ , a definição do espectro de energia de onda é dada pela Eq. 3.17. A variância da elevação da superfície pode ser obtida pela área compreendida na curva do espectro (Eq. 3.18).

$$S_{\zeta}(\omega_n)d\omega = \frac{1}{2} \zeta_{an}^2 \quad (3.17)$$

$$\sigma_{\zeta}^2 = \int_0^{\infty} S_{\zeta}(\omega)d\omega \quad (3.18)$$

Algumas formulações de espectro de mar foram desenvolvidas, basicamente empregando dois parâmetros para sua definição, a altura significativa de onda ( $H_{1/3}$ ) e os períodos ( $T_1, T_2, T_P^3$ ) (Eq. 3.19).

$$S_{\zeta}(\omega) = H_{1/3}^2 f(\omega, T) \quad (3.19)$$

Neste trabalho, para os cálculos envolvendo mar irregular, foi selecionado o espectro de Bretschneider, uma clássica formulação utilizada especialmente para regiões de mar aberto (Eq. 3.20).

$$S_{\zeta} = \frac{173H_{1/3}^2}{T_1^4} \omega^{-5} \exp\left\{\frac{-692}{T_1^4} \omega^{-4}\right\} \quad (3.20)$$

As formulações de espectro assumem os dois parâmetros como constantes ao longo do tempo, o que seria uma aproximação razoável apenas para um intervalo de tempo limitado. Neste ponto, será abordada a predição para curto intervalo de tempo e em seguida para longo prazo.

### 3.2.2.1 Estado de mar para curto prazo

Nesta seção, será utilizado de forma meramente ilustrativa o espectro de Bretschneider com  $H_{1/3}$  de 5 metros, equivalente à media da altura de onda em estado de mar 6<sup>4</sup>, de acordo com a Sociedade Classificadora RINAMIL. Este espectro possui a relação apresentada na Eq. 3.21 para mares plenamente desenvolvidos, correspondendo à um período entre zeros ascendentes de aproximadamente 8 segundos.

$$T_2 = 3,56\sqrt{H_{1/3}} \quad (3.21)$$

Inicialmente, é necessário que as frequências do espectro de onda sejam adaptadas às frequências de encontro, de acordo com a velocidade de avanço do navio. Segundo LLOYD (1989), esta transformação é obtida pela Eq. 3.22 e ilustrada na Figura 3.10.

<sup>3</sup> Os períodos característicos são denominados por  $T_1$ (período médio),  $T_2$  (período entre zeros ascendentes) e  $T_{PICO}$  (período de pico).

<sup>4</sup> Este seria um estado de mar tipicamente requerido em requisitos de projeto para este tipo de navio.

$$\frac{d\omega_e}{d\omega} = 1 - \frac{2\omega U \cos \mu}{g} \quad (3.22)$$

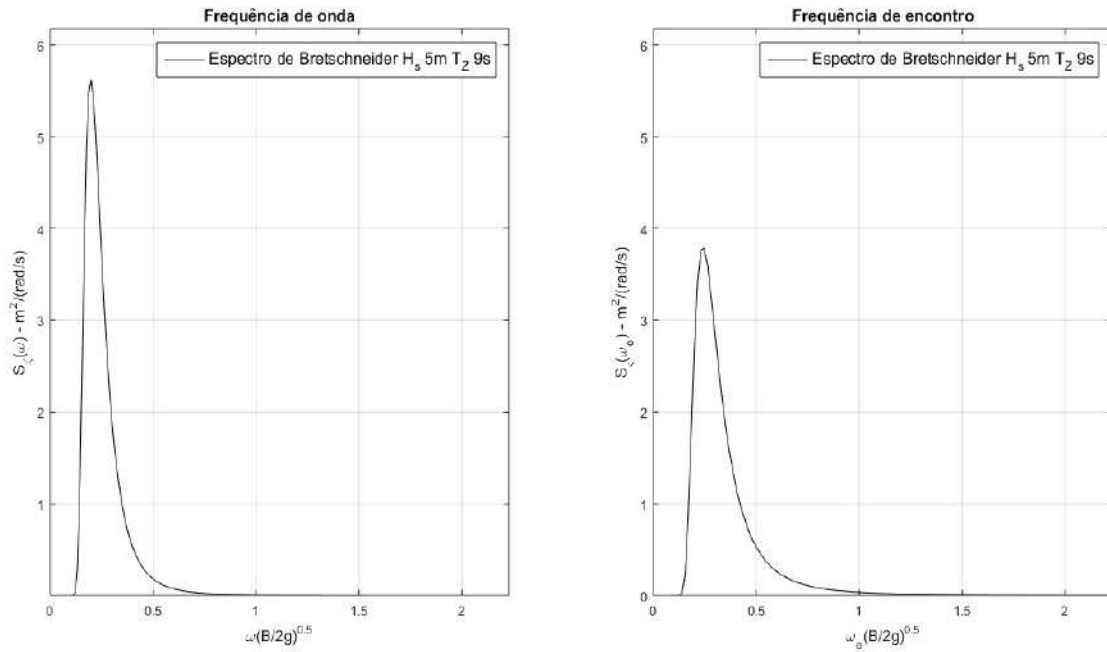


Figura 3.10 – Transformação para frequência de encontro.

O próximo passo consiste no cruzamento entre o espectro obtido e a função de transferência do movimento desejado, fornecendo o respectivo espectro de resposta. Foram efetuados os cálculos com as funções de transferência de deslocamento e velocidade verticais relativas em P. O cálculo é realizado conforme as Eqs. 3.23 e 3.24.

$$S_{r_3}(\omega_e) = S_{\zeta}(\omega_e) \left| \frac{r_3}{\zeta_a} \right|^2 \quad (3.23)$$

$$S_{v_3}(\omega_e) = S_{\zeta}(\omega_e) \left| \frac{v_3}{\zeta_a} \right|^2 \quad (3.24)$$

A representação do procedimento descrito é apresentada na Figura 3.11. Para deslocamento e velocidade relativas, são ilustrados em sequência: o espectro de mar - Figura 3.11(a) -, a função de transferência do movimento - Figura 3.11(b) - e o espectro de resposta calculado - Figura 3.11(c).

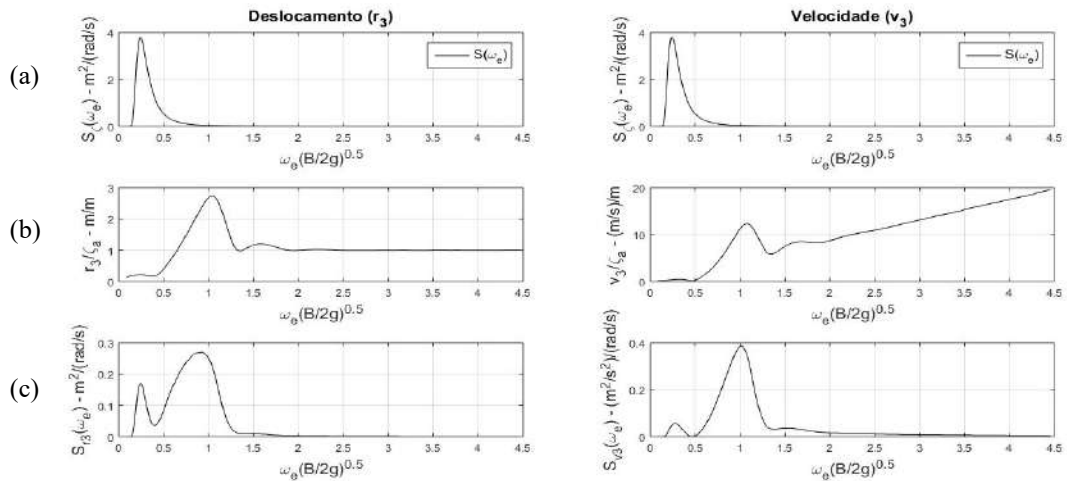


Figura 3.11 - Espectros de resposta.

### 3.2.2.2 Estado de mar para longo prazo

Em uma análise de longo termo, os parâmetros do espectro de mar não podem ser considerados constantes por todo o período. Um levantamento estatístico com probabilidades de ocorrência para variadas alturas e períodos pode ser obtido em um diagrama de dispersão relativo à área de interesse.

O programa Octopus contém em seu banco de dados informações estatísticas de mar de acordo com regiões selecionáveis manualmente (Figura 3.12). Foram marcadas as áreas 87, 96 e 103, correspondentes ao oceano Atlântico, nas proximidades do extremo sul do continente americano. Trata-se de uma rota comumente empregada por navios da Marinha do Brasil em travessia, patrulha ou atividades conjuntas.

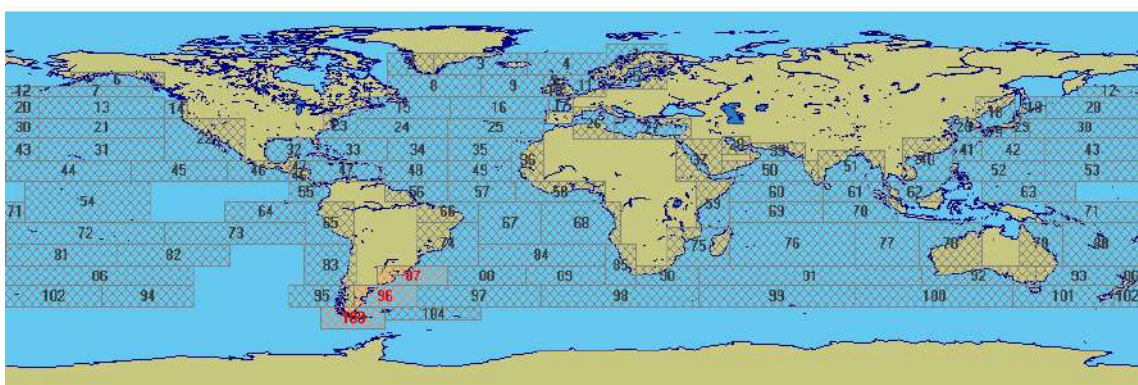


Figura 3.12 - Áreas selecionáveis (Seaway Octopus).

As áreas selecionadas forneceram o diagrama de dispersão exibido na Figura 3.13.

Cada configuração de parâmetros está associada a um valor que, ao ser dividido pelo somatório total de observações, fornece a correspondente probabilidade de ocorrência. É possível empregar este tipo de diagrama de variadas formas. Neste trabalho foram elaborados diversos espectros de mar, um para cada combinação, e em seguida associados às estatísticas contidas na figura.

Hs\Tz	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5	9,5	10,5	11,5	12,5	13,5	14,5	15,5	16,5	17,5	Sum	
17												0,1								0
16										0,1	0,1	0,2	0,1	0,1						1
15									0,1	0,3	0,4	0,5	0,4	0,2	0,1					2
14								0,1	0,3	0,8	1,3	1,3	0,9	0,5	0,2	0,1				5
13								0,2	1	2,4	3,5	3,3	2,2	1,1	0,5	0,2				14
12							0,1	0,7	3	6,8	9,1	7,3	5	2,4	0,9	0,3	0,1			36
11							0,3	2,4	9,1	18,4	22,3	18	10,4	4,7	1,7	0,6	0,2			88
10						0,1	1,1	7,9	26	47	51,6	38	20,4	8,6	3	0,9	0,2	0,1		205
9						0,2	4	24,3	70,6	113,1	111,5	74,7	37	14,5	4,8	1,4	0,4	0,1		457
8						0,9	13,5	71,3	180,2	253,5	223,1	135,2	61,3	22,3	6,8	1,9	0,5	0,1		971
7						3,3	43,4	197,1	429,9	527,5	409,6	232,5	91,3	30,8	8,8	2,3	0,5	0,1		1968
6						0,2	12,2	133	510,8	947,4	999,7	679	327	121,8	37,4	10	2,4	0,5	0,1	3781
5						0,9	43,5	380,1	1223,2	1890,5	1691,4	980,8	417,2	138,7	38,7	9,5	2,2	0,5	0,1	6830
4						4,3	150,1	1044,8	2663,8	3350,8	2463,9	1210,4	440,7	129	32,4	7,3	1,5	0,3	0,1	11504
3						0,1	20,5	302,3	2508,4	5085,6	4950,2	2386,3	1159,4	352,7	89	19,7	4	0,8	0,1	17675
2						0,5	106,4	1830,8	5720,6	7739,8	5397,9	2329,7	718	173,4	36,7	7	1,2	0,2		23884
1						10,7	863,4	6324,7	11673,6	8814,5	3632,6	996,3	209,2	37	5,9	0,9	0,1			32572
Sum	0	0	0	11	996	8668	21631	26369	20896	12338	5790	2252	751	221	59	15	3	1	100000	

Figura 3.13 - Diagrama de dispersão fornecido pelo Octopus.

Todos os cálculos efetuados nas previsões da probabilidade de *slamming* empregaram espectros de mar combinados com o diagrama de dispersão apresentado, possibilitando uma representação mais realista do estado de mar considerado para a região de interesse.

### 3.3 PREDIÇÕES DE *SLAMMING*

O estudo do evento foi baseado em duas de suas principais previsões, a estimativa da probabilidade de ocorrência e a pressão de impacto na região em análise. Os pré-requisitos para tais estimativas, de acordo com OCHI (1973), envolvem informações acerca dos movimentos do navio para um determinado estado de mar e parâmetros de forma da geometria do casco.

A análise envolveu apenas formulações analíticas e empíricas publicadas em VON KARMAN (1929), WAGNER (1932), OCHI (1964) e OCHI e MOTTER (1971), sendo gerados diversos comparativos das variações de casco para as duas modalidades de estimativa.

#### 3.3.1 Probabilidade de ocorrência

O trabalho de OCHI (1964) estabelece que o *slamming* é um evento que possui dois requisitos:

- A proa da embarcação emerge da água; e
- Sua reentrada na superfície ocorre a uma velocidade vertical acima de um certo valor crítico.

Denominando-os por eventos A e B, são considerados estatisticamente independentes de acordo com PRICE e BISHOP (1974). Assim, a probabilidade para que ambos ocorram é dada pela Eq. 3.25.

$$P[A \cap B] = P[A]P[B] \quad (3.25)$$

O primeiro evento está relacionado com o deslocamento relativo no ponto P, cuja variância pode ser calculada pela Eq. 3.26.

$$\sigma_S^2 = \int_0^\infty S_\zeta(\omega_e) \left| \frac{S_{r3}}{\zeta_a} \right|^2 d\omega_e = m_{0S} \quad (3.26)$$

Sendo:

- $\sigma_S^2$  a variância do deslocamento vertical relativo;
- $S_\zeta$  o espectro de onda;
- $S_{r3}$  o espectro de resposta do deslocamento vertical relativo; e
- $m_{0S}$  o momento espectral de deslocamento, ordem 0.

A probabilidade para que o deslocamento vertical relativo em P exceda o calado da seção que contém o ponto ( $T_P$ ) é obtido pela expressão da Eq. 3.27.

$$Pr\{r_3 > T_P\} = \exp\left\{-\frac{T_P^2}{2m_{0S}}\right\} \quad (3.27)$$

O evento B diz respeito à velocidade vertical relativa em P, sendo a respectiva variância obtida na Eq. 3.28.

$$\sigma_V^2 = \int_0^\infty S_\zeta(\omega_e) \left| \frac{v_3}{\zeta_a} \right|^2 d\omega_e = m_{0V} \quad (3.28)$$

Sendo:

- $\sigma_V^2$  a variância da velocidade vertical relativa;
- $v_3$  o espectro de resposta da velocidade vertical relativa; e
- $m_{0V}$  o momento espectral de velocidade, ordem 0.



A velocidade crítica para reentrada é calculada de acordo com a escala de Froude (Eq. 3.29). Com este valor, é possível obter a probabilidade para que a velocidade relativa ultrapasse-a (Eq. 3.30).

$$V_{CR} = 0,093\sqrt{gL} \quad (3.29)$$

$$Pr\{v_3 > V_{CR}\} = \exp\left\{-\frac{V_{CR}^2}{2m_{0V}}\right\} \quad (3.30)$$

Combinando a probabilidade dos eventos A e B, pode-se chegar às expressões para cálculo de probabilidade de ocorrência por ciclo de onda, através da Eq. 3.31 e da Eq. 3.32. O número de ocorrências esperadas por hora pode ser obtido pela Eq. 3.33 e a Eq. 3.34.

$$Pr\{Slam\} = Pr\{r_3 > T_P\}Pr\{v_3 > V_{CR}\} \quad (3.31)$$

$$Pr\{Slam\} = \exp\left\{-\left\{\frac{T_P^2}{2m_{0S}} + \frac{V_{CR}^2}{2m_{0V}}\right\}\right\} \quad (3.32)$$

$$T_{2S} = 2\pi\sqrt{\frac{m_{0S}}{m_{0V}}} \quad (3.33)$$

$$N/hr = \frac{3600}{T_{2S}}Pr\{Slam\} \quad (3.34)$$

As probabilidades foram combinadas com as informações obtidas no diagrama de dispersão (Eq. 3.35), gerando uma estimativa para longo período.

$$PR\{Slam\} = \sum_1^n Pr\{Slam\}_n * Pr(H_{1/3}, T_Z)_n \quad (3.35)$$

### 3.3.2 Pressão de impacto

A pressão de impacto foi obtida através de métodos analíticos e de um método empírico. As formulações analíticas empregadas simplificam o fenômeno real tridimensional para um estudo bidimensional, modelando a região como uma seção de cunha com determinado ângulo de fundo.

Todas as técnicas em questão estimam o coeficiente de pressão, que é empregado com a velocidade relativa para se determinar a pressão de impacto na proa, de acordo

com a Eq. 3.36.

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho v_3^2 \quad (3.36)$$

Sendo:

- $P$  a pressão de impacto;
- $C_p$  o coeficiente de pressão; e
- $v_3$  a velocidade vertical relativa.

Seguindo as mesmas premissas de CONOLLY (1974), foram consideradas nas análises a região do casco partindo da quilha até 1/10 do calado normal. As geometrias simplificadas de cunha, empregadas nos métodos analíticos, foram obtidas através da transformação ilustrada na Figura 3.14.

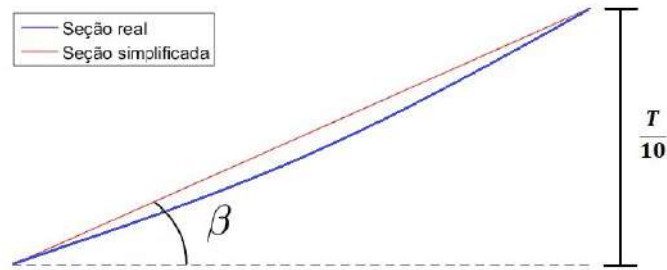


Figura 3.14 - Transformação da seção.

### 3.3.2.1 Método de Von Karman

A clássica formulação de VON KARMAN (1929), é baseada na teoria de conservação da quantidade de movimento. O intervalo de tempo do impacto do corpo na água é considerado mínimo, não havendo elevação da superfície líquida. A pressão máxima de impacto, de acordo com o método pode ser obtida pela Eq. 3.37, com o correspondente adimensional de pressão pela Eq. 3.38.

$$P_{max} = \frac{\rho}{2} v_3^2 \pi \cot \beta \quad (3.37)$$

$$C_{pmax} = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2} \rho v_3^2} \quad (3.38)$$

### 3.3.2.2 Método de Wagner

Desenvolvidos posteriormente, os conceitos de WAGNER (1932), consideram a

elevação da superfície da água durante o impacto. Também conhecida como teoria assintótica, a metodologia proposta é baseada na aproximação de uma cunha com pequeno ângulo de fundo para uma placa plana em expansão.

O resultado derivado destas considerações fornece a estimativa de pressão de impacto dada pela Eq. 3.39.

$$C_{pmax} = 1 + \frac{\pi^2}{4} \cot^2 \beta \quad (3.39)$$

### 3.3.2.3 Método de Ochi

A formulação proposta por OCHI e MOTTER (1971) para estimativa de pressão é baseada em análises estatísticas. Inicialmente, a geometria da seção considerada no *slamming* é mapeada em um círculo através de transformação conforme com três parâmetros, conforme a Eq. 3.40.

A técnica de mapeamento utilizada no método foi desenvolvida por LANDWEBER e MACAGNO (1959), e emprega para geração de curvas a razão entre boca e calado, o coeficiente de área e o raio de giração da seção em relação ao eixo transversal. As correspondentes formulações foram inseridas no Programa A. O procedimento foi validado através da comparação com resultados obtidos no trabalho de MACAGNO (1967).

$$Z = M_S \left( \delta + \frac{a_1}{\delta} + \frac{a_3}{\delta^3} + \frac{a_5}{\delta^5} \right) \quad (3.40)$$

Sendo:

- $Z = x + iy$  (coordenadas da seção);
- $\delta = \varepsilon + i\eta$  (coordenadas do círculo);
- $M_S$  o fator de escala; e
- $a_1, a_3$  e  $a_5$  os coeficientes da transformação.

Obtendo-se os 3 coeficientes correspondentes ao mapeamento de geometria da seção, é possível empregar a fórmula baseada em múltiplas análises de regressão, de acordo com a Eq. 3.41.

$$C_{pmax} = \exp (1.377 + 2.419a^1 - 0.873a^3 + 9.624a^5) \quad (3.41)$$

## 4 DINÂMICA DO SISTEMA

Neste capítulo, são abordadas questões relativas ao movimento da embarcação, se deslocando sob velocidade constante e com incidência de ondas pela proa. Para todas as análises foi considerada a seguinte hipótese: a embarcação como um corpo rígido, que se desloca em um meio fluido homogêneo e invíscido, que escoar de forma incompressível.

### 4.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O modelo em estudo retrata um navio de perfil esbelto. Com a hipótese de pequenos movimentos da embarcação, é possível empregar a teoria linear, o que possibilita uma série de simplificações ao problema em estudo.

#### 4.1.1 Considerações iniciais

O escoamento é dito irrotacional quando o vetor vorticidade é nulo, conforme a Eq. 4.1. Um vetor com rotacional nulo deve corresponder ao gradiente de uma determinada função escalar (no caso, a função do potencial de velocidade), de acordo com a Eq. 4.2. Como também é incompressível, a condição de continuidade decorrente resulta na equação de Laplace para o potencial de velocidade, apresentada na Eq. 4.3.

$$\nabla \times \vec{V} = \vec{0} \quad (4.1)$$

$$\vec{V} = \nabla \phi \quad (4.2)$$

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (4.3)$$

Sendo:

- $\vec{V}$  o vetor velocidade;
- $\nabla$  o operador nabla; e
- $\phi$  o potencial de velocidade.

Através da linearização das condições na superfície livre, é possível simplificar o problema em questão, desprezando termos de ordem superior. Essa consideração é válida ao se considerar pequenas amplitudes de onda, relativas ao seu comprimento característico.

Neste ponto, é necessário estabelecer condições de contorno adequadas ao problema. A condição dinâmica significa que a pressão na superfície livre ( $z = \zeta$ ) é igual à atmosférica. Empregando a equação de Bernoulli, obtém-se a Eq. 4.4. A condição cinemática na superfície livre estabelece que a velocidade vertical da partícula de água é idêntica à da superfície (a partícula de água na superfície livre permanece na mesma), resultando na relação apresentada na Eq. 4.5. As formulações são válidas para a média da superfície líquida ( $z = 0$ ), que combinadas resultam na condição de superfície livre (Eq. 4.6).

$$g\zeta + \frac{\partial\Phi}{\partial t} = 0 \quad (4.4)$$

$$\frac{\partial\zeta}{\partial t} = \frac{\partial\Phi}{\partial z} \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial^2\Phi}{\partial t^2} + g\frac{\partial\Phi}{\partial z} = 0 \quad (4.6)$$

A Eq. 4.6 pode ser reescrita ao se considerar o potencial de velocidade correspondente à oscilação harmônica com frequência  $\omega$  (Eq. 4.7).

$$-\omega^2\Phi + g\frac{\partial\Phi}{\partial z} = 0 \quad (4.7)$$

### 4.1.2 Ondas regulares

Uma solução muito útil para a equação de superfície livre envolve um sistema de ondas progressivas sinusoidais. A elevação da superfície livre pode ser descrita pela Eq. 4.8. O correspondente potencial de velocidade para a onda incidente sinusoidal em águas profundas é dado pela Eq. 4.9. Os parâmetros  $\omega$  e  $k$  são mutuamente dependentes, podendo ser empregada a relação de dispersão para águas profundas (Eq. 4.10).

$$\zeta = \zeta_a \cos(kx - \omega t + \varepsilon) \quad (4.8)$$

$$\Phi_0 = \frac{g\zeta_a}{\omega} e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (4.9)$$

$$k = \frac{\omega^2}{g} \quad (4.10)$$

Sendo:

- $\zeta$  a elevação da superfície livre;
- $\zeta_a$  a amplitude de onda;
- $\omega$  a frequência circular; e
- $k$  o número de onda.

Considerando a embarcação se deslocando com velocidade constante  $U$  e incidência de ondas pela proa, pode-se determinar a frequência de encontro  $\omega_e$  (Eq. 4.11).

$$\omega_e = \omega + \frac{\omega^2}{g} U \quad (4.11)$$

Através do potencial da onda, é possível determinar as componentes de velocidade das partículas do fluido, de acordo com a Eq. 4.12 e a Eq. 4.13.

$$v_x = \frac{\partial \Phi_0}{\partial x} = \omega \zeta_a e^{kz} \cos(kx - \omega t) \quad (4.12)$$

$$v_z = \frac{\partial \Phi_0}{\partial z} = \omega \zeta_a e^{kz} \sin(kx - \omega t) \quad (4.13)$$

Estas componentes de velocidade possuem mesma amplitude, com diferença de fase de  $90^\circ$ , o que representa um movimento orbital das partículas, em um raio de dimensão  $\zeta_a e^{kz}$ . A Figura 4.1 ilustra o movimento oscilatório para a condição de águas profundas. Conclui-se que, conforme a profundidade aumenta, a velocidade decai exponencialmente, uma observação muito útil e que será lembrada no próximo capítulo. O fenômeno apresentado é conhecido por “Efeito Smith” e, segundo LEWIS (1988), para profundidades acima de meio comprimento de onda o efeito da pressão hidrodinâmica das ondas é praticamente nulo.

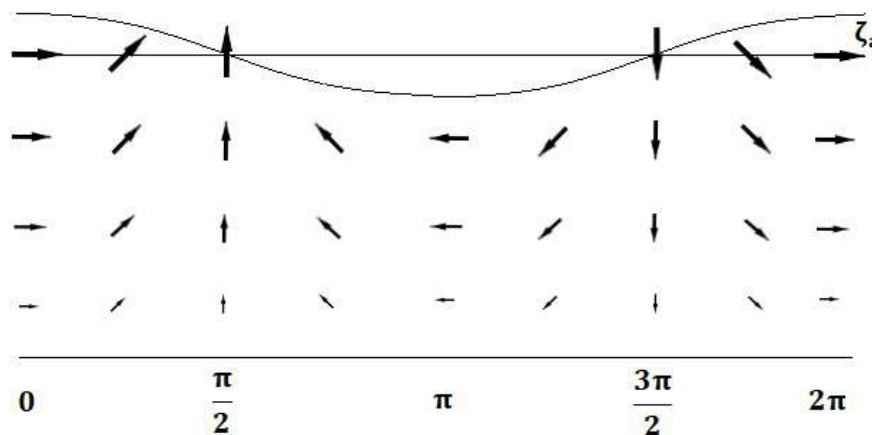


Figura 4.1 - Movimento orbital das partículas e o “Efeito Smith”.

