

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA

Paulo Rodrigo Ramos de Almeida

ESTUDO DA ESTABILIDADE TRANSVERSAL E DO MOVIMENTO DE
BALANÇO DE UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL

Manaus
2023

Paulo Rodrigo Ramos de Almeida

ESTUDO DA ESTABILIDADE TRANSVERSAL E DO MOVIMENTO DE
BALANÇO DE UMA EMBACAÇÃO REGIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval, na Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas.

Orientador: Jassiel Vladimir Hernández Fontes

Manaus

2023

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

D278ee Almeida, Paulo Rodrigo Ramos de
Estudo da Estabilidade Transversal e do Movimento de
Balanço de Uma Embarcação Regional / Paulo Rodrigo
Ramos de Almeida. Manaus : [s.n], 2023.
88 f.: color.; 31 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Naval - Universidade
do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.

Inclui bibliografia

Orientador: Jassiel Vladimir Hernández Fontes

1. Arquitetura naval. 2. estabilidade transversal. 3.
distribuição de pesos. 4. equilíbrio hidrostático. 5.
movimento de balanço. I. Jassiel Vladimir Hernández
Fontes (Orient.). II. Universidade do Estado do
Amazonas. III. Estudo da Estabilidade Transversal e do
Movimento de Balanço de Uma Embarcação Regional

Paulo Rodrigo Ramos de Almeida

ESTUDO DA ESTABILIDADE TRANSVERSAL E DO MOVIMENTO DE
BALANÇO DE UMA EMBACAÇÃO REGIONAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
requisito para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Naval, na Escola Superior de
Tecnologia da Universidade do Estado do
Amazonas.

Aprovado em 24 de agosto de 2023.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes
Universidade do Estado do Amazonas

Prof. Dr. Elvis Jhoarsy Osório Santander
Universidade do Estado do Amazonas

Prof. Dr. Eduardo Rafael Barreda del Campo
Universidade do Estado do Amazonas

Prof. Dr. José Ramón Hechavarría Pérez
Universidade do Estado do Amazonas

Manaus
2023

Dedico este trabalho à minha avó, a Sra. Glória Pereira Ramos e à minha mãe, a Sra. Raquel de Souza Ramos, por terem me acompanhado por toda a vida e terem exercido papel fundamental na formação do meu caráter.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todos os dias ter tido amor por mim, dando-me dificuldades a superar para que pudesse moralmente e intelectualmente evoluir.

Prezados familiares e colaboradores, expresso a minha mais profunda gratidão por todo o apoio, suporte, dedicação e paciência demonstrado a mim ao longo dos anos. Não há vocábulos suficientes para expressar o quanto valorizo cada um de vocês e tudo o que fizeram por mim.

Agradeço a minha família por estar sempre presente em todos os momentos importantes da minha vida, bons e ruins. Aos que me deram amor incondicional, paciência e encorajamento, meus pais, o Sr. Wallace Pinto Ferreira e a Sra. Raquel de Souza Ramos, sem vocês, eu não teria chegado tão longe na vida e não teria me tornado a pessoa que sou hoje.

Agradeço aos meus colaboradores por todas as oportunidades acadêmicas, e as oportunidades de aprendizado e eticidade no ambiente acadêmico e de trabalho, dentre os quais destaco o Me. Leonardo Alves Vergasta e o Bel. José Ricardo Chaves Coelho. O sucesso que alcanço é o resultado de todo o esforço, comprometimento e oportunidades que me foram proporcionadas a cada etapa da minha fase de graduação.

Agradeço ao meu orientador, Dr. Jassiel Vladimir Hernández-Fontes, pelas oportunidades proporcionadas a mim, ressalto que a sua paixão pela ciência me inspira e me faz enxergar a ciência em sua verdadeira amplitude.

Agradeço à empresa *Bentley Systems* pela disponibilidade da versão acadêmica do software *Maxsurf* utilizado no presente trabalho.

Este trabalho foi apoiado pelo Governo do Estado do Amazonas com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM por meio do projeto de pesquisa intitulado “Acidentes com embarcações na região amazônica: identificação de causas e alternativas de prevenção”, chamada N°010/2021 – CT&I Áreas Prioritárias.

“É importante não deixar de questionar. A curiosidade tem uma razão de existir”

Albert Einstein, Memórias do editor Willian Miller, citadas em edições da revista Life de 1955

RESUMO

A navegação interior de transporte longitudinal de cargas e passageiros nos rios da Amazônia tem um papel importante no desenvolvimento regional, pois muitas vezes, o transporte hidroviário é a única alternativa. Para isto, é comum o uso de embarcações regionais, cuja característica principal é a altura considerável da sua superestrutura. Muitas vezes, estas embarcações são superlotadas de pessoas e carga em geral. Quando sobrecarregadas em conveses superiores, o centro de gravidade da embarcação tende a se elevar, podendo reduzir a capacidade de restauração durante o movimento de balanço. Se além disto, soma-se a interação de forças externas como as geradas por ondas e rajadas de ventos, a embarcação pode entrar em condições de instabilidade. Como contribuição ao entendimento deste problema, o presente trabalho apresenta um estudo da estabilidade transversal e do movimento de balanço de uma embarcação regional de transporte de carga e passageiros, com a finalidade de avaliar os efeitos de diferentes condições de carregamento. A embarcação foi modelada utilizando software de desenho assistido por computador. Por outro lado, as análises de estabilidade e movimentos foram feitas usando métodos disponíveis no software *Maxsurf Stability* e *Motions*, respectivamente. Em ambas as análises foram feitas comparações de resultados para avaliar o efeito da variação da condição de carregamento da embarcação. Foi avaliada a estabilidade intacta da embarcação e os resultados obtidos foram comparados com normativas regionais, discutindo as condições inseguras de operação. Por outro lado, a análise do movimento de balanço foi feita em condições de em ondas regulares, sendo verificado que a variação do centro de gravidade vertical da embarcação muda a condição de onda na qual pode ocorrer o máximo deslocamento angular. O procedimento simplificado proposto no presente trabalho pode ser estendido para caracterizar a estabilidade e a dinâmica de outras embarcações regionais similares.

Palavras-chave: Arquitetura naval, estabilidade transversal, distribuição de pesos, equilíbrio hidrostático, movimento de balanço.

ABSTRACT

Inland navigation for the longitudinal transport of cargo and passengers on the rivers of the Amazon has an important role in regional development, as waterway transport is often the only alternative. For this, it is common to use regional vessels, whose main feature is the considerable height of their superstructure. These vessels are often overcrowded with people and cargo in general. When overloaded on upper decks, the center of gravity of the vessel tends to rise, which may reduce the restoration capacity during roll motion. If, in addition to this, the interaction of external forces, such as those generated by waves and wind, is added, the vessel may experience conditions of instability. As a contribution to the understanding of this problem, the present work presents a study of the transverse stability and the roll motion of a regional cargo and passenger transport vessel, with the purpose of evaluating the effects of different loading conditions. The vessel was modeled using computer aided design software. On the other hand, stability and motion analyzes were performed using methods available in the Maxsurf Stability and Motions software, respectively. In both analyzes, comparisons of results were made to evaluate the effect of varying the vessel's loading condition. The intact stability of the vessel was evaluated, and the results obtained were compared with regional regulations, discussing the unsafe operating conditions. On the other hand, the analysis of the roll motion was carried out in conditions of regular waves, and it was verified that the variation of the vessel's vertical center of gravity changes the wave condition in which the maximum angular displacement can occur. The simplified procedure proposed in the present work can be extended to characterize the stability and dynamics of other similar regional vessels.

Keywords: Naval architecture, transversal stability, weight distribution, hydrostatic equilibrium, roll motion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Distritos navais brasileiros, definidos por regiões de diferentes cores. As palavras em branco denotam os nomes dos Estados brasileiros. O contorno contínuo em linha preta delimita a Amazônia Legal (ou em outros termos, Amazônia brasileira).	19
Figura 2: Fluxograma de metodologia de estudo da dinâmica de um sistema naval.	22
Figura 3: Estrutura SAR.	27
Figura 4: Organograma de agentes regulamentários.	29
Figura 5: Critério para a CEE devido Braços de Emborcamento.	30
Figura 6: Fluxograma do estudo de Estabilidade.	32
Figura 7: Embarcação em condição de equilíbrio de forças.	33
Figura 8: Embarcação em condição de equilíbrio estável, $GMt [m] > 0$	34
Figura 9: Embarcação em condição de equilíbrio indiferente ou neutra, $GMt [m] = 0$	34
Figura 10: Embarcação em condição de equilíbrio instável, $GMt [m] < 0$	35
Figura 11: Braço de adriçamento GZ [m], e deslocamento de massa através das cunhas submersas e emersas.	35
Figura 12: Movimentação transversal de peso, influenciando o braço GZ.	37
Figura 13: Movimentação vertical de peso, influenciando o braço GZ.	37
Figura 14: Os seis graus de liberdade (GdL) de uma embarcação, translacionais e rotacionais. GdLs rotacionais: (a) Guinada. (b) Balanço e (c) Arfagem. GdLs translacionais: (d) Avanço. (e) Deriva e (f) Afundamento.	38
Figura 15: Desenvolvimento da ressonância do balanço paramétrico.	42
Figura 16: (a) Ressonância do balanço para través. (b) Ressonância do balanço paramétrico. (c) Faixa de frequência da ressonância do balanço paramétrico.	42
Figura 17: Fluxograma de softwares utilizados.	45
Figura 18: Fluxograma do processo de construção do casco de uma embarcação amazônica.	46
Figura 19: Fluxograma de análise de curvas GZ.	47
Figura 20: Fluxograma de Análise dos OARs.	47
Figura 21: Casco Pantera Negra modelado em 3D. (a) Vista de perspectiva da proa. (b) Vista de perspectiva da popa.	51
Figura 22: Vistas da embarcação Pantera Negra em 3D.	52
Figura 23: Curvas cruzadas em 2D.	53
Figura 24: Variação dos braços de adriçamentos em águas calmas em comparação a ondas senoidais com crista à meia-nau e ondas senoidais com vale à meia-nau.	54

Figura 25: Curvas de Estabilidade para águas calmas com variação de calado e CGV. (a) Curvas de Estabilidade Estática (CEE). (b) Curvas de Estabilidade Dinâmica (CED).55

Figura 26: Ondas senoidais com amplitude ζ [m] = 0,5, comprimentos de onda de λ [m] = 15,225 e λ [m] = 30,45 e diferenças de fase de 0 e $\pi/2$. (a) λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e sem diferença de fase com crista à meia-nau. (b) λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com vale à meia-nau. (c) λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com crista à meia-nau. (d) λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5, sem diferença de fase com vale à meia-nau.56

Figura 27: Ondas com λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e sem diferença de fase com crista à meia-nau e variação de carga ∇ e CGV. (a) CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (b) CEDs para as restrições de (a). (c) CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1,309 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (d) CEDs para as restrições de (c). (e) CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1,445 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (f) CEDs para as restrições de (e).58

Figura 28: Ondas com λ [m] = 15,22, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com vale à meia-nau, variação de calado e CGV. (a) CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$ Calado 1 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (b) CEDs para as restrições de (a). (c) CEEs com λ [m] = 15,22, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1,309 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (d) CEDs para as restrições de (c). (e) CEEs com λ [m] = 15,22, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1,445 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (f) CEDs para as restrições de (e).60

Figura 29: Ondas com λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5, sem diferença de fase com vale à meia-nau, variação de calado e CGV. (a) CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (b) CEDs para as restrições de (a). (c) CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1,309 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (d) CEDs para as restrições de (c). (e) CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1,445 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (f) CEDs para as restrições de (e).62

Figura 30: Ondas com λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com crista à meia-nau, variação de calado e CGV. (a) CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (b) CEDs para as restrições de (a). (c) CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1,309 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (d) CEDs para as restrições de (c). (e) CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1,445 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (f) CEDs para as restrições de (e).65

Figura 31: Restrições para o OAR n4 desacoplado em calado 1 [m], variação de centro de gravidade vertical e velocidade de avanço. (a) Funções de transferência para o calado 1 [m]

com CGV = 1,33 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; quadrado vermelho = Sem vel. de avanço, triângulo verde = Fn 0,2, xis roxo = Fn 0,4. (b) Funções de transferência para o calado 1 [m] com CGV 2,66 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; círculo laranja = Sem vel. de avanço, mais azul escuro = Fn 0,2, menos vinho = Fn 0,4. (c) Funções de transferência para o calado 1 [m] com CGV 4 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; quadrado roxo = Sem vel. de avanço, quadrado verde-água = Fn 0,2, triângulo laranja escuro = Fn 0,4.....	68
Figura 32: Restrições para o OAR n4 desacoplado em calado 1,309 [m], variação de centro de gravidade vertical e velocidade de avanço. (a) Funções de transferência para o calado 1,309 [m] com CGV = 1,33 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; quadrado vermelho = Sem vel. de avanço, triângulo verde = Fn 0,2, xis roxo = Fn 0,4. (b) Funções de transferência para o calado 1,309 [m] com CGV 2,66 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; círculo laranja = Sem vel. de avanço, mais azul escuro = Fn 0,2, menos vinho = Fn 0,4. (c) Funções de transferência para o calado 1,309 [m] com CGV 4 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; quadrado roxo = Sem vel. de avanço, quadrado verde-água = Fn 0,2, triângulo laranja escuro = Fn 0,4.....	69
Figura 33: Restrições para o OAR n4 desacoplado em calado 1,445 [m], variação de centro de gravidade vertical e velocidade de avanço. (a) Funções de transferência para o calado 1,445 [m] com CGV = 1,33 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; quadrado vermelho = Sem vel. de avanço, triângulo verde = Fn 0,2, xis roxo = Fn 0,4. (b) Funções de transferência para o calado 1,445 [m] com CGV 2,66 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; círculo laranja = Sem vel. de avanço, mais azul escuro = Fn 0,2, menos vinho = Fn 0,4. (c) Funções de transferência para o calado 1,445 [m] com CGV 4 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; quadrado roxo = Sem vel. de avanço, quadrado verde-água = Fn 0,2, triângulo laranja escuro = Fn 0,4.....	71
Figura 34: Restrições para o OAR n4 desacoplado em velocidade de avanço Fn n em mar de través e variação de Calado e CGVs. (a) Funções de transferência para o calado 1 [m] com variação de CGV [1,33 - 4]; xis azul = CGV 1,33, menos verde-água = CGV 2,66, triângulo verde = CGV 4. (b) Funções de transferência para o Calado de 1,309 com variação de CGV [1,33 - 4]; mais azul = CGV 1,33, quadrados verde-água = CGV 2,66, círculo verde-limão = CGV 4. (c) Funções de transferência para o Calado 4 [m] com variação de CGV [1,33 - 4]; quadrado azul = CGV 1,33, xis verde-água = CGV 2,66, menos verde = CGV 4.....	72
Figura 35: Flagrante de excesso de passageiros.	79
Figura 36: Relação estatística anual de Naufrágios e Decessos.	79
Figura 37: Superestrutura da embarcação Freire II destruída à esquerda e local do acidente à direita.	81