### 4.1.3 Dinâmica do corpo rígido

O sistema de referência adotado neste trabalho está de acordo com a Figura 4.2, ilustrando os movimentos de translação de índices 1, 2 e 3, e rotação correspondendo a 4, 5 e 6. Como foi investigado unicamente a situação com incidência de ondas pela proa, apenas os movimentos no plano vertical foram analisados. Adicionalmente, segundo SALVESEN, TUCK e FALTINSEN (1970), para navios longos e com simetria transversal, as forças hidrodinâmicas associadas ao movimento de *surge* são muito inferiores a dos demais modos, podendo ser desprezadas sem prejuízo à solução. Portanto, o sistema foi simplificado ao considerarmos unicamente os movimentos de *heave* e *pitch*.

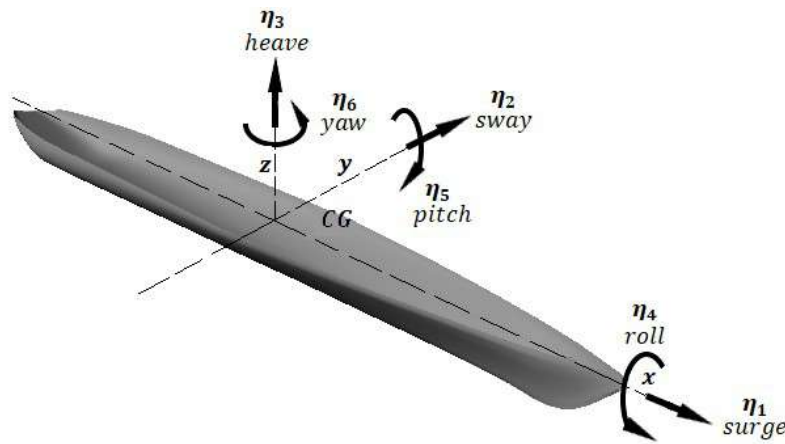


Figura 4.2 - Definição do sistema de referência.

Assumindo que o corpo oscile harmonicamente, os movimentos em notação complexa podem ser descritos pelas Eqs. 4.14, 4.15 e 4.16.

$$\eta_i = \bar{\eta}_i e^{i\omega t}, i = 3,5 \quad (4.14)$$

$$\dot{\eta}_i = i\omega \bar{\eta}_i e^{i\omega t}, i = 3,5 \quad (4.15)$$

$$\ddot{\eta}_i = -\omega^2 \bar{\eta}_i e^{i\omega t}, i = 3,5 \quad (4.16)$$

Sendo:

- $\bar{\eta}_i$  a amplitude complexa do movimento na direção  $i$ .

De forma geral, as equações de movimento para um navio oscilando em ondas podem ser descritas de acordo com a segunda lei de Newton, Eq. 4.17.

$$\sum \vec{F}^{EXT} = m\vec{a} \quad (4.17)$$

Segundo FALTINSEN (1990), em proveito da teoria linear, forças e momentos externos podem ser decompostos em:

- Excitação, compostos pela parcela de Froude Krilov e pela difração, considerando o corpo com seus movimentos restritos, sujeito à incidência das ondas; e
- Radiação, causados pela oscilação do corpo, em uma superfície líquida inicialmente não perturbada.

Estes podem ser obtidos integrando a pressão atuante na superfície do casco submersa, de acordo com a Eq. 4.18 e a Eq. 4.19. As pressões são obtidas com os potenciais de velocidade, utilizando a formulação de Bernoulli linearizada (Eq. 4.20).

$$\vec{F}_3 = \iint_S (p\vec{n})dS \quad (4.18)$$

$$\vec{F}_5 = \iint_S p(\vec{r} \times \vec{n})dS \quad (4.19)$$

$$p = -\rho \left( \frac{\partial \Phi}{\partial t} + gz \right) \quad (4.20)$$

Considerando o corpo deslocando-se em relação à posição inicial do centro de gravidade, o potencial de velocidade deve satisfazer a condição de contorno na superfície do casco, conforme a Eq. 4.21. Conclui-se que o potencial pode ser representado pelo somatório da Eq. 4.22.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} = \vec{U}\vec{n} + \vec{\Omega}(\vec{r} \times \vec{n}) \quad (4.21)$$

$$\Phi = \sum_j \phi_i U_i \quad (4.22)$$

Sendo:

- $\vec{U}$  o vetor velocidade de translação do corpo;
- $\vec{\Omega}$  o vetor velocidade de rotação; e
- $\phi_i$  o potencial de velocidade por unidade de velocidade relativo ao movimento  $i$ .



O potencial  $\phi_i$  também está de acordo com a condição de contorno na superfície do corpo, de acordo com a Eq. 4.23 e a Eq. 4.24.

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial n} = \vec{n}_i, i = 3 \quad (4.23)$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial n} = (\dot{\vec{r}} \times \vec{n}_i), i = 5 \quad (4.24)$$

Para ondas incidentes e movimentos da embarcação de pequena amplitude, o potencial de velocidades pode ser representado pela Eq. 4.25. A primeira parcela da igualdade está relacionada com o efeito de radiação, a segunda diz respeito à excitação do corpo pelas ondas.

$$\Phi = Re \left\{ \left( \sum_{j=3,5} \bar{\eta}_j \phi_j + \zeta_a (\phi_0 + \phi_7) \right) e^{i\omega t} \right\} \quad (4.25)$$

Sendo:

- $\phi_j$  o potencial de velocidade por unidade de deslocamento relativo ao movimento  $j$ ;
- $\phi_0$  o potencial de ondas incidentes por unidade de deslocamento; e
- $\phi_7$  o potencial de ondas incidentes difratadas por unidade de deslocamento.

De acordo com a condição de contorno na superfície do corpo, para amplitudes  $\eta$  independentes, obtém-se a Eq. 4.26 e a Eq. 4.27.

$$\frac{\partial \phi_j}{\partial n} = i\omega \vec{n}_j, i = 3 \quad (4.26)$$

$$\frac{\partial \phi_i}{\partial n} = i\omega (\dot{\vec{r}} \times \vec{n}_i), i = 5 \quad (4.27)$$

Aplicando a Eq. 4.20 na Eq. 4.25, resulta em outra expressão para a pressão, conforme a Eq. 4.28. De acordo com a Eq. 4.18 e a Eq. 4.19 é possível calcular as forças e momentos do sistema, dados pela Eq. 4.29.

$$p = -\rho \left( Re \left\{ \frac{\partial}{\partial t} \left[ \left( \sum_{j=3,5} \bar{\eta}_j \phi_j + \zeta_a (\phi_0 + \phi_7) \right) e^{i\omega t} \right] \right\} \right) - \rho g z \quad (4.28)$$

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \vec{F}_3 \\ \vec{F}_5 \end{pmatrix} = & -\rho g \iint_S \begin{pmatrix} \vec{n} \\ \vec{r} \times \vec{n} \end{pmatrix} z ds - \rho Re \sum_{j=3,5} i\omega \vec{\eta}_j e^{i\omega t} \iint_S \begin{pmatrix} \vec{n} \\ \vec{r} \times \vec{n} \end{pmatrix} \phi_j ds \\ & - \rho Re i\omega \zeta_\alpha e^{i\omega t} \iint_S \begin{pmatrix} \vec{n} \\ \vec{r} \times \vec{n} \end{pmatrix} (\phi_0 + \phi_7) ds \end{aligned} \quad (4.29)$$

A igualdade possui três grupos. O primeiro termo está relacionado com a restauração, seguido pela parcela hidrodinâmica (massa adicionada e amortecimento) e o último sendo o componente de excitação. Resumidamente, as contribuições das forças externas podem ser subdivididas conforme a Eq. 4.30.

$$F_j^{EXT} = F_j^S + F_j^H + F_j^E, j = 3,5 \quad (4.30)$$

Sendo:

- $F_j^S$  a parcela de restauração;
- $F_j^H$  a parcela de radiação hidrodinâmica; e
- $F_j^E$  a parcela de excitação.

#### 4.1.3.1 Forças de radiação

A força e momento de restauração são obtidos pela Eq. 4.31. Por definição, podem ser representados pela Eq. 4.32. Os coeficientes podem ser simplificados de acordo com as Eqs. 4.33, 4.34 e 4.35. A restauração independe da frequência de oscilação do corpo, variando apenas com sua geometria.

$$\begin{pmatrix} \vec{F}_3^S \\ \vec{F}_5^S \end{pmatrix} = -\rho g \iint_S \begin{pmatrix} \vec{n} \\ \vec{r} \times \vec{n} \end{pmatrix} z ds \quad (4.31)$$

$$\vec{F}_j^S = \sum_{i=3,5} C_{ij} \vec{\eta}_i, i = 3,5 \quad (4.32)$$

$$C_{33} = \rho g A_{wl} \quad (4.33)$$

$$C_{35} = C_{53} = -\rho g I_{55} \quad (4.34)$$

$$C_{55} = \rho g \nabla GM_L \quad (4.35)$$

Os componentes hidrodinâmicos podem ser obtidos de acordo com a Eq. 4.36. O termo do integrando na Eq. 4.37, é calculado juntamente com a Eq. 4.26. A forma apresentada na Eq. 4.38 também é válida para apresentar este componente, já indicando

os coeficientes de massa adicionada e de amortecimento, ambos fortemente influenciados pela frequência de oscilação (além da própria forma do corpo). As forças podem ser representadas de acordo com a Eq. 4.39.

$$\vec{F}_j^H = Re \left\{ \sum_{j=3,5} \bar{\eta}_j e^{i\omega t} f_{ij} \right\}, i = 3,5 \quad (4.36)$$

$$f_{ij} = -\rho \iint_S \frac{\partial \phi_i}{\partial n} \phi_j dS \quad (4.37)$$

$$f_{ij} = \omega^2 A_{ij} - i\omega B_{ij} \quad (4.38)$$

$$\vec{F}_j^H = \sum_{j=3,5} \bar{\eta}_j (\omega_e^2 A_{ij} - i\omega_e B_{ij}), i = 3,5 \quad (4.39)$$

Segundo JOURNÉE (2003), o programa Octopus considera que os coeficientes de massa adicionada tendem ao infinito para frequências aproximadamente nulas (o programa na verdade efetua estes cálculos com valores de frequência muito baixos, mesmo que seja selecionado um intervalo partindo de 0).

Para frequências tendendo ao infinito, os coeficientes de massa para cada seção bidimensional baseada em formas de Lewis podem ser calculados (JOURNÉE, 2003 apud TASAI, 1959) de acordo com a Eq. 4.40.

$$M'_{33}(\omega \rightarrow \infty) = \frac{\rho\pi}{2} \left( \frac{B_S}{2(1 + a_1 + a_3)} \right)^2 ((1 + a_1)^2 + 3a_3^2) \quad (4.40)$$

Sendo:

- $M'_{33}$  o coeficiente de massa em heave na seção bidimensional; e
- $a_1$  e  $a_3$  os coeficientes de mapeamento para curvas de Lewis.

Para o amortecimento, analisando a região de frequências muito baixas ( $\omega \rightarrow 0$ ), o primeiro termo da Eq. 4.7 se anula, resultando na Eq. 4.41. A condição corresponde à substituição da superfície livre por um plano rígido, em ( $z = 0$ ).

Para altas frequências ( $\omega \rightarrow \infty$ ) o segundo termo da equação é anulado, pois passa a ser relativamente muito inferior ao primeiro, o que resulta na Eq. 4.42. Em ambos os casos, as condições impostas impossibilitam a existência de componentes de velocidade na superfície livre. Como consequência, o corpo oscilante não irá gerar ondas e o

amortecimento hidrodinâmico nestes limites de frequência é inexistente.

$$\frac{\partial \Phi_j}{\partial z} = 0 \quad (4.41)$$

$$\Phi_j = 0 \quad (4.42)$$

#### 4.1.3.2 Forças de excitação

O último termo de forças, relativo à excitação, é fornecido na Eq. 4.43. De acordo com o princípio da linearidade, a condição de contorno para o potencial na superfície do corpo, considerando os seus movimentos restritos é dado pela Eq. 4.44.

$$\begin{pmatrix} \vec{F}_3^E \\ \vec{F}_5^E \end{pmatrix} = -\rho Re i \omega \zeta_a e^{i\omega t} \iint_S \begin{pmatrix} \vec{n} \\ \vec{r} \times \vec{n} \end{pmatrix} (\phi_0 + \phi_7) ds \quad (4.43)$$

$$\frac{\partial \phi_7}{\partial n} = -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} \quad (4.44)$$

Outro modo de expressar a excitação, dado pela Eq. 4.45, considera a força ou momento com amplitude complexa (Eq. 4.46), obtido conjuntamente com a Eq. 4.26 e a Eq. 4.27. Segundo NEWMAN (1977), estas formulações podem ser empregadas para corpos com movimentos restritos ou livres, havendo distinção apenas para efeitos de segunda ordem.

$$\vec{F}_j^E = Re\{\zeta_a e^{i\omega t} \vec{X}_i\}, i = 3,5 \quad (4.45)$$

$$\vec{X}_i = -\rho \iint_S (\phi_0 + \phi_7) \frac{\partial \phi_i}{\partial n} ds, i = 3,5 \quad (4.46)$$

Sendo:

- $\vec{X}_i$  a amplitude complexa de excitação na direção  $i$ .

O potencial de ondas incidentes é conhecido, de acordo com a Eq. 4.9, faltando determinar o termo de difração. Com as condições de contorno no fundo e na superfície, a condição de radiação no infinito e empregando o teorema de Green, pode-se associar o potencial de difração ao de radiação, conforme a Eq. 4.47.

$$\iint_S \phi_i \frac{\partial \phi_7}{\partial n} = \iint_S \phi_7 \frac{\partial \phi_i}{\partial n}, i = 3,5 \quad (4.47)$$

Combinando as Eqs. 4.46 e 4.47, e em seguida considerando a condição da Eq. 4.44, foi obtida a Eq. 4.48.

$$\vec{X}_i = -\rho \iint_S \left( \phi_0 \frac{\partial \phi_i}{\partial n} + \phi_i \frac{\partial \phi_0}{\partial n} \right) ds, i = 3,5 \quad (4.48)$$

É possível verificar que o potencial de difração não está presente na equação. Desse modo, foi obtida uma formulação que expressa as forças de excitação sem a necessidade do cálculo para o potencial de difração. A partir deste conceito, foram estabelecidas as relações de HASKIND (1957).

O potencial de radiação está relacionado com o fluxo de energia, que por sua vez associa os termos de amortecimento. Para um elemento bidimensional, simétrico em relação ao plano longitudinal, é obtida a formulação da Eq. 4.49.

$$B_{ii} = \frac{|X_i|^2}{2\rho g V_g} \quad (4.49)$$

Sendo:

- $B_{ii}$  o amortecimento no grau de liberdade  $i$ ; e
- $V_g$  a velocidade de grupo da onda.

### 4.1.3.3 Equações do movimento

Os únicos graus de liberdade considerados neste estudo, relativos aos movimentos de *heave* e *pitch*, constituem um sistema com 2 equações diferenciais. Estas consideram o navio com velocidade média de avanço constante e movimentos de oscilação lineares e harmônicos. A solução foi obtida no domínio da frequência, resultando em amplitudes de movimento para cada frequência analisada. De acordo com SALVESEN, TUCK e FALTINSEN (1970), este sistema pode ser descrito de acordo com a Eq. 4.50 e a Eq. 4.51.

$$(M + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5 = F_3 e^{i\omega t} \quad (4.50)$$

$$(I_{55} + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 + A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 = F_5 e^{i\omega t} \quad (4.51)$$

Agrupando os termos em matrizes, as equações podem ser escritas segundo a Eq. 4.52. Na forma complexa, aplicando as Eqs. 4.14, 4.15 e 4.16, o sistema é dado pela Eq. 4.53.

$$(M + A)\ddot{\eta} + B\dot{\eta} + C\eta = Fe^{i\omega t} \quad (4.52)$$

$$-\omega^2(M + A)\bar{\eta}e^{i\omega t} + i\omega B\bar{\eta}e^{i\omega t} + C\bar{\eta}e^{i\omega t} = Fe^{i\omega t} \quad (4.53)$$

Através do sistema é possível obter as funções de transferência para os movimentos.

#### 4.1.4 Teoria das faixas

Para o cálculo de movimentos da embarcação, foi empregada uma metodologia baseada na teoria das faixas. JOURNÉE (2003) afirma que este tipo de técnica possibilita que os movimentos e excitações de um corpo flutuante tridimensional sejam obtidos utilizando resultados da teoria potencial bidimensional, ou seja, um problema típico 3D é simplificado para um 2D. A estrutura flutuante é dividida em seções (ou faixas), cada uma analisada como um elemento bidimensional. A técnica é voltada aos corpos esbeltos, com reduzida razão de boca por comprimento<sup>5</sup>.

Neste estudo, o casco foi subdividido em 21 seções, sendo calculados os coeficientes hidrodinâmicos e forças de excitação para cada uma. Posteriormente, tais valores foram integrados ao longo do casco, e em seguida o sistema de equações foi solucionado, obtendo-se as funções de transferência dos movimentos de interesse (*heave* e *pitch*).

Especificamente, para obtenção dos potenciais bidimensionais dos coeficientes, utilizou-se o método de faixas modificado proposto por TASAI (1969), considerado mais adequado para o problema com velocidade de avanço. O cálculo dos coeficientes hidrodinâmicos foi realizado através do método de multipolos, empregando transformadas de Lewis. Esse tipo de método, criado por URSELL (1949), originalmente retratava o problema de um semicírculo oscilando verticalmente na superfície livre.

O potencial de velocidade é representado na origem por uma fonte e um dipolo, além de uma série de potenciais de multipolos que decaíam conforme a distância aumenta (condição de superfície livre e radiação de ondas). A condição de contorno do corpo pode ser obtida após calculadas as intensidades das singularidades mencionadas. Para seções não singulares, foi empregado a técnica de transformação conforme. A função de mapeamento converteu uma seção do navio em um semicírculo. Desse modo,

---

<sup>5</sup> Segundo JOURNÉE (2003), a técnica pode ser aplicada de modo satisfatório em casco com razão boca por comprimento menor ou igual a 1:3.

o método de cálculos hidrodinâmicos de uma seção circular pode ser empregada em um modelo de seção típica do navio.

A metodologia descrita apresenta a desvantagem de não se adequar precisamente à geometrias com bulbo, quinas ou outras particularidades das embarcações. No entanto, como as variações de casco foram geradas através da própria técnica da transformada de Lewis, este problema não ocorreu.

O programa Seaway Octopus, com base nas geometrias de casco geradas pelo programa A, além de outros parâmetros<sup>6</sup>, efetuou os cálculos descritos anteriormente.

## 4.2 FREQUÊNCIA NATURAL

Basicamente, a dinâmica da embarcação foi simplificada à um problema de oscilação mecânico massa-mola-amortecedor, com a particularidade de possuir componentes que oscilam de acordo com a frequência (forças de excitação, massa adicionada e amortecimento). Estes sistemas possuem uma determinada frequência na qual oscilam livremente, sem excitação. Caso a configuração em questão não seja fortemente amortecida, é esperado que os movimentos de oscilação máximos ocorram em intervalos de frequência muito próximos aos da frequência natural calculada.

De forma simplificada, considerando as equações de movimento desacopladas, as frequências naturais não amortecidas de *heave* e *pitch* são determinadas de acordo com a Eq. 4.54 e a Eq. 4.55.

$$\omega_{n3} = \sqrt{\frac{C_{33}}{A_{33} + M}} \quad (4.54)$$

$$\omega_{n5} = \sqrt{\frac{C_{55}}{A_{55} + I_{55}}} \quad (4.55)$$

Enquanto as equações acopladas dos dois movimentos, desprezando os termos de excitação e amortecimento são apresentadas na Eq. 4.56.

$$\begin{bmatrix} -\omega^2(M + A_{33}) + C_{33} & -\omega^2 A_{35} + C_{35} \\ -\omega^2 A_{53} + C_{53} & -\omega^2(M + A_{55}) + C_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\eta}_3 \\ \bar{\eta}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.56)$$

<sup>6</sup> Adicionalmente, foi informado ao programa a velocidade de avanço, a posição longitudinal do CG, o calado considerado e ausência de banda/trim.

A solução pode ser obtida igualando o determinante da matriz principal a 0 (as demais soluções possíveis são triviais). O cálculo deste determinante resulta em uma equação de 4º grau, conforme a Eq. 4.57.

$$a\omega^4 + b\omega^2 + c = 0 \quad (4.57)$$

Os termos  $\omega^2$  são então substituídos pela variável  $u$ , transformando a igualdade em uma equação do 2º grau, de fácil solução. A Figura 4.3 consolida os dois métodos apresentados. Na Figura 4.3(a), é apresentada a curva gerada pelo polinômio de 2º grau, cujas raízes fornecem as frequências naturais de *heave* e *pitch* ao quadrado (indicadas com linhas tracejadas).

As Figuras 4.3(b) e 4.3(c) ilustram as frequências naturais para o sistema não acoplado (com valor indicado pela interseção entre as curvas contínuas). Através da Figura 4.3 é possível observar que as soluções, comparando o sistema acoplado ou não acoplado, apresentam valores muito próximos.

As frequências naturais foram calculadas pelo programa B, cujos resultados para cada uma das variantes do casco são apresentados no capítulo 5, juntamente com os gráficos de movimento.

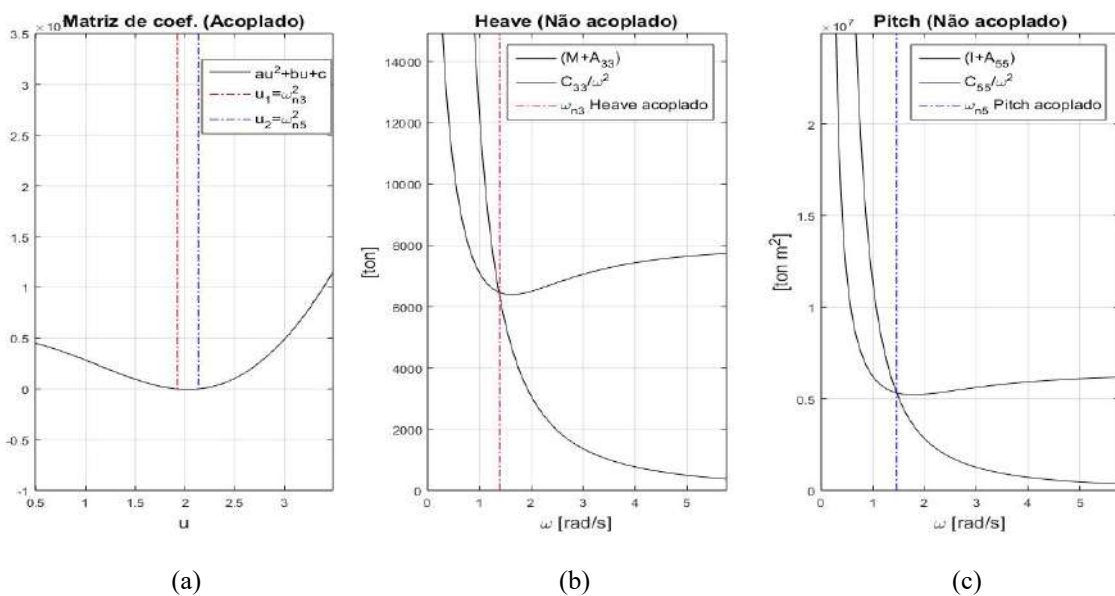


Figura 4.3 - Exemplo de cálculo das frequências naturais.



## 5 RESULTADOS E ANÁLISE

### 5.1 VALORES OBTIDOS PARA AS VARIAÇÕES DO CASCO

A Tabela 5.1 resume os valores máximos e mínimos obtidos para cada adimensional, já descartados os modelos reprovados em análise de estabilidade. O detalhamento dos valores, bem como os resultados da avaliação de estabilidade inicial e intacta foram inseridos no Apêndice E. O plano de balizas, plano de flutuação e representação 3D de cada um dos oito modelos gerados podem ser vistos no Apêndice F.

Tabela 5.1 - Valores extremos dos adimensionais.

Adimensional	Min(-)	Max(+)	Varição entre extremos (%)
LCB/L <sub>pp</sub>	0,447	0,510	14,09
C <sub>B</sub>	0,358	0,590	64,8
LCF/L <sub>pp</sub>	0,435	0,515	18,39
C <sub>wL</sub>	0,777	0,867	11,58

### 5.2 FORÇAS E COEFICIENTES GERADOS PELO OCTOPUS

O formato do casco pode exercer uma considerável influência na dinâmica do sistema. Os resultados das forças de excitação fornecidos pelo Octopus estão contidos no Apêndice G, enquanto os coeficientes de massa adicionada, amortecimento e restauração são apresentados no Apêndice H.

#### 5.2.1 Considerações gerais

O comportamento observado nos gráficos gerados pelo programa Matlab relativos as forças e coeficientes hidrodinâmicos tende a obedecer determinados padrões, em especial nos limites de frequência (intervalos de alta e baixa frequência), de acordo com as figuras desta seção.

### 5.2.1.1 Forças de excitação

Baseado na teoria apresentada na seção 4.1.2, sabe-se que as forças que atuam sobre o casco são o resultado da integração do campo de pressão e como este está relacionado com o potencial de velocidade da onda incidente, o qual apresenta um decaimento exponencial com a profundidade (Figura 4.1), é de se esperar que a região mais próxima à superfície livre seja mais suscetível às forças de excitação da onda.

As componentes de excitação do sistema podem ser representadas na forma adimensional de acordo com a Eq. 5.1 e a Eq. 5.2, segundo LEWIS (1988). É possível verificar que o denominador da Eq. 5.1 inclui o coeficiente de restauração do movimento em *heave*. A força em *pitch* foi dividida pelo número de onda, compondo juntamente com sua amplitude a inclinação máxima da onda.

$$\vec{F}'_3 = \frac{\vec{F}_3}{\rho g A_{WL} \zeta_a} \quad (5.1)$$

$$\vec{F}'_5 = \frac{\vec{F}_5}{\rho g l_{55} k \zeta_a} \quad (5.2)$$

A Figura 5.1(a) e a Figura 5.1(b) exibem as curvas de excitação adimensionalizadas de acordo com as Eqs. 5.1 e 5.2, fazendo com que ambas se aproximem de 1 para frequências próximas de 0. Desse modo, para o intervalo de pequenas frequências, foi concluído que:

- A força de excitação em *heave* - Figura 5.1(a) - aproximadamente se iguala ao componente de restauração ( $\rho g A_{WL}$  - vide Eq. 4.33) multiplicado pela amplitude de onda. Portanto, para geometrias de casco com maior área no plano de flutuação, é esperado que possuam excitação em *heave* mais significativa na região de baixas frequências; e
- A força de *pitch* adimensional - Figura 5.1(b) - obtida com a divisão da força pelo termo de máxima inclinação de onda ( $k \zeta_a$ ), possui a amplitude tendendo a 1, enquanto a força dimensional tende a 0 (justamente por haver momento de excitação em *pitch* aproximadamente nulo com a incidência de ondas relativamente longas neste intervalo).

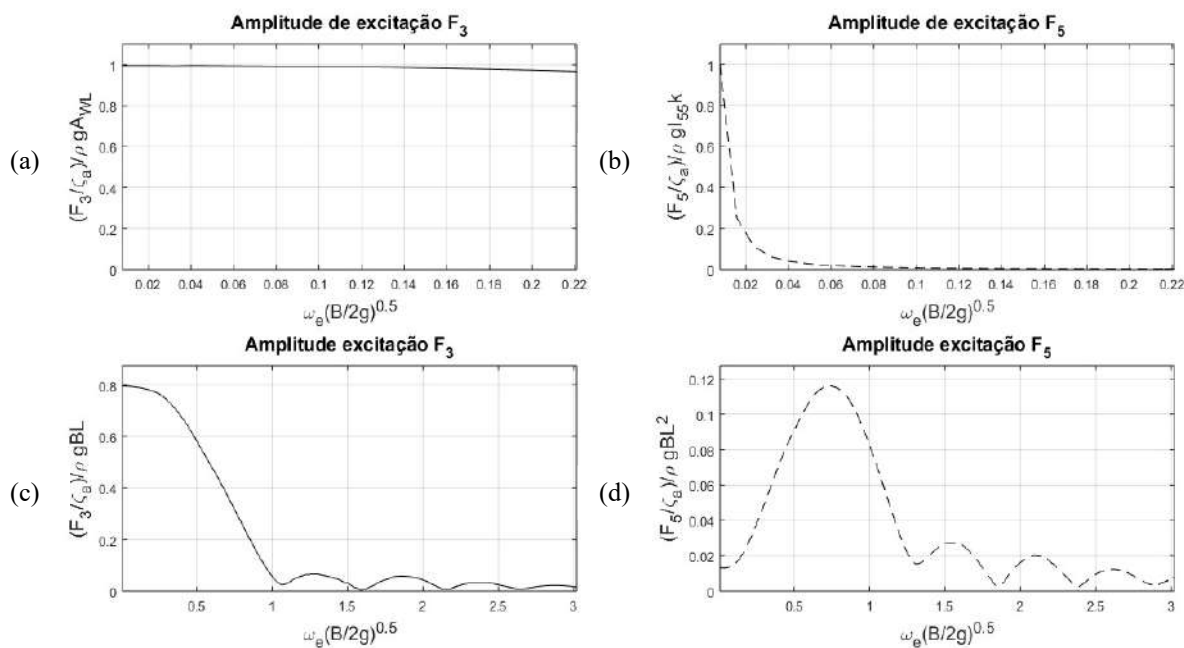


Figura 5.1 – Exemplo do comportamento das amplitudes de excitação.

A Figura 5.1(c) e a Figura 5.1(d) contém curvas que foram adimensionalizadas de modo a manter o aspecto idêntico ao daquelas fornecidas diretamente pelo Octopus<sup>7</sup>. Conforme observado, na região de altas frequências as excitações se aproximam de 0, resultado do cancelamento das ondas ao longo do casco. É comum que ocorra um pico de forças nas faixas de frequência intermediárias.

### 5.2.1.2 Coeficiente de amortecimento

A Figura 5.2 ilustra um típico resultado dos coeficientes de amortecimento obtidos com o programa Octopus. É possível observar o coeficiente tendendo a zero nos extremos do intervalo de frequência, pois o corpo não estará gerando ondas nestes intervalos.

<sup>7</sup> Os gráficos originais gerados pelo programa Octopus para as forças de excitação utilizam como formato: a componente de força dividida pela amplitude de onda ( $F_3/\zeta_a$ ) ou ( $F_5/\zeta_a$ ).

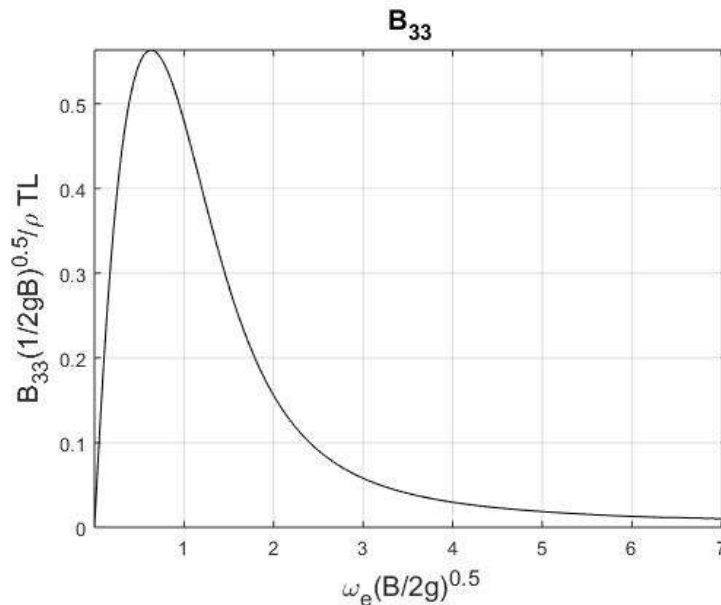


Figura 5.2 – Exemplo do comportamento para amortecimento em *heave*.

### 5.2.2 Variações de resultado mais expressivas entre extremos

Basicamente, as variações do coeficiente de bloco ( $C_B$ ) e da área de flutuação ( $C_{WL}$ ) resultaram em maiores oscilações para alguns componentes de excitação e radiação.

A Figura 5.3 ilustra a variação do amortecimento quando comparados os modelos de coeficiente de bloco extremos,  $C_B(+)$  e  $C_B(-)$ . Conforme já comentado, para fluido invíscido, o amortecimento do sistema ocorrerá através da geração de ondas pelo corpo flutuante.

É razoável considerar que uma estrutura com superfície perpendicular ao plano da superfície da água não será eficaz para geração de ondas através de oscilação vertical. Logo, o modelo  $C_B(+)$ , com casco de geometria mais próxima da condição perpendicular nas proximidades da superfície, apresentou menor amortecimento em *heave*, de acordo com a Figura 5.3. A curva de amortecimento relativa a  $C_B(+)$ , em azul, possui menores valores de amortecimento para toda a faixa de frequências analisada.

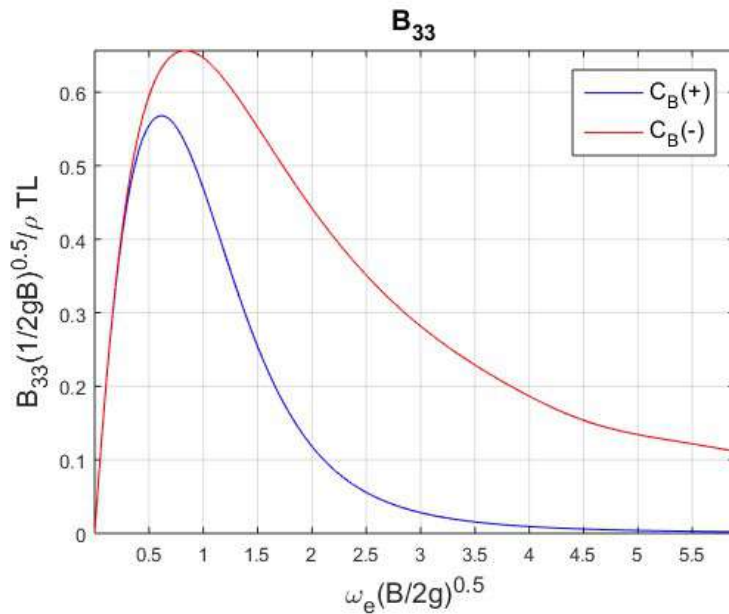


Figura 5.3 - Variação do amortecimento em função do  $C_B$ ,  $C_B(+)$  em azul e  $C_B(-)$  em vermelho.

Variações significativas de amortecimento e restauração também foram observadas ao se comparar as variações de casco  $C_{WL}(+)$  e  $C_{WL}(-)$ , conforme apresentado na Figura 5.4. O modelo  $C_{WL}(-)$  apresenta geometria menos propícia à geração de ondas (curvatura da porção superior mais próxima à uma “parede vertical”), o que poderia justificar o menor amortecimento ilustrado, de acordo com as Figuras 5.4(a) e 5.4(b).

Como  $C_{WL}(-)$  possui menor área no plano de flutuação, em decorrência direta da Eq. 4.33 é esperado que possua menor força de restauração para o movimento de *heave*, conforme a Figura 5.4(c). O casco  $C_{WL}(-)$  também possui menor altura do centro de carena, uma das parcelas da altura metacêntrica longitudinal. Com a altura sendo inferior, de acordo com a Eq. 4.35, é esperado que a restauração em *pitch* do casco  $C_{WL}(-)$  também seja menor, em consonância com a Figura 5.4(d).

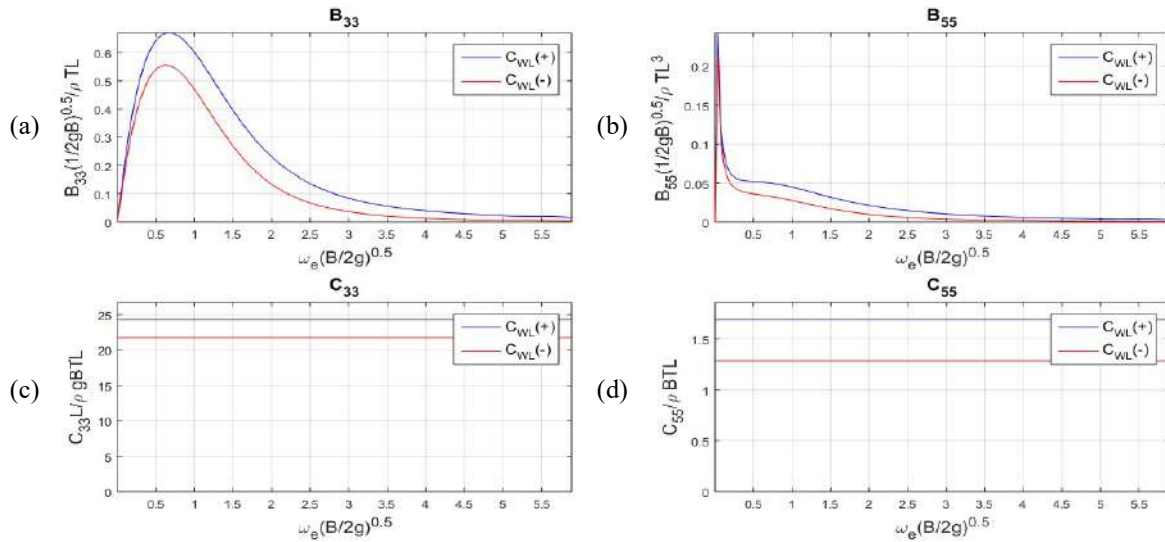


Figura 5.4 - Variação dos coeficientes de amortecimento ( $B_{33}$  e  $B_{55}$ ) e de restauração ( $C_{33}$  e  $C_{55}$ ) em função do CWL, CWL(+) em azul e CWL(-) em vermelho.

As forças de excitação dos modelos  $C_{WL}(+)$  e  $C_{WL}(-)$  apresentaram razoável diferença nos dois modos de excitação (*heave* e *pitch*). Como o casco  $C_{WL}(+)$  apresenta junto à superfície livre um formato mais favorável à atuação de componentes verticais das forças, é razoável considerar que este modelo esteja submetido à maiores excitações, em consonância com os gráficos da Figura 5.5 (as curvas de excitação de  $C_{WL}(+)$  apresentaram maiores amplitudes em quase todas as frequências). A área do plano de flutuação superior resulta em maior restauração vertical e maior excitação em *heave* para pequenas frequências (vide Eq. 5.1).

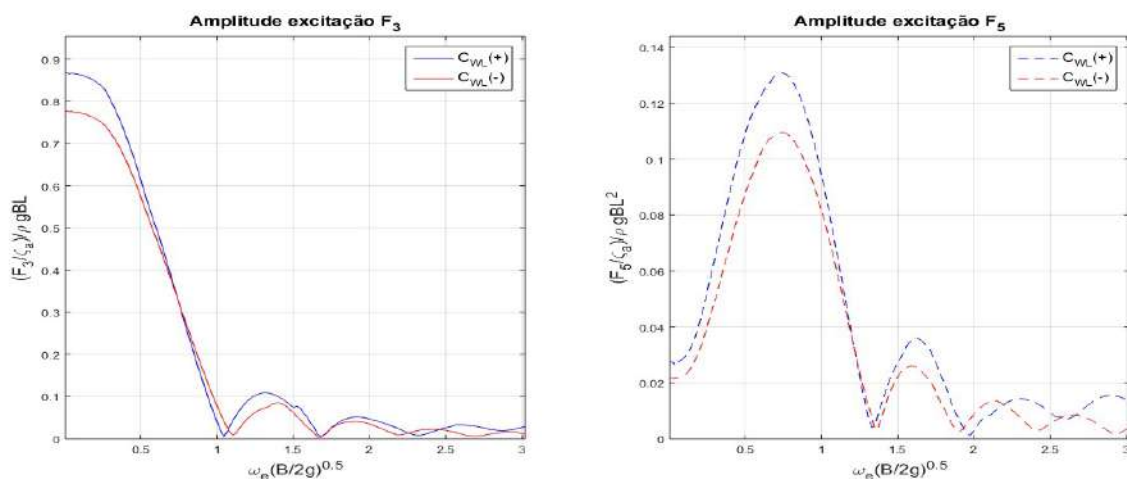


Figura 5.5 – Variação das amplitudes de excitação ( $F_3$  e  $F_5$ ) em função do CWL, CWL(+) em azul e CWL(-) em vermelho.

## 5.3 ANÁLISE DE MOVIMENTOS

### 5.3.1 Deslocamento relativo

Os gráficos dos componentes da função de transferência do deslocamento vertical relativo apresentam o comportamento ilustrado na Figura 5.6. Para baixas frequências (ondas relativamente longas) o navio tende a acompanhar a elevação da onda e sua declividade, motivo pelo qual as amplitudes de *heave* - Figura 5.6(a) - e *pitch* - Figura 5.6(b) - se aproximam, respectivamente, da amplitude da onda e de sua inclinação.

Nessa região de frequência praticamente não há variação da distância vertical da superfície livre com o ponto P, correspondendo aos valores iniciais da curva de deslocamento relativo. De acordo com a Figura 5.6(c) a amplitude desse deslocamento em baixas frequências é aproximadamente nula.

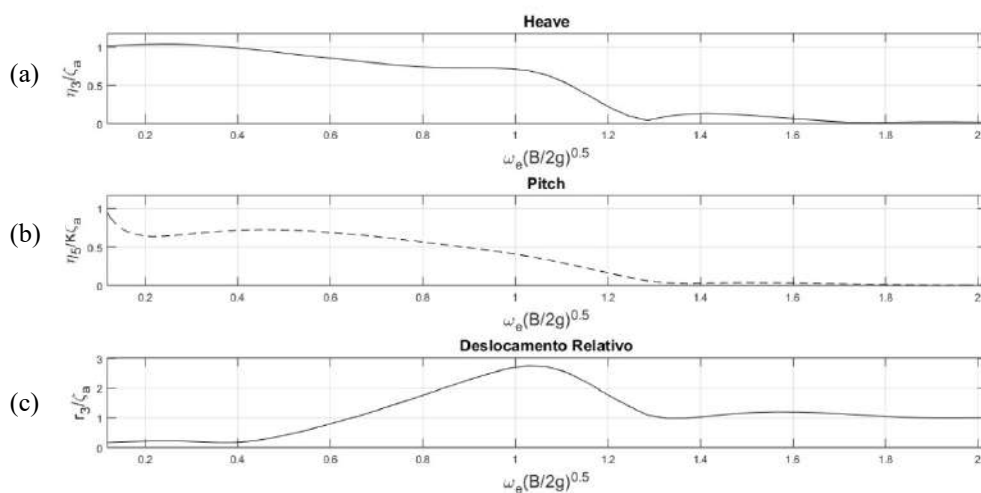


Figura 5.6 – Exemplo para curvas de *heave*, *pitch* e deslocamento relativo.

Em altas frequências, as amplitudes de *heave* e *pitch* são nulas, o movimento relativo se dará apenas pela oscilação das ondas. Por essa razão, na região de ondas curtas, a função de transferência entre o deslocamento e a amplitude de onda se aproxima do valor unitário, como pode ser observado na Figura 5.6(c).

A Figura 5.7 ilustra a composição do movimento vertical relativo no ponto P, em consonância com a Eq. 3.9. A Figura 5.7(a) contém as amplitudes relativas ao movimento de *heave* (curva contínua) e as componentes de *pitch* multiplicadas pela distância longitudinal do CG ao ponto P (curva tracejada). Também é representada a

amplitude unitária de onda (reta contínua em verde), que será constante para toda a faixa de frequências. Na Figura 5.7(b) além das curvas de deslocamento relativo, foram adicionados os dados de frequência natural para *heave* (com a letra “H”, e linha contínua) e *pitch* (com a letra P, indicada por uma linha tracejada).

Pela Figura 5.7(a), em baixas frequências ocorre apenas a contribuição do movimento de *heave* (o corpo executa apenas a translação vertical) e da parcela de ondas. O deslocamento relativo na região é nulo (vide Eq. 3.9), pois ambas as parcelas (movimento de *heave* e onda) são de mesmo módulo (unitário) e sentido. É importante ressaltar que a análise deve considerar tanto a amplitude quanto a fase dos movimentos (a composição completa do deslocamento relativo, incluindo a fase dos movimentos, foi incluída no Apêndice J).

Para ondas curtas, as contribuições de *heave* e *pitch* são muito pequenas, restando apenas a parcela unitária da onda, como pode ser observado na Figura 5.7(b) para valores de frequência maiores que 1.4.

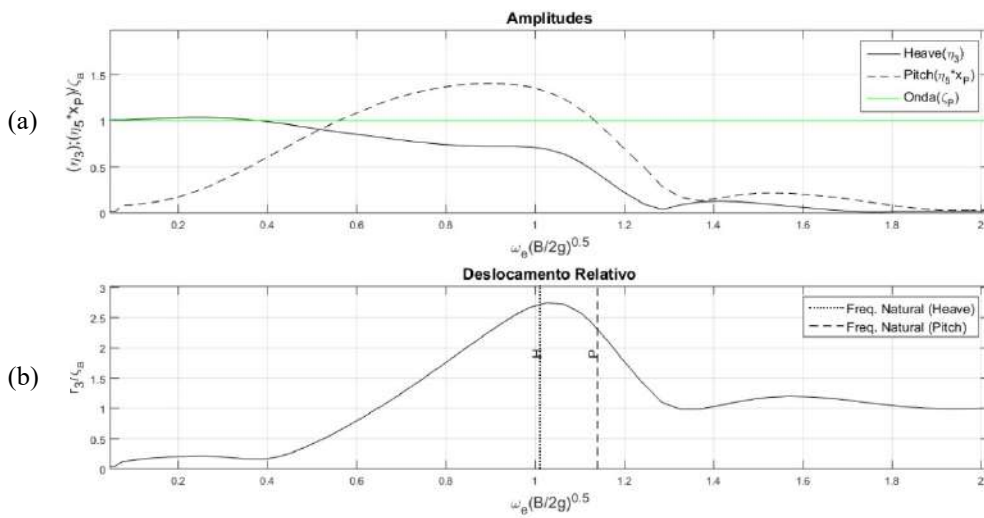


Figura 5.7 – Exemplo de componentes do deslocamento relativo.

A seguir, são apresentados os gráficos comparativos do movimento vertical relativo.

### 5.3.1.1 Deslocamento (LCB/L<sub>pp</sub>)

As curvas da Figura 5.8(a) ilustram a influência das amplitudes na composição do movimento. O casco LCB(+) apresentou maior deslocamento relativo em P na região de pico do movimento (valor da frequência em torno de 1). No intervalo de frequência



entre 1,2 e 1,6 houve uma inversão entre as curvas de deslocamento relativo por conta da fase entre os componentes do movimento.

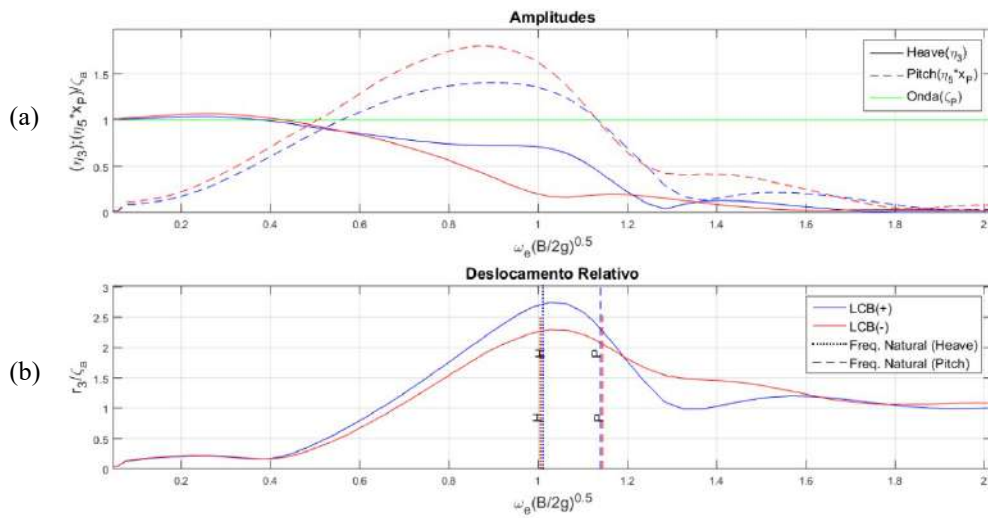


Figura 5.8 - Variação de amplitudes e deslocamento relativo em função do LCB, LCB (+) em azul e LCB (-) em vermelho.

### 5.3.1.2 Deslocamento ( $C_B$ )

Segundo BHATTACHARYA (1978), o movimento em *heave* nas proximidades da região de ressonância tende a ser mais elevado para coeficientes de bloco superiores, o que pode ser verificado na Figura 5.9(a). Tal consideração é consistente com o fato de que o modelo  $C_B(+)$  possui menor amortecimento.

Para os modelos com coeficientes de bloco extremos, é possível observar com base na Figura 5.9(b) que o incremento no  $C_B$  resultou em maior amplitude do deslocamento relativo, especialmente na região de pico do movimento (frequência em torno de 1,1).

Ainda pela Figura 5.9(b), verificou-se considerável diferença da frequência natural entre os cascos  $C_B(+)$  e  $C_B(-)$ , para os dois modos de oscilação. O modelo  $C_B(+)$  possui inércia e massa mais elevados, o que de acordo com as Eqs. 4.54 e 4.55 resulta em menores valores das frequências naturais para *heave* e *pitch*.

Em tempo, é importante ressaltar que a variação do adimensional de forma entre os cascos deste comparativo é a mais expressiva. Conforme a Tabela 5.1, a diferença percentual é cerca de 4 vezes superior à média das demais variações.

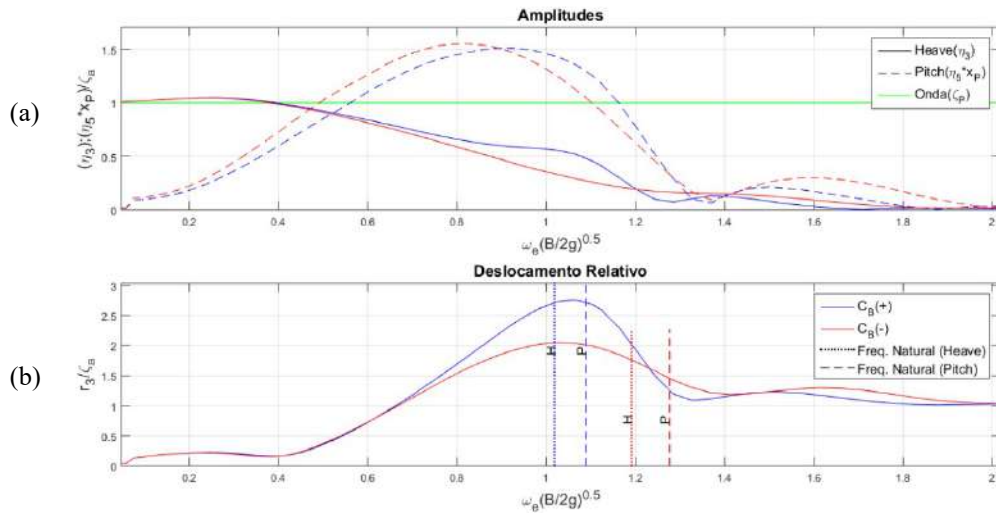


Figura 5.9 - Variação de amplitudes e deslocamento relativo em função do  $C_B$ ,  $C_B (+)$  em azul e  $C_B (-)$  em vermelho.

### 5.3.1.3 Deslocamento (LCF/ $L_{pp}$ )

A Figura 5.10 indica a tendência do movimento relativo entre as variantes para o centro de flutuação longitudinal. As contribuições das amplitudes (*heave* e *pitch*) mais elevadas para LCF(-) - apresentadas na Figura 5.10(a) - resultaram na maior amplitude do deslocamento vertical para o casco, conforme a Figura 5.10(b).

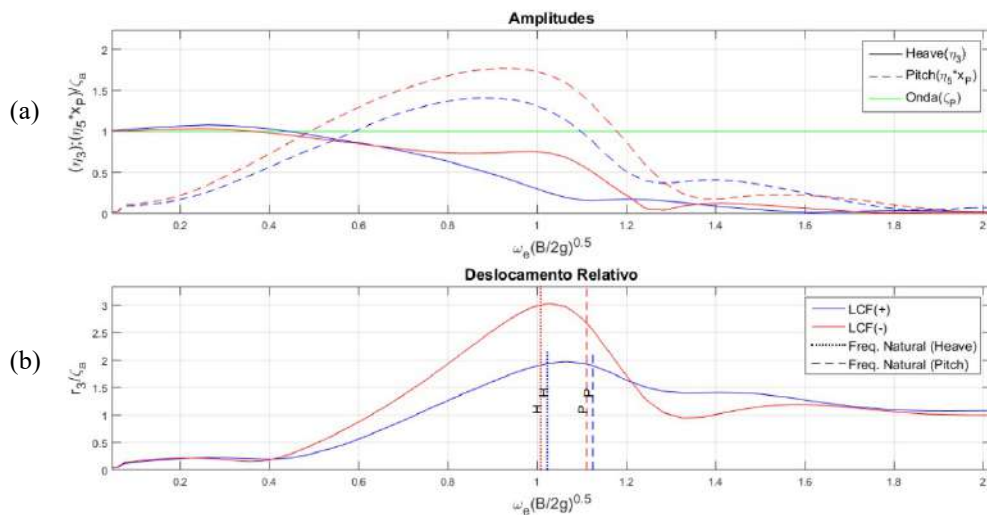


Figura 5.10 - Variação de amplitudes e deslocamento relativo em função do LCF, LCF (+) em azul e LCF (-) em vermelho.

### 5.3.1.4 Deslocamento ( $C_{WL}$ )

Verificou-se que o aumento na área de flutuação gerou uma atenuação no

deslocamento vertical relativo no ponto P, com as amplitudes dos componentes de *heave* e *pitch* inferiores para  $C_{WL}(+)$ , de acordo com a Figura 5.11(a). Assim, a variação de casco  $C_{WL}(+)$  apresenta menores respostas na função de transferência do deslocamento relativo, conforme a Figura 5.11(b).

Em relação ao casco  $C_{WL}(-)$ , os termos de restauração do modelo  $C_{WL}(+)$  são mais elevados (conforme a Eq. 4.33 e a Eq. 4.35, nas parcelas de área e do segundo momento de área, respectivamente), e logo as frequências naturais do casco  $C_{WL}(+)$  estão em regiões de frequência mais elevada (Eqs. 4.54 e 4.55), como pode ser visto na Figura 5.11(b).