Figura 38: Embarcação Novo Amapá superlotada à esquerda, representação artística do naufrágio do Novo Amapá à direita.	81
Figura 39: Embarcação Sobral Santos II.	82
Figura 40: Embarcação Ana Maria VIII.	83
Figura 41: Embarcação Princesa Amanda.	83
Figura 42: Embarcação Comandante Sales naufragado.	84
Figura 43: Embarcação Almirante Monteiro naufragado.	85
Figura 44: Embarcação N/M Anna Karoline III.	85
Figura 45: Quadro de referências ao ponto zero da embarcação.	86
Figura 46: Tabela de configuração de carga e distribuição de centros de gravidade.	86
Figura 47: Tabela de restrições de incremento de calado, com CGL e CGV pré-estabelecidos.	87
Figura 48: Seleção para simulação de critérios normativos NORMAM-02.	87
Figura 49: Menu de seleção de análise de simulação.	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Centros de Coordenação SAR, MRCCs e RCCs.....	23
Tabela 2: Sobreviventes, Desaparecidos e Decessos em 2019, atualização até 08/01/20.....	24
Tabela 3: Sobreviventes, Desaparecidos e Decessos em 2020, atualização até 05/01/21.....	24
Tabela 4: Sobreviventes, Desaparecidos e Decessos em 2021, atualização até 05/01/22.....	25
Tabela 5: Estatísticas do 9º DN entre 2019-22.	26
Tabela 6: Critérios de Estabilidade para a Área 1.	30
Tabela 7: Critérios de Estabilidade para a Área 1 que não atendam ao item d da Tabela 6. ...	30
Tabela 8: Critérios de Estabilidade para a Área 2.	31
Tabela 9: GdLs classificados como rotacionais e translacionais de uma embarcação.....	39
Tabela 10: Características de padrões em embarcações regionais amazônicas para as atividades de transporte misto, de carga e passageiros na região da Amazônia ocidental brasileira.	44
Tabela 11: Características selecionadas de padrões em embarcações amazônicas para as atividades de transporte misto, de carga e passageiros na Amazônia ocidental brasileira.....	44
Tabela 12: Casos de estudo em águas calmas.	49
Tabela 13: Casos de estudo em ondas senoidais com amplitude 0,5 [m].....	50
Tabela 14: Características selecionadas para o casco da embarcação regional selecionada como caso de estudo, nomeada Pantera Negra.....	51
Tabela 15: Critérios NORMAM-02/DPC para as CEDs em condição de Estabilidade Intacta (EI) em águas calmas para múltiplos deslocamentos volumétricos (∇) e CGVs.	54
Tabela 16: Casos de estudo de com λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e sem diferença de fase com crista à meia-nau e variação de calado e CGV.....	57
Tabela 17: Casos de estudo de com λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com vale à meia-nau e variação de calado e CGV.	59
Tabela 18: Casos de estudo de com λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5 e sem diferença de fase com crista à meia-nau e variação de calado e CGV.....	61
Tabela 19: Casos de estudo com λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com crista à meia-nau e variação de calado e CGV.	64
Tabela 20: Restrições para o OAR n4 desacoplado em deslocamento volumétrico ∇A , 135° de ângulo de encontro, variação de centro de gravidade vertical e velocidade de avanço.	67
Tabela 21: Restrições para o OAR n4 desacoplado com calado 1,309 [m], 135° de ângulo de encontro, variação de centro de gravidade vertical e velocidade de avanço.	68

Tabela 22: Restrições para o OAR n4 desacoplado com calado 1,445 [m], 135° de ângulo de encontro, variação de centro de gravidade vertical e velocidade de avanço.	70
Tabela 23: Restrições para o OAR n4 desacoplado em velocidade de avanço F_n n em mar de través e variação de deslocamento volumétrico e centros de gravidade verticais.....	71
Tabela 24: Dados dos naufrágios mais significativos entre 1975 e 2020.....	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas
ANTAq – Agência Nacional de Transportes Aquaviários
ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil
ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações
BB - Bombordo
BE - Boreste
CED – Curvas de Estabilidade Dinâmica
CEE – Curva de Estabilidade Estática
COMPAAz – Comando de Operações Marítimas e Proteção da Amazônia Azul
COMOPNAV – Comando de Operações Navais
DN – Distrito Naval
DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
IAFN – Inquéritos Administrativos sobre Acidentes e Fatos da Navegação
MB – Marinha do Brasil
MMA – Massa, Mola, Amortecedor
MEE – Momento de Estabilidade Estática
TRI – Trimestre
SAR – Serviço de Busca e Salvamento Marítimo
MRCC – (*Maritime Rescue Coordination Centre*) Centro de Coordenação SAR
RCC – Centro de Coordenação SAR regionais
IMO – (*International Maritime Organization*) Organização Marítima Internacional
CSN – Certificado de Segurança da Navegação
NORMAM – Normas da Autoridade Marítima
DPC – Departamento de Portos e Costas
ONU – Organização das Nações Unidas
x – Coordenada Longitudinal
y – Coordenada Transversal
z – Coordenada Vertical
GdL – Grau de Liberdade

LISTA DE SÍMBOLOS

∇	Deslocamento Volumétrico
Φ	Ângulo de Adernamento
GM_0	Altura Metacêntrica Inicial
GM	Altura Metacêntrica
GM_t	Altura Metacêntrica Transversal
GM_ϕ	Altura Metacêntrica no ângulo de banda ϕ [°]
CGV	Centro de Gravidade Vertical
CGL	Centro de Gravidade Longitudinal
CGT	Centro de Gravidade Transversal
OAR	Operador de Amplitude de Resposta
ϕ_f	Ângulo de Alagamento
ϕ_{est}	Ângulo de Estabilidade
GZ_{max}	Braço de Adriçamento Máximo
GZ	Braço de Adriçamento
ρ	Densidade
g	Aceleração da Gravidade
M_H	Momento de Endireitamento
M_E	Momento de Emborcamento
BM_t	Raio Metacêntrico Transversal
F_B	Força de Empuxo
CF	Centro de Flutuabilidade
CVF	Centro Vertical de Flutuabilidade
CTF	Centro Transversal de Flutuabilidade
CF_ϕ	Centro de Flutuação no ângulo de banda ϕ [°]
M_ϕ	Metacentro deslocado devido ângulo de banda ϕ [°]
M	Metacentro
$CFCF'_\phi$	Centro de Flutuação deslocado devido ângulo de banda ϕ [°]
I_t	Inércia Transversal
CG	Centro de Gravidade
$CGCG_d$	Distância deslocada do Centro de gravidade CG para CG_d devido deslocamento d [m]
$J_{\phi_{n_4}}$	Momento de Inércia do balanço
$A_{\phi\phi_{n_4}}$	Coefficiente de Inércia adicional do balanço
$B_{\phi\phi_{n_4}}$	Coefficiente de Amortecimento do balanço
$C_{\phi\phi_{n_4}}$	Coefficiente de restauração do balanço
$M_{\phi_{n_4}}$	Momento de excitação do balanço na frequência de encontro, ω_e
ϕ_{n_4}	Deslocamento instantâneo do balanço
$\dot{\phi}_{n_4}$	Velocidade instantânea do balanço
$\ddot{\phi}_{n_4}$	Aceleração instantânea do balanço
$\beta_{\phi\phi_{n_4}}$	Fator de Amortecimento adimensional para o balanço desacoplado
Γ_{n_4}	Fator de Amortecimento para o balanço desacoplado

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	18
2.	OBJETIVOS.....	21
2.1.	OBJETIVO GERAL	21
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
3.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
3.1.	TEORIA APLICADA AO ESTUDO	22
3.2.	ESTATÍSTICAS E ESTRUTURA DO SERVIÇO DE BUSCA E SALVAMENTO (SAR)	22
3.3.	NORMAS DA AUTORIDADE MARÍTIMA (NORMAM) NA NAVEGAÇÃO INTERIOR NA AMAZÔNIA OCIDENTAL	28
3.4.	ESTIMATIVA DE CARGA E CENTROS DE GRAVIDADE	31
3.5.	PRINCÍPIOS ELEMENTARES DE ESTABILIDADE	32
3.6.	BRAÇO DE ADRIÇAMENTO E MOMENTO RESTAURADOR.....	35
3.7.	EFEITOS DAS MUDANÇAS DE PESOS NA ESTABILIDADE	36
3.8.	CONCEITOS DE DINÂMICA DE EMBARCAÇÕES	38
3.9.	MOVIMENTO DE BALANÇO DESACOPLADO	39
3.10.	SELEÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DO MODELO DE ESTUDO	43
4.	METODOLOGIA	45
4.1.	ETAPAS DO ESTUDO	48
4.2.	HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS PARA A ANÁLISE DAS CURVAS GZ E OS OPERADORES DE AMPLITUDE DE RESPOSTAS (OARS).....	48
4.3.	CASOS DE ESTUDO DOS BRAÇOS ADRIÇANTES.....	49
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
5.1.	CURVAS DE ESTABILIDADE ESTÁTICA (CEE) E DINÂMICA (CED)	53
5.1.1.	Águas calmas	54
5.1.2.	Ondas senoidais	56
5.2.	OPERADORES DE AMPLITUDE DE RESPOSTAS (OARS)	66
6.	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS	74
	APÊNDICE A - REVISÃO DE ACIDENTES NA REGIÃO AMAZÔNICA	78
	APÊNDICE B - PROCEDIMENTO DE ANÁLISE USANDO SOFTWARE.....	86

1. INTRODUÇÃO

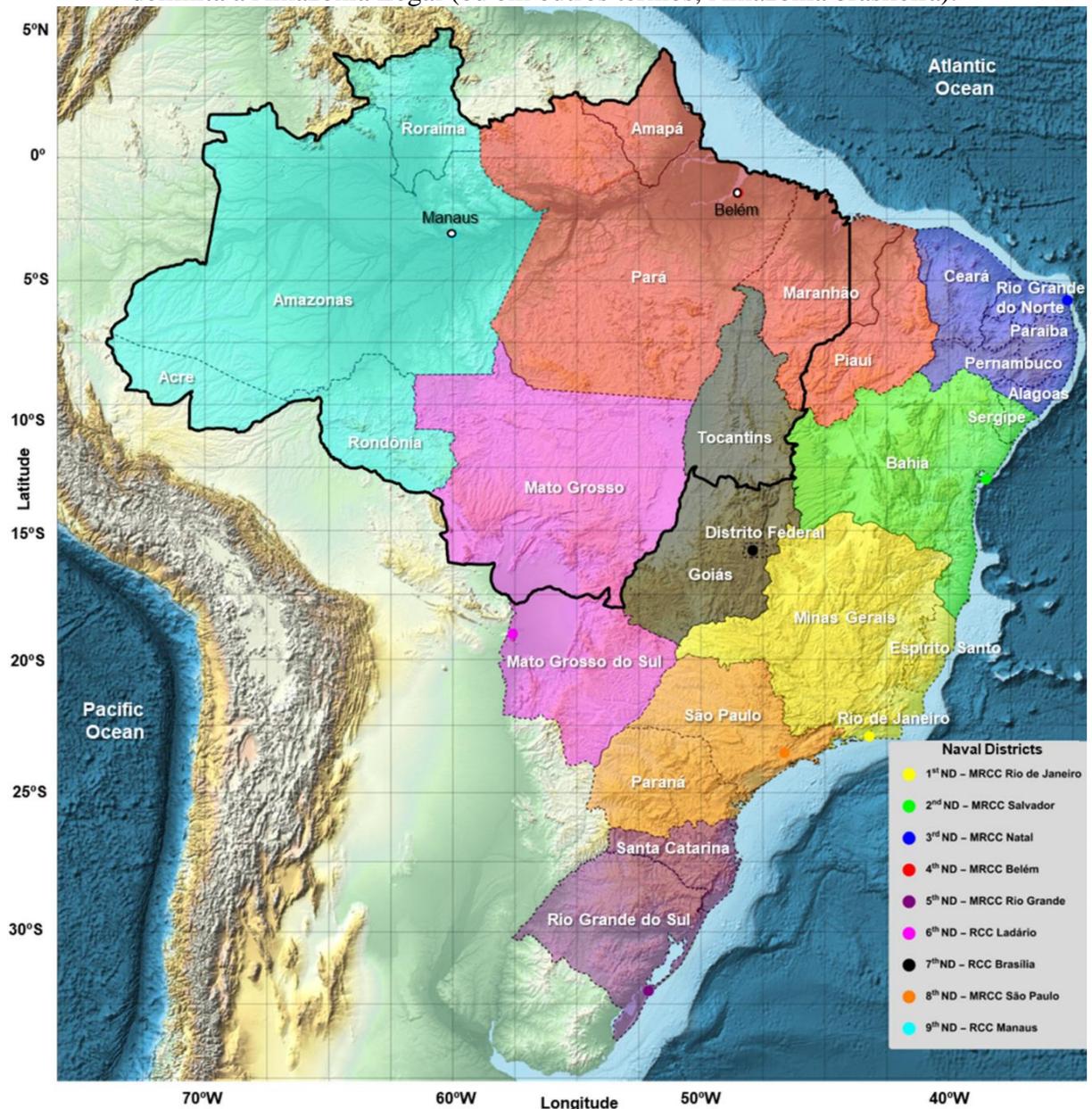
A maior floresta tropical da terra, a Amazônica, tem uma área de 7,1 mi [km²], equivalente a 59,9 [%] do território brasileiro. A sua bacia hidrográfica se origina nas montanhas dos Andes, no Peru, e cruza a América do Sul (MARTINI; DUARTE; ARAI, 2008), percorrendo mais 5 países: Equador, Colômbia, Venezuela, Bolívia e Brasil, até desaguar no oceano Atlântico. O rio Amazonas é o principal rio da Amazônia brasileira, cuja bacia hidrográfica possui a mais extensa rede hidrográfica do planeta, mais de 25 mil [km] de rios navegáveis (DNIT, 2018) e 10,5 mi [km] em extensão hidroviária (PARENTE; SZLAFSZTEIN, 2022), principalmente no Amazonas e Pará (FONTES et al., 2023).

A região da floresta amazônica em território brasileiro é denominada Amazônia Legal, essa região se destaca para o interesse nacional pelas suas riquezas em biodiversidade e potenciais de exploração de recursos naturais, tendo em vista que esta região detém ~1/3 das reservas de florestas tropicais úmidas do mundo, contribuindo com 18 [%] de água doce do planeta sendo transportada para o oceano atlântico, com uma vazão de 210 [m³/s] (JÉZÉQUEL et al., 2022). A Amazônia Legal engloba 8 estados brasileiros, sendo eles: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins e parte do Estado do Maranhão. A região é responsável por mudanças ambientais como a reciclagem de precipitação, cooperando diretamente para manutenção do regime hidrológico (ROCHA et al., 2015).

A bacia amazônica possui baixa declividade na planície aluvial, com terrenos baixos e planos junto aos cursos d'água, assim como uma grande diversidade de afluentes (SILVA, J. S., 2010), além de ser extremamente vulnerável a fatores causados por mudanças naturais e antropogênicas, essas mudanças afetam as funções dos ecossistemas na bacia amazônica, enfraquecem ou intensificam o ciclo hidrológico regional, interferindo negativamente na agricultura, geografia, biodiversidade e ecossistemas, áreas urbanas e rurais além da própria navegação fluvial, de comércio ou esporte (GUIMBERTEAU et al., 2013).

Para facilitar a administração nacional, adotou-se a divisão nacional brasileira em 9 Distritos Navais (DNs), cujas composições correspondentes têm dois ou mais estados integrados para a administração da Marinha do Brasil, como mostrado na Figura 1, onde o contorno em linha preta representa a Amazônia brasileira (Amazônia legal). O Brasil possui 6 Centros de Coordenação de Resgate Marítimo SAR – MRCC e 3 Centros de Coordenação de Resgate SAR – RCC em águas interiores (MARINHA DO BRASIL, 2022a).

Figura 1: Distritos navais brasileiros, definidos por regiões de diferentes cores. As palavras em branco denotam os nomes dos Estados brasileiros. O contorno contínuo em linha preta delimita a Amazônia Legal (ou em outros termos, Amazônia brasileira).



Fonte: Fontes *et al.* (2023).

A navegação fluvial exerce influência no sistema regional amazônico de transporte de carga, passageiros, pesca, pesquisa e turismo. Embarcações de diversos tipos desempenham atividades de transporte de passageiros, incluindo carga de mercadorias. Entretanto, frequentemente não existe uma fiscalização adequada da distribuição de pesos na embarcação, de maneira que esteja garantida a sua obediência aos critérios de segurança de estabilidade quando submetida a diversas condições de navegação (SOARES; FILHO, 2014).

A navegação regional amazônica é um fator de desenvolvimento, gera processos de sustentação, integração e manutenção da Amazônia, tem caráter estratégico e é fundamental

para o desenvolvimento econômico e social, sem o transporte fluvial nesta região, ficariam em risco as economias locais, bem como processos produtivos. Em 2019, o transporte de cargas aumentou 235 [%] no transporte aquaviário em 10 anos, com 58.905 mi [ton] transportadas em 75 [%] das hidrovias amazônicas (OLIVEIRA, 2021). O rio Amazonas, um dos principais meios de navegação de pequeno, médio e grande porte, com uma declividade de 2 [cm/km], é umas das hidrovias mais favoráveis à navegação de transporte de cargas e passageiros. A malha hidroviária amazônica é responsável por parte do transporte de mercadorias, pessoas e animais da região (DNIT, 2021), possui papel vital no comércio intermunicipal e interestadual, no entanto, a operação de embarcações também pode ter efeitos negativos, como poluição sonora e visual, bem como a perda de áreas de pesca e de recreação, essas embarcações são fontes de poluição dos rios, através do derramamento de produtos tóxicos e lixo, que pode contaminar as águas e afetar a vida marinha e a saúde humana, causando danos físicos aos ecossistemas marinhos e afetando a biodiversidade e a qualidade da água.

A navegação de transporte de carga e passageiros é sensível à má distribuição de cargas, intensificando instabilidades na dinâmica da embarcação, influenciando na resposta do sistema naval¹, que envolve as interações entre a o casco e várias forças hidrodinâmicas distintas (LEWIS, EDWAR V., 1988a). Quanto mais próxima a posição do Centro de Gravidade Vertical (CGV) da posição metacêntrica (M), menor será o seu braço de adriçamento e, conseqüentemente, a sua capacidade de restauração será reduzida. Nestas condições, a estabilidade pode ser comprometida (BELENKY, VADIM; SEVASTIANOV, NIKITA B., 2007). Estudos têm sido feitos com relação ao movimento de balanço por Buča e Ivo (2006), Chai (2016) e Peres e Blanke (2010). Uma revisão de acidentes é apresentada no Apêndice A, enquanto a problemática de acidentes marítimos pode ser encontrada mais detalhadamente em Fontes *et al.* (2023) e Zappes *et al.* (2013). Embora diferentes estudos relacionados com estabilidade de embarcações e prevenção de acidentes graves, como naufrágios, tenham sido apresentados em outras regiões, é necessário contribuir com a literatura técnica e científica relacionada com o comportamento de embarcações regionais amazônicas.

Com o intuito de contribuir com essa linha de estudo, o presente trabalho visa avaliar o comportamento de uma embarcação regional de carga e passageiros, utilizando métodos de estabilidade e de movimentos disponíveis no *software Maxsurf* da *Bentley Systems*.

¹ Sistema naval – Diz-se um sistema que ao sofrer ações de forças externas ou internas produzirá respostas com frequência e intensidade; pode-se adotar como sistema naval qualquer estrutura flutuante, com propulsão ou não.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar a estabilidade transversal e o movimento de balanço de uma embarcação regional de carga e passageiros, verificando o efeito da variação de diferentes condições de carregamento e visando propor um procedimento simplificado que permita avaliar níveis de operação segura.

2.2. Objetivos específicos

- I. Descrever o problema de acidentes com embarcações de carga e passageiros regionais, revisando os naufrágios mais conhecidos na região amazônica;
- II. Modelar o casco de uma embarcação de transporte de carga e passageiros com características regionais amazônicas;
- III. Estudar a estabilidade intacta transversal e o movimento de balanço de uma embarcação regional de carga e passageiros em diferentes deslocamentos volumétricos e centros de gravidade verticais; e
- IV. Avaliar os movimentos desacoplados de balanço em ondas regulares, considerando o efeito das mudanças do CGV para diferentes deslocamentos volumétricos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. Teoria aplicada ao estudo

O estudo do comportamento dinâmico do sistema naval (DSN) aplicado a este estudo consiste em uma análise de hidrodinâmica considerando métodos de análise numérica, com um fluido não-viscoso, incompressível e irrotacional, através de métodos potenciais, utilizando a teoria das faixas (SALVESEN; TUCK; FALTINSEN, 1970), disponível em softwares de análise de comportamento dinâmico como o *Maxsurf Motions*.

A Figura 2 mostra as alternativas para avaliar a dinâmica de um sistema naval, as quais incluem métodos analíticos, numéricos e experimentais. No diagrama, pode ser observada a aplicabilidade da teoria das faixas.

Figura 2: Fluxograma de metodologia de estudo da dinâmica de um sistema naval.



Fonte: Autor.

3.2. Estatísticas e Estrutura do Serviço de Busca e Salvamento (SAR)

O serviço brasileiro de busca e salvamento SAR regulamenta a busca e salvamento para a salvaguarda da vida humana no mar, nos portos e hidrovias de navegação interior do Brasil.

É responsabilidade da autoridade marítima implementar e executar inspeção naval, dentre outras atividades, conforme a Lei 9.537 (1997), para assegurar a salvaguarda da vida

humana e a segurança da navegação em mar aberto e em navegação interior; além da prevenção da poluição ambiental de descartes de embarcações, plataformas e suas instalações de apoio.

O propósito das normas para os inquéritos administrativos sobre acidentes e fatos da navegação (IAFN), é estabelecer regulações para a sua instauração e instrução, assim como suas formalidades até o tribunal marítimo (MARINHA DO BRASIL, 2021a).

A Marinha do Brasil se faz presente em todo o território do nacional brasileiro, para que haja fluidez na administração naval, a instituição dividiu o Brasil em 9 Distritos Navais (DNs). Essa divisão permite que cada Distrito Naval seja composto por 2 ou mais estados (Figura 1) (MARINHA DO BRASIL, 2023a).

Cada Distrito Naval (DN) possui um centro de coordenação SAR, MRCC ou RCC, acrescido do nome do país ou cidade onde está localizado o centro. A função do MRCC é exercida pelo serviço de busca e salvamento da Marinha, no Brasil, a cargo dos comandos navais (DE ABREU, 2011).

A responsabilidade da supervisão do serviço de busca e salvamento marítimo é do MRCC Brazil, SALVAMAR Brasil, no Rio de Janeiro. Haja vista as dimensões da região de busca e salvamento SRR marítimo do Brasil, os centros de coordenação SAR são divididos em centros de coordenação MRCC e RCC, Tabela 1.

Tabela 1: Centros de Coordenação SAR, MRCCs e RCCs.

SALVAMAR		Localização	
Região	Estado	Cidade	
MRCC			
Norte	Pará	Belém	
Nordeste	Rio Grande do Norte	Natal	
Leste	Bahia	Salvador	
Sueste	Rio de Janeiro	Rio de Janeiro	
Sul	Rio Grande do Sul	Rio Grande	
Sul sueste	São Paulo	São Paulo	
RCC			
Noroeste	Amazonas	Manaus	
Oeste	Mato Grosso	Ladário	
Centro-Oeste	Distrito Federal	Distrito Federal	

Fonte: Adaptado de Marinha do Brasil (2023b).

As Tabelas 2, 3 e 4 destacam dados de sobreviventes, desaparecidos e decessos relacionados ao 9º DN, respectivamente, para os quatro trimestres do período de 2019-22.

A Tabela 2 é referente aos 4 trimestres de 2019-20 e indica 11,7 [%] de sobreviventes, 58,5 [%] desaparecidos e 24,5 [%] de decessos neste período são do 9º DN em relação aos números totais de todos os distritos navais.

Tabela 2: Sobreviventes, Desaparecidos e Decessos em 2019, atualização até 08/01/20.

		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	Total
		DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	
Sobrevivente	1° TRI	116	35	2	11	13	2	0	5	14	198
	2° TRI	72	6	27	258	14	4	0	73	133	587
	3° TRI	239	22	117	229	35	0	0	21	12	675
	4° TRI	776	56	30	255	41	5	2	35	172	1372
	Total	1203	119	176	753	103	11	2	134	331	2832
Desaparecido	1° TRI	5	0	0	6	0	0	0	0	11	22
	2° TRI	3	0	2	4	0	0	0	1	6	16
	3° TRI	5	0	3	0	0	0	0	0	5	13
	4° TRI	1	0	0	2	0	1	0	1	26	31
	Total	14	0	5	12	0	1	0	2	48	82
Decesso	1° TRI	3	0	0	6	1	3	0	6	3	22
	2° TRI	2	0	1	7	3	4	0	10	9	36
	3° TRI	7	1	7	12	4	0	0	7	4	42
	4° TRI	20	12	2	8	11	3	1	10	33	100
	Total	32	13	10	33	19	10	1	33	49	200

Fonte: Adaptado de Marinha do Brasil (2020).

A Tabela 3 é referente aos 4 trimestres de 2020-21 indica 11,5 [%] de sobreviventes, 39,2 [%] desaparecidos e 8,9 [%] de decessos neste período são do 9° DN em relação aos números totais de todos os distritos navais.

Tabela 3: Sobreviventes, Desaparecidos e Decessos em 2020, atualização até 05/01/21.

		1°	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	Total
		DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	
Sobrevivente	1° TRI	92	9	5	115	31	2	0	24	32	310
	2° TRI	27	7	20	31	16	4	0	23	17	145
	3° TRI	56	10	13	30	10	0	18	20	8	165
	4° TRI	58	20	1	13	23	0	6	25	35	181
	Total	233	46	39	189	80	6	24	92	92	801
Desaparecido	1° TRI	1	2	0	5	1	0	0	0	7	16
	2° TRI	1	0	0	3	0	0	0	3	4	11
	3° TRI	6	0	2	12	0	0	0	0	8	28
	4° TRI	0	2	0	3	1	0	0	3	10	19
	Total	8	4	2	23	2	0	0	6	29	74
Decesso	1° TRI	15	3	3	49	2	2	0	8	6	88
	2° TRI	18	6	1	12	7	1	0	11	4	60
	3° TRI	6	6	7	18	3	4	2	10	4	60
	4° TRI	3	2	1	2	6	1	2	4	7	28
	Total	42	17	12	81	18	8	4	33	21	236

Fonte: Adaptado de Marinha do Brasil (2021b).

A Tabela 4 é referente aos 4 trimestres de 2021 a 2022 indica 7,4 [%] de sobreviventes, 28,8 [%] desaparecidos e 9,1 [%] de decessos neste período são do 9º DN em relação aos números totais de todos os distritos navais.

Tabela 4: Sobreviventes, Desaparecidos e Decessos em 2021, atualização até 05/01/22.

		1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º	Total
		DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	DN	
Sobrevivente	1º TRI	77	11	1	37	6	12	6	6	12	168
	2º TRI	40	22	14	16	14	5	0	28	21	160
	3º TRI	151	14	8	7	18	13	0	28	15	254
	4º TRI	54	4	2	27	11	14	6	16	5	139
	Total	322	51	25	87	49	44	12	78	53	721
Desaparecido	1º TRI	2	0	0	4	0	0	0	1	9	16
	2º TRI	7	0	2	2	1	0	0	2	4	18
	3º TRI	1	0	5	4	1	1	0	1	6	19
	4º TRI	9	0	0	5	0	0	3	1	2	20
	Total	19	0	7	15	2	1	3	5	21	73
Decesso	1º TRI	11	3	0	7	2	4	2	3	2	34
	2º TRI	8	2	0	11	2	3	2	7	6	41
	3º TRI	6	2	1	5	3	4	0	10	6	37
	4º TRI	9	4	0	18	12	7	4	8	2	64
	Total	34	11	1	41	19	18	8	28	16	176

Fonte: Adaptado de Marinha do Brasil (2022b).

A Tabela 5 resume as estatísticas de acidentes no 9º DN no período 2019-22, nesse período de tempo no 9º DN, a estimativa oficial de sobreviventes em acidentes é de 476, dos quais 69,5 [%] dos fatos de navegação envolvendo sobreviventes ocorreram no período de 2019-20, no período de 2020-21 foi de 19,3 [%] e no período de 2021 a 2022 foi de 11,1 [%].

De 2019-22, oficialmente houve o total de 98 desaparecidos no 9º DN, entre 2019-20, a porcentagem indica 49 [%] dos totais desaparecidos, entre 2020-21 a porcentagem cai para 29,6 [%] e no intervalo de 2021-22, os números indicam 21,4 [%] do total para este intervalo.

No período de 2019-22 são apresentados um total de 86 decessos segundo a Marinha do Brasil, dos quais 56,9 [%] ocorreram no período de 2019-20, 24,4 [%] no período de 2020-21 e 18,6 [%] no Período de 2021-22.

A Tabela 5 extrai comparações entre as Tabelas [2-4], as informações para o intervalo de 2019-20, os 331 sobreviventes do 9º DN representam dentre todos os DN's, cerca de 11,7 [%] da soma total do número de acidentes, os 48 desaparecidos representam uma estimativa de 58,5 [%] do número total registrado nos 9 DN's, e os 49 decessos representam quase ~24,5 [%] da soma total dos 9 DN's.

Entre 2020-21, os 92 sobreviventes do 9º DN representam dentre todos os DN's, aproximadamente 11,5 [%], os 29 desaparecidos quase 39,2 [%] do total nos 9 DN's, os 21 decessos para o 9º DN no período de 2020-21 representam 8,9 [%] dos registros nos 9 DN's.

No intervalo de 2021-22, os 53 sobreviventes do 9º DN representam dentre os DN's, quase 7,4 [%] do total, os 21 desaparecidos representam 28,8 [%] do total nos 9 DN's, e os 16 decessos para o 9º DN no período de 2020-21 representam 9,1 [%] do total dos 9 DN's.

Tabela 5: Estatísticas do 9º DN entre 2019-22.

Índices	Período avaliado					
	2019-20		2020-21		2021-22	
	n.º de casos	%	n.º de casos	%	n.º de casos	%
Sobreviventes	331	11,7	92	11,5	53	7,4
Desaparecidos	48	58,5	29	39,2	21	28,8
Decessos	49	24,5	21	8,9	16	9,1

Fonte: Adaptado de Marinha do Brasil (2022b).

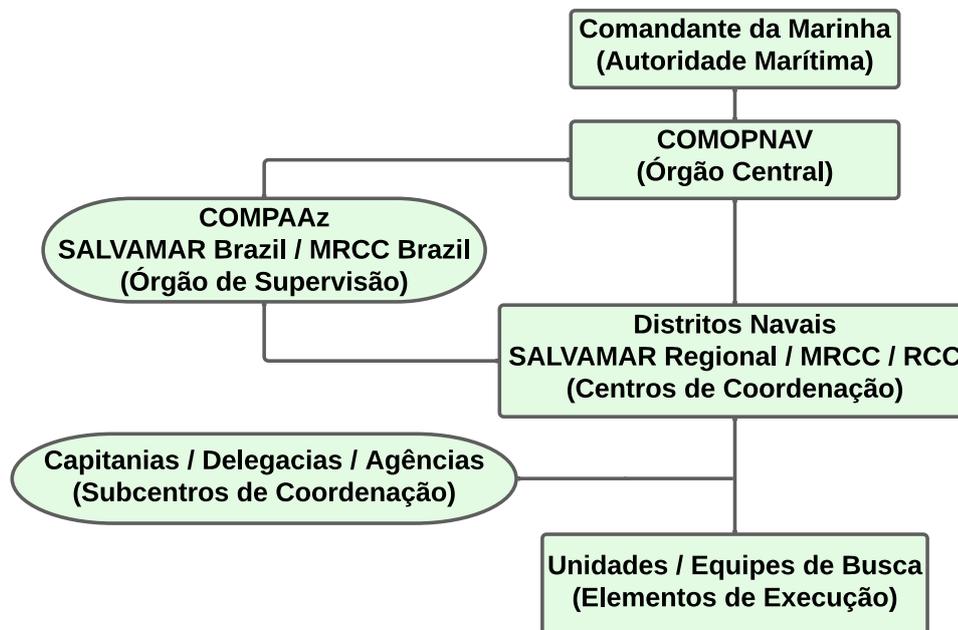
Os dados apresentados podem ser usados para avaliar as estratégias de resposta a emergências, os índices sugerem uma necessidade de otimização no tempo de resposta e eficácia das operações SAR. A estrutura SAR da Marinha do Brasil se refere à organização de coordenação e execução e aos recursos empregados para realizar operações de busca e salvamento marítimo em todo o território nacional e uma área de busca e salvamento internacional. A estrutura SAR da Marinha do Brasil é composta por vários elementos-chave (MARINHA DO BRASIL, 2023c):

- I. **Centro de Coordenação de Busca e Salvamento Marítimo, MRCC e RCC** - O MRCC é responsável pela coordenação centralizada de todas as operações de busca e salvamento marítimo. As informações sobre incidentes são recebidas, avaliadas e encaminhadas para as unidades e recursos adequados para ações de busca e salvamento. O RCC desempenha as mesmas funções para navegação interior;
- II. **Unidades de Busca e Salvamento** - A Marinha do Brasil mantém unidades especializadas em busca e salvamento, como embarcações de resgate, helicópteros e aeronaves de patrulha marítima. Essas unidades estão planejadas para responder rapidamente a incidentes e realizar operações de busca e salvamento; e
- III. **Sistema de Comunicação e Alerta** - A estrutura SAR da Marinha do Brasil conta com um sistema eficiente de comunicação e alerta, que permite a rápida transmissão de informações e coordenação entre todas as partes envolvidas. Isso inclui sistemas de rádio, sistemas de satélite e outras tecnologias de comunicação.