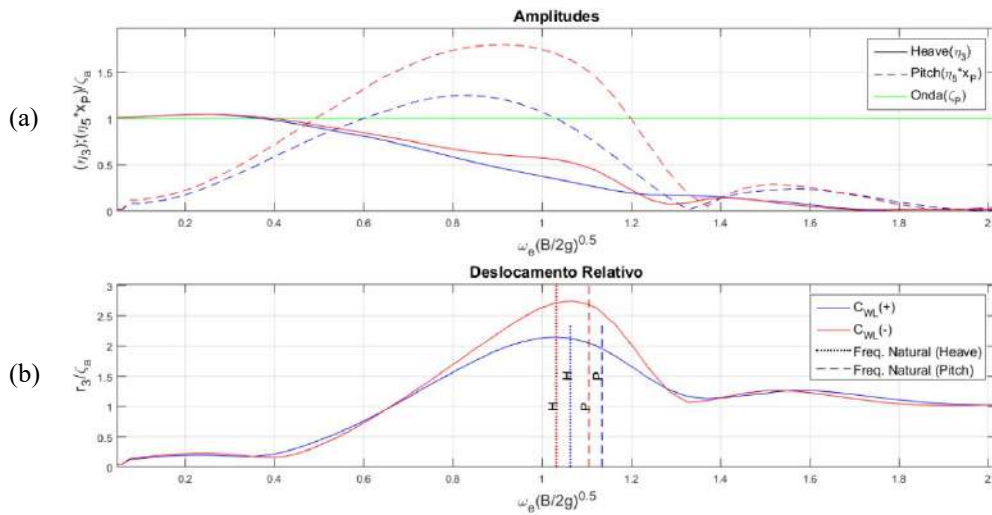


Figura 5.11 - Variação de amplitudes e deslocamento relativo em função do  $C_{WL}$ ,  $C_{WL}(+)$  em azul e  $C_{WL}(-)$  em vermelho.

### 5.3.2 Velocidade relativa

O resumo comparativo da velocidade vertical relativa do ponto para todas as 8 variações de casco está contido nos gráficos da Figura 5.12. As curvas de velocidade relativa, em módulo, podem facilmente ser obtidas a partir dos dados de deslocamento relativo, multiplicando-os pela respectiva frequência de encontro.

Para baixas frequências essa velocidade é próxima de zero. Em altas frequências, por restar apenas a parcela de onda, ocorre o incremento de velocidade relativa na mesma razão do aumento na frequência de encontro.

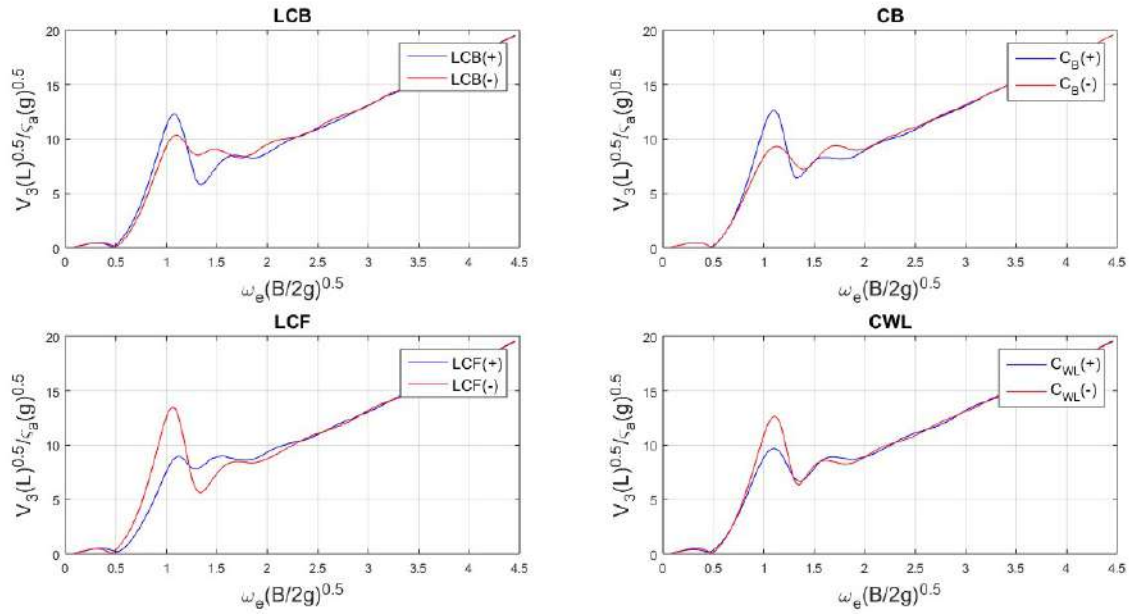


Figura 5.12 - Velocidade vertical relativa.

## 5.4 RESULTADOS DAS PREDIÇÕES DE *SLAMMING*

### 5.4.1 Probabilidade do evento

Os resultados para cada modelo de casco (probabilidade do evento<sup>8</sup> para longo prazo e número de incidências por hora) são apresentados na Tabela 5.2. Adicionalmente, a Figura 5.13 ilustra a relação entre a probabilidade de *slamming* com os correspondentes percentuais de variação dos coeficientes de forma do casco. A Sociedade Classificadora RINAMIL estabelece um limite de 20 incidências de *slamming* por hora.

Tabela 5.2 - Probabilidade de ocorrência.

Modelo	PR {slam} (%)	N/hr
Base	1,03	19
LCB(+)	1,36	25
LCB(-)	0,88	17
$C_B(+)$	1,33	25
$C_B(-)$	0,71	13

<sup>8</sup> Probabilidade de ocorrência por ciclo de onda.

LCF(+)	0,44	9
LCF(-)	1,87	34
C <sub>WL</sub> (+)	0,77	14
C <sub>WL</sub> (-)	1,33	25

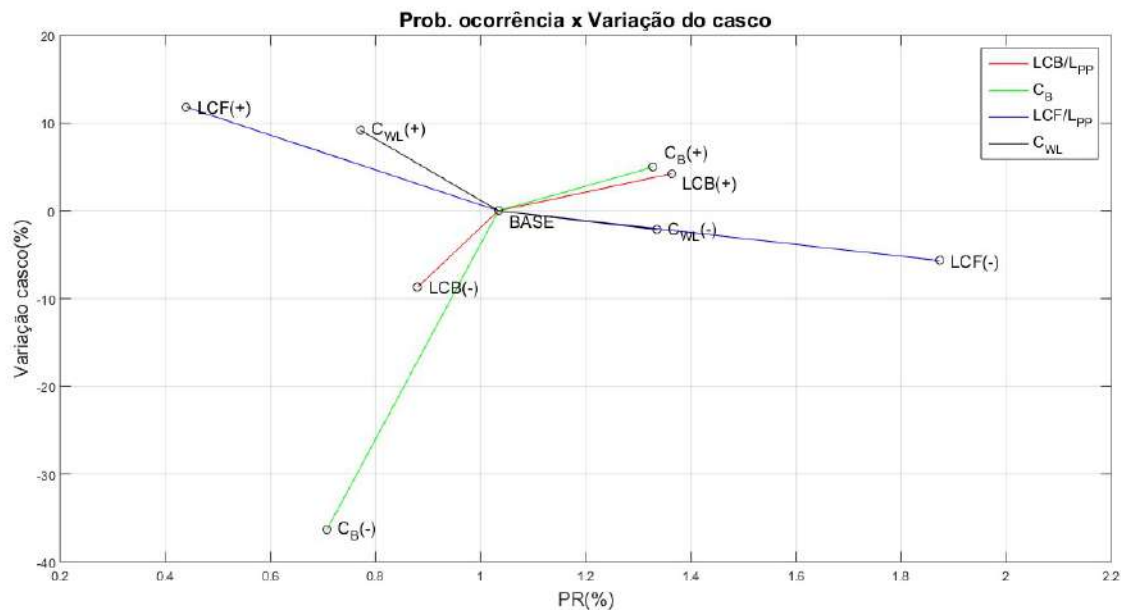


Figura 5.13 – Relação entre probabilidade de ocorrência e variação do casco.

Conforme apresentado na seção 3.1.4, além dos 8 modelos de casco extremos, cerca de 2000 variações do casco foram selecionadas no processo de geração, possuindo apenas 1 dos coeficientes de forma variável. De modo a ilustrar mais detalhadamente o comparativo da Figura 5.13, os dados da probabilidade de *slamming* referentes à modelos intermediários<sup>9</sup> foram acrescentados no gráfico da Figura 5.14.

De acordo com o gráfico, verificou-se para estes cascos intermediários que os valores da probabilidade de ocorrência em função da variação do coeficiente de forma seguem em geral a tendência apresentada na Figura 5.13. Entretanto, este comportamento não é regular, havendo consideráveis oscilações dependendo do adimensional.

<sup>9</sup> As variações de casco classificadas no processo mencionado na seção 3.1.4 e na análise de estabilidade, excluindo os 8 modelos de casco extremos [LCB(+), LCB(-), C<sub>B</sub>(+), C<sub>B</sub>(-), LCF(+), LCF(-), C<sub>WL</sub>(+) e C<sub>WL</sub>(-)], foram designadas como modelos de casco intermediários.

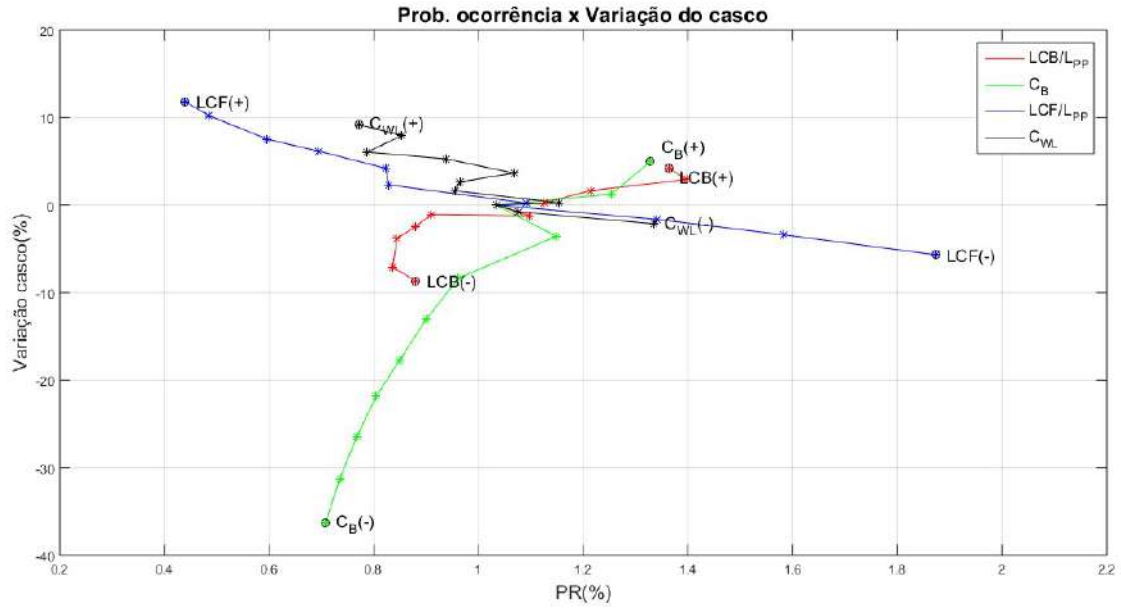


Figura 5.14 – Comparativo com modelos na faixa intermediária.

A Tabela 5.3 contém o percentual de variação de adimensionais (coluna 2) e a respectiva alteração na probabilidade de ocorrência do *slamming* (coluna 3). Pela leitura, o incremento do LCB/L<sub>pp</sub> ou C<sub>B</sub> aumenta a probabilidade do evento, ao passo que um casco com LCF/L<sub>pp</sub> ou C<sub>WL</sub> maiores apresentaria menor probabilidade de ocorrência.

A última coluna apresenta a razão entre a variação da probabilidade de *slamming* e a variação do coeficiente de forma. O coeficiente de bloco apresentou a menor taxa de variação, enquanto a alteração do centro longitudinal de flutuação correspondeu à maior variação da probabilidade de ocorrência do evento.

Tabela 5.3 – Variação do casco e probabilidade de ocorrência.

Adimensional	Variação extremos <sup>10</sup> (%)	Variação PR {Slam} (%)	[PR {Slam}/Var.]*100
LCB/L <sub>pp</sub>	14,09	0,48	3,42
C <sub>B</sub>	64,8	0,62	0,96
LCF/L <sub>pp</sub>	18,39	-1,43	-7,79
C <sub>WL</sub>	11,58	-0,56	-4,87

<sup>10</sup> Considerou-se a variação do adimensional menor (-), para o maior (+). Como exemplo, do casco LCB(-) para o casco LCB(+), houve variação do coeficiente de forma em 14,09%, resultando em incremento de 0,48% na probabilidade de *slamming*.

## 5.4.2 Pressão de impacto

Neste item, foi consolidado o comparativo dentre as pressões de impacto estimadas para as 8 variações de casco e o modelo original, com as três metodologias apontadas na seção 3.3.2. De acordo com a Figura 5.15, é possível verificar a tendência de redução da força de impacto com o aumento do ângulo de fundo (vide Figura 2.1). Verifica-se com o auxílio das Figuras F.1, F.2, F.3 e F.4 (Apêndice F), que o aumento deste ângulo ocorreu especialmente com a redução do LCB e do  $C_B$ .

Em consonância com ZHAO (1996), a solução de Wagner tende a fornecer estimativas de pressão superiores a Von Karman. Cabe ressaltar que o primeiro método considera a seção com pequeno ângulo de fundo, o pressuposto inicial de seu embasamento teórico. Em tempo, também é interessante constatar que as predições empíricas de OCHI e MOTTER (1971) forneceram resultados compreendidos entre os valores obtidos pelos métodos de VON KARMAN (1929) e WAGNER (1932).

Embora não seja possível com base apenas em tais formulações assegurar a acurácia das predições, elas constituem um bom indicativo para comparação entre as variações de casco analisadas.

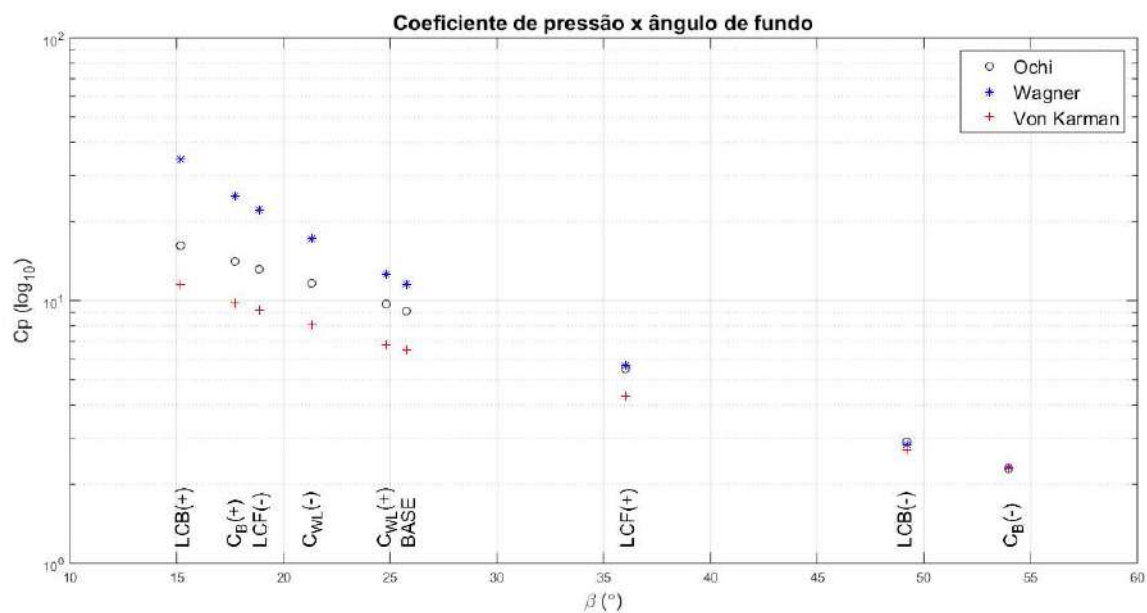


Figura 5.15 - Relação entre ângulo de fundo e  $C_p$ .

## 5.4.3 Comparativo geral

A pressão estimada de *slamming* pode ser obtida pela Eq. 3.36 com valores do

coeficiente de pressão e da velocidade relativa no ponto P. Foi considerada para a velocidade de impacto o valor médio quadrático (RMS), através da Eq. 3.28 e da Eq. 5.3. Como na seção 3.2.2.1, foi utilizado nesta estimativa o espectro de Bretschneider com  $H_{1/3}$  de 5 metros e um período entre zeros ascendentes de 8 segundos.

A Tabela 5.4 e a Tabela 5.5 contém todas as pressões obtidas para o modelo base e as variantes do casco.

$$RMS_V = \sqrt{m_{0V}} \quad (5.3)$$

Tabela 5.4 - Comparativo de pressões para o modelo Base, LCB(+), LCB(-), C<sub>B</sub>(+) e C<sub>B</sub>(-).

Método	Variações	Base	LCB(+)	LCB(-)	C <sub>B</sub> (+)	C <sub>B</sub> (-)
	V (m/s)	3,1	3,2	3,1	3,3	2,9
Von Karman	C <sub>p</sub>	6,5	11,6	2,7	9,8	2,3
	P (kN/m <sup>2</sup> )	32,4	62,3	13,1	53,5	10,1
Wagner	C <sub>p</sub>	11,6	34,5	2,8	25,1	2,3
	P (kN/m <sup>2</sup> )	57,7	185,7	13,7	136,8	10,2
Ochi	C <sub>p</sub>	9,2	16,2	2,9	14,1	2,3
	P (kN/m <sup>2</sup> )	45,7	87,3	14,1	76,7	10,2

Tabela 5.5 - Comparativo de pressões para o modelo Base, LCF(+), LCF(-), C<sub>WL</sub>(+) e C<sub>WL</sub>(-).

Método	Variações	Base	LCF(+)	LCF(-)	C <sub>WL</sub> (+)	C <sub>WL</sub> (-)
	V (m/s)	3,1	2,8	3,4	3,0	3,3
Von Karman	C <sub>p</sub>	6,5	4,3	9,2	6,8	8,1
	P (kN/m <sup>2</sup> )	32,4	17,3	55,5	30,5	44,1
Wagner	C <sub>p</sub>	11,6	5,7	22,1	12,5	17,2
	P (kN/m <sup>2</sup> )	57,7	22,6	133,7	56,4	94,3
Ochi	C <sub>p</sub>	9,2	5,5	13,2	9,7	11,6
	P (kN/m <sup>2</sup> )	45,7	22,0	79,6	43,4	63,5



A Sociedade Classificadora DNV-GL estabelece que uma embarcação com notação de serviço irrestrita deve ser projetada para suportar um impacto de *slamming* correspondente à formulação da Eq. (5.4).

$$P = \frac{21}{\tan \beta} C_w \left(1 - \frac{20T}{L}\right) \left(\frac{0,3}{A}\right)^{0,3} \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad (5.4)$$

Sendo:

- $\beta$  o ângulo de fundo;
- T o calado;
- $C_w$  para navios com operação irrestrita e maiores de 100 m, igual a  $6 + 0,02L$ ; e
- A igual a  $0,002\Delta/T$ .

A seguir, é apresentado na Tabela 5.6 um comparativo entre pressões estimadas pelo método de OCHI e MOTTER (1971) e os limites previstos de acordo com a DNV-GL, calculados para cada modelo. É possível verificar que as variações atendem aos requisitos da Sociedade Classificadora, porém é importante ressaltar que tais resultados estão vinculados à um estado de mar específico, bem como à velocidade considerada de 18 nós.

Tabela 5.6 – Pressões pelo método de Ochi e limites da DNV-GL

Modelo	P (kN/m <sup>2</sup> )	
	Ochi	DNV-GL
Base	45,67	63,2
LCB(+)	87,29	112,5
LCB(-)	14,07	26,3
C <sub>B</sub> (+)	76,71	93,9
C <sub>B</sub> (-)	10,19	25,4
LCF(+)	21,96	42,0
LCF(-)	79,64	89,4
C <sub>WL</sub> (+)	43,39	66,0
C <sub>WL</sub> (-)	63,53	78,3

Com base nos dados de probabilidade de ocorrência e pressão de impacto, foi elaborado um comparativo geral, conforme apresentado na Figura 5.16. Segundo LLOYD (1989), um incremento no coeficiente da área de flutuação à vante seria benéfico ao permitir aumento da boca local, alterando os coeficientes hidrodinâmicos de forma benéfica, ou seja, reduzindo os movimentos relativos do casco na região de *slamming*.

De modo geral, os 4 modelos com melhor comportamento para este tipo de evento (*slamming*) possuem cascos com o perfil das balizas em “V” nas seções de vante. Modelos com grande ângulo de fundo terão a pressão de impacto aliviada em comparação aos demais, de acordo com o estudo comparativo entre cascos na seção 5.4.2. Neste comparativo foram considerados os coeficientes de pressão resultantes da formulação empírica de OCHI e MOTTER (1971).

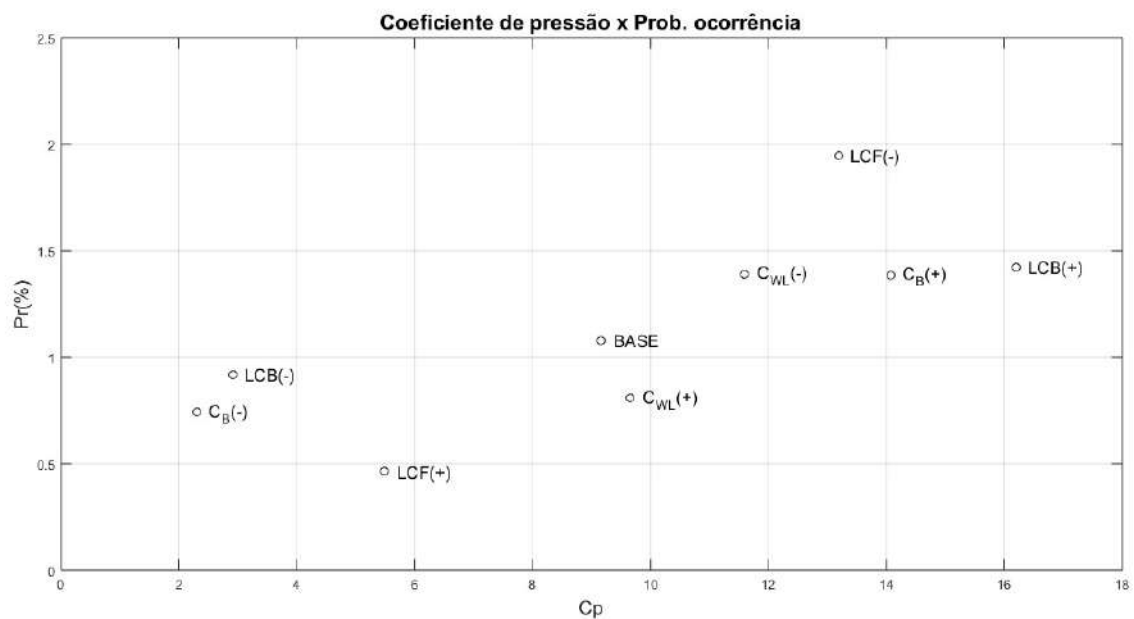


Figura 5.16 - Relação entre  $C_p$  e probabilidade de ocorrência.

## 6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A investigação desenvolvida ao longo do texto foi baseada na relação entre variações de determinados parâmetros geométricos de um casco (LCB,  $C_B$ , LCF e  $C_{WL}$ ) e as consequências no seu desempenho envolvendo predições de *slamming*. Algumas considerações importantes sobre a metodologia empregada e os resultados obtidos são listados a seguir.

Inicialmente, foi verificada a importância do controle durante a variação paramétrica do casco objetivando soluções de modelos viáveis. Mesmo com a imposição de diversas restrições geométricas, algumas variações de casco foram reprovadas em critérios básicos de estabilidade. O emprego de funções polinomiais no código para geração de modelos eliminou a possibilidade de transições de contorno bruscas entre as seções, tornando as formas de casco mais próximas à realidade.

O uso das técnicas de Lewis para representação das seções do casco através de dois parâmetros possibilitou a simplificação no processo de geração de cascos, com um número de parâmetros de entrada e tempo de processamento muito reduzido. Entretanto, a variação das curvas de seção com este método torna-se consideravelmente limitada, não possibilitando contornos de geometria com quinas, formatos de bulbo, dentre outros.

A ferramenta Octopus foi adequada ao esquema de trabalho desta dissertação. O programa trabalha com arquivos de entrada e saída que em sua maioria são de simples leitura e manuseio por outros códigos, facilitando a obtenção dos dados e sua interpretação, especialmente nas etapas intermediárias do processo (como a análise das informações sobre os coeficientes hidrodinâmicos e as forças de excitação). Ele também possibilita a montagem de diagramas estatísticos do mar na região de interesse, através do seu banco de dados.

Com relação aos resultados, o trabalho envolveu a pesquisa dos três objetivos principais mencionados na introdução. Os dados obtidos indicam que todos os quatro parâmetros de forma selecionados exercem influência nos movimentos da embarcação, e conseqüentemente nas predições de *slamming*. O método para criação de variações do casco resultou em oscilações extremas de parâmetros diferenciadas, particularmente para o coeficiente de bloco, com valores cerca de quatro vezes acima dos demais, fato ressaltado através da Figura 5.13 e da Tabela 5.3.

De acordo com as predições de *slamming* detalhadas no capítulo 5, os parâmetros de área ( $LCF/L_{PP}$  e  $C_{WL}$ ) exerceram maior influência na estimativa da probabilidade de ocorrência, possuindo tendência de redução das probabilidades com o aumento dos coeficientes de forma, enquanto os parâmetros relacionados ao volume ( $LCB/L_{PP}$  e  $C_B$ ) possuem menor influência, com tendência de aumento da probabilidade pelo incremento dos coeficientes. A alteração do coeficiente de bloco, que irá gerar um maior impacto em termos de concepção preliminar no projeto de navio, resultou na menor oscilação da probabilidade de ocorrência. Logo, seria o parâmetro menos indicado para a otimização do projeto visando a redução do *slamming*.

Os intervalos de frequência natural apresentaram considerável diferença quando comparados os valores dos modelos com coeficiente de bloco e da área de flutuação máximos e mínimos, o que representa outra consequência importante a ser analisada pelo projetista.

Ao observar o comparativo de pressões de impacto, é possível verificar que a força estimada obtida por todos os métodos empregados reduz inversamente com o ângulo de fundo. O modelo LCF(+), uma das variações melhor classificadas, ilustra um típico caso favorável em ambas as predições. Possui seções de vante em formato afilado, característica benéfica em termos de pressão, bem como menor probabilidade de impacto pelo formato da área de flutuação à vante ( $LCF$  e  $C_{WL}$  favoráveis à redução do *slamming*).

Seria interessante em trabalhos posteriores incluir o uso de modernas ferramentas baseadas na Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) para cálculos da pressão de impacto e análise dos movimentos. Elas podem incorporar modelos para representar outros fenômenos, como a formação de bolsões de ar na região de impacto.

Outros parâmetros de forma também poderiam ser abordados no estudo, como o coeficiente da seção mestra, altura do centro de carena e coeficiente prismático, indicadores igualmente importantes na definição da geometria do casco. A inclusão da análise dos movimentos horizontais do casco (*roll*, *yaw* e *sway*), não abordados no texto, representaria mais um considerável complemento à pesquisa.