Além desses elementos-chave, a Marinha do Brasil também colabora com outros órgãos e instituições envolvidas em busca e salvamento, como a Força Aérea Brasileira (FAB), a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), para garantir uma resposta eficiente e coordenada em casos de emergência marítima. A estrutura SAR da Marinha do Brasil é projetada para garantir a prontidão, a coordenação eficaz e a resposta rápida em emergências marítimas, com o objetivo de salvar vidas e proteger a segurança e a integridade das pessoas que utilizam as águas brasileiras. Regulamentada a busca e salvamento de vidas humanas nas hidrovias navegáveis do Brasil pela Lei nº 7.273 (1984), essa regulamentação possui o propósito de salvaguardar a vida humana no mar, portos e a navegação interior.

A Figura 3 representa a estrutura hierárquica SAR, o comandante da Marinha do Brasil desempenha o papel da Autoridade mor², subordinando o Comando de Operações Navais (COMOPNAV), que possui como órgão de supervisão de atividades, o Comando de Operações Marítimas e Proteção da Amazônia Azul (COMPAAz), que desempenha a função de fiscalização das atividades dos centros de coordenação, ou seja, os DN's e, conseqüentemente, seus centros de coordenação e subcentros: as Capitânicas, Delegacias e Agências que compõem o sistema de operação de busca e salvamento.

Figura 3: Estrutura SAR.



Fonte: Adaptado de Marinha do Brasil (2023c).

² Mor é um adjetivo na língua portuguesa, considerado a forma abreviada de “maior”. Autoridade mor é a maior posição hierárquica na Marinha do Brasil, uma instituição nacional permanente e regular, organizada com base na hierarquia e na disciplina, sob a autoridade suprema do Presidente da República, e destina-se à defesa da Pátria, à garantia dos poderes constitucionais e, por iniciativa de qualquer destes, da lei e da ordem.

A busca e salvamento desenvolve qualquer ato ou atividade para prestação de auxílio à vida humana. Suas bases fundamentais são localizar, socorrer e retornar à segurança os ocupantes de qualquer aeronave ou embarcações em risco em águas brasileiras. A organização SAR é regulamentada pela Organização Marítima Internacional.

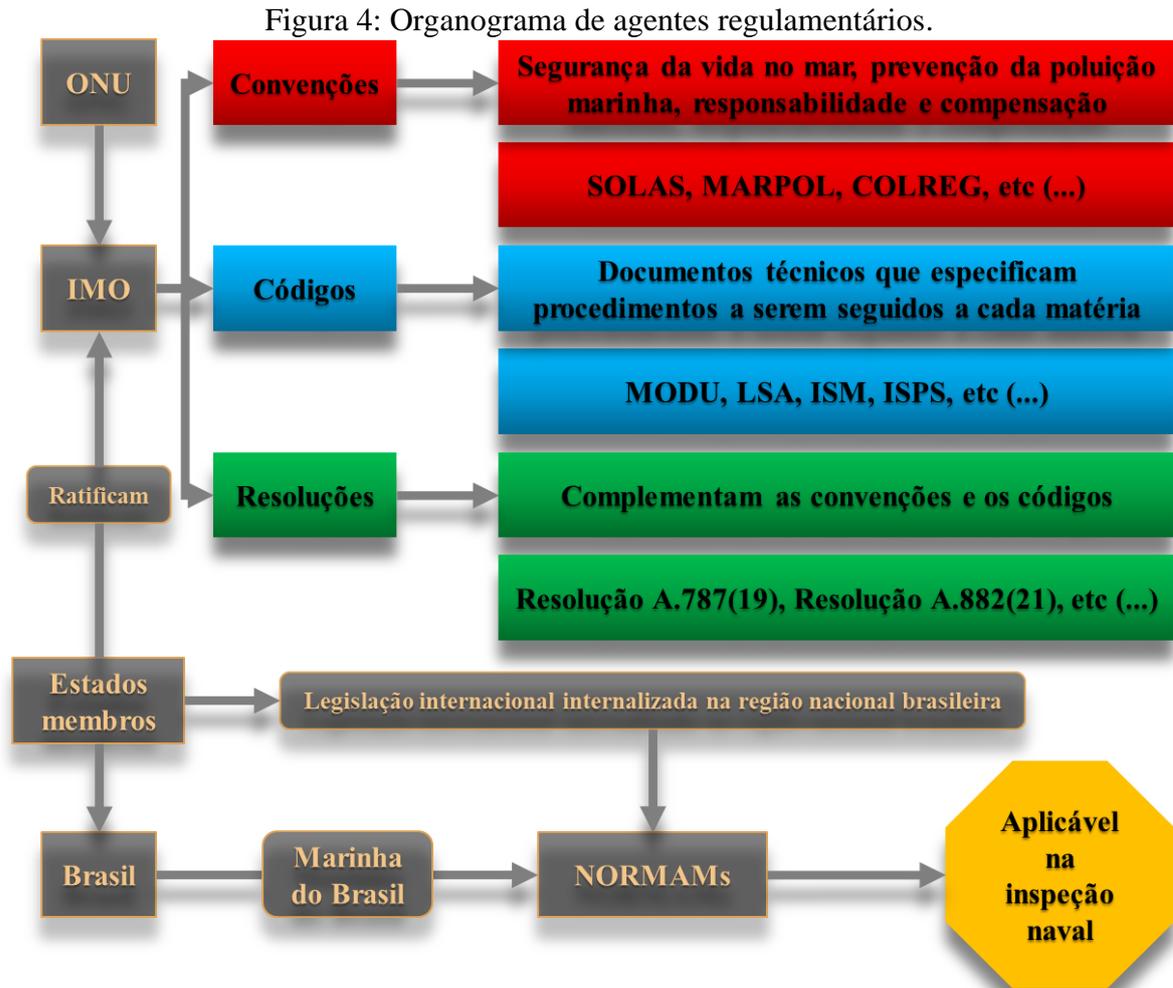
O comandante de operações navais é responsável por coordenar e controlar a execução de atividades de assistência e salvamento de embarcação, dos serviços de busca e salvamento, aprovar as normas relativas à busca e salvamento de vidas humanas no mar, portos e nas vias navegáveis interiores (LEBRE; ULYSSÉA; SELAU, 2011).

Com o serviço de busca e salvamento em atividade, os comandantes dos DN's realizam a busca e salvamento para uma coordenação direta das capitânicas dos portos. Conforme suas responsabilidades, as capitânicas dos portos, capitânicas fluviais, delegacias e agências, devem orientar, coordenar e controlar as atividades sobre a segurança da navegação e a salvaguarda da vida humana nas hidrovias navegáveis pela previsão da Lei nº 8.617 (1993).

3.3. Normas da Autoridade Marítima (NORMAM) na navegação interior na Amazônia Ocidental

A Figura 4 representa a organização dos agentes regulamentários para a aplicação normativa. Historicamente, após o fim da segunda guerra mundial, a cooperação global levou à criação da Organização das Nações Unidas, e em 1948 foi instituída a Organização Marítima Internacional (IMO). A IMO publica convenções, códigos e resoluções para a segurança da navegação e prevenção da poluição marinha; essas publicações são ratificadas³ e assinadas pelos Estados membros. O Brasil, como Estado membro, internaliza normas, padrões e recomendações internacionais nas suas leis marítimas nacionais, as NORMAMs. A autoridade marítima brasileira é exercida pela Marinha do Brasil (MB); cabe a esta promover a implementação e a execução das leis e normas (BARRETO, 2019).

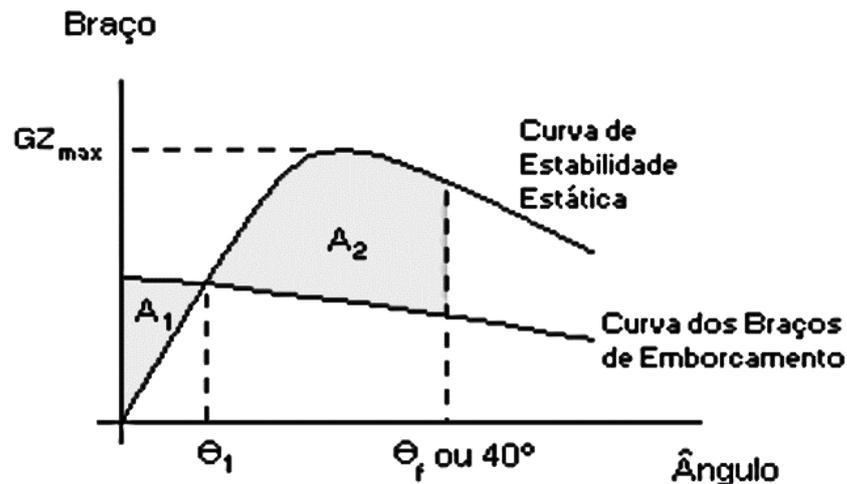
³ Ratificar significa validar, aprovar, legalizar, autenticar, confirmar um ato ou compromisso.



Fonte: Adaptado de Barreto (2019).

A Figura 5 representa a aplicação de critérios para as Curvas de Estabilidade Estática (CEE) (MARINHA DO BRASIL, 2022c). Na figura, o ângulo θ_1 representa o equilíbrio da embarcação quando submetida a ação de acúmulo de passageiros em um bordo, vento, manobra de giro ou reboque, e deve ser menor ou igual ao ângulo de imersão do convés na condição de carregamento considerada ou 15° , o que for menor. A área é representada entre a curva dos braços de emborcamento e a curva de estabilidade estática, ou seja, A_1 . A inclinação θ_f representa o ângulo de alagamento, onde imergem aberturas do casco que não sejam estanques. A área A_2 é compreendida entre a curva de estabilidade estática e a curva dos braços de emborcamento até o ângulo de 40° ou θ_f , o que for menor. As áreas A_1 e A_2 sob as curvas representam a reserva de capacidade de estabilidade estável; e, por conseguinte, em $A_2 \geq A_1$, os braços GZ definem a capacidade da embarcação restaurar a sua condição de equilíbrio.

Figura 5: Critério para a CEE devido Braços de Embarcamento.



Fonte: Adaptado de NORMAM-02/DPC (2022c).

Conforme o item 0605 da NORMAM-02/DPC (2022c), que trata das áreas de navegação, este estudo irá abordar para os efeitos de aplicação das regras, as duas áreas classificadas de navegação, sendo:

- I. **Área 1** - Áreas abrigadas, tais como lagos, lagoas, baías, rios e canais, onde normalmente não sejam verificadas ondas com alturas.

As embarcações que operam nas regiões classificadas como Área 1, com exceção das barcaças, deverão atender aos critérios de estabilidade da Tabela 6.

Tabela 6: Critérios de Estabilidade para a Área 1.

Critério	a	b	c	d	e
Condição	$\phi_{est.} \leq 15^\circ$	$A_2 \geq A_1$	$GM_0 \geq 0.35 [m]$	$\phi_f \geq 25^\circ$	$GZ_{max} \geq 0.1 [m]$

Fonte: Adaptado de NORMAM-02/DPC (2022c).

As embarcações de carga que operam nas regiões classificadas como Área 1 e que não atendam ao critério **d**, ou seja, apresentem ângulo de alagamento inferior a 25°, poderão ter sua estabilidade intacta avaliada por intermédio do seguinte critério na Tabela 7.

Tabela 7: Critérios de Estabilidade para a Área 1 que não atendam ao item **d** da Tabela 6.

Critério	f	g	h	i
Condição	$A_2 \geq 0.04 [m \cdot rad]$	$GZ_{max} \geq 0.2 [m]$	$GM_0 \geq 0.5 [m]$	$\phi_f \geq 12^\circ$

Fonte: Adaptado de NORMAM-02/DPC (2022c).

- II. **Área 2** - Áreas parcialmente abrigadas, onde eventualmente sejam observadas ondas com alturas significativas e ou combinações adversas de agentes ambientais, tais como vento, correnteza ou maré, que dificultem o tráfego das embarcações.

As embarcações que operam nas regiões classificadas como Área 2, com exceção das barcaças, deverão atender aos seguintes critérios de estabilidade da Tabela 8.

Tabela 8: Critérios de Estabilidade para a Área 2.

Critério	a	b	c	d	e
Condição	$\phi_{est.} \leq 12^\circ$	$A_2 \geq 1.2 A_1$	$GM_0 \geq 0.35 [m]$	$\phi_f \geq 30^\circ$	$GZ_{max} \geq 0.15 [m]$

Fonte: Adaptado de NORMAM-02/DPC (2022c).

3.4. Estimativa de carga e centros de gravidade

Deve-se ser sabido qual a capacidade de carga de uma embarcação a fim de conhecer suas restrições, para estar dentro dos parâmetros de segurança estabelecidos pelos órgãos fiscalizadores e sociedades classificadoras. Na análise de capacidade está incluso o volume de todos os espaços de carga, depósitos e tanques; assim como as localizações verticais, longitudinais e transversais dos centroides de cada espaço de carga para encontrar o centro de gravidade ou o porte bruto da embarcação. Pode-se dizer então que uma das características básicas de qualquer embarcação é a dimensão da carga que ela é hábil a carregar (LEWIS, EDWAR V., 1988b). Essas informações são necessárias para verificar a adequação da embarcação para a carga máxima a bordo, a fim de conhecer suas características de estabilidade.

O centro de gravidade (CG) é um dos principais fatores que ajudam a determinar se a estabilidade do navio é adequada. Os pesos a bordo e a posição do centro de gravidade determinam os calados à ré a à vante, assim como seus ângulos de banda e trim. Comumente se modifica a distribuição ou quantidade de pesos no navio para obter os calados ideais e a estabilidade ideal de navegação. Por isso, é importante seguir uma organização ordenada e classificação sistemática de pesos, dado sua importância na influência da estabilidade, visando atender aos requisitos de segurança estabelecidos. Para determinar o centro de gravidade (CG) basta aplicar os conceitos das equações (1), (2) e (3):

$$CGV = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot cgv_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, (1) \quad CGL = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot cgl_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, (2) \quad CGT = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot cgt_i}{\sum_{i=1}^n m_i}, (3)$$

sendo:

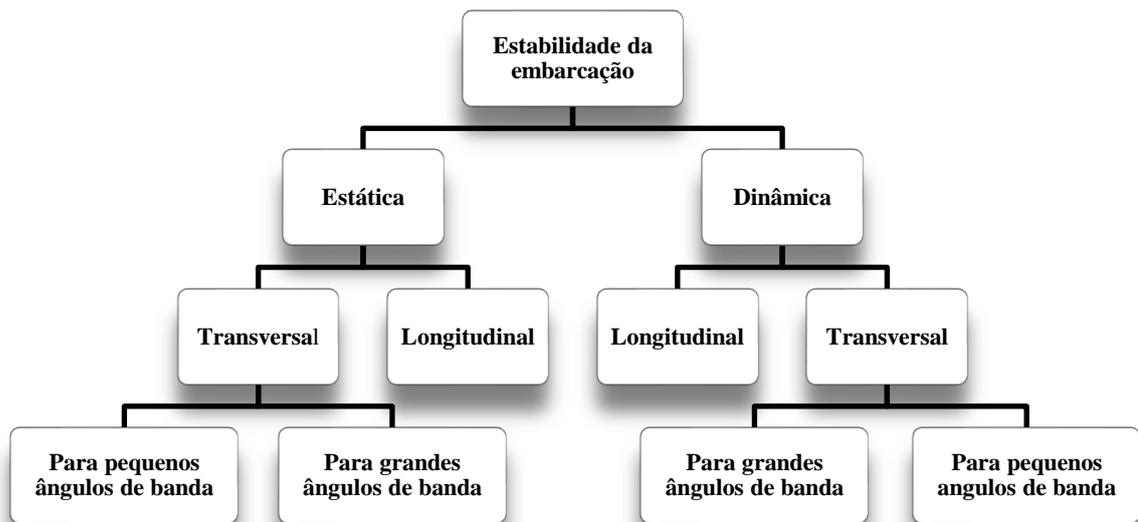
- CGV [m] = Centro de gravidade vertical;
- CGL [m] = Centro de gravidade longitudinal;
- CGT [m] = Centro de gravidade transversal;
- m_i [kg] = Massa de um corpo embarcado;
- cgv_i [m] = Centro de gravidade vertical de um corpo embarcado de massa m [kg];
- cgl_i [m] = Centro de gravidade longitudinal de um corpo embarcado de massa m [kg];
- cgt_i [m] = Centro de gravidade transversal de um corpo embarcado de massa m [kg].

3.5. Princípios Elementares de Estabilidade

A estabilidade, é um aspecto sensível a variações tanto longitudinais quanto transversais. Tendo em vista que a estabilidade se divide em estática e dinâmica, essa divisão proporciona um melhor entendimento das forças que atuam sobre a embarcação.

Para a segurança das embarcações, três conceitos são fundamentais: flutuabilidade, estabilidade estática e dinâmica. Por isso, é importante considerar os efeitos das forças internas e externas para compreender as causas e efeitos. A Figura 6 explana que fundamentalmente a estabilidade estática é essencial para o entendimento do equilíbrio, procurando-se entender as forças que alteram a posição inicial e suas relações. Por outro lado, a estabilidade dinâmica procura entender os efeitos de influências internas e externas, considerando o trabalho para adernar uma embarcação a um ângulo de inclinação θ (LEWIS, EDWAR V., 1988b).

Figura 6: Fluxograma do estudo de Estabilidade.



Fonte: Autor.

Conforme disposto por Lewis & Edwar (1988b), os principais fatores que influenciam a estabilidade estática de um navio são:

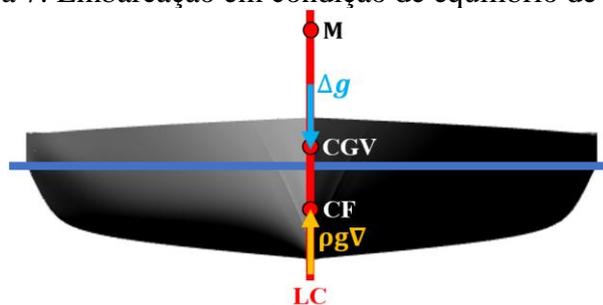
- I. **A geometria submersa do casco** - A geometria submersa do casco influencia a posição metacêntrica; quanto maior a geometria submersa, menor a posição metacêntrica; e
- II. **A distribuição de pesos na embarcação** - A distribuição de pesos influencia no CGV. Isto significa que essa parcela alterada reposiciona o GM_t .

A estabilidade transversal propicia-se a ser crítica em relação à estabilidade longitudinal, uma vez que a estabilidade transversal é muito mais suscetível a pequenas alterações (LEWIS, EDWAR V., 1988b).

O projeto da embarcação não deve somente ter adequada flutuabilidade, mas assegurar que irá flutuar em condições extremas (LEWIS, EDWAR V., 1988a). Durante as operações, as embarcações regionais estarão sujeitas a interações dinâmicas que causam momentos adicionais, variando dos seus movimentos. Alguns efeitos dinâmicos podem ser relacionados às forças adicionais causadas pelo vento. Outra ameaça que pode afetar a estabilidade é o dano causado ao casco após de uma colisão, abalroamento ou qualquer evento.

- I. A Figura 7 representa a resultante de todos os momentos se anulando, considerado estado de equilíbrio. Na estabilidade estática, o foco está no estado de equilíbrio com ângulo de banda zero. Para isso é preciso que o somatório de peso e empuxo se anulem. O CGV deve estar abaixo da posição do Metacentro (M), na mesma linha vertical (BARRASS; DERRETT, 2006; LEWIS, EDWAR V., 1988b).

Figura 7: Embarcação em condição de equilíbrio de forças.



Fonte: Autor.

O centro de gravidade vertical (CGV) e o centro de flutuação (CF) afetam a estabilidade transversal e o metacentro, haja vista que a condição da embarcação de equilíbrio estável, instável e neutra será definida a partir da equação (4).

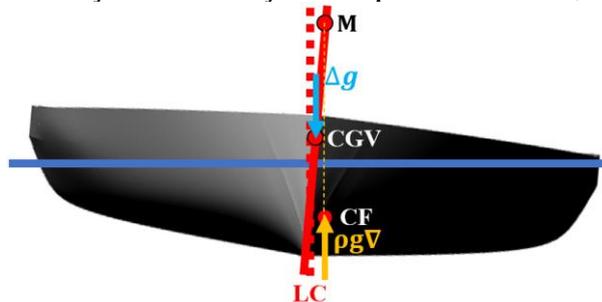
$$GM_t \text{ [m]} = CVF + BM_t - CGV, \quad (4)$$

GM_t	Altura metacêntrica transversal
CVF	Centro Vertical de Flutuação
BM_t	Raio metacêntrico transversal
CGV	Centro de Gravidade Vertical

- II. A Figura 8 mostra a condição de equilíbrio estável, isto é, uma embarcação inclinada ϕ° para bombordo (BB) ou boreste (BE) com retorno à sua posição de equilíbrio com ângulo de banda zero. Para isso, a embarcação deve ter a posição CGV abaixo da altura

metacêntrica (M), para resultar $GM_t [m] > 0$. A posição CGV permanece inalterada pela inclinação e a força da gravidade atua verticalmente para baixo através deste ponto. O CF move-se para CF' para assumir o novo centro de empuxo do volume deslocado do casco. A força de flutuabilidade é considerada como atuando verticalmente para cima através de CF' e do metacentro (M). CGV desenvolve um momento para devolver a embarcação à posição de equilíbrio. Este momento é o Momento de adriçamento e é igual ao produto da força peso e o comprimento da alavanca GZ. GZ é a distância perpendicular entre o CG e a vertical através do CF passando pelo M. Em pequenos ângulos de banda, menores do que 15° se considera $GZ [m] = GM_t \cdot \text{sen}(\phi)$ (BARRASS; DERRETT, 2006).

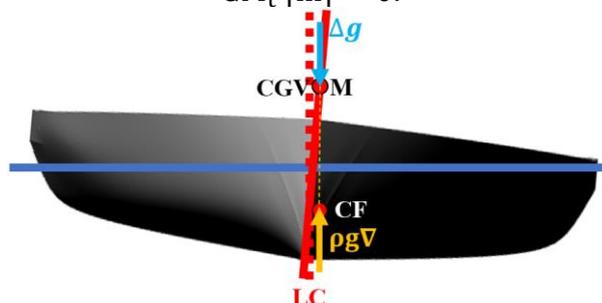
Figura 8: Embarcação em condição de equilíbrio estável, $GM_t [m] > 0$.



Fonte: Autor.

- III. Quando o CGV coincide com a altura metacêntrica (M), Figura 9, a embarcação está em equilíbrio indiferente ou neutro. Se ela estiver adernada ϕ° , diz-se que há banda permanente. Nesta condição de equilíbrio a altura metacêntrica é nula, $GM_t [m] = 0$ (LEWIS, EDWAR V., 1988b; BARRASS; DERRETT, 2006).

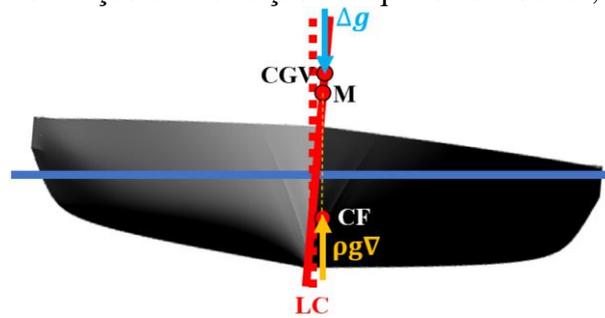
Figura 9: Embarcação em condição de equilíbrio indiferente ou neutra, $GM_t [m] = 0$.



Fonte: Autor.

- IV. Quando a posição metacêntrica é negativa $GM_t [m] < 0$, consequência de o CGV estar acima da altura metacêntrica (M), essa condição é denominada equilíbrio instável, Figura 10. Ao se inclinar $\phi [^\circ]$ para BE ou BB, a embarcação emborcará.

Figura 10: Embarcação em condição de equilíbrio instável, $GM_t [m] < 0$.

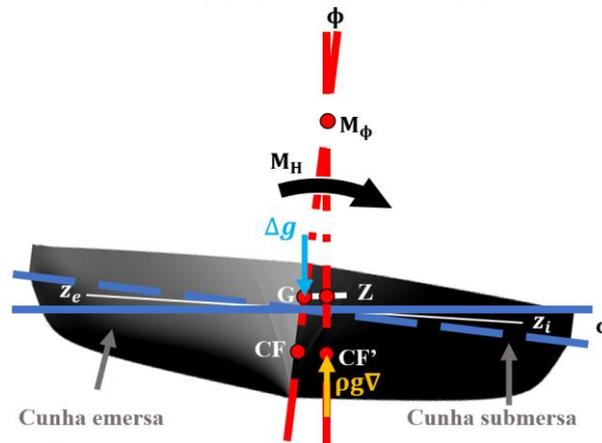


Fonte: Autor.

3.6. Braço de Adriçamento e Momento Restaurador

A Figura 11 mostra uma embarcação em repouso sofrendo um momento de emborcamento (*heeling*), alterando seu estado de equilíbrio em $\phi = 0^\circ$. O momento aplicado M_H [ton · m], mudará o ângulo de equilíbrio de banda para $\phi \neq 0^\circ$.

Figura 11: Braço de adriçamento GZ [m], e deslocamento de massa através das cunhas submersas e emersas.



Fonte: Autor.

Um ângulo de banda $\phi \neq 0^\circ$ muda o deslocamento através das cunhas submersas e emersas. Consequentemente, o centro de flutuação se altera de CF para CF' em uma linha paralela que liga os centroides das cunhas emersa e imersa $z_e z_i$ [m]. Fisicamente o equilíbrio só vai ser alcançado quando o momento de estabilidade M_E , for igual ao momento de emborcamento, M_H [kN · m].

$$M_H = M_E, \quad (5)$$

O momento de estabilidade M_E , é definido como uma força de empuxo sendo aplicada distante de um ponto, considerando-se então como:

$$M_E [\text{ton} \cdot \text{m}] = (\rho \cdot g \cdot \nabla)GZ, (6)$$

O braço de adriçamento, GZ [m]⁴, pode ser definido como:

$$GZ [\text{m}] = GM_\phi \cdot \text{sen}(\phi), (7)$$

Substituindo a equação (7) em (6), o M_E se torna:

$$M_E [\text{ton} \cdot \text{m}] = (\rho \cdot g \cdot \nabla)[GM_\phi \cdot \text{sen}(\phi)], (8)$$

O metacentro (M_ϕ) é inversamente proporcional ao deslocamento da embarcação (∇). Quanto maior for o deslocamento, menor será a posição vertical do metacentro. Pode-se afirmar que o deslocamento de massa de fluido equivalente ao volume das cunhas alteram o CF e a posição do metacentro se desloca de M para M_ϕ (JOURNÉE, J. M. J.; MASSIE, W. W., 2001).

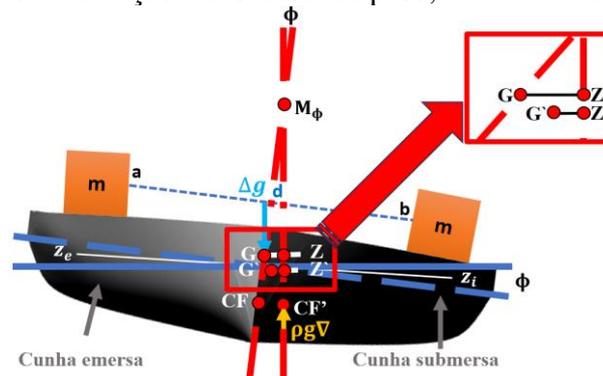
3.7. Efeitos das Mudanças de Pesos na Estabilidade

A distribuição de pesos pode resultar em ângulos de adernamento permanentes, e levar a embarcação a situações críticas de estabilidade se a resultante de todos os pesos a bordo estiver aplicada em um ponto que seja fora da linha de centro (Figura 7). Para evitar tais condições o somatório dos momentos a BB deve que ser igual à soma a BE (BARRASS; DERRETT, 2006; GOMES, 1977; LEWIS, EDWAR V., 1988b).

A distribuição de pesos verticalmente pode causar maior ou menor sensibilidade na estabilidade transversal, com a redução ou aumento do CGV, afetando a altura metacêntrica (GM_t), e conseqüentemente a capacidade de restauração. O deslocamento do CG dos pesos no convés observado na Figura 12, separado pela distância d , pelo deslocamento de $a \rightarrow b$, ou seja, o $G \rightarrow G'$ será paralelo ao deslocamento de carga. Se a embarcação está em equilíbrio estático e há uma mudança de carga, essa mudança pode adernar a embarcação a ϕ° . Esse deslocamento pode reduzir o braço GZ e a capacidade de restauração.

⁴ De forma análoga, pode-se calcular o braço GZ considerando os valores KN , demonstrado pela expressão $GZ = KN - (KG \text{ sen}(\phi))$, considerando a distância perpendicular de K até um ponto N na linha vertical do metacentro (M) e o novo Centro de Flutuação “empuxo” (CF').

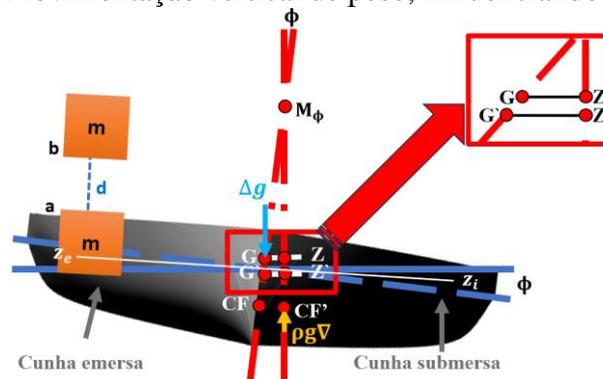
Figura 12: Movimentação transversal de peso, influenciando o braço GZ.



Fonte: Autor.

O deslocamento vertical de um corpo de massa m [kg], conforme exposto na Figura 13, elevado de $a \rightarrow b$, o CGV se elevará; de forma geral não há variação do metacentro (M), uma vez que o deslocamento da embarcação não se altere. Contudo, a elevação do CGV acarretará uma diminuição do GM_t , consequentemente a capacidade de restauração será menor. Se o peso for abaixado de $b \rightarrow a$, o CGV também irá abaixar e assim aumentando o valor do GM_t , acrescentando a capacidade de restauração.

Figura 13: Movimentação vertical de peso, influenciando o braço GZ.



Fonte: Autor.

O CGV é um fator crítico; manter o CGV baixo é fundamental para garantir uma maior estabilidade e uma melhor capacidade de restauração em condições adversas de navegação. Pode-se aplicar, nas Figuras 12 e 13, a equação (9).

$$GG' \text{ [m]} = \frac{m \cdot g \cdot d}{\Delta}, \quad (9)$$

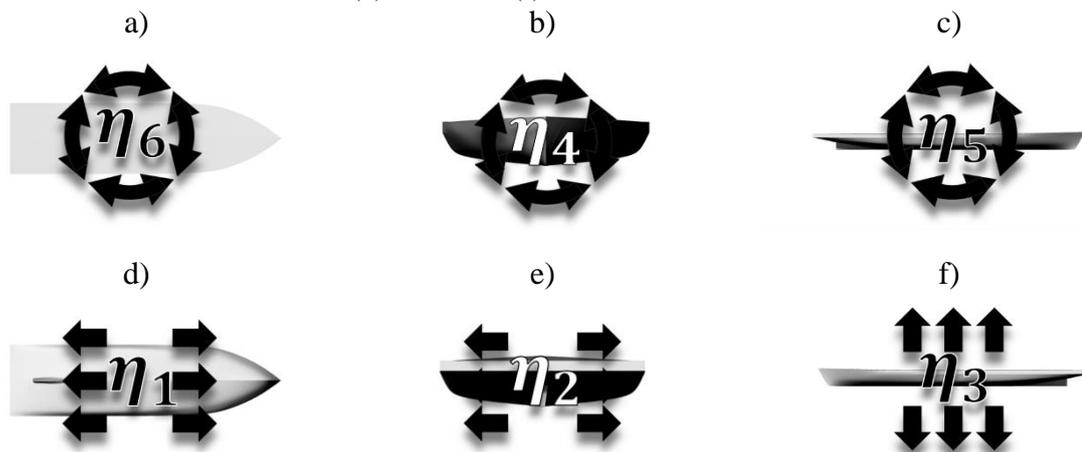
GG' [m]	Deslocamento do centro de gravidade $G \rightarrow G'$
m [kg]	Massa de um corpo m de massa
g [m/s ²]	Aceleração gravitacional
Δ [ton]	Deslocamento da embarcação

3.8. Conceitos de dinâmica de embarcações

Um sistema naval pode ser estudado desde o ponto da teoria de vibrações mecânicas. O sistema sofre oscilação livre quando se movimenta apenas sob uma perturbação inicial, sem forças externas atuantes. O número mínimo de coordenadas independentes necessárias para determinar completamente as posições de todas as partes de um sistema naval em qualquer instante de tempo define o número de graus de liberdade. Os sistemas com um número finito de graus de liberdade são sistemas de parâmetros discretos ou concentrados, os com um número infinito de graus de liberdade são sistemas contínuos ou distribuídos (RAO, 2010).