O uso de ferramentas mais elaboradas para alteração no formato do casco poderia facilitar e enriquecer o processo para geração de novas variantes. A limitada técnica de curvas de Lewis com dois parâmetros pode ser expandida a três destes, viabilizando a

elaboração de contornos do casco mais complexos, incluindo geometrias com bulbo, por exemplo.

Finalmente, os conceitos e resultados da dissertação podem ser empregados em estudos preliminares para o projetos de navios (fase em que geralmente há uma considerável margem à mudanças no projeto), constituindo mais uma ferramenta indicativa durante a modelagem do casco e definição sobre algumas de suas características principais.

## 7 REFERÊNCIAS

ATHANASSOULIS, G. L. "An extended-Lewis form family of ship sections and its applications to seakeeping calculations". *International Shipbuilding Progress*, Vol. 32, No. 366. 1985.

BALES, N. K. (1980). "Optimizing the seakeeping performance of destroyer-type hulls". *Thirteenth Symposium on Naval Hydrodynamics*. Tokyo, Japan.

BELGA, F. C. (s.d.). 2017, "Seakeeping optimization of a fast displacement catamaran on the basis of strip-theory codes". M.Sc. dissertation, Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.

CHUANG, S. (1966). "*Slamming with rigid edge-sharped bodies with various deadrise angles*". Washington, D.C.

CONOLLY, J. (1974). "Standards of good seakeeping for destroyers and frigates in head seas". *International Symposium on the Dynamics of Marine Vehicles and Structures in*. London, U.K.

DNV-GL. (2015). "*Rules for classification of high speed and light craft*".

DOBROVOL'SKAYA, Z. (1969). "On some problems of similarity flow of fluid with a free surface". *Journal of fluid mechanics* , 805-829.

DOUSSET, S. J. (s.d.). 2015, "Water entry of a free falling ridge edge: an experimental investigation". M.Sc. dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro .Rio de Janeiro, Brasil.

ENGLE, A. L. (2003). "A comparison of hydrodynamic impacts". *Marine structures* , 175-182.

FALTINSEN, O. M. (1990). *Sea loads on ships and offshore structures. 1. ed.* Cambridge: Cambridge University Press.

FARIN, G. E. (2000). *The Essentials of CAGD*. Natick, Massachusetts: A K Peters/CRC Press.

FONSECA, M. M. (2002). *Arte Naval. 6 ed.* Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha.

GERRITSMAN, J. S. (1967). "Full-scale destroyer motion measurements". *Journal of*

*Ship Research* .

GRIGOROPOULOS, G. J. (1988). "A new method for developing hull forms with superior seakeeping qualities". *CADMO '88*. . Southampton, U.K.

GRIGOROPOULOS, G. J. (2004). "Hull form optimization for hydrodynamic performance". *Marine Technology* , pp. 167-182.

HASKIND, M. (1957). "The exciting forces and wetting of ships in waves". *Izvestia Akademii Nauk SSSR, Otdelenie Tskhnicheshikh Nauk* , pp. 65 - 79.

JOURNÉE, J. M. (2003). "*Theoretical manual of strip theory program SEAWAY for Windows*". TUD Report No. 1370.

KAPSENBERG, G. K. (2005). " Finding the hull form for given seakeeping characteristics ". *MARIN, Wageningen, the Netherlands* .

KAPSENBERG, G. K. (2011). "Slamming of ships: where are we now?". *The Royal Society* , 2892-2919.

KORVIN- KROUKOVSKY, B. J. (1957). "Pitching and Heaving Motions of a Ship in Regular Waves". *Transactions SNAME, 1957, No. 65* , 590-632.

LANDWEBER. L., M. M. (1959). "Added mass of a three parameter family of two dimensional forms oscillating in a free surface". *Journal of ship research* .

LEWIS, E. V. (1988). *Principles of Naval Architecture volume III. 3 ed.* Jersey City, NJ: SNAME The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 1988.

LEWIS, F. M. (1929). "The inertia of water surrounding a vibrating ship". *In transactions SNAME*.

LLOYD, A. R. (1989). *Seakeeping: ship behaviour in rough weather*. Chichester: Elis Horwood Limited.

MACAGNO, M. (1967). "*A comparison of three methods for computing the added mass of ship sections*". Iowa city: University of Iowa.

NEWMAN, J. N. (1977). *Marine hydrodynamics*. Cambridge University Press.

OCHI, M. K. (1964). "Prediction of occurrence and severity of ship slamming at sea". *Proceedings of 5th O.N.R. Symposium*. Bergen, Norway.

OCHI, M. K., MOTTER, L. E. (April de 1971). "A method to estimate slamming

characteristics for ship design". *Marine Technology Vol.8, No.2* .

OCHI, M. K., MOTTER, L. E. (1973). "Prediction of slamming characteristics and hull responses for ship design". SNAME.

PRICE, W. G., BISHOP, R. E. D. (1974). *Probabilistic theory of ship dynamics*. Chap.& H.

RINAMIL. (2017). "Rules for the Classification of Naval Ships". Genova.

SALVENSEN, N. T. (1970). "Ship motions and sea loads". *SNAME* , 104, p. 250.

SMITH, W. (1966). *"Equation of motion coefficients for a pitching and heaving destroyer model"*. TUDelft, Ship Hydromechanics Laboratory.

TASAI, F. (1969). "Improvements in the theory of ship motions in longitudinal waves". *Proceedings 12th I.T.T.C.*

URSELL, F. (1949). "On the heaving motion of a circular cylinder on the surface of a fluid". *The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics* , 218–231.

VON KARMAN, T. (1929). *"The impact on seaplane floats during landing"*. Washington, DC: NACA Technical Note.

VUGTS, J. H. (1968). *"The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface"*.

WAGNER, H. (1932). "Über Stoss und Gleitvorgänge an der Oberfläche von Flüssigkeiten". *Z. Angew. Math. Mech.*, v. 12 , 193-215.

WANG, S. (2011). *"Assessment of slam induced loads on two dimensional wedges and ship"*. Lisboa: Insitudo Superior técnico.

WHITE, F. M. (2010). *Mecânica dos fluidos*. 6<sup>a</sup> ed. São Paulo: McGraw-Hill.

YETTOU, E. D. (2007). "A new analytical model for pressure estimation of symmetrical". *Journal of fluids and structures* , 501-522.

ZHAO, R. E. (1996). Water entry of arbitrary two-dimensional sections with and without flow separation. *Symposium on naval hydrodynamics*.

ZHAO, R. (1993). "Water entry of two dimensional bodies". *Journal of fluid mechanics* , 593-612.



# APÊNDICE A. PROGRAMA A

Este apêndice inclui o código elaborado em Fortran que compõe o programa A, utilizado nas etapas pré-processamento do Octopus. Resumidamente, ele é responsável por gerar versões alteradas do casco base através de 6 parâmetros de entrada, além de calcular algumas de suas propriedades hidrostáticas. O programa exporta a nova geometria através de 3 formatos diferentes, compatíveis com o Octopus, o FreeShip e o Rhinoceros (formato de pontos). Por fim, ele efetua os cálculos de pressão de acordo com as 3 técnicas apresentadas no texto.

Para geração automática de novas geometrias do casco, foram efetuadas as seguintes alterações no código:

- Inclusão de estruturas de repetição para as 6 variáveis de entrada, ao invés da leitura do “input AB.txt”; e
- Nas últimas linhas de código, inclusão de 4 filtros para a seleção das variações de casco.

```
!=====
! PROGRAMA A
! - Efetua a leitura do arquivo contendo o casco base
1 - Efetua a leitura dos inputs para alteração da geom. (S1, S2, S3, B1, B2, B3)
! - Gera o contorno de casco no plano de flutuação
! - Gera balizas com a técnica de Lewis
! - Efetua o cálculo de coeficientes de forma do casco
! - Gera borda livre
! - Efetuar os cálculos da pressão de impacto
! - Gera arquivo de casco compatível com o Octopus
! - Gera arquivo de casco compatível com o FreeShip
! - Gera arquivo de casco compatível com o formato de pontos do Rhinoceros
!=====
  program CodigoA
!=====
! DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS
integer :: i,j,k,o,s,p,dm,skip,baliz
real*4, dimension(420) :: x,y,z ! Coordenadas do casco Base
real*4, dimension(420) :: xh,yh,zh,yhm,zhm ! Pontos para cálculos hidrostáticos
real*4, dimension(462) :: xf,yf,zf
real*4, dimension(201) :: bxar,byar,bxav,byav,tb,bzar,bzav
real*4, dimension(200) :: tetam,yk,zk
real*4, dimension(1000) :: alm,a3,a5,as,bs,cs,deltam,alfal,bet,n
real*4, dimension(21) :: sig,T,B,sx,sy,ts,syb,px,pz,pzb,gama,a1,a2 ! Dados p/ Lewis
real*4, dimension(20) :: teta,yt,zt,xli,yli,zli
real*4, dimension(40) :: w,wb,we,lambda,fadm
real*4, dimension(15) :: fat
real*4, dimension(8) :: fri
real*4, dimension(4) :: xcr,ycr,xcv,ycv,zcr,zcv
real*4, dimension(3) :: siga,sigc
real*4 :: lcb,volt,volxt,lmax,bmax,tmax,vmax,cb,rho,desl,lcf,kb,kl,kwag,kkar,lwl,&
&bk,tx,ix,ixt,ixre,ixtr,nc,kll,klm
!=====
! LEITURA/ESCRITA DE DADOS
open (2,file='inputAB.txt',status='old') ! Dados do navio
open (3,file='inputA.txt',status='old') ! Dados do modelo Base
open (4,file='casco.HUL',status='unknown') ! Arquivo de saída no formato Octopus
open (5,file='hidro.out',status='unknown') ! Coeficientes de forma do casco
open (6,file='free.txt',status='unknown') ! Arquivo de saída no formato FreeShip
open (7,file='sup1.out',status='unknown') ! ângulos do contorno na sup. livre
```

```

open (8,file='slam.out',status='unknown') ! Pressão de impacto e ang. fundo
open (9,file='rhino.out',status='unknown') ! Arquivo de saída no formato pts. Rhino
!=====
! LEITURA DE PONTOS DO CASCO BASE
do i=1,420
  read(3,*) x(i),y(i),z(i)
end do
!=====
! LEITURA DE PARÂMETROS DO INPUT AB
do i=1,14
  read (2,*) fat(i)
end do
o=fat(7) ! Número de pontos por baliza
s=fat(8) ! Número de seções
rho=fat(9)
v=fat(10)
baliz=fat(14)
lwl=112.4
p=0
pi=3.14159
dm=o*s
rad=(2*pi/360)
deg=(360/(2*pi))
!=====
! CÁLCULO PARA CONTORNO DO PLANO DE FLUTUAÇÃO (POPA E CURVAS DE BÉZIER)
do i=1,3
  siga(i)=fat(i)
end do
do i=1,21
  sx(i)=x(1+((i-1)*o))
  sy(i)=y(1+((i-1)*o))
end do
sy(1)=sy(11)*siga(3) ! Largura da popa
do i=1,((o*10)+1)
  tb(i)=0.005*(i-1)
end do
xcr(1)=sx(1) ! Curva de Bézier da popa
xcr(2)=(0.8*sx(1))
xcr(3)=(0.2*sx(1))
xcr(4)=sx(11)
ycr(1)=sy(1)
ycr(2)=(siga(1)*sy(11)*1.5)
ycr(3)=sy(11)*1.2
ycr(4)=sy(11)
do i=1,((o*10)+1)
  bxar(i)=(((1-tb(i))**3)*xcr(1))+ (3*tb(i)*((1-tb(i))**2)*xcr(2))+ (3*(tb(i)**2)*(1-tb(i))**3)*xcr(3))+ ((tb(i)**3)*xcr(4))
  byar(i)=(((1-tb(i))**3)*ycr(1))+ (3*tb(i)*((1-tb(i))**2)*ycr(2))+ (3*(tb(i)**2)*(1-tb(i))**3)*ycr(3))+ ((tb(i)**3)*ycr(4))
end do
xcv(1)=sx(11) ! Curva de Bézier da proa
xcv(2)=(0.2*sx(21))
xcv(3)=(0.9*sx(21))
xcv(4)=sx(21)
ycv(1)=sy(11)
ycv(2)=sy(11)*1.2
ycv(3)=(siga(2)*sy(11)*1.5)
ycv(4)=sy(21)
do i=1,((o*10)+1)
  bxav(i)=(((1-tb(i))**3)*xcv(1))+ (3*tb(i)*((1-tb(i))**2)*xcv(2))+ (3*(tb(i)**2)*(1-tb(i))**3)*xcv(3))+ ((tb(i)**3)*xcv(4))
  byav(i)=(((1-tb(i))**3)*ycv(1))+ (3*tb(i)*((1-tb(i))**2)*ycv(2))+ (3*(tb(i)**2)*(1-tb(i))**3)*ycv(3))+ ((tb(i)**3)*ycv(4))
end do
do i=1,((s-1)/2)
  do j=1,((o*10)+1)
    if ((abs(sx(i)-bxar(j))).LT.1) then
      syb(i)=byar(j)
    end if
  end do
end do
do i=(((s-1)/2)+1),s
  do j=1,((o*10)+1)
    if ((abs(sx(i)-bxav(j))).LT.1) then
      syb(i)=byav(j)
    end if
  end do
end do

```

```

end do
do i=1,21
  if (syb(i).GT.sy(11)) then ! Limite da curva até a boca máxima
    syb(i)=sy(11)
  end if
end do
do i=1,11
  if (syb(i).LT.sy(1)) then ! Limite da curva até a boca máxima
    syb(i)=sy(1)
  end if
end do
pzb(11)=0
!=====
! CÁLCULO PARA SEÇÕES (CURVAS DE LEWIS)
do i=4,6
  sigc(i-3)=fat(i)
end do
do i=1,s
  ts(i)=0.05*(i-1)
end do
do i=1,s ! Interpolação das seções intermediárias
  sig(i)=((1-ts(i))**2)*sigc(1)+(2*(1-ts(i))*ts(i)*sigc(2))+((ts(i)**2)*sigc(3))
end do
do i=1,(s-1) ! Cálculo das curvas de Lewis para cada seção
  B(i)=syb(i)
  T(i)=abs(pz(i)-z(1))
  H=B(i)/T(i)
  C=3+((4*sig(i))/pi)+(1-((4*sig(i))/pi))*(((H-1)/(H+1))**2)
  a2(i)=(3-C+(9-2*C)**0.5)/C
  a1(i)=(1+a2(i))*((H-1)/(H+1))
  a0=T(i)/(1-a1(i)+a2(i))
  teta(1)=0
  do j=1,(o-1)
    teta(j+1)=(j*pi)/(2*(o-1))
  end do
  do k=1,(s-1)
    yt(k)=a0*(((1+a1(i))*sin(teta(k)))-(a2(i)*sin(3*teta(k))))
    zt(k)=a0*(((1-a1(i))*cos(teta(k)))+(a2(i)*cos(3*teta(k))))
  end do
  ztmax=zt(1) ! Inversão da curva
  do k=1,(s-1)
    zt(k)=abs(ztmax-zt(k))
  end do
  delta=(z(1)-zt(o)) ! Ajuste da posição da curva na coordenada z
  do k=1,(s-1)
    zt(k)=zt(k)+delta
  end do
  do j=1,(s-1)
    y(1+(o*i)-j)=yt(j)
    z(1+(o*i)-j)=zt(j)
  end do
end do
do i=1,dm ! Restrição inferior da curva até o calado projetado
  if (z(i).GT.4.01) then
    z(i)=4.01
  end if
end do
!=====
! CÁLCULOS HIDROSTÁTICOS / COEFICIENTES DE FORMA
do i=1,dm
  xh(i)=x(i)
  yh(i)=y(i)
  zh(i)=z(i)
end do
do i=1,(dm-o)
  yhm(i)=(yh(i)+yh(i+o))/2
  zhm(i)=(zh(i)+zh(i+o))/2
end do
esp=abs(x(o+1)-x(1))
volt=0 ! Cálculos volumétricos
volxt=0
volzt=0
do i=1,(s-1)
  do j=1,(o-1)
    bp=zhm(1)-zhm(j+((i-1)*o))
    bg=zhm(1)-zhm(j+1+((i-1)*o))
    alt=yhm(j+((i-1)*o))-yhm(j+1+((i-1)*o))
  end do
end do

```

```

    cenr=zhm(j+((i-1)*o))+(bp/2)
    cent=zhm(j+1+((i-1)*o))+((bg-bp)*2/3)
    trap=((bp+bg)*alt)/2
    aret=bp*alt
    atri=(bg-bp)*(alt/2)
    vol=trap*esp
    volt=volt+vol
    xm=((xh(1+(o*(i-1))))+(xh(1+(o*i))))/2
    volx=vol*xm
    volz=(aret*esp*cenr)+(atri*esp*cent)
    volxt=volxt+volx
    volzt=volzt+volz
  end do
end do
lmax=abs(x(1))*2
bmax=abs(y((dm-o)/2)+1)
tmax=4.01
vmax=(lmax*bmax*tmax)
lcb=volxt/volt ! Posição longitudinal do centro de carena
kb=volzt/volt ! Altura do centro de carena
cb=volt/vmax ! Coeficiente de bloco
desl=(rho*volt*2) ! Deslocamento
areal=0 ! Cálculos de área
area2=0
areax1=0
areax2=0
do i=1,(s/2)
  bp1=yh(1+((i-1)*o))
  bg1=yh(1+(i*o))
  cenr1=(esp/2)+xh(1+((i-1)*o))
  cent1=(esp*(2/3))+xh(1+((i-1)*o))
  aret1=bp1*esp
  atri1=(bg1-bp1)*(esp/2)
  trap1=((bp1+bg1)*esp)/2
  areax=(aret1*cenr1)+(atri1*cent1)
  areax1=areax1+areax
  areal=trap1+areal
end do
do i=((s/2)+1),(s-1)
  bg2=yh(1+((i-1)*o))
  bp2=yh(1+(i*o))
  cenr2=(esp/2)+((i-11)*(esp))
  cent2=(esp*(1/3))+((i-11)*(esp))
  aret2=bp2*esp
  atri2=(bg2-bp2)*(esp/2)
  trap2=((bp2+bg2)*esp)/2
  areax=(aret2*cenr2)+(atri2*cent2)
  areax2=areax2+areax
  area2=trap2+area2
end do
area=areal+area2
areaxt=areax1+areax2
lcf=areaxt/area ! Centro longitudinal de flutuação
areat=lmax*bmax
cwp=area/areat ! Coeficiente da area de flutuação
!=====
! CÁLCULO DO ÂNGULO DO CONTORNO COM A SUPERFÍCIE LIVRE
do i=1,(s)
  yli(i)=y(((i-1)*o)+1)-y(((i-1)*o)+3)
  zli(i)=z(((i-1)*o)+1)-z(((i-1)*o)+3)
  xli(i)=x(((i-1)*o)+1)+(112.4/2)
  gama(i)=atan(zli(i)/yli(i))
  gama(i)=gama(i)*deg
end do
!=====
! CÁLCULO DA BORDA LIVRE (continuidade do contorno, até a borda livre original)
do i=1,s
  do j=1,2
    xf(((i-1)*(o+2))+j)=x(((i-1)*o)+1)
    zf(((i-1)*(o+2))+j)=z(((i-1)*o)+1)+(2.85/j)
    yf(((i-1)*(o+2))+j)=(((y(((i-1)*o)+1))-y(((i-1)*o)+2)))*((zf(((i-1)*(o+2))+j))
&- (z(((i-1)*o)+2)))/(z(((i-1)*o)+1)-z(((i-1)*o)+2))+y(((i-1)*o)+2)
  end do
  do j=3,(o+2)
    xf(((i-1)*(o+2))+j)=x(((i-1)*o)+(j-2))
    yf(((i-1)*(o+2))+j)=y(((i-1)*o)+(j-2))
    zf(((i-1)*(o+2))+j)=z(((i-1)*o)+(j-2))
  end do
end do

```

```

end do
end do
do i=1, s
  do j=1, 2
    if (yf(((i-1)*(o+2))+j).GT.y((o*11)+1)) then
      yf(((i-1)*(o+2))+j)=y((o*11)+1)
    end if
  end do
end do
!=====
! REFINO DA SEÇÃO CONSIDERADA PARA CÁLCULO DO SLAMMING (200 PONTOS NA SEÇÃO)
  B(baliz)=syb(baliz)
  T(baliz)=abs(pz(baliz)-z(1))
  H=B(baliz)/(T(baliz))
  C=3+((4*sig(baliz))/pi)+(1-((4*sig(baliz))/pi))*((H-1)/(H+1))**2)
  a2(baliz)=(3-C+((9-2*C)**0.5))/C
  a1(baliz)=(1+a2(baliz))*((H-1)/(H+1))
  a0=T(baliz)/(1-a1(baliz)+a2(baliz))
  teta(1)=0
  do j=1, ((o*10)-1)
    tetam(j+1)=(j*pi)/(2*((o*10)-1))
  end do
  do k=1, (o*10)
    yk(k)=a0*(((1+a1(baliz))*sin(tetam(k)))-(a2(baliz)*sin(3*tetam(k))))
    zk(k)=a0*(((1-a1(baliz))*cos(tetam(k)))+(a2(baliz)*cos(3*tetam(k))))
  end do
  ztmax=zk(1)
  do k=1, (o*10)
    zk(k)=abs(ztmax-zk(k))
  end do
  delta=(z(1)-zk(o*10))
  do k=1, (o*10)
    zk(k)=zk(k)+delta
  end do
!=====
! CÁLCULO DA PRESSÃO DE IMPACTO (OCHI E MOTTER, 1973)
do i=1, ((o*10)-1)
  if ((zk(i)-(0.1*zk((o*10))))*(zk(i+1)-(0.1*zk((o*10))))).LT.0) then
    zaxis=zk(i+1) ! 1/10 do calado projetado
    tk=zaxis
    bk=yk(i+1)
    ilim=(i+1) ! Número de pontos para 1/10 calado
  end if
end do
ixt=0
areat=0
do i=1, (ilim-1)
  hgr=(zaxis-zk(i))
  hre=(zaxis-zk(i+1))
  htr=hgr-hre
  are=bas*hre
  atr=(bas*htr)/2
  areat=are+atr+areat
  dtr=hre+(htr*(1/3))
  bas=(yk(i+1)-yk(i))
  ixre=bas*(hre**3)/3
  ixtr=(bas*(htr**3)/36)+(atr)*(dtr**2)
  ixt=ixt+ixtr+ixre ! Momento de área (1/10 da seção)
end do
!=====
! CONFORMAL MAPPING COM 3 PARÂMETROS (LANDWEBER e MACAGNO, 1959)
sigma=areat/(bk*tk)
prec=1000
lamb=tk/bk
nc=ixt/(bk*(tk**3))
linf=-0.2
lsup=0.2
do i=1, prec
  a5(i)=linf+(i*(lsup-linf)/prec)
  as(i)=1+3*(a5(i)**2)
  bs(i)=(-1)*(3*(1+lamb)+a5(i)*(1-lamb))
  cs(i)=((8*lamb*sigma)/pi)+2*(1+lamb+(lamb**2))
  deltam(i)=(bs(i)**2)-(4*as(i)*cs(i))
  alfa1(i)=(-bs(i)-sqrt(deltam(i)))/(2*as(i))
  alm(i)=((1-lamb)/alfa1(i))-a5(i)
  a3(i)=((1+lamb)/alfa1(i))-1
  bet(i)=1-alm(i)

```

```

n(i)=(pi*(alfa(i)**4)/(128*(lamb**3)))*(2*((bet(i)**3)+((bet(i)**2)*a3(i))+2*bet(i)
&(i)*((a3(i)**2)-(a3(i)*a5(i)+(a5(i)**2))-((a3(i)**2)*a5(i)))-(bet(i)**4)*(2*(bet(i)
&**3)*a3(i))-2*(bet(i)**2)*((4*(a3(i)**3))-(5*a3(i)*a5(i)+(6*(a5(i)**2)))&
&+(12*bet(i)*(a3(i)**2)*a5(i))-(3*(a3(i)**2)+(a5(i)**2))*((a3(i)**2)+5*(a5(i)**2)))
end do
do i=1, (prec-1)
  if ((n(i)-nc)*(n(i+1)-nc)).LT.0) then ! Definição de n por interpolação
    alf=alm(i) ! Parâmetro al
    a3f=a3(i) ! Parâmetro a3
    a5f=a5(i) ! Parâmetro a5
  end if
end do
klm=exp(1.377+(2.419*alf)-(0.873*a3f)+(9.624*a5f))
!Em caso de erro, simplificar para Conformal mapping c/2 parâmetros
Hk=bk/tk
Ck=3+((4*sigma)/pi)+(1-((4*sigma)/pi))*(((Hk-1)/(Hk+1))**2)
a2k=(3-Ck+((9-2*Ck)**0.5))/Ck
alk=(1+a2k)*((Hk-1)/(Hk+1))
a3k=0
k1l=exp(1.377+(2.419*alk)-(0.873*a2k)+(9.624*a3k))
!=====
! CÁLCULO DA PRESSÃO DE IMPACTO (KARMAN, 1929) E (WAGNER, 1932)
beta=atan(tk/bk)
kwag=1+((pi**2)/(4*((tan(beta))**2)))
kkar=pi/tan(beta)
beta=beta*deg
!=====
! OUTPUTS DO PROGRAMA A
write(4,"(A3)") "6.4"
write(4,"(A8)") "outputA4"
write(4,"(A66)") " 4.0100 0.0000 112.4000 0.0000"
write(4,"(I13)") (s-1)
write(4,"(10F16.4)") esp,esp,esp,esp,esp,esp,esp,esp,esp,esp
write(4,"(10F16.4)") esp,esp,esp,esp,esp,esp,esp,esp,esp,esp
write(4,"(A2)") "1"
do i=1,s
  write(4,"(F16.4,I14,A28)") (abs(x(1))+x((o*(i-1))+1)),(o-1),"
0.0000"
  write(4,"(10F16.4)") y(((i-1)*o)+20),z(((i-1)*o)+20),y(((i-1)*o)+19),z(((i-
1)*o)+19),y(((i-1)*o)+18),z(((i-1)*o)+18),&
&y(((i-1)*o)+17),z(((i-1)*o)+17),y(((i-1)*o)+16),z(((i-1)*o)+16)
  write(4,"(10F16.4)") y(((i-1)*o)+15),z(((i-1)*o)+15),y(((i-1)*o)+14),z(((i-
1)*o)+14),y(((i-1)*o)+13),z(((i-1)*o)+13),&
&y(((i-1)*o)+12),z(((i-1)*o)+12),y(((i-1)*o)+11),z(((i-1)*o)+11)
  write(4,"(10F16.4)") y(((i-1)*o)+10),z(((i-1)*o)+10),y(((i-1)*o)+9),z(((i-
1)*o)+9),y(((i-1)*o)+8),z(((i-1)*o)+8),&
&y(((i-1)*o)+7),z(((i-1)*o)+7),y(((i-1)*o)+6),z(((i-1)*o)+6)
  write(4,"(10F16.4)") y(((i-1)*o)+5),z(((i-1)*o)+5),y(((i-1)*o)+4),z(((i-
1)*o)+4),y(((i-1)*o)+3),z(((i-1)*o)+3),&
&y(((i-1)*o)+2),z(((i-1)*o)+2),y(((i-1)*o)+1),z(((i-1)*o)+1)
end do
write(4,"(A72)") " 1.0000 1.0000"
write(4,"(A20)") "*** End of file ***"

write(5,"(F11.3)") (lcb+56.2),(lcf+56.2),kb,cb,cwp,desl

write(6,"(1A1)") "0"
do i=1,s
write(6,"(1A9)") " "
do j=1,(o+2)
write(6,"(3F11.3)") xf(((i-1)*(o+2))+j),yf(((i-1)*(o+2))+j),zf(((i-1)*(o+2))+j)
end do
end do
write(6,"(1A9)") " "
write(6,"(1A3)") "EOF"

do i=1,(s)
write(7,"(F11.3,F11.1)") xli(i),gama(i)
end do

write(8,"(9F11.3)") bk,tk,sigma,beta,k1l,klm,kwag,kkar,nc

do i=1,dm
write(9,"(3F11.3)") x(i),y(i),z(i)
end do
end program

```

# APÊNDICE B. PROGRAMA B

Este apêndice inclui os códigos elaborados em Fortran que compõem o programa B, responsável pelas etapas pós-processamento do Octopus. O primeiro código trabalha com um arquivo gerado por este programa comercial que contém dados sobre coeficientes e forças de excitação. O segundo emprega um outro arquivo que contém as funções de transferência dos movimentos da embarcação, em relação ao CG.