Forças de excitação externas e internas afetam o comportamento dinâmico, incluindo momentos adicionais causados pelas ondas, vento, efeitos de superfície livre, vibrações da casa de máquinas, hélices etc. Todas as fontes de excitação produzem cargas na sua estrutura. Para entender o comportamento de um sistema naval, necessita-se estabelecer um programa de análise para entender a influência de cada fator na estabilidade. Geralmente se estabelece um modelo físico para determinar as diferentes equações de movimento. Uma embarcação pode se definir como um sistema naval com uma massa que possui 6 Graus de Liberdade (GdL), 3 GdLs translacionais e 3 GdLs rotacionais, como mostrado na Figura 14.

Figura 14: Os seis graus de liberdade (GdL) de uma embarcação, translacionais e rotacionais. GdLs rotacionais: (a) Guinada. (b) Balanço e (c) Arfagem. GdLs translacionais: (d) Avanço. (e) Deriva e (f) Afundamento.



Fonte: Autor.

A Tabela 9 explica os GdLs da Figura 14, nomeando-os e classificando-os nas categorias de rotação e translação em relação ao seu eixo de referência e os enumerando.

Tabela 9: GdLs classificados como rotacionais e translacionais de uma embarcação.

Eixo	x	y	z	x	y	z
GdL	η_1 Avanço	η_2 Deriva	η_3 Afundamento	η_4 Balanço	η_5 Arfagem	η_6 Guinada
Rotacional	-	-	-	η_4	η_5	η_6
Translacional	η_1	η_2	η_3	-	-	-

Fonte: Autor.

A excitação de um sistema depende da transferência de sua energia potencial para energia cinética e vice-versa. Havendo amortecimento, alguma quantidade de energia será dissipada em cada ciclo, em forma de calor, ruído e outras formas de dissipação de energia. Nas oscilações subamortecidas em um sistema Massa-Mola-Amortecedor (MMA), a amplitude da vibração livre diminui gradualmente com o tempo, devido à resistência oferecida pelo meio circundante, seja ar ou fluido (DE CASTRO, 2018; LEWIS, EDWAR V., 1988c; RAO, 2010).

3.9. Movimento de balanço desacoplado

O movimento de balanço pode ser representado pela equação diferencial de 2ª ordem (10). Essa equação representa um modelo físico ideal que sofre influência inercial, fatores de amortecimento e de restauração.

$$\left(J_{\phi\eta_4} + A_{\phi\phi\eta_4} \right) \ddot{\phi}_{\eta_4} + B_{\phi\phi\eta_4} \cdot \dot{\phi}_{\eta_4} + C_{\phi\phi\eta_4} \cdot \phi_{\eta_4} = M_{\phi\eta_4} \cdot e^{i\omega_e \cdot t}, \quad (10)$$

$\ddot{\phi}_{\eta_4}$	Aceleração do balanço	$J_{\phi\eta_4}$ ⁵	Momento inércia do balanço
$\dot{\phi}_{\eta_4}$	Velocidade do balanço	$A_{\phi\phi\eta_4}$ ⁶	Coefficiente de inércia adicional do balanço
ϕ_{η_4}	Deslocamento do balanço	$B_{\phi\phi\eta_4}$	Coefficiente de amortecimento do balanço
$M_{\phi\eta_4} e^{i\omega_e \cdot t}$	Momento aplicado à embarcação	$C_{\phi\phi\eta_4}$ ⁷	Coefficiente de restauração do balanço

A solução da equação (10) é expressa pela equação (11):

$$\phi = \frac{M_{\phi\eta_4} \cdot \text{Cos}(\omega_e \cdot t + \varepsilon_{\phi\zeta})}{\sqrt{(C_{\phi\phi\eta_4} - (J_{\phi\eta_4} + A_{\phi\phi\eta_4})\omega_e^2)^2 + B_{\phi\phi\eta_4}^2 \omega_e^2}}, \quad (11)$$

⁵ O momento de inércia considera k_{xx} , ∇ e a densidade do fluido ρ , de forma que $J_{\phi\eta_4} = k_{xx} \nabla \rho$

⁶ O coeficiente adicional de inércia considera 30% do momento de inércia do roll, de forma que $A_{\phi\phi\eta_4} = 0.3 J_{\phi\eta_4}$

⁷ O fator de restauração do balanço considera pode ser expresso como, $C_{\phi\phi\eta_4} = GM_t \Delta$

Onde $\varepsilon_{\phi\zeta}$ é a mudança de fase relativa para a função forçante:

$$\tan(\varepsilon_{\phi\zeta}) = \frac{B_{\phi\phi\eta_4} \cdot \omega_e}{C_{\phi\phi\eta_4} - (J_{\phi_{roll}} + A_{\phi\phi\eta_4}) \omega_e^2}, \quad (12)$$

A equação (12) pode ser expressa em termos da razão de amortecimento:

$$\beta_{\phi\phi\eta_4} = \frac{\Gamma_{\eta_4}}{\omega_n} = \frac{B_{\phi\phi\eta_4}}{2 \sqrt{C_{\phi\phi\eta_4} (J_{\phi\eta_4} + A_{\phi\phi\eta_4})}}, \quad (13)$$

A equação (13) representa o fator de amortecimento adimensional que é a razão do fator de amortecimento, Γ_{η_4} , expressado na equação (15) e a frequência natural do sistema, ω_n , equação (14), pode ser definida como:

$$\omega_n^2 = \frac{C_{\phi\phi\eta_4}}{J_{\phi\eta_4} + A_{\phi\phi\eta_4}}, \quad (14)$$

O fator de amortecimento dimensional é expresso na equação (15) e o fator de sintonia na equação (16):

$$\Gamma = \frac{B_{\phi\phi\eta_4}}{2(J_{\phi\eta_4} + A_{\phi\phi\eta_4})}, \quad (15) \quad \text{e} \quad \lambda = \frac{\omega_e}{\omega_n}, \quad (16)$$

À parte, mostra-se pela diferenciação das funções dos OARs que a frequência natural amortecida, $\omega_{n\text{amortecida}}$, é dada por:

$$\omega_{n\text{amortecida}} = \omega_n \sqrt{1 - 2\beta_{\phi\phi}^2}, \quad (17)$$

A função de resposta do OAR do balanço (OAR_{η_4}), é então assumida ser:

$$\text{OAR}_{\eta_4} = \frac{\Phi \cdot C_{\phi\phi\eta_4}}{M_{\phi\eta_4}} = \left(\sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + 4\beta_{\phi\phi\eta_4}^2 \lambda^2} \right)^{-1}, \quad (18)$$

O OAR_{η_4} é então modificado para a direção da onda e a inclinação aparente da onda, de modo que o OAR em mares de proa e popa é dado seguindo a equação (19):

$$\text{OAR}_{\eta_4}(\mu) = \text{OAR}_{\eta_4} \cdot \sin(\mu), \quad (19)$$

A equação (19) é zero em mares de proa e de popa, e tem máximos em mares de través⁸. O máximo nos OARS _{η_4} se dá pela influência do fator de amortecimento, quando a frequência natural da embarcação se aproxima matematicamente da razão do fator de restauração com a inércia do balanço e a inércia adicional, $\omega_n^2 \approx \frac{C_{\phi\phi\eta_4}}{J_{\phi\eta_4} + A_{\phi\phi\eta_4}}$ (equação 14).

A frequência de encontro considera a componente da velocidade da embarcação na direção das ondas e subtrai a velocidade da fase da onda c . A velocidade relativa considera a velocidade das ondas (c), a velocidade da embarcação (u) e o ângulo de encontro da embarcação e ondas (μ), **velocidade de encontro relativo** = $c - u \cdot \cos(\mu)$, ou simplificadamente:

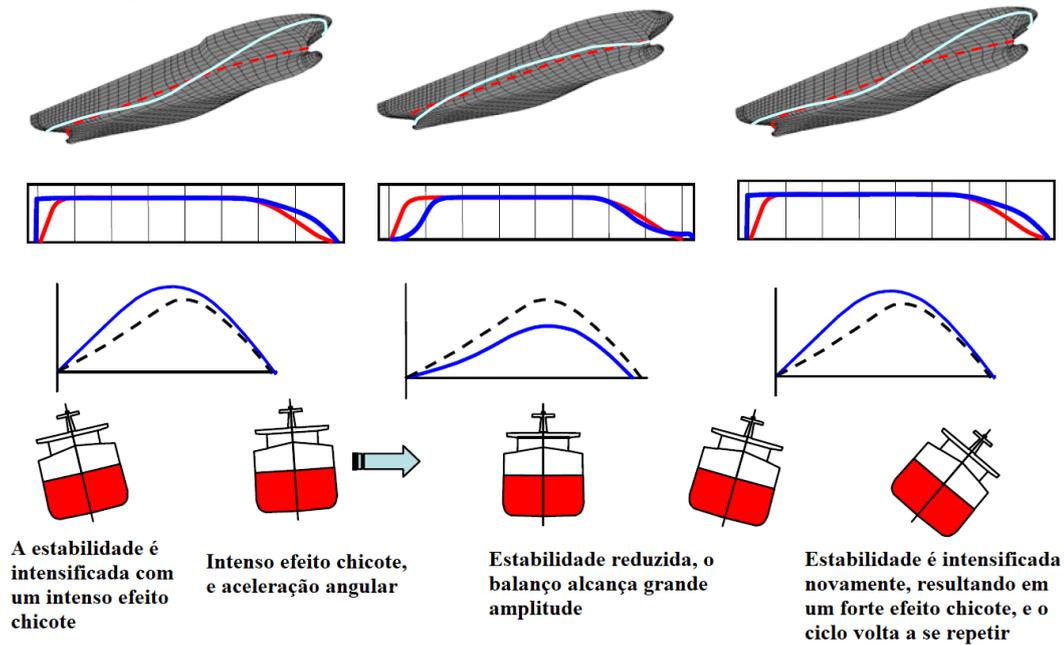
$$\omega_e = \omega \left(1 - \frac{u}{c} \cos(\mu) \right), \quad (20)$$

Nas últimas décadas, mudanças significativas nos projetos e operações de embarcações comerciais vem ocorrendo. As transformações e os impactos na estabilidade intacta são fatores a se considerar, tendo em vista a ressonância paramétrica de balanço e perda de estabilidade. Os critérios de estabilidade intacta de segunda geração (SGISc) foram desenvolvidos para uma análise de vários níveis de influência. A avaliação direta da estabilidade dinâmica pode não ser exigida para todos os navios abrangidos pelos regulamentos da IMO, os dois primeiros níveis consistem em critérios de vulnerabilidade de nível 1 e 2, que funcionam como uma verificação preliminar no processo de projeto, a fim de mitigar o risco de instabilidade dinâmica e falha de estabilidade (BELENKY; BASSLER; SPYROU, 2011).

A Figura 15 a SGISc avalia a vulnerabilidade do balanço paramétrico a partir das perdas de capacidade de estabilidade, observando a influência dos braços adriçantes a intensificação ou enfraquecimento a partir de ondas senoidais, onde há a observação da influência dos parâmetros das ondas incidentes, como a altura de onda e comprimento, além da relação da frequência das ondas, analisando desde o *wave steepness*, que se diz a razão da altura da onda pelo seu comprimento, para analisar a influência da magnitude de mudanças de estabilidade na amplitude de balanço na Figura 16.

⁸ Mar de través – Incidência de ondas na perpendicular em relação ao eixo longitudinal (eixo - x) da embarcação

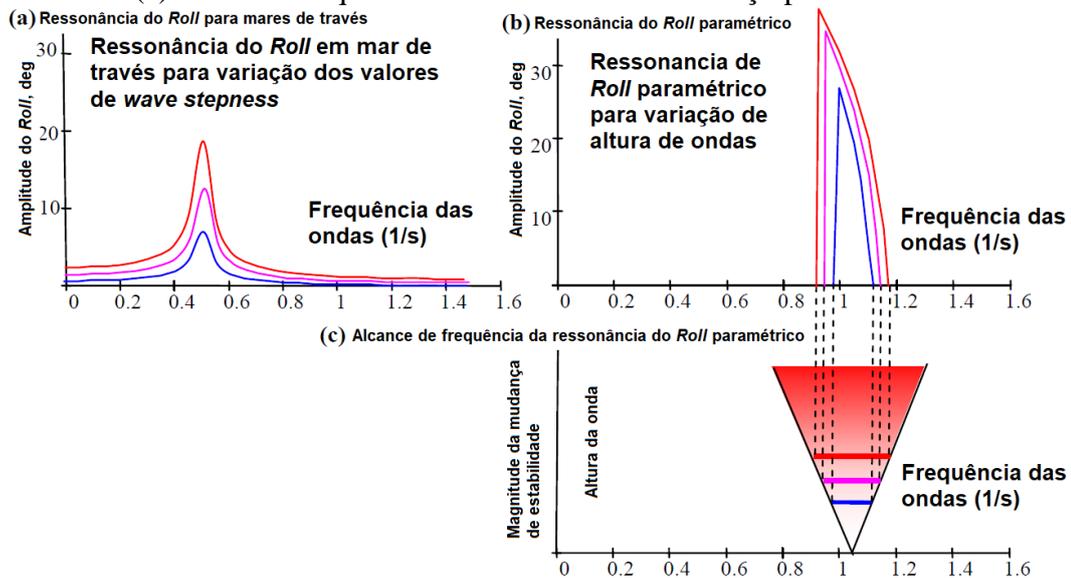
Figura 15: Desenvolvimento da ressonância do balanço paramétrico.



Fonte: Adaptado de Belenky, Bassler e Spyrou (2011).

O balanço paramétrico é um fenômeno de ressonância e semelhante à ressonância do balanço em ondas de través, contudo, o balanço paramétrico tem uma faixa de frequência limitada. A principal diferença observada na Figura 16 é que entre os dois fenômenos é que a amplitude da faixa de frequência para rotação paramétrica depende da magnitude da mudança de estabilidade, enquanto a faixa de frequência para ressonância de balanço depende da altura da onda (BELENKY; BASSLER; SPYROU, 2011).

Figura 16: (a) Ressonância do balanço para través. (b) Ressonância do balanço paramétrico. (c) Faixa de frequência da ressonância do balanço paramétrico.



Fonte: Adaptado de Belenky, Bassler e Spyrou (2011).

A forma mais simples de representar o balanço paramétrico são as equações de Mathieu, que tem sido extensivamente utilizada para analisar este fenômeno. Conforme o desenvolvimento da SGISc, diz-se que este modelo é um instrumento em desenvolvimento para a análise dos critérios de vulnerabilidade.