## B.1 CÓDIGO B1

```
!=====
! PROGRAMA B - CÓDIGO B1
! - Gerar listagem de coeficientes e forças obtidos em arquivos do Octopus
! - Efetuar o cálculo das frequências naturais
! - Efetuar o cálculo das médias de coeficientes e forças
!=====
program CodigoB1
!=====
! DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS
integer :: i,nf,skip
real*4, dimension(400) :: a33,a35,a53,a55,b33,b35,b53,b55,w,a,b,eq,wf,we,e3,f3,e5,f5
real*4, dimension(14800) :: madd,damp ! Coef. de massa adicionada e amortecimento
real*4, dimension(36) :: rest ! Coeficientes de restauração
real*4, dimension(5600) :: force ! Forças de excitação
real*4, dimension(8) :: par
real*4 :: c33,c35,c53,c55,M,I55,c,wfn1,wfn2,fn1,fn2,me3,me5,ma33,ma55,mb33,mb55
!=====
! LEITURA/ESCRITA DE DADOS
open (2,file='octopus.out',status='old') ! Arquivo do Octopus (coeficientes e forças)
open (3,file='hidro.out',status='old') ! Leitura de propriedades geométricas do casco
open (4,file='coefAB.out',status='unknown') ! Listagem de coef. de massa ad. e amort.
open (5,file='coefC.out',status='unknown') ! Listagem de coef. de restauração
open (6,file='fnat.out',status='unknown') ! Função p/cálculo de freq. naturais
open (7,file='wfn.out',status='unknown') ! Freq. naturais em heave e pitch calculadas
open (8,file='force.out',status='unknown') ! Listagem de forças de excitação
open (9,file='media.out',status='unknown') ! Cálculo da média de forças e coef.
lwl=112.4 ! LPP
nf=400 ! Número de frequências
r55=26.2 ! Raio de giração
!=====
! LEITURA DE PROPRIEDADES DO CASCO
do i=1,6
  read(3,*) par(i)
end do
M=par(6) ! Massa do modelo
I55=M*(r55**2)
!=====
! LEITURA DE COEFICIENTES DO OCTOPUS
do 20 skip = 1,34
  read(2,*)
20 continue
  read(2,*) madd
do i=1,nf
  a33(i)=madd(16+(37*(i-1)))
  a35(i)=madd(18+(37*(i-1)))
  a53(i)=madd(28+(37*(i-1)))
  a55(i)=madd(30+(37*(i-1)))
  w(i)=madd(1+(37*(i-1)))
end do
do 30 skip = 1,3
  read(2,*)
30 continue
  read(2,*) damp
do i=1,nf
  b33(i)=damp(16+(37*(i-1)))
```

```

    b35(i)=damp(18+(37*(i-1)))
    b53(i)=damp(28+(37*(i-1)))
    b55(i)=damp(30+(37*(i-1)))
end do
do 40 skip = 1,2
    read(2,*)
40 continue
    read(2,*) rest
    c33=rest(15)
    c35=rest(17)
    c53=rest(27)
    c55=rest(29)
do 50 skip = 1,7240
    read(2,*)
50 continue
    read(2,*) force
do i=1,nf
    wf(i)=force(1+(14*(i-1)))
    we(i)=force(2+(14*(i-1)))
    e3(i)=force(7+(14*(i-1)))
    f3(i)=force(8+(14*(i-1)))
    e5(i)=force(11+(14*(i-1)))
    f5(i)=force(12+(14*(i-1)))
end do
!=====
! CÁLCULO DA FREQUENCIA NATURAL - SISTEMA ACOPLADO
do i=21,nf
a(i)=(M+a33(i))*(I55+a55(i))-(a35(i)*a53(i))
b(i)=((-M+a33(i))*c55)-((I55+a55(i))*c33)+(a35(i)*c53)+(a53(i)*c35)
c=(c33*c55)-(c35*c53)
eq(i)=(a(i)*(w(i)**2))+(b(i)*(w(i)))+c
end do
do i=21,(nf-1) ! Raiz 1
    if ((eq(i)*eq(i+1).LT.0).AND.(eq(i).GT.0)) then
        wfn1=w(i+1)-(((w(i+1)-w(i))*(abs(eq(i+1))))/(abs(eq(i))+abs(eq(i+1))))
    end if
end do
do i=21,(nf-1) ! Raiz 2
    if ((eq(i)*eq(i+1).LT.0).AND.(eq(i).LT.0)) then
        wfn2=w(i+1)-(((w(i+1)-w(i))*(abs(eq(i+1))))/(abs(eq(i))+abs(eq(i+1))))
    end if
end do
fn1=sqrt(wfn1) ! Freq. natural heave
fn2=sqrt(wfn2) ! Freq. natural pitch
!=====
! CÁLCULO DA MÉDIA DE FORÇAS E COEFICIENTES
do i=1,nf
    se3=se3+e3(i)
    se5=se5+e5(i)
    sa33=sa33+a33(i)
    sa55=sa55+a55(i)
    sb33=sb33+b33(i)
    sb55=sb55+b55(i)
end do
me3=se3/nf
me5=se5/nf
ma33=sa33/nf
ma55=sa55/nf
mb33=sb33/nf
mb55=sb55/nf
!=====
! OUTPUTS DO CÓDIGO B1
write(5,"(4F16.2)") c33,c35,c53,c55
do i=21,nf
write(6,"(F16.4,F16.1)") w(i),eq(i)
end do
write(7,"(4F16.4)") wfn1,wfn2,fn1,fn2
do i=1,nf
write(4,"(F16.4,8F16.2)") w(i),a33(i),a35(i),a53(i),a55(i),b33(i),b35(i),b53(i),b55(i)
write(8,"(6F16.4)") wf(i),we(i),e3(i),f3(i),e5(i),f5(i)
end do
write(9,"(8F16.2)") me3,me5,ma33,ma55,mb33,mb55,c33,c55
end program

```



## B.2 CÓDIGO B2

```
!=====  
! PROGRAMA B - CÓDIGO B2  
! - Efetuar o cálculo de deslocamento absoluto e relativo em P  
! - Efetuar o cálculo de velocidade absoluta e relativa em P  
! - Efetuar o cálculo do espectro de Bretschneider  
! - Efetuar o cálculo do espectro de resposta  
! - Efetuar o cálculo dos momentos espectrais  
! - Efetuar o cálculo de probabilidade de ocorrência do slamming  
!=====  
program CodigoB2  
!=====  
! DECLARAÇÃO DE VARIÁVEIS  
integer :: i,nf,skip  
real*4, dimension(215) :: w,we,a3,f3,a5,f5,k,a5k,wl,slwl,zp,zpf,zpr,zpi,sp,spf,spr,&  
&spi,ksif,ksir,ksii,A,A1,S,E,SE,SRP,bp,bg,h1,h2,h,br,bt,m2A,zpv,zpvf,zpvr,zpvi,vteta&  
&,vtetaf,vtetar,vtetai,ksiv,ksivf,ksivr,ksivi,spv,spvf,spvr,spvi,SRPV,spmax  
real*4, dimension(3225) :: mot ! Dados de CG RAOs do Octopus  
real*4, dimension(186) :: tz,hs,prob,pochi,m0vp,m2p ! Dados do espectro  
real*4, dimension(14) :: fat ! Dados do navio  
real*4 :: m0,m2,m0v,m2t,m0vt,lwl  
!=====  
! LEITURA DE DADOS  
open (2,file='CGmotions.out',status='old') ! Arquivo do Octopus (CG RAOs)  
open (3,file='inputAB.txt',status='old') ! Dados do navio  
open (4,file='diagram.txt',status='old') ! Arquivo do diagrama de dispersão  
open (5,file='RAO.out',status='unknown') ! Listagem dos RAOs calculados em P  
open (6,file='OCHI.out',status='unknown') ! Resultado da prob. slamming (OCHI)  
open (7,file='ESPEC.out',status='unknown') ! Listagem de dados do espectro  
!=====  
! LEITURA DE PARÂMETROS DE INPUT AB  
do i=1,14  
    read (3,*) fat(i)  
end do  
o=fat(7) ! Número de pontos por seção  
s=fat(8) ! Número de seções do casco  
rho=fat(9) ! Densidade da água  
v=fat(10) ! Velocidade do navio  
baliz=fat(14) ! Seção do ponto P  
!=====  
! LEITURA CG RAOs (OCTOPUS)  
g=9.81  
lwl=112.4  
pi=3.14159  
rad=(2*pi/360) ! Conversão para radianos  
deg=(360/(2*pi)) ! Conversão para graus  
do 120 skip = 1,4  
    read (2,*)  
120 continue  
    read (2,130) nf  
130 format(49X, I6)  
nf=nf+1  
do 20 skip = 1,3  
    read (2,*)  
20 continue  
    read (2,30) cog  
30 format(49X, F6.3)  
do 40 skip = 1,4042  
    read (2,*)  
40 continue  
    read (2,*) mot  
xb=(lwl*0.9)-cog  
do i=1,nf  
    w(i)=mot(1+(15*(i-1)))  
    slwl(i)=mot(2+(15*(i-1)))  
    we(i)=mot(3+(15*(i-1)))  
    a3(i)=mot(8+(15*(i-1)))  
    f3(i)=mot(9+(15*(i-1)))  
    a5(i)=mot(12+(15*(i-1)))  
    f5(i)=mot(13+(15*(i-1)))  
    wl(i)=112.4/(slwl(i)**2)  
    k(i)=(2*3.1416)/wl(i)  
    a5k(i)=(2*3.1416/360)*a5(i)/k(i)
```

```

end do
!=====
! CÁLCULO DO DESLOCAMENTO ABSOLUTO
! Decomposição nos planos real (r) e imaginário (i)
do i=1,nf
zpr(i)=a3(i)*cos(f3(i)*rad)-(xb*a5(i)*rad*cos(f5(i)*rad)) ! Plano Re
zpi(i)=a3(i)*sin(f3(i)*rad)-(xb*a5(i)*rad*sin(f5(i)*rad)) ! Plano Im
zp(i)=sqrt(((zpr(i))**2)+((zpi(i))**2)) ! Módulo
zpf(i)=atan2(zpi(i),zpr(i))*deg! Fase
if (zpf(i).LT.0) then
zpf(i)=zpf(i)+360
end if
end do
!=====
! CÁLCULO DO DESLOCAMENTO RELATIVO
do i=1,nf
ksif(i)=((2*pi)/(wl(i)))*xb
ksir(i)=cos(ksif(i))
ksii(i)=sin(ksif(i))
spr(i)=ksir(i)-(a3(i)*cos(f3(i)*rad)+(xb*a5(i)*rad*cos(f5(i)*rad)) ! Plano Re
spi(i)=ksii(i)-(a3(i)*sin(f3(i)*rad)+(xb*a5(i)*rad*sin(f5(i)*rad)) ! Plano Im
sp(i)=sqrt(((spr(i))**2)+((spi(i))**2)) ! Módulo
spf(i)=atan2(spi(i),spr(i))*deg! Fase
ksif(i)=atan2(ksii(i),ksir(i))*deg
spmmax(i)=1+a3(i)+(xb*a5(i)*rad)
if (spf(i).LT.0) then
spf(i)=spf(i)+360
end if
if (ksif(i).LT.0) then
ksif(i)=ksif(i)+360
end if
end do
!=====
! CÁLCULO DA VELOCIDADE ABSOLUTA
do i=1,nf
zpv(i)=zp(i)*we(i)
zpvf(i)=(zpf(i)*rad)+(pi/2)
if (zpvf(i).LT.0) then
zpvf(i)=zpvf(i)+360
end if
end do
!=====
! CÁLCULO DA VELOCIDADE RELATIVA
do i=1,nf
vtetar(i)=v*(a5(i)*rad*cos(f5(i)*rad)) ! Plano Re
vtetai(i)=v*(a5(i)*rad*sin(f5(i)*rad)) ! Plano Im
ksiv(i)=we(i)
ksivf(i)=(ksif(i)*rad)+(pi/2)
ksivr(i)=ksiv(i)*cos(ksivf(i)) ! Plano Re
ksivi(i)=ksiv(i)*sin(ksivf(i)) ! Plano Im
zpv(i)=zpv(i)*cos(zpvf(i)) ! Plano Re
zpi(i)=zpv(i)*sin(zpvf(i)) ! Plano Im
spvr(i)=ksivr(i)-vtetar(i)-zpv(i) ! Plano Re
spvi(i)=ksivi(i)-vtetai(i)-zpi(i) ! Plano Im
zpvf(i)=zpvf(i)*deg
vteta(i)=sqrt(((vtetar(i))**2)+((vtetai(i))**2))
vtetaf(i)=atan2(vtetai(i),vtetar(i))*deg
ksivf(i)=ksivf(i)*deg
spv(i)=sqrt(((spvr(i))**2)+((spvi(i))**2)) ! Módulo
spvf(i)=atan2(spvi(i),spvr(i))*deg ! Fase
if (zpvf(i).LT.0) then
zpvf(i)=zpvf(i)+360
end if
if (vtetaf(i).LT.0) then
vtetaf(i)=vtetaf(i)+360
end if
if (ksivf(i).LT.0) then
ksivf(i)=ksivf(i)+360
end if
if (spvf(i).LT.0) then
spvf(i)=spvf(i)+360
end if
end do
!=====
! LEITURA DO DIAGRAMA DE DISPERSÃO
do i=1,186
read(4,*) tz(i),hs(i),prob(i)

```

```

end do
do j=1,186
t1=1.086*tz(j)
do i=1,nf
A(i)=(172.8*((hs(j)**2))/((t1**4))*((w(i))**(-5))
A1(i)=exp((-691.2/((t1**4))*((w(i))**(-4)))
S(i)=A(i)*A1(i) ! Espectro de Bretschneider
end do
do i=1,nf
E(i)=(9.81/(9.81+(2*w(i)*v))) ! Transformação freq. encontro
end do
do i=1,nf
SE(i)=S(i)*E(i) ! Espectro na freq. encontro
SRP(i)=SE(i)*((sp(i))**2) ! Espectro de resposta deslocamento
SRPV(i)=SE(i)*((spv(i))**2) ! Espectro de resposta velocidade
end do
!=====
! CÁLCULO DO MOMENTO ESPECTRAL DE ORDEM 0 (DESLOCAMENTO)
m0=0
do i=1,(nf-1)
bp(i)=SRP(i)
bg(i)=SRP(i+1)
m0=((bp(i)+bg(i))*(we(i+1)-we(i)))/2+m0
end do
!=====
! CÁLCULO DO MOMENTO ESPECTRAL DE ORDEM 0 (VELOCIDADE)
m0v=0
do i=1,(nf-1)
bp(i)=SRPV(i)
bg(i)=SRPV(i+1)
m0v=((bp(i)+bg(i))*(we(i+1)-we(i)))/2+m0v
end do
m0vp(j)=m0v*(prob(j)/100000)
m2p(j)=m2*(prob(j)/100000)
m0vt=m0vt+m0vp(j)
m2t=m2t+m2p(j)
!=====
! CÁLCULO DE PROBABILIDADE DO SLAMMING (OCHI, 1964)
Ds=4.01
Scr=0.0928*((g*lw1)**0.5)
pochi(j)=(exp(-((Ds)**2)/(2*m0))-(((Scr)**2)/(2*m0v)))* (prob(j)/100000)
pr=pr+pochi(j)
end do
!=====
! OUTPUTS DO CÓDIGO B2
do i=1,nf
write(5,"(3F8.3,F8.1,2F12.3,F8.1,F8.3,F8.1,F8.3,F8.1,F8.1,F8.3,F8.1,F8.3,F8.1,F8.3,F8
.1,F8.3,F8.1,F8.3)") w(i),we(i),a3(i),f3(i),&
&a5(i),a5k(i),f5(i),zp(i),zpf(i),sp(i),spf(i),ksiv(i),zpv(i),zpvf(i),vteta(i),vtetaf(
i),ksiv(i),ksivf(i),spv(i),spvf(i),spmax(i)
write(7,"(12F8.3)")
w(i),we(i),S(i),E(i),SE(i),sp(i),spv(i),SRP(i),SRPV(i),m0,m2t,m0vt
end do
write(6,"(F11.6)") Pr
end program

```

## APÊNDICE C. CURVAS DE BÉZIER

São curvas paramétricas geradas no plano ou espaço, definidas por um certo número de pontos de controle. O grau da curva ( $n$ ), está relacionado com  $n + 1$  pontos de controle. Os pontos da extremidade fixam o início e fim da curva, enquanto os intermediários (pontos de controle) definem seu contorno.

Inicialmente é necessário que sejam estabelecidos os pontos da curva, através do algoritmo de Casteljau, de acordo com a Eq. C.1 (FARIN, 2000).

$$b_i^r(t) = (1 - t)b_i^{r-1}(t) + tb_{i+1}^{r-1}(t), \quad r = 1, \dots, n \quad (\text{C.1})$$

A curva de Bézier pode ser definida de acordo com o algoritmo na forma da Eq. C.2, sendo dada pela Eq. C.3.

$$B^n(t) = \{b_0^n(t), t \in [0,1]\} \quad (\text{C.2})$$

$$B^n(t) = \sum_{i=0}^n B_i^n(t)b_i \quad (\text{C.3})$$

Assim a curva de Bézier pode ser representada na forma quadrática e cúbica, respectivamente, pela Eq. C.4 e a Eq. C.5.

$$B(t) = (1 - t)^2b_0 + 2t(1 - t)b_1 + t^2b_2, \quad t \in [0,1] \quad (\text{C.4})$$

$$B(t) = (1 - t)^3b_0 + 3t(1 - t)^2b_1 + 3t^2(1 - t)b_2 + t^3b_3, \quad t \in [0,1] \quad (\text{C.5})$$

A Figura C.1 ilustra uma típica curva de Bézier cúbica e seus pontos de controle.

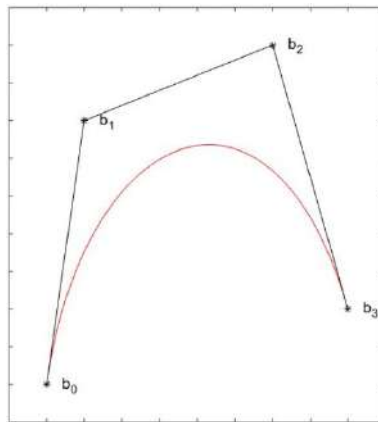


Figura C.1 – curva cúbica de Bézier.

## APÊNDICE D. TRANSFORMADA DE LEWIS

Os métodos de mapeamento possibilitam a transformação de formas aleatórias em um plano complexo, para outros formatos de interesse (em geral, geometrias simples como círculos) em outro plano. Conforme abordado no texto principal, essa característica mostra-se muito útil no campo da hidrodinâmica, pois problemas físicos podem ter sua solução simplificada com o auxílio das funções de mapeamento.

O popular método de transformação de LEWIS (1929), possibilita a transformação de uma geometria circular (Eq. D.1) em outra forma aleatória (Eq. D.2).

$$\zeta = ie^\alpha e^{-i\theta} \quad (\text{D.1})$$

$$z = x + iy \quad (\text{D.2})$$

A transformação da Eq. D.3 irá mapear os pontos do plano  $\zeta$ , nos correspondentes do plano  $z$ , ao serem apropriadamente determinados os coeficientes da função de mapeamento.

$$z = M_S(a_{-1}\zeta + a_1\zeta^{-1} + a_3\zeta^{-3} + a_5\zeta^{-5} + \dots) \quad (\text{D.3})$$

Sendo:

- $M_S$  o fator de escala; e
- $a_n$  os coeficientes da função de mapeamento.

A formulação de Lewis emprega apenas dois parâmetros, resultando na Eq. D.4.

$$z = M_S(a_{-1}\zeta + a_1\zeta^{-1} + a_3\zeta^{-3}) \quad (\text{D.4})$$

Ao substituírmos as Eq. D.1 e D.2 na Eq. D.4, destacando as parcelas reais e imaginárias, pode-se obter equações paramétricas que mapeiam as formas aleatórias no plano  $z$  (Eq. D.5 e Eq. D.6).

$$y_S = M_S((1 + a_1) \sin \theta - a_3 \sin 3\theta) \quad (\text{D.5})$$

$$z_S = M_S((1 + a_1) \sin \theta - a_3 \sin 3\theta) \quad (\text{D.6})$$

Considerando o formato das seções de navios, a razão local de seção entre a meia boca e o calado é dada pela Eq. D.7. O coeficiente de seção da área local é obtido pela Eq. D.8.

$$H = \frac{B_S/2}{D_S} = \frac{1 + a_1 + a_3}{1 - a_1 + a_3} \quad (D.7)$$

$$\sigma = \frac{Area}{B_S D_S} = \frac{\pi}{4} \left( \frac{1 - a_1^2 - 3a_3^2}{(1 + a_3)^2 - a_1^2} \right) \quad (D.8)$$

Desse modo, variadas formas com geometria muito similar à de curvaturas de casco podem ser geradas com apenas dois parâmetros, a razão  $H$  e o coeficiente de área  $\sigma$ . A Figura D.1 ilustra curvas obtidas com a metodologia de Lewis, através dos parâmetros de entrada indicados.

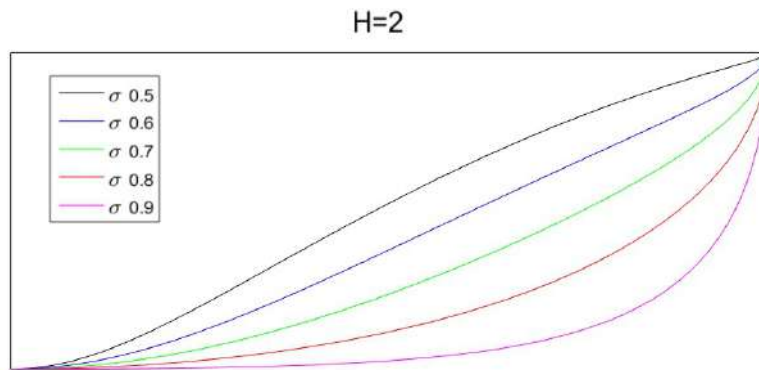


Figura D.1 – Geometrias típicas geradas com a técnica de Lewis.

# APÊNDICE E. RESULTADOS DO PROCESSO DE VARIAÇÃO E DA ANÁLISE DE ESTABILIDADE

O programa A gerou um total de 10.380.000 variações do modelo original, cada uma sendo avaliada em quatro etapas de filtragem, para os quatro adimensionais. A Tabela E.1, Tabela E.2, Tabela E.3 e Tabela E.4 contém dados obtidos para cada modelo com adimensional máximo (+) ou mínimo (-).

Conforme o número de variações obtidas em cada filtragem, é interessante observar que uma parcela muito reduzida de modelos foi efetivamente aproveitada (cerca de 2000 variantes no total), a grande maioria foi descartada por não apresentar três dos adimensionais com valor aproximadamente idêntico ao modelo original.

Tabela E.1 - Dados de variações (LCB/L<sub>pp</sub>).

261 variações	(%)	LCB(-)	Base	LCB(+)	(%)
LCB/L <sub>pp</sub>	8,63	0,447	0,489	0,510	4,26
C <sub>B</sub>	0,18	0,563	0,562	0,561	0,18
LCF/L <sub>pp</sub>	0,24	0,462	0,461	0,461	0,14
C <sub>WL</sub>	0,25	0,796	0,794	0,792	0,25

Tabela E.2 - Dados de variações (C<sub>B</sub>).

892 variações	(%)	C <sub>B</sub> (-)	Base	C <sub>B</sub> (+)	(%)
C <sub>B</sub>	36,30	0,358	0,562	0,590	4,98
LCB/L <sub>pp</sub>	0,21	0,490	0,489	0,489	0,06
LCF/L <sub>pp</sub>	0,24	0,462	0,461	0,462	0,24
C <sub>WL</sub>	0,25	0,796	0,794	0,796	0,25

Tabela E.3 - Dados de variações (LCF/L<sub>pp</sub>).

168 variações	(%)	LCF(-)	Base	LCF(+)	(%)
LCF/L <sub>pp</sub>	5,72	0,435	0,461	0,515	11,75
C <sub>WL</sub>	0,13	0,793	0,794	0,793	0,13
LCB/L <sub>pp</sub>	0,07	0,489	0,489	0,491	0,42
C <sub>B</sub>	0,36	0,560	0,562	0,559	0,53

Tabela E.4 - Dados de variações (C<sub>WL</sub>).

790 variações	(%)	C <sub>WL</sub> (-)	Base	C <sub>WL</sub> (+)	(%)
C <sub>WL</sub>	2,14	0,777	0,794	0,867	9,19
LCF/L <sub>pp</sub>	0,34	0,463	0,461	0,460	0,28
LCB/L <sub>pp</sub>	0,50	0,492	0,489	0,492	0,50
C <sub>B</sub>	0,18	0,561	0,562	0,561	0,18

A Tabela E.5 contém os valores obtidos durante as análises de estabilidade. Os dados apresentados já consideram os modelos aprovados de acordo com os critérios empregados.

Tabela E.5 – Resultados dos critérios de estabilidade.