Quando se considera a navegação em mares de popa ou de proa, sem momentos emborcantes de ondas, considera-se a equação (21).

$$\left(J_{\phi_{\eta_4}} + A_{\phi\phi_{\eta_4}} \right) \ddot{\phi}_{\eta_4} + B_{\phi\phi_{\eta_4}} \cdot \dot{\phi}_{\eta_4} + C_{\phi\phi_{\eta_4}} \cdot \phi_{\eta_4} = 0, (21)$$

A variação de GM_t num intervalo de tempo t é a chave física para o modelo de rolagem paramétrica, observando-se o estudo em funções senoidais ou cossenoidais.

$$GM_t(t) = GM_m + GM_a \cdot \text{Cos}(\omega_e t), (22)$$

A observação da variação do GM_t analisa a sua média e amplitude.

$$GM_{\text{média}} = 0.5(GM_{\text{máx.}} + GM_{\text{mín.}}), (23)$$

$$GM_{\text{amplitude}} = 0.5(GM_{\text{máx.}} - GM_{\text{mín.}}), (24)$$

Considerando as representações do fator de restauração $C_{\phi\phi_{\eta_4}} = \Delta \cdot GM_t$, fazendo as substituições das equações (23) e (24), resulta na equação (25).

$$\ddot{\phi}_{\eta_4} + 2\Gamma_{\eta_4} \cdot \dot{\phi}_{\eta_4} + (\omega_m^2 + \omega_a^2 \cdot \text{Cos}(\omega_e \cdot t)) \cdot \phi_{\eta_4} = 0, (25)$$

$$\omega_a^2 \approx \frac{\Delta \cdot GM_a}{J_{\phi_{\eta_4}} + A_{\phi\phi_{\eta_4}}}, (26) \text{ e } \omega_m^2 \approx \frac{\Delta \cdot GM_m}{J_{\phi_{\eta_4}} + A_{\phi\phi_{\eta_4}}}, (27)$$

3.10. Seleção de características do modelo de estudo

A seleção das características do modelo a ser estudado se baseia em Ho et al. (1989) (Tabela 10), onde o autor supracitado dá a oportunidade de aplicar os princípios e métodos de projeto. Os diferentes módulos de projeto da embarcação, principais dimensões e disposições gerais, como a propulsão, estabilidade intacta e desempenho econômico, visando promover a discussão e o ajuste contínuo dos projetos, com as necessidades dos armadores, construtores e órgãos reguladores, para as velocidades adequadas, rotas e carregamentos, com o objetivo de melhor adequar o projeto às necessidades operacionais.

Tabela 10: Características de padrões em embarcações regionais amazônicas para as atividades de transporte misto, de carga e passageiros na região da Amazônia ocidental brasileira.

Série 1			Série 2		
Faixa de variação			Faixa de variação		
[m]	≥	<	[m]	≥	<
Comprimento	15	25	Comprimento	25	45
Boca	4,6	6,9	Boca	6,9	10,3
Pontal	1,6	2,1	Pontal	2,1	3,8
Calado	1,1	1,6	Calado	1,6	2,9
Série 3			Série 4		
Faixa de variação			Faixa de variação		
[m]	≥	<	[m]	≥	<
Comprimento	45	65	Comprimento	65	65
Boca	10,3	13,5	Boca	13,5	13,5
Pontal	3,8	4,6	Pontal	4,6	4,6
Calado	2,9	3,6	Calado	3,6	3,6

Fonte: Adaptado de Ho et al. (1989).

Foram analisadas para as 4 séries características, com base nas capacidades, rotas e velocidades de operação, quais as correlações entre, Comprimento X Deslocamento, Boca X Comprimento, Calado X Boca, Borda livre X Comprimento entre outros fatores, incluindo segundo o autor, a relação de regiões com embarcações de características semelhantes e regiões com as maiores concentrações das embarcações com as características semelhantes com base nos Coeficientes de bloco (Cb).

As análises iterativas desenvolvidas por Ho et al. (1989) permite que haja a atualização do projeto em navegação interior, disponibilizando características observadas e suas concentrações de operação, constituindo um elemento agregador a modelagem de embarcações regionais. Desta forma, a seleção das características de modelagem, foram obtidas faixas de características a partir das séries 1 e 2 (Tabela 11).

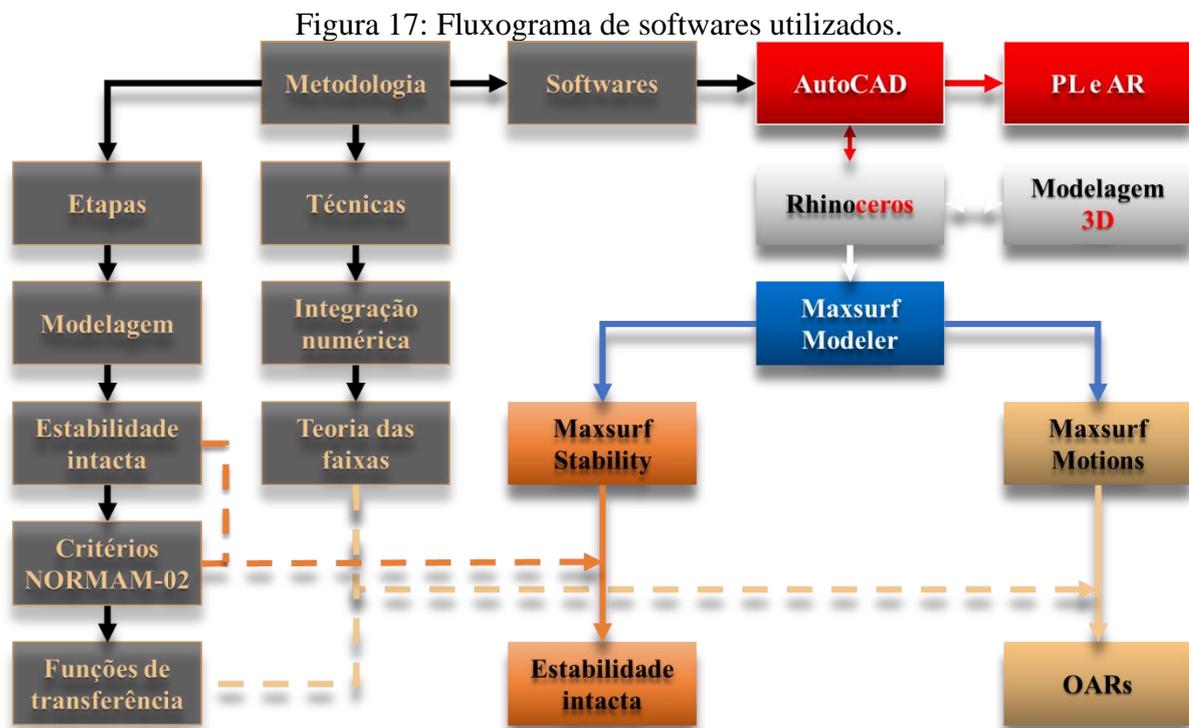
Tabela 11: Características selecionadas de padrões em embarcações amazônicas para as atividades de transporte misto, de carga e passageiros na Amazônia ocidental brasileira.

Série selecionada		
Faixa de variação		
[m]	≥	<
Comprimento	25	35
Boca	6	8
Pontal	1,5	3
Calado	1	2

Fonte: Autor.

4. METODOLOGIA

A metodologia do projeto expõe claramente as etapas de desenvolvimento do estudo, técnicas e *softwares* a fim de que o leitor interessado seja capaz de reproduzir os resultados apresentados. Este estudo pode ser distinguido em 4 etapas, conforme o capítulo 2 e baseadas no fundamento teórico apresentado no Capítulo 3. A Figura 17 apresenta as etapas gerais do desenvolvimento, pode-se observar que foram utilizados alguns softwares para a modelagem da embarcação (e.g., Autocad), assim como para a avaliação da estabilidade (Maxsurf Stability) e os movimentos da embarcação (Maxsurf Motions). O Apêndice B detalha o procedimento seguido desde a construção do plano de linhas até as análises de comportamento dinâmico do modelo 3D projetado.

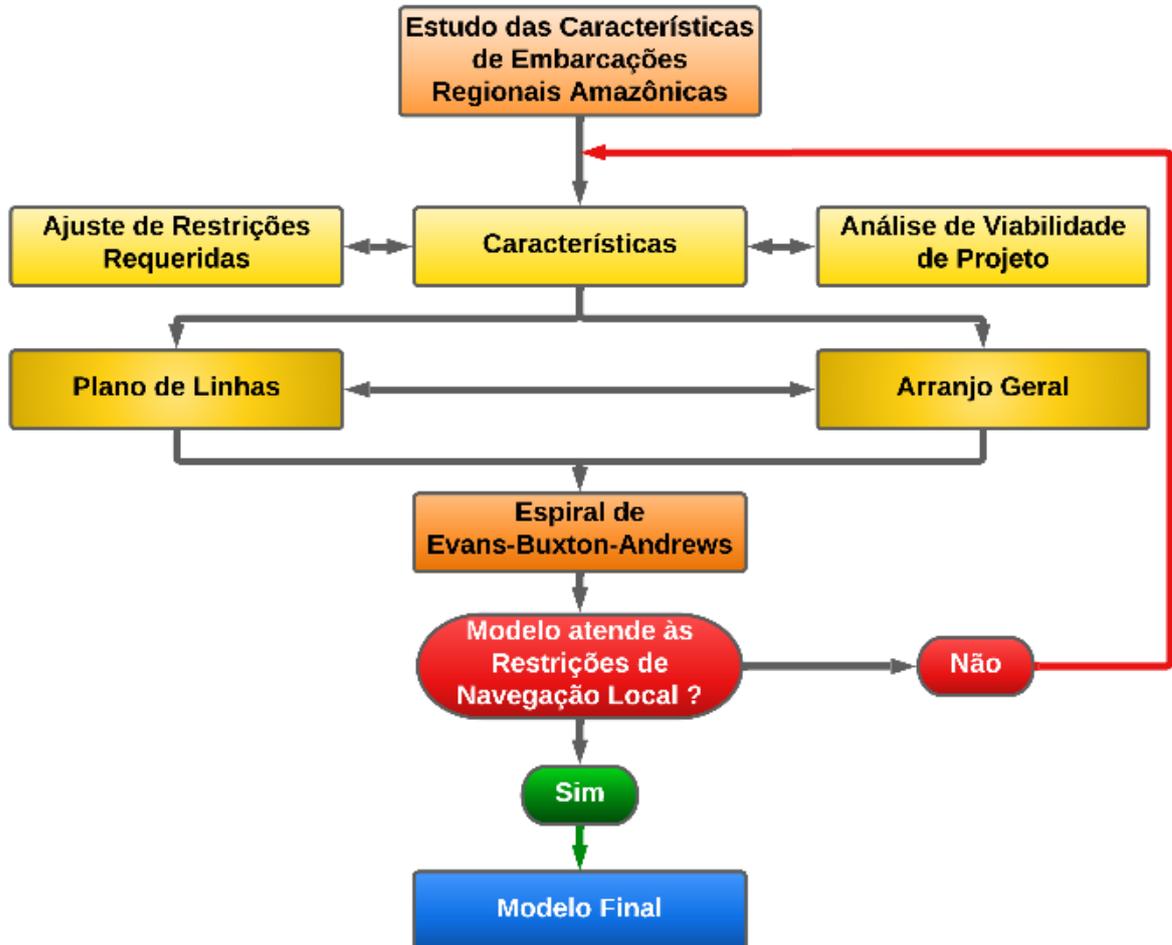


Fonte: Autor.

O fluxograma geral (Figura 18) da construção do modelo 3D para simulação. O estudo requerido para entendimento das características regionais de navegação na região amazônica deve passar por um processo iterativo de análise de características e ajuste de restrições. O plano de linhas começa a ser desenvolvido e detalhado para posteriormente através do arranjo geral haver a disposição e otimização de todos os espaços embarcados. Em conjunto, é ideal passar por um processo de refinamento pela espiral de Evans-Buxton-Andrews (MISTREE et al.,

1990). Uma vez que o modelo atenda às características de navegação amazônica, modela-se o casco em 3D para estudos posteriores.

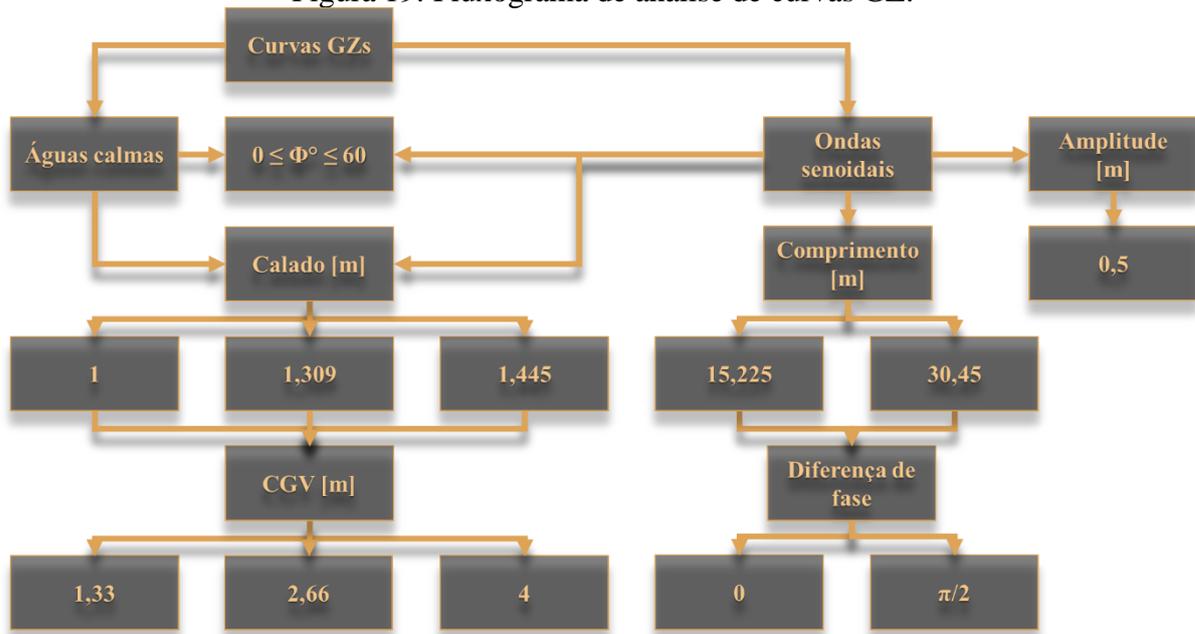
Figura 18: Fluxograma do processo de construção do casco de uma embarcação amazônica.



Fonte: Autor.

As etapas se procedimento de análise das curvas dos braços de adriçamento (Figura 19), com margem de avaliação de 60° para bombordo em águas calmas e senoidais, para 3 condições de carregamento. A distribuição de centros de gravidade é considerada para 3 posições; além de que a análise em ondas senoidais terá restrições adicionais, como 2 comprimentos de onda, duas diferenças de fase e uma amplitude fixa.

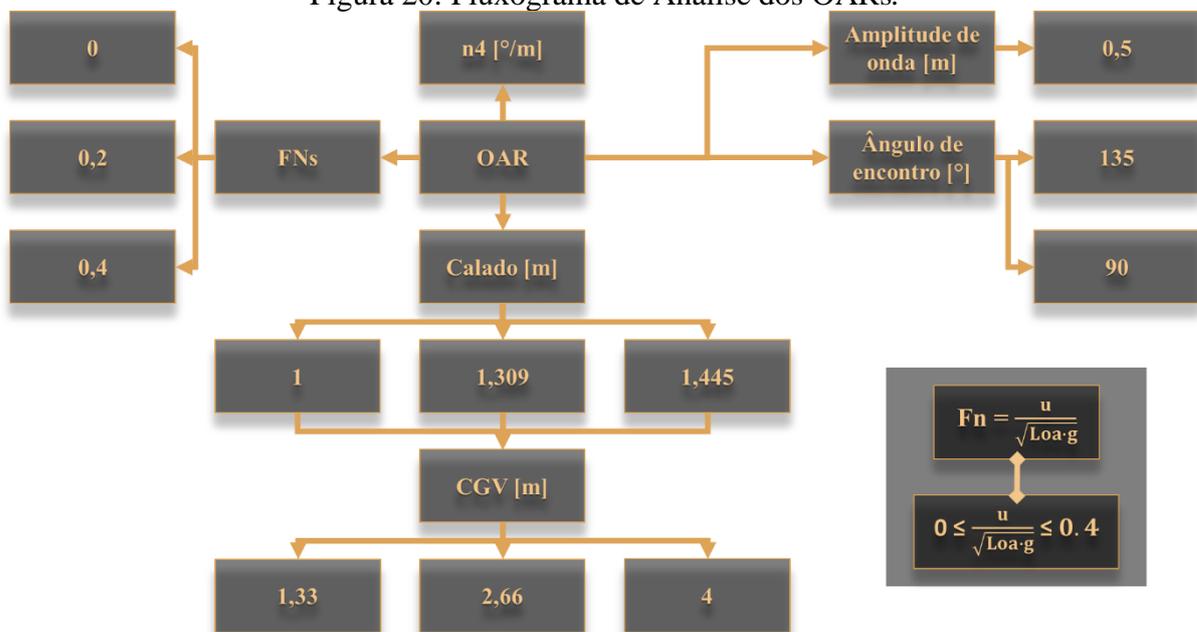
Figura 19: Fluxograma de análise de curvas GZ.