Critério	Req.	LCB(+)	LCB(-)	Cb(+)	Cb(-)	LCF(+)	LCF(-)	Cwl(+)	Cwl(-)
area GZ $\Phi < 30^\circ$ (m.rad)	0,055	0,059	0,087	0,063	0,211	0,079	0,065	0,145	0,067
area GZ $\Phi < 40^\circ$ (m.rad)	0,090	0,094	0,140	0,099	0,326	0,127	0,104	0,230	0,105
area GZ $30^\circ < \Phi < 40^\circ$ (m.rd)	0,030	0,035	0,054	0,037	0,115	0,047	0,039	0,085	0,038
ang. Max GZ ( $^\circ$ )	25,0	31,8	31,8	30,9	36,4	31,8	31,8	32,7	30,9
GZ a $30^\circ$ (m)	0,200	0,217	0,322	0,234	0,669	0,286	0,238	0,501	0,241
GMt inicial (m)	0,150	0,481	0,658	0,456	2,611	0,656	0,572	1,259	0,518
Âng. eq. trip. ( $^\circ$ )	10,0	3,5	2,5	3,3	1,2	2,5	3,1	1,3	3,1
Âng. eq. guinada ( $^\circ$ )	10,0	5,6	3,9	5,6	1,2	4,0	5,0	2,1	5,0



# APÊNDICE F. GEOMETRIAS EXTREMAS

- (LCB/L<sub>pp</sub>)

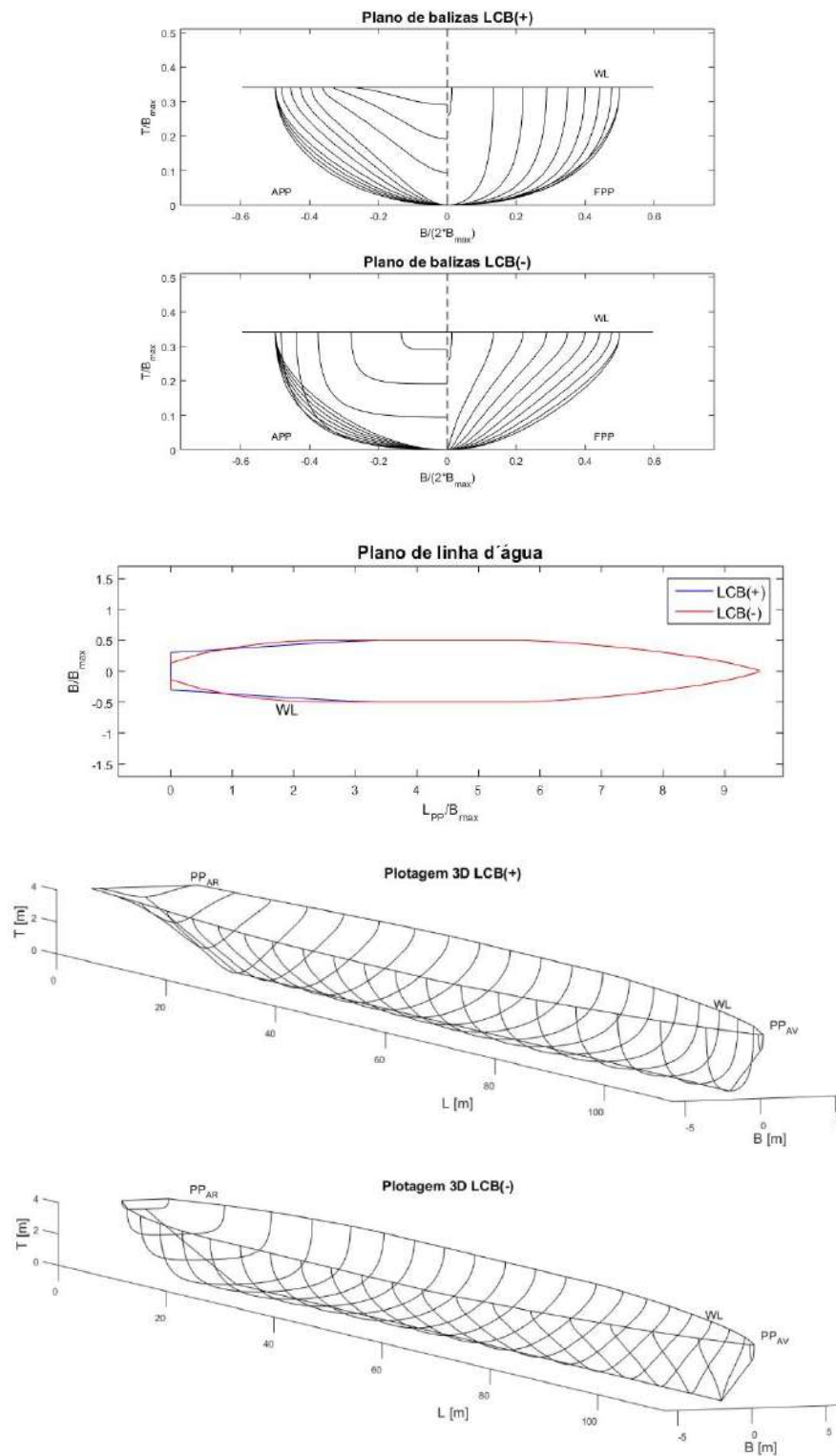


Figura F.1 – Representação gráfica (LCB/L<sub>pp</sub>).

- $(C_B)$

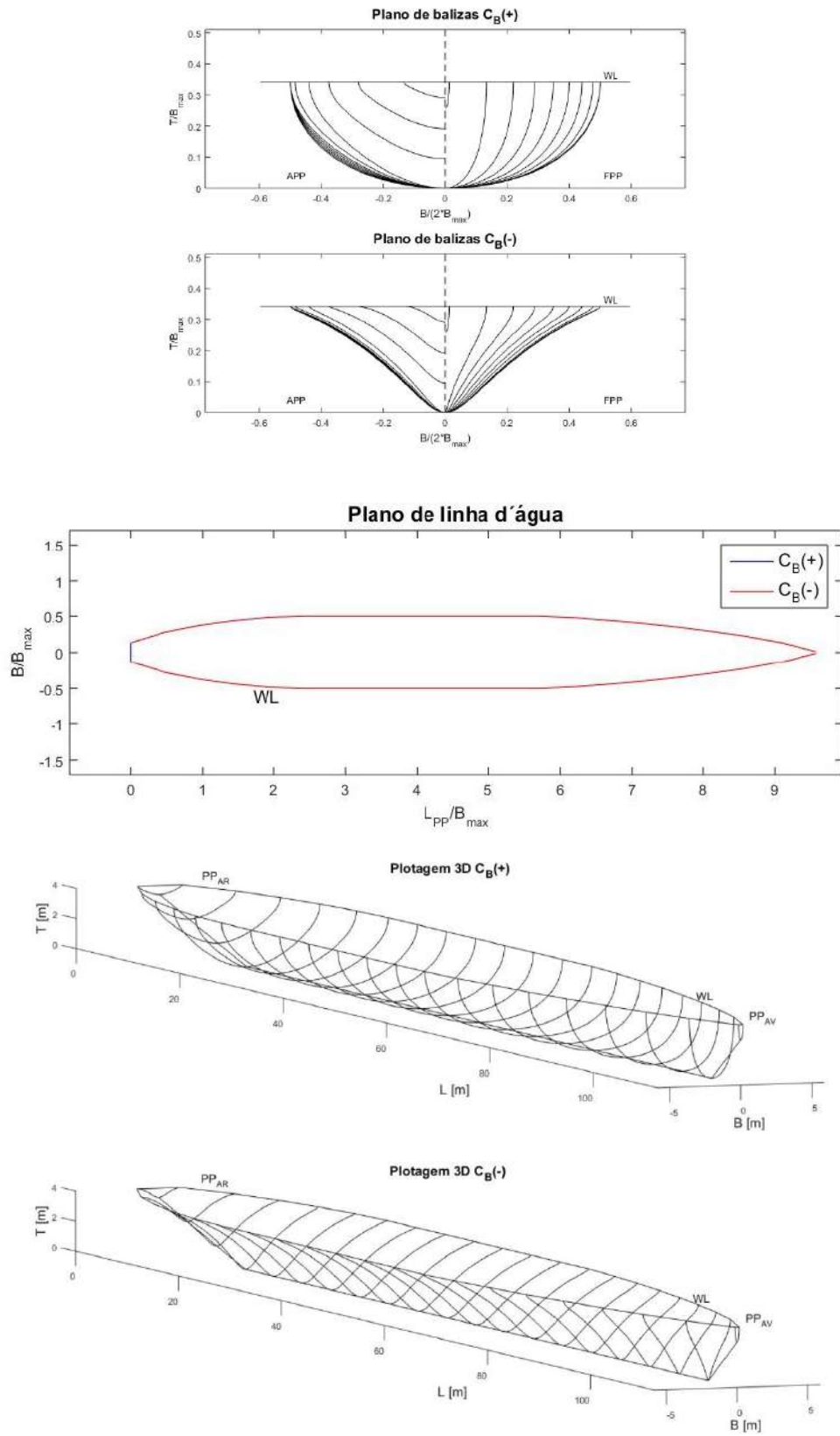


Figura F.2 – Representação gráfica ( $C_B$ ).

- (LCF/L<sub>pp</sub>)

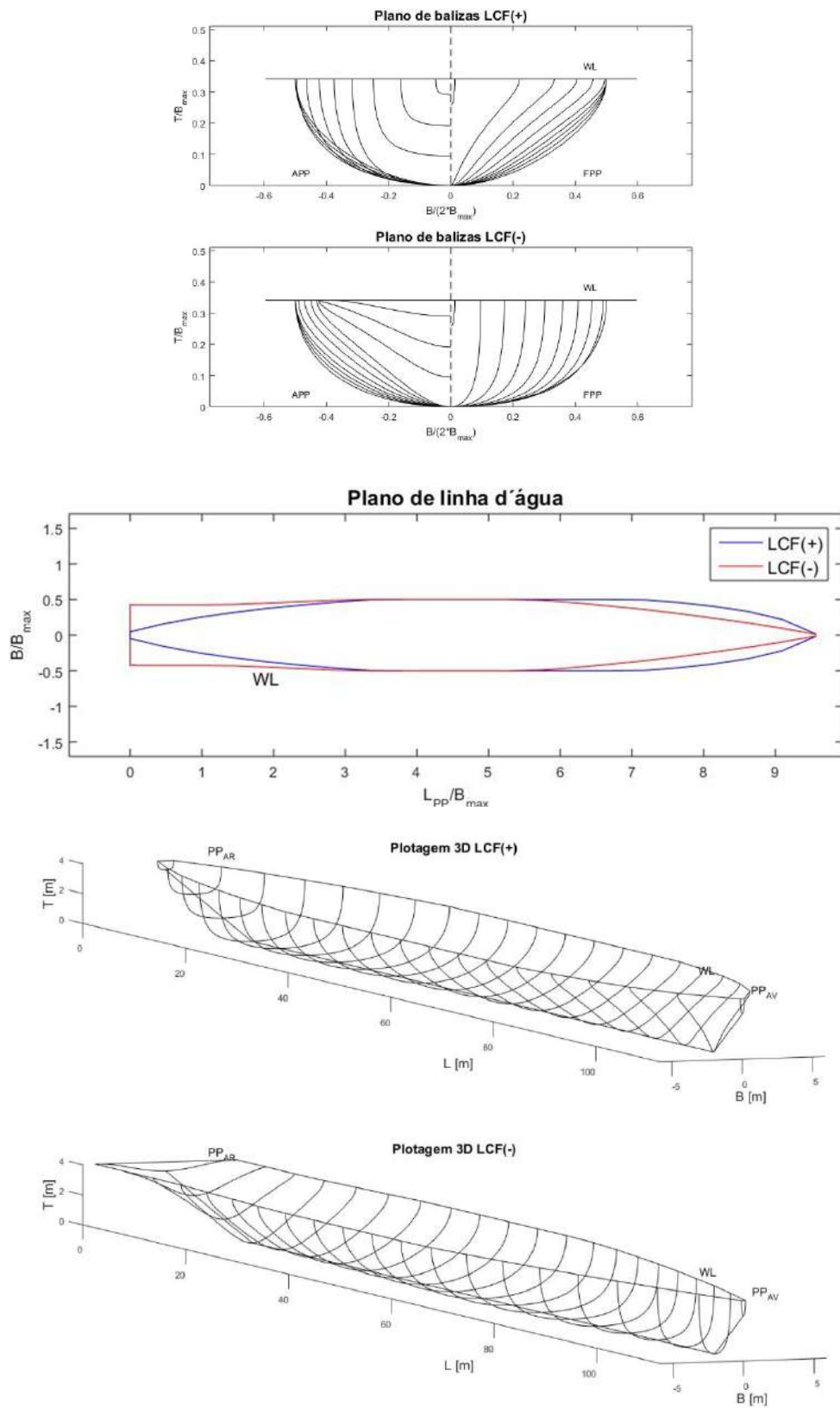


Figura F.3 – Representação gráfica (LCF/L<sub>pp</sub>).

- ( $C_{WL}$ )

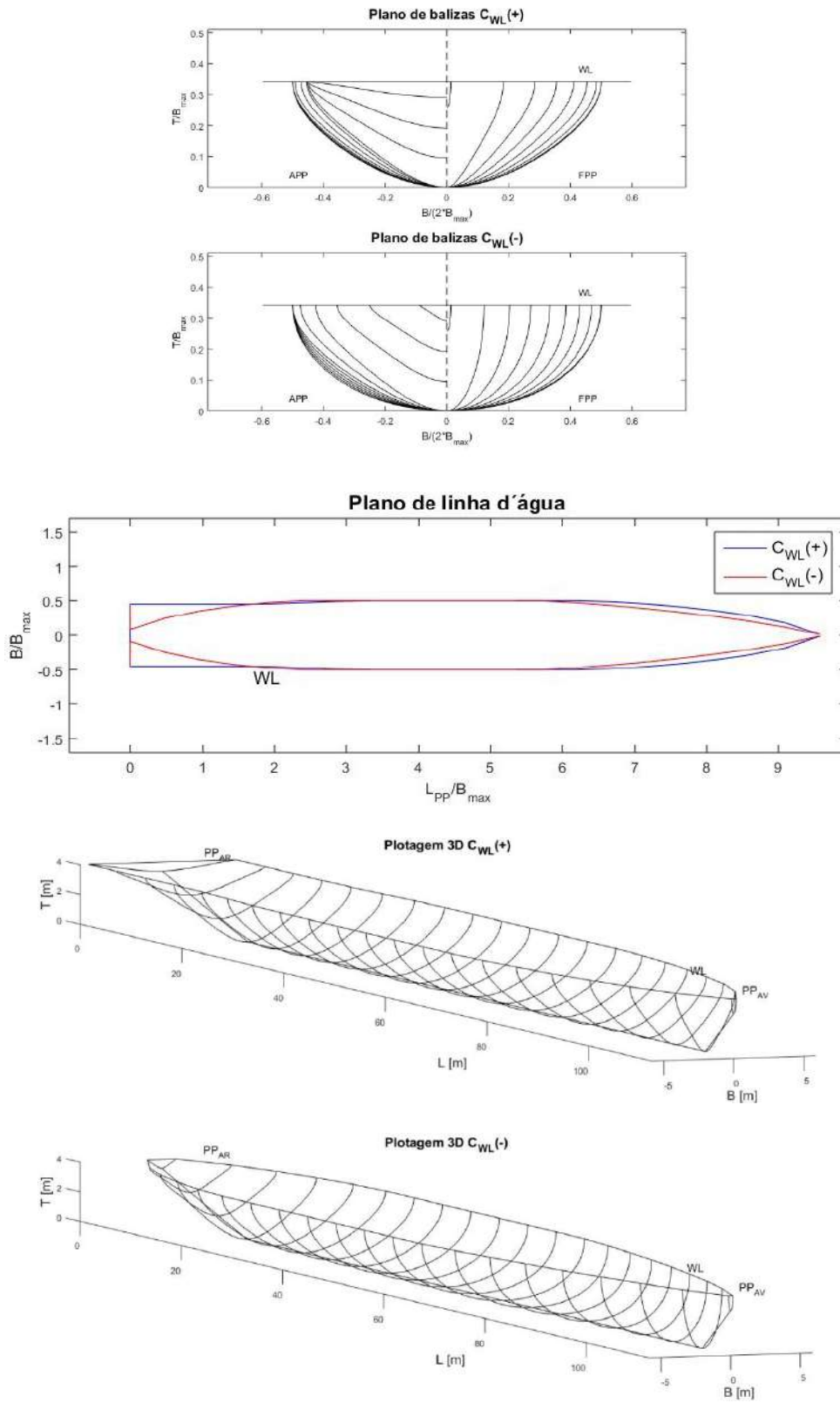


Figura F.4 – Representação gráfica ( $C_{WL}$ ).

## APÊNDICE G. FORÇAS DE EXCITAÇÃO

As forças e momentos de excitação podem ser descritos pelas respectivas amplitude e fase em cada frequência. Os diagramas de fase de forças ou momentos de excitação foram simplificados, conforme exemplificado na Figura G.1. A razão (Im/Re) significa a proporção em que a excitação atua no plano imaginário (fase 90° ou 270°), em relação ao real (fase 0° ou 180°).

Em uma escala de 0 a 1, quanto mais próximo de 1, maior será a inclusão da força ou momento no plano imaginário, enquanto mais próximo de 0, maior o será no plano real. O gráfico superior da Figura G.1 contém o diagrama de fase original, enquanto o inferior apresenta o diagrama simplificado.

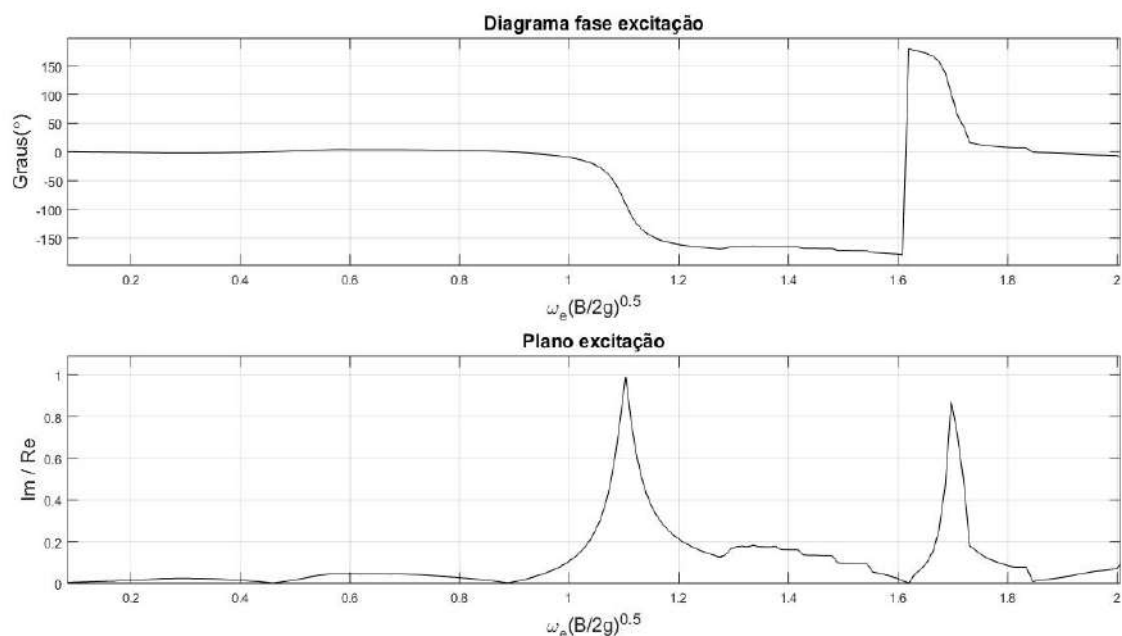


Figura G.1 - Representação do plano de excitação.

A Figura G.2, Figura G.3, Figura G.4 e Figura G.5 contém as amplitudes e diagramas de fase para os dados de excitação fornecidos pelo Octopus.

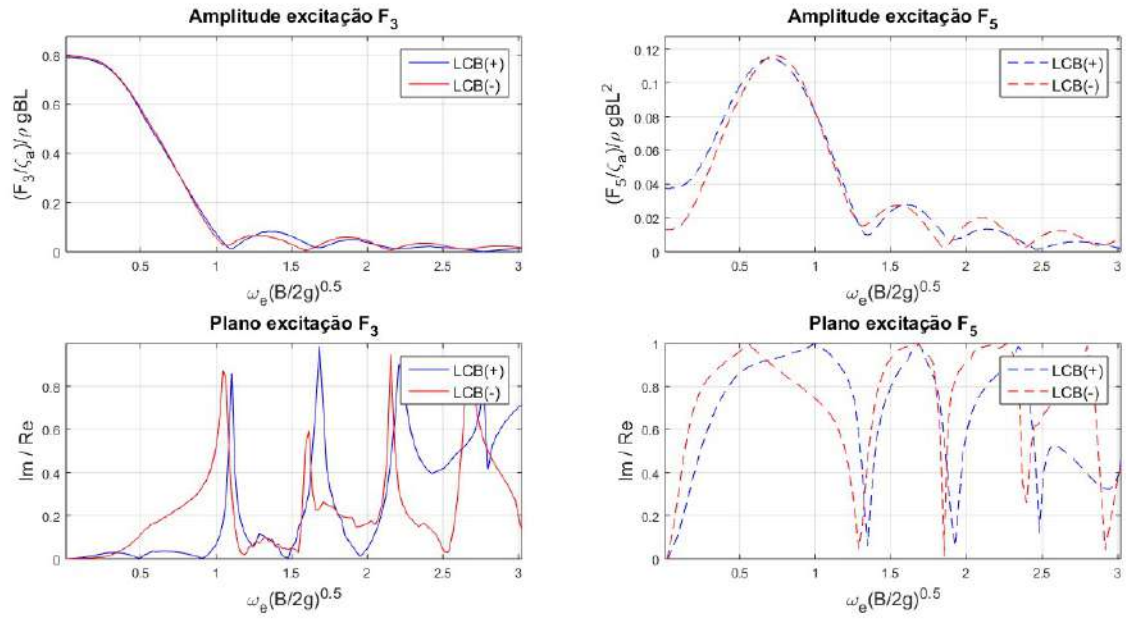


Figura G.2 – Excitação (LCB/L<sub>pp</sub>).

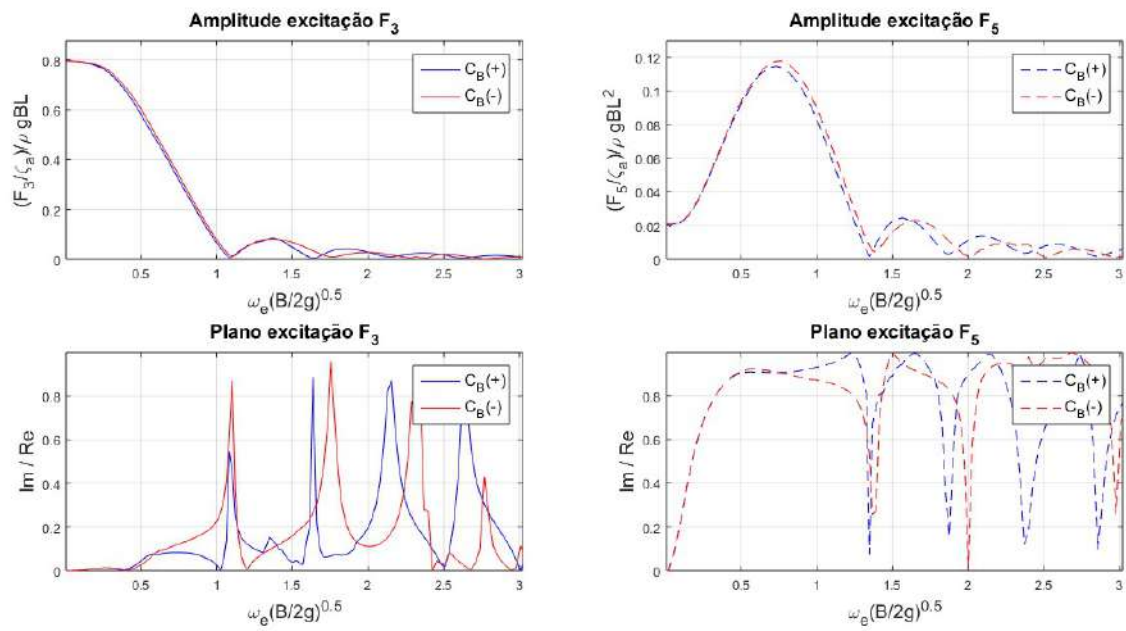


Figura G.3 – Excitação ( $C_B$ ).

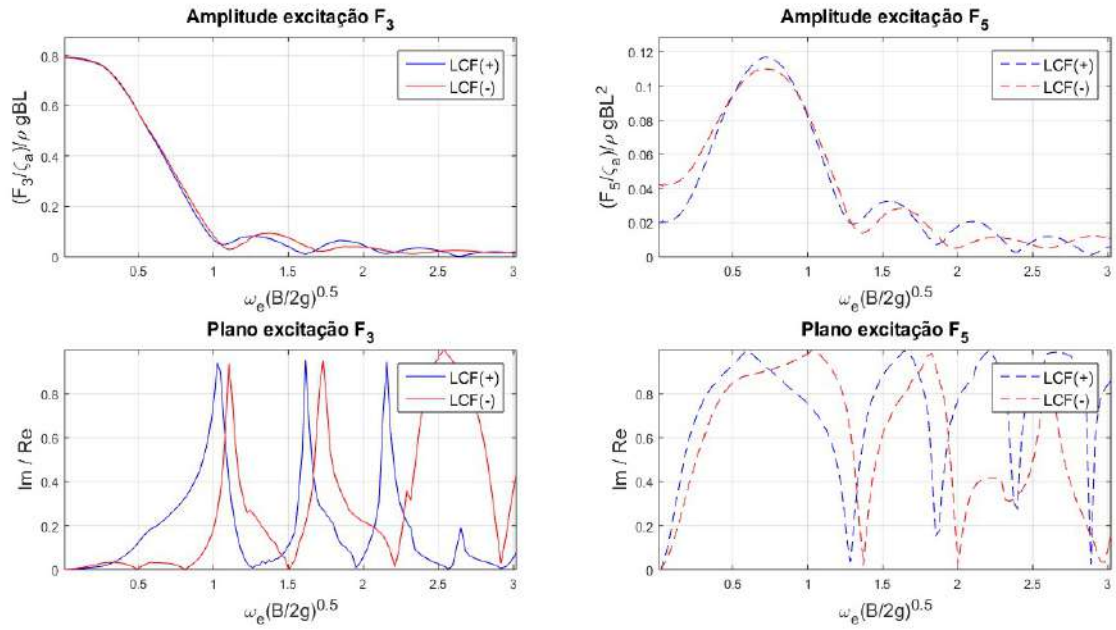


Figura G.4 – Excitação (LCF/LPP).

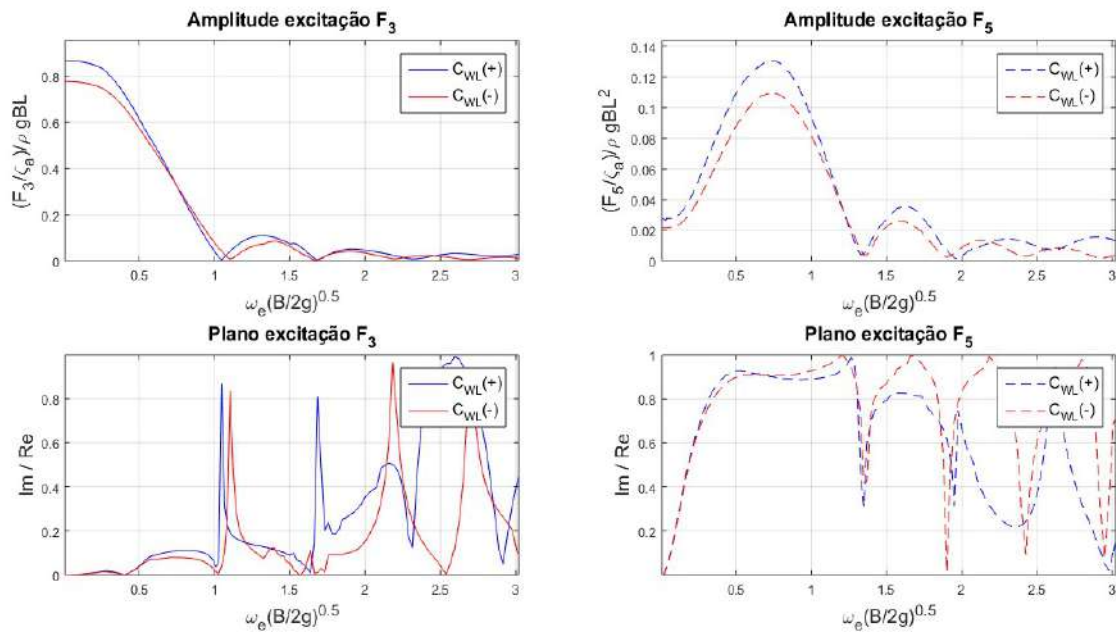


Figura G.5 – Excitação (CWL).

# APÊNDICE H. COEFICIENTES DE RADIAÇÃO

Os coeficientes de massa adicionada, amortecimento e restauração fornecidos pelo programa Octopus foram plotados em gráficos do Matlab, conforme as Figuras H.1, H.2, H.3 e H.4.

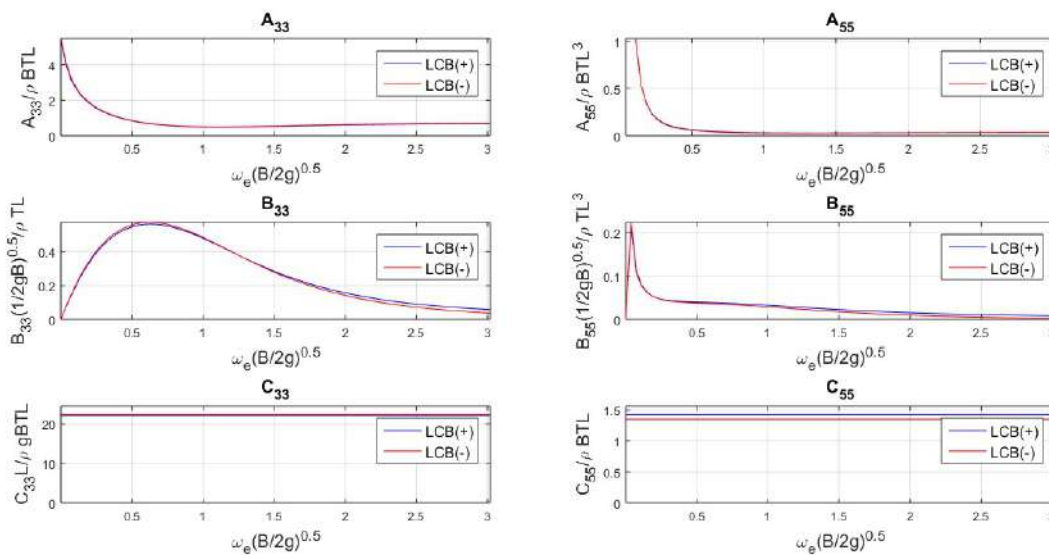


Figura H.1 – Coeficientes (LCB/L<sub>pp</sub>).

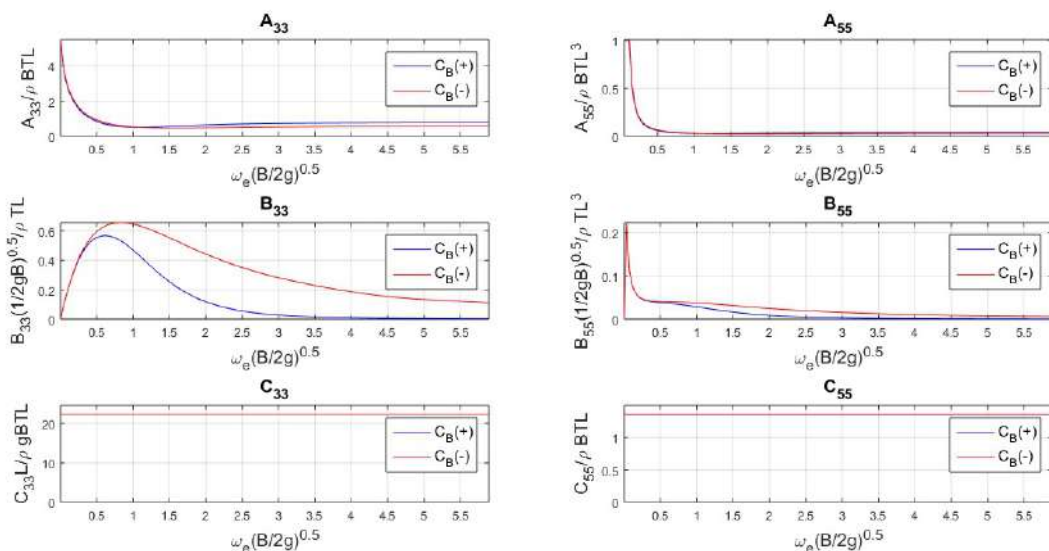


Figura H.2 – Coeficientes (C<sub>B</sub>).



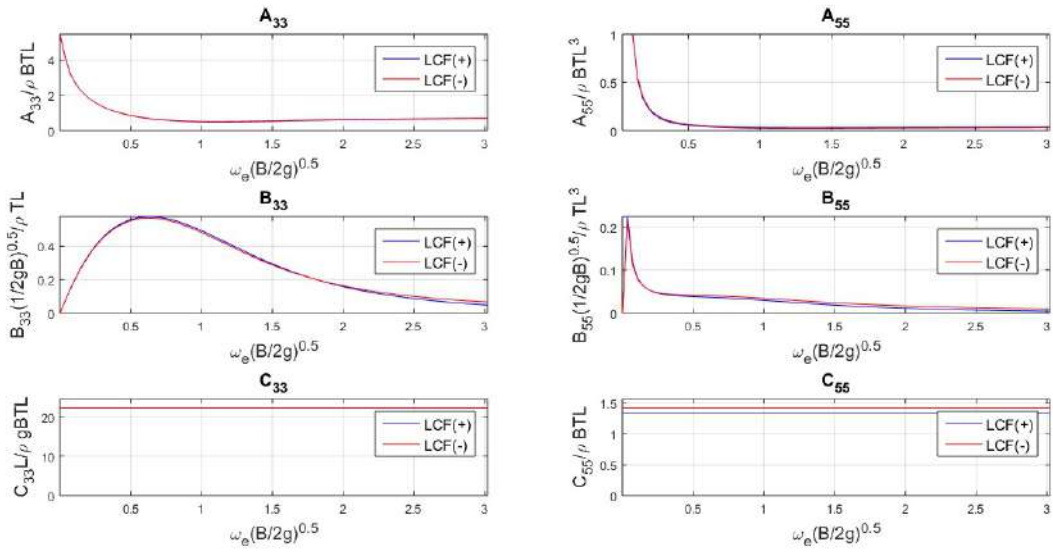


Figura H.3 – Coeficientes (LCF/Lpp).

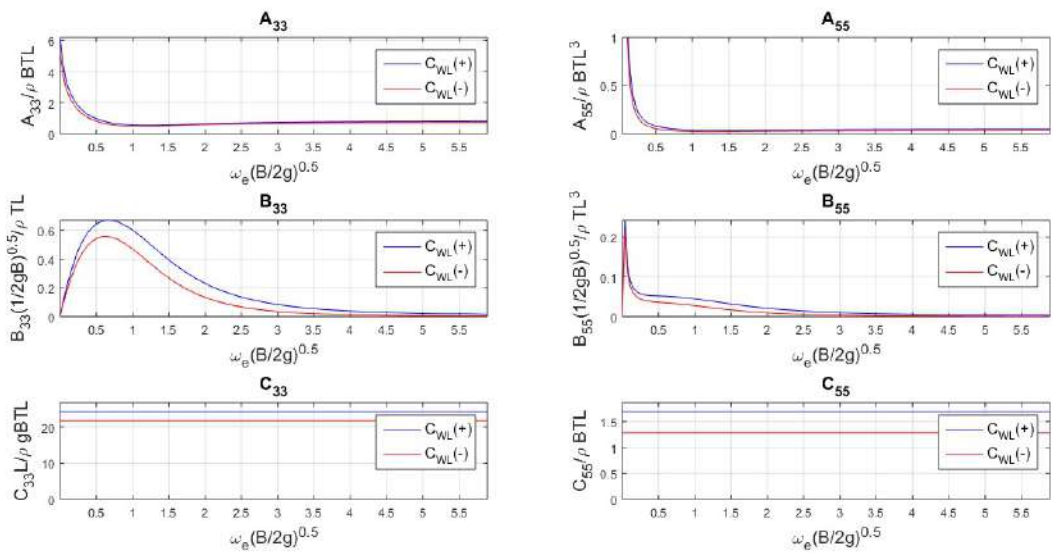


Figura H.4 – Coeficientes ( $C_{WL}$ ).

# APÊNDICE I. COMPARATIVO DE FORÇAS E COEFICIENTES

Para cada coeficiente de forma, foi quantificada a diferença dos componentes de excitação (APÊNDICE G) e de radiação (APÊNDICE H) entre os cascos de coeficiente extremo. A variação destes valores foi representada de acordo com a Tabela I.1. Os percentuais correspondem à diferença entre os valores médios de cada componente de excitação ou radiação, para uma ampla faixa de frequências.

A cor do símbolo que representa a variação (●) será a mesma do coeficiente de forma com maior valor médio de força ou radiação, azul para LCB(+),  $C_B(+)$ , LCF(+),  $C_{WL}(+)$  e vermelha para LCB(-),  $C_B(-)$ , LCF(-),  $C_{WL}(-)$ . Alterações com percentual inferior a 5% não foram consideradas nos comparativos.

Tabela I.1 - Representação de diferenças entre componentes de excitação e radiação.

Percentual de variação (%)	Alteração
< 5%	
5% a 10%	●
10% a 25%	●●
25% a 50%	●●●
> 50%	●●●●

## APÊNDICE J. DESLOCAMENTO RELATIVO

Com base nos dados de forças de excitação e dos coeficientes de radiação apresentados, foi analisada a composição do deslocamento relativo para os oito modelos de casco. Aqui são utilizadas todas as simplificações previamente apresentadas ao longo do texto. Adicionalmente, foi elaborado um novo diagrama de fase (Figura J.1).

No Figura J.1(a) são apresentados os diagramas de fase das parcelas de contribuição de *heave*, *pitch* e de elevação da onda no ponto P, em relação ao centro do movimento (foi adotado o CG). A Figura J.1(b) apresenta a razão, para cada frequência, entre o deslocamento relativo no ponto P e o deslocamento máximo possível, ou seja, efetuando o cálculo puramente com as amplitudes de cada contribuição, desconsiderando as influências de fase. O intuito deste novo diagrama seria exibir de forma muito simplificada a influência da fase de cada parcela no deslocamento relativo.

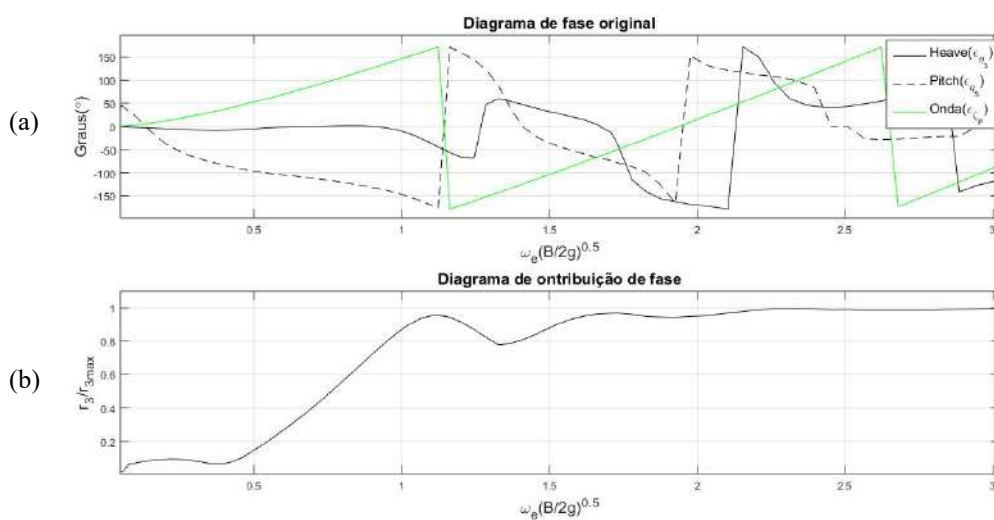


Figura J.1 - Diagrama de fase simplificado.

As Figuras J.2, J.3, J.4 e J.5 contém os diagramas de fase originais e as correspondentes simplificações para as 8 variações de casco.

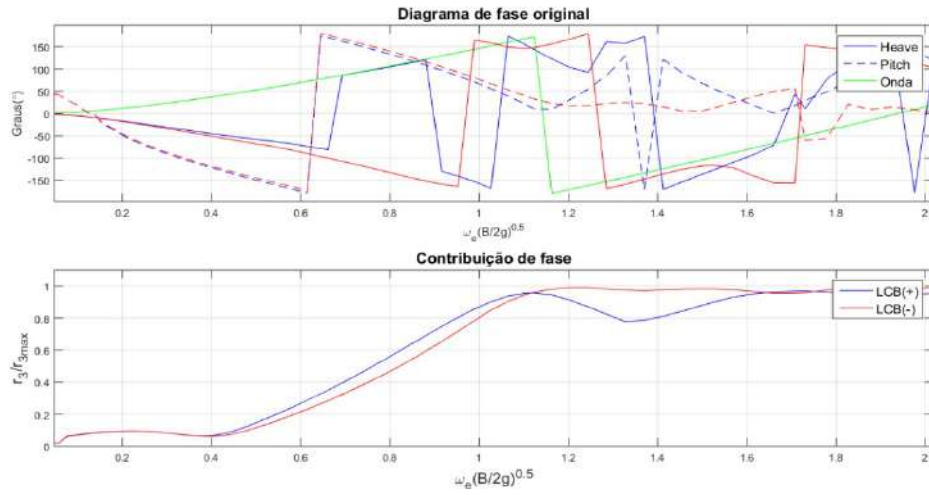


Figura J.2 – Diagrama de fase (LCB/L<sub>pp</sub>).

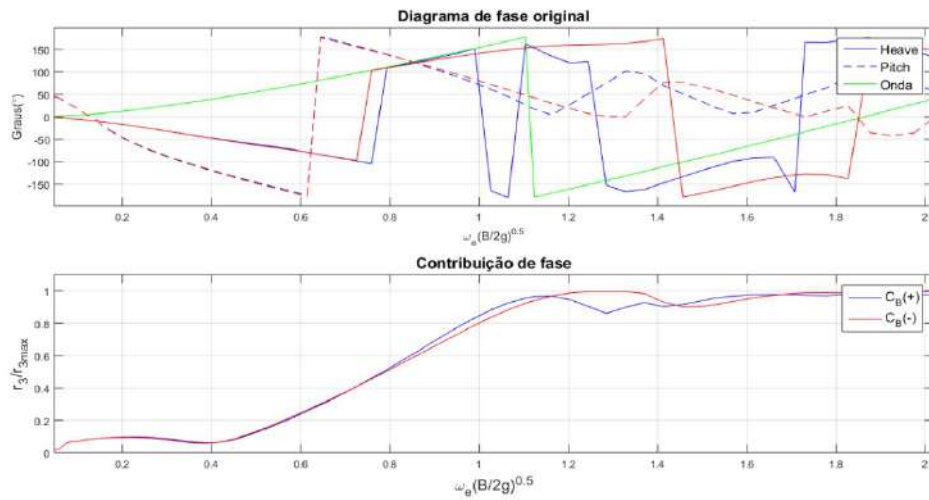


Figura J.3 – Diagrama de fase (C<sub>B</sub>).

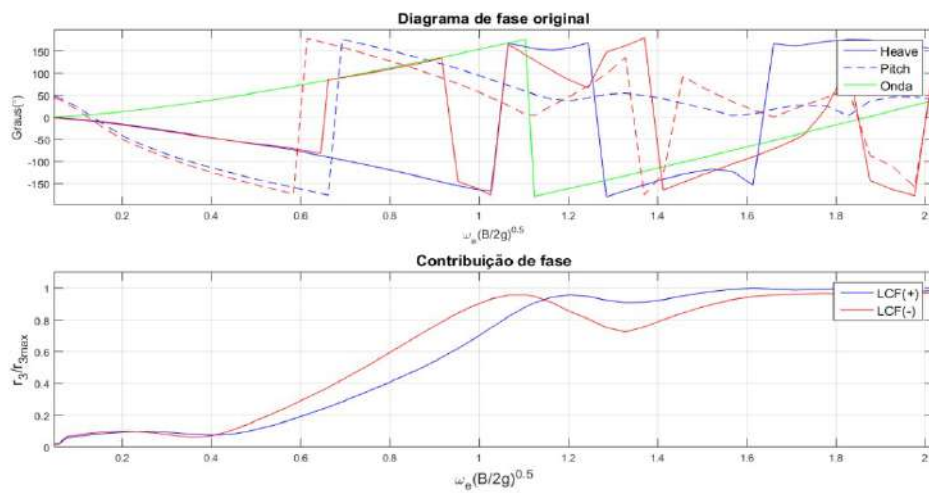


Figura J.4 – Diagrama de fase (LCF/L<sub>pp</sub>).

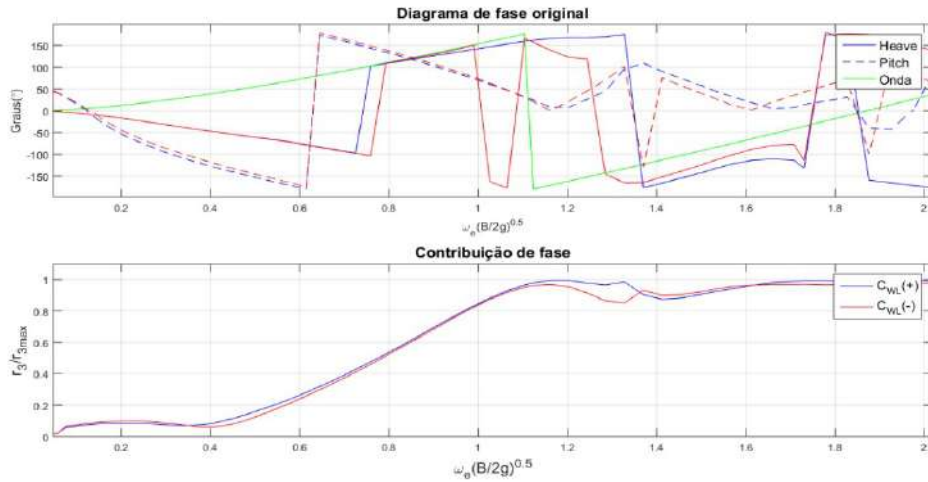


Figura J.5 – Diagrama de fase ( $C_{WL}$ ).

## J.1 ANÁLISE LCB/ $L_{pp}$

As variações de excitação e dos coeficientes estão concentradas na Tabela J.1, indicando que a variação LCB(+) possui maior coeficiente de amortecimento e excitação em *pitch*.

Tabela J.1 - Variações (LCB/ $L_{pp}$ ).

Parâmetro	Variação
$F_5$	●
$B_{55}$	●●

A composição do deslocamento relativo é apresentada na Figura J.6. Na Figura J.6(a) são apresentadas as amplitudes decorrentes do movimento de *heave* (curva contínua) e do componente de *pitch* multiplicada pela distância longitudinal do CG ao ponto P (curva tracejada).

Este gráfico indica uma maior amplitude em *heave* do modelo LCB(+), em torno da frequência adimensional de 1. A Figura J.6(b) indica a influência da fase (intervalo de frequência adimensional entre 1,2 e 1,6) no deslocamento relativo - Figura J.6(c).

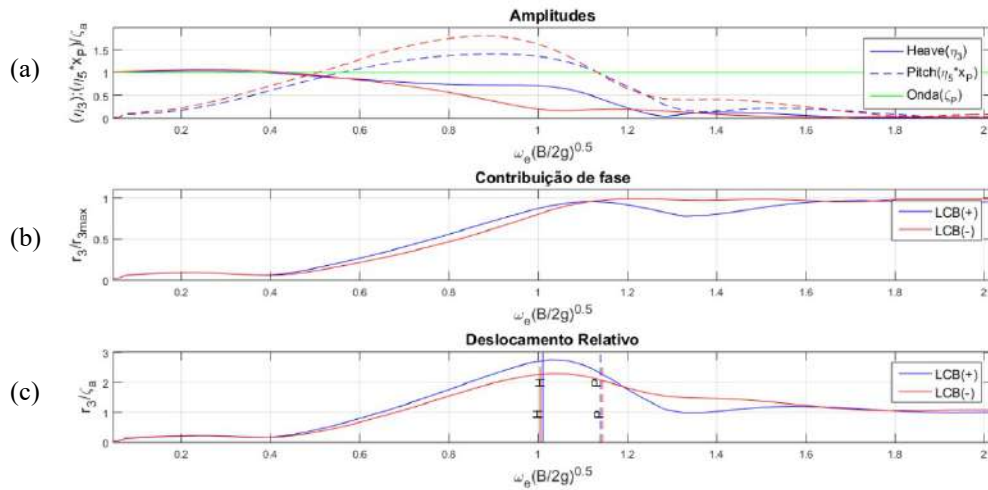


Figura J.6 - Deslocamento vertical relativo (LCB/L<sub>pp</sub>).

## J.2 ANÁLISE C<sub>B</sub>

Conforme descrito na Tabela J.2, o casco CB(+) apresenta maior inércia e amortecimento consideravelmente menor, o que torna as correspondentes amplitudes nos dois movimentos mais elevadas, conforme a Figura J.7(a).

Tabela J.2 - Variações (C<sub>B</sub>).

Parâmetro	Variação
A <sub>33</sub>	●●
B <sub>33</sub>	●●●●
B <sub>55</sub>	●●●●

Também foi possível verificar a influência da fase no intervalo de frequência adimensional entre 1,2 e 1,4 - Figuras J.7(b) e J.7(c).

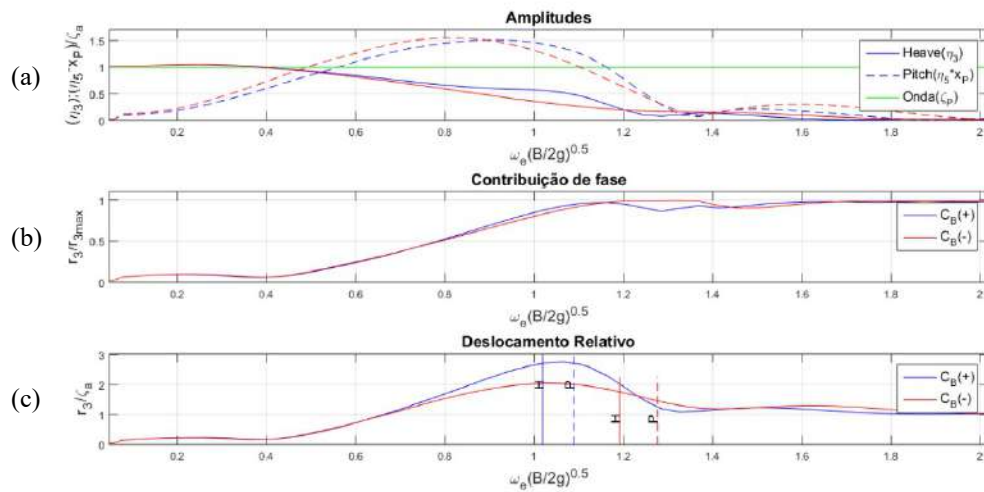


Figura J.7 - Deslocamento vertical relativo ( $C_B$ ).

### J.3 ANÁLISE LCF/L<sub>pp</sub>

De acordo com a Tabela J.3, LCF(-) possui maior momento de excitação, coeficientes de amortecimento e restauração em *pitch*.

Tabela J.3 - Variações (LCF/L<sub>pp</sub>).

Parâmetro	Variação
$F_5$	●
$B_{55}$	●●
$C_{55}$	●

A Figura J.8(b) indica a influência da fase (intervalo de frequência adimensional entre 1,2 e 1,6) no deslocamento relativo - Figura J.8(c).

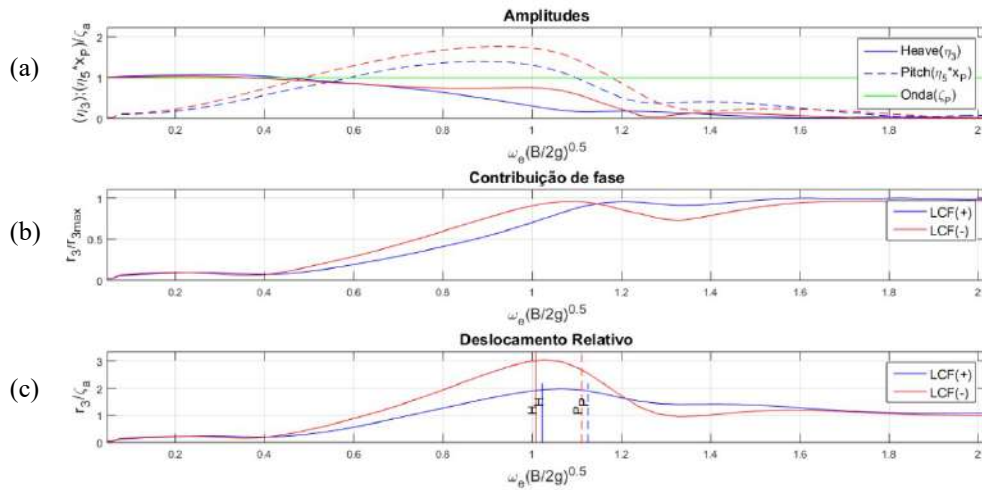


Figura J.8 - Deslocamento vertical relativo (LCF/L<sub>pp</sub>).

## J.4 ANÁLISE $C_{WL}$

A Tabela J.4 contém todas as variações verificadas entre os extremos deste adimensional. O somatório de todos os fatores de excitação e coeficientes de inércia, amortecimento e restauração implicaram em menores amplitudes para os movimentos de  $C_{WL}(+)$ , de acordo com a Figura J.9.

Tabela J.4 - Variações ( $C_{WL}$ ).

Parâmetro	Variação
$F_3$	●●
$F_5$	●●●
$A_{33}$	●●
$A_{55}$	●●
$B_{33}$	●●●
$B_{55}$	●●●
$C_{33}$	●●
$C_{55}$	●●●



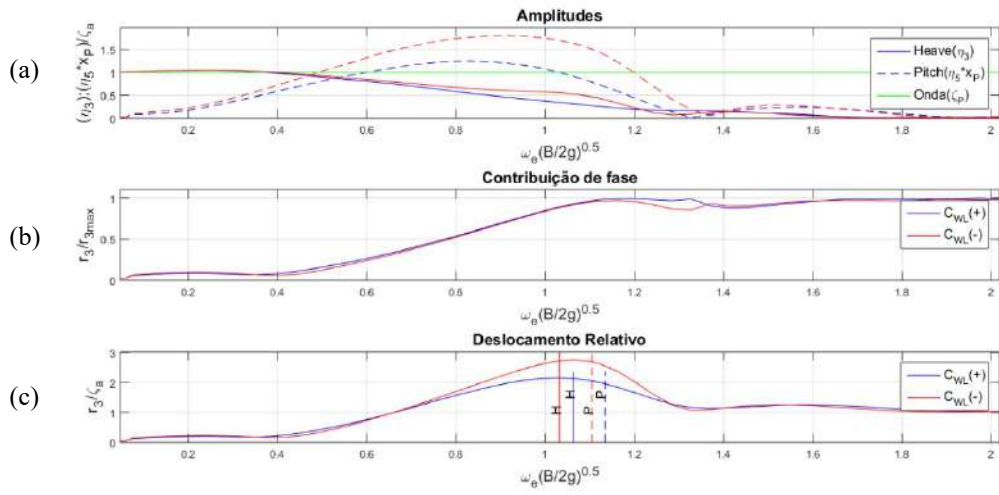


Figura J.9 - Deslocamento vertical relativo ( $C_{WL}$ ).