Fonte: Autor.

Os operadores de amplitude de respostas (OARs) seguem aplicação conforme exposto na Figura 20. Tem uma restrição de deslocamento com 2 distribuições do centro de gravidade (CG), com a incidência de ondas com 2 amplitudes e 2 ângulos de encontro em relação à embarcação, que terá o comportamento avaliado para 2 velocidades de avanço.

Figura 20: Fluxograma de Análise dos OARs.



Fonte: Autor.

4.1. Etapas do estudo

- I. Revisão de estatísticas sobre acidentes e fatos de navegação com embarcações regionais. A revisão se concentra na literatura, notícias, revistas científicas, teses, entre outros, como discorrido no Capítulo 1;
- II. Seleção das características de embarcações regionais para a determinação de condições reais de operação para gerar o caso de estudo de projeto preliminar;
- III. Modelagem computacional do casco, com a qual serão realizadas as análises de estudo de caso. A modelagem será feita utilizando os softwares AutoCAD e Maxsurf;
- IV. Análise das curvas de estabilidade estática e dinâmica, para aplicação de critérios NORMAM-02/DPC;
- V. Análise do movimento de balanço. Nesta etapa, será analisado o comportamento estático e dinâmico da embarcação quando submetida à interação com ondas regulares, múltiplos carregamentos e CGVs; e
- VI. Comparação dos vários casos de estudo. Nesta etapa será analisado o efeito de diferentes posições de CGVs nos movimentos de rolagem, curvas GZ, comparando os resultados com o caso de referência (etapa e).

4.2. Hipóteses simplificadoras para a análise das curvas GZ e os operadores de amplitude de respostas (OARs)

- I. O casco é rígido e indeformável;
- II. O critério de simulação é de estabilidade intacta;
- III. O fluido é invíscido e tem densidade constante $\rho = 1 \left[\frac{\text{ton}}{\text{m}^3} \right]$;
- IV. Não há efeitos de águas no convés;
- V. Não há efeitos de momentos de superfície livre;
- VI. As posições dos centros de gravidade longitudinais (CGL) e transversais (CGT), são consideradas fixas em: CGL [m] = 14,19 e CGT [m] = 0;
- VII. A embarcação não apresenta avaria como condição inicial com condição de equilíbrio estável e ângulo de banda e trim nulos;
- VIII. Considerar-se-á 3 CGVs, em 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m].
- IX. Considerar-se-á 3 carregamentos (Δ) correspondentes aos seus devidos calados em água doce:
 - i. Calado a [m] = 1,000 $\equiv \nabla$ [m³] = 112,925 $\equiv \Delta$ [ton] = 112,925;

- ii. Calado b [m] = 1,309 $\equiv \nabla$ [m³] = 171,802 $\equiv \Delta$ [ton] = 171,802; e
 - iii. Calado c [m] = 1,445 $\equiv \nabla$ [m³] = 200,182 $\equiv \Delta$ [ton] = 200,182.
- X. Considerar-se-á análises sem águas calmas para cálculos iniciais e ondas senoidais. As ondas senoidais serão avaliadas com 2 comprimentos de onda, 1 amplitude e 1 diferenças de fase:
- i. Amplitude ζ [m] = 0,5;
 - ii. Comprimento de onda λ_a [m] = 15,225 e λ_b [m] = 30,45; e
 - iii. Diferença de fase $\Phi = \pi/2$.
- XI. Será considerado 3 números de Froude (F_n), e serão avaliados com suas velocidades correspondentes para a simulação em [nós]:
- i. $F_n a = 0,2$, Vel. [m/s] = 3,45 \approx Vel. [nós] = 6,71; e
 - ii. $F_n b = 0,4$, Vel. [m/s] = 6,91 \approx Vel. [nós] = 13,43.
- XII. Considera-se uma embarcação esbelta para o uso da teoria das faixas, onde o seu comprimento total é muito maior do que a sua boca ou calado e a boca é expressivamente menor do que os comprimentos de ondas;
- XIII. Os movimentos são pequenos e lineares com respeito a amplitude de onda;
- XIV. A profundidade da coluna de água é muito maior do que o comprimento de onda;
- XV. Um sistema Massa-Mola-Amortecedor forçado e simplificado é assumido para a análise do balanço desacoplado; e
- XVI. O fator de amortecimento linear usado é $\zeta = 0,075$.

4.3. Casos de estudo dos braços adriçantes

Para a análise dos braços adriçantes com variação de deslocamento volumétrico e centros de gravidade verticais é exposto na Tabela 12 os casos de estudo em águas calmas,

Tabela 12: Casos de estudo em águas calmas.

Casos de estudo (CE)	Volume deslocado (∇) [m ³]	CGV [m]
CE 1	112,925	1,33
CE 2		2,66
CE 3		4
CE 4	171,802	1,33
CE 5		2,66
CE 6		4
CE 7	200,182	1,33
CE 8		2,66
CE 9		4

Fonte: Autor.

Os casos de estudo em ondas senoidais, estabelecem os mesmos critérios básicos analisados em águas calmas, contudo, adiciona-se parâmetros de comprimentos de onda, amplitude de onda e diferença de fase, conforme exposto na Tabela 13.

Tabela 13: Casos de estudo em ondas senoidais com amplitude 0,5 [m].

Casos de estudo (CE)		Volume deslocado (∇) [m ³]	CGV [m]				
CE 10	—	112,925	1,33	λ [m] = 15,225	Diferença de fase = 0		
CE 11	—		2,66				
CE 12	—		4				
CE 13	—	171,802	1,33				
CE 14	—		2,66				
CE 15	—		4				
CE 16	—	200,182	1,33	λ [m] = 15,225	Diferença de fase = $\pi/2$		
CE 17	—		2,66				
CE 18	—		4				
CE 19	—	112,925	1,33			λ [m] = 30,45	Diferença de fase = 0
CE 20	—		2,66				
CE 21	—		4				
CE 22	—	171,802	1,33	λ [m] = 30,45	Diferença de fase = $\pi/2$		
CE 23	—		2,66				
CE 24	—		4				
CE 25	—	200,182	1,33			λ [m] = 30,45	Diferença de fase = $\pi/2$
CE 26	—		2,66				
CE 27	—		4				
CE 28	—	112,925	1,33	λ [m] = 30,45	Diferença de fase = 0		
CE 29	—		2,66				
CE 30	—		4				
CE 31	—	171,802	1,33			λ [m] = 30,45	Diferença de fase = $\pi/2$
CE 32	—		2,66				
CE 33	—		4				
CE 34	—	200,182	1,33	λ [m] = 30,45	Diferença de fase = $\pi/2$		
CE 35	—		2,66				
CE 36	—		4				
CE 37	—	112,925	1,33			λ [m] = 30,45	Diferença de fase = $\pi/2$
CE 38	—		2,66				
CE 39	—		4				
CE 40	—	171,802	1,33	λ [m] = 30,45	Diferença de fase = $\pi/2$		
CE 41	—		2,66				
CE 42	—		4				
CE 43	—	200,182	1,33			λ [m] = 30,45	Diferença de fase = $\pi/2$
CE 44	—		2,66				
CE 45	—		4				

Amplitude de onda [m] = 0,5

Fonte: Autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As características principais da embarcação são resumidas na Tabela 14. Cabe mencionar que conceitualmente a proa do casco pelo projeto de detalhamento deve ser reforçada para suportar impactos com obstáculos flutuantes, mas sem deixar de lado as características de baixa resistência hidrodinâmica. A forma do casco deve oferecer uma boa manobrabilidade nas curvas sinuosas, garantindo a navegação segura e eficiente. A eficiência do casco para baixa resistência e boa manobrabilidade requerem estudos de resistência ao avanço e testes de mar. A maximização da capacidade de carga é uma necessidade para a modalidade de navegação de transporte de carga e passageiros intermunicipal. Por outro lado, a maximização do espaço para passageiros também deve ser reforçada no projeto de detalhamento a fim de aumentar a acessibilidade e conforto da embarcação, tanto para lazer quanto saídas de emergência.

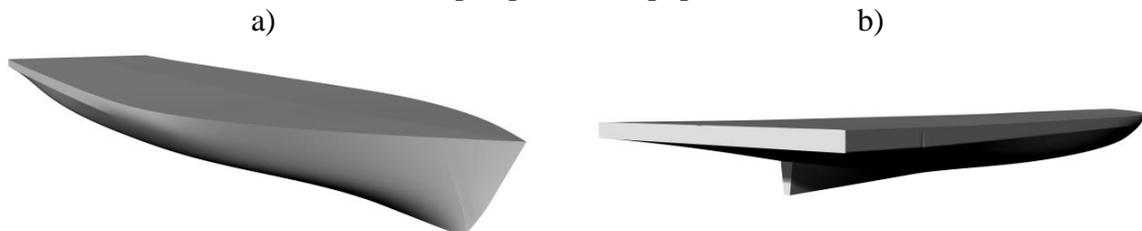
Tabela 14: Características selecionadas para o casco da embarcação regional selecionada como caso de estudo, nomeada Pantera Negra.

Comprimento total	30	[m]
Comprimento entre PP	28	[m]
Boca Moldada	8	[m]
Pontal Moldado	1,7	[m]
Calado de Projeto	1,3	[m]

Fonte: Autor.

O processo iterativo da construção do casco em 3D, através das revisões das séries expostas por Ho et al. (1989), é exposta na Figura 21, onde pode-se observar as visões de perspectiva da proa e popa de uma embarcação com características de navegação regionais amazônicas.

Figura 21: Casco Pantera Negra modelado em 3D. (a) Vista de perspectiva da proa. (b) Vista de perspectiva da popa.

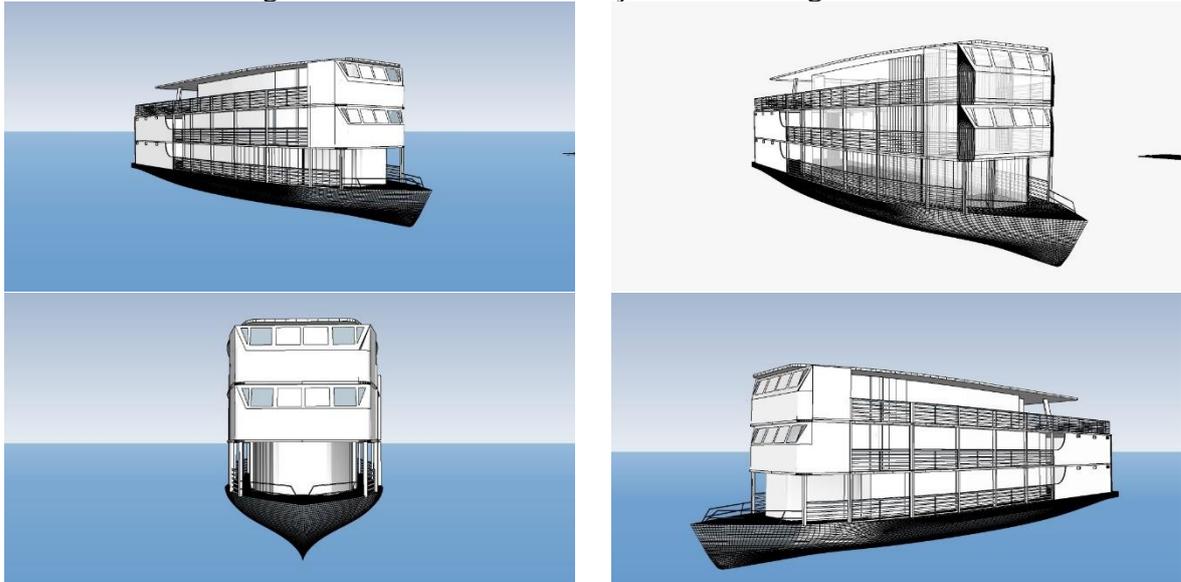


Fonte: Autor.

A Figura 22 expõe representações artísticas em 3D da embarcação regional amazônica, onde podem se observar diferentes ângulos e perspectivas, oferecendo uma compreensão

abrangente do projeto. A representação 3D permite identificar problemas potenciais ou áreas que necessitam de ajustes. Antes da construção real, é possível avaliar a ergonomia, o fluxo de circulação, a eficiência do espaço e outros aspectos importantes. Essa capacidade de antecipar problemas economiza tempo, recursos e evita retrabalhos durante o processo de construção, além de ser uma poderosa ferramenta de apresentação e marketing.

Figura 22: Vistas da embarcação Pantera Negra em 3D.

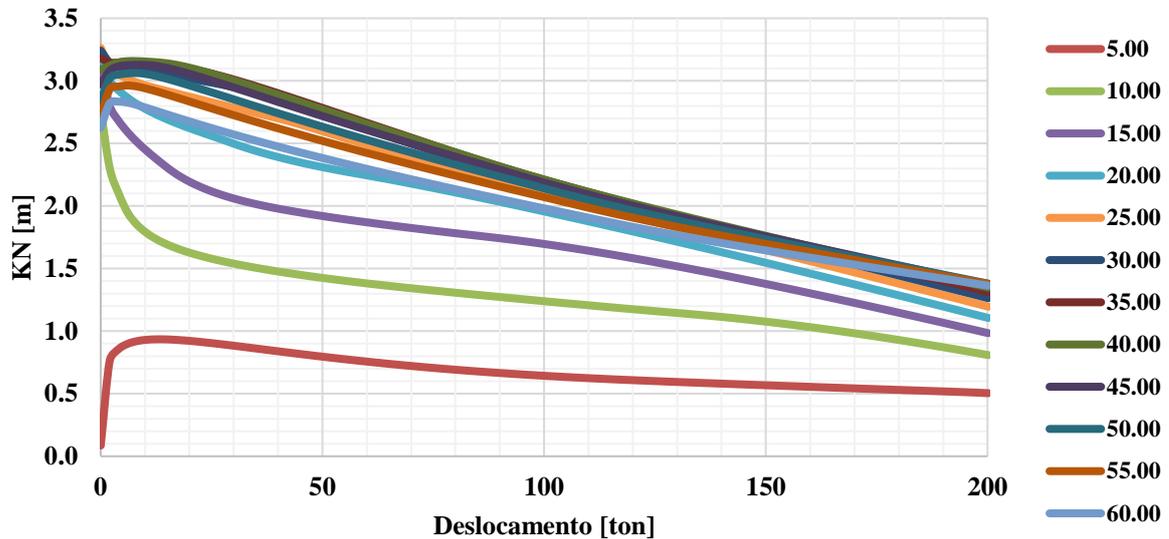


Fonte: Autor.

Na arquitetura naval, as curvas cruzadas representam as correções a serem feitas nos cálculos das curvas dos braços de adriçamento GZ. A Figura 23 representa as curvas cruzadas da embarcação considerada. As curvas cruzadas estimam a influência da carga máxima transportada com as curvas de estabilidade GZ. Consequentemente relacionam a distribuição ideal de centros de pesos para manter a estabilidade em diferentes condições de adernamento, que variam de 5° a 60° . A relação entre o peso e o centro de gravidade da embarcação em diferentes níveis de inclinação demonstra que o aumento de carga reduz os valores de das alavancas KN. Contudo, a visão 2D das curvas cruzadas é apenas uma representação da superfície tridimensional planificada, tendo em vista que são consideradas 3 variáveis, KN [m], ângulo de adernamento $[\theta^\circ]$ e carregamento [ton]. Considerando a equação (7) com o valor corrigido de KN, segundo a nota de rodapé 2, onde se enfatiza que $GZ = KN - (CGV \cdot \text{sen}(\theta))$, a redução dos valores de KN tendem a braços de adriçamentos menores, consequentemente, menores braços de adriçamento GZ geram menores momentos restauradores. Para altos valores de KG e ângulos próximos a 60° , os braços de adriçamento GZ tendem a ser expressivamente pequenos, com tendência a valores negativos, uma vez observados na correção dos braços GZs,

baixos KNs e altos CGVs, tornando a embarcação a condições de estabilidade instável, tendo em vista que valores $GM_t < 0$ tendem a facilitar o emborcamento (BARRASS; DERRETT, 2006; LEWIS, EDWAR V., 1988b).

Figura 23: Curvas cruzadas em 2D.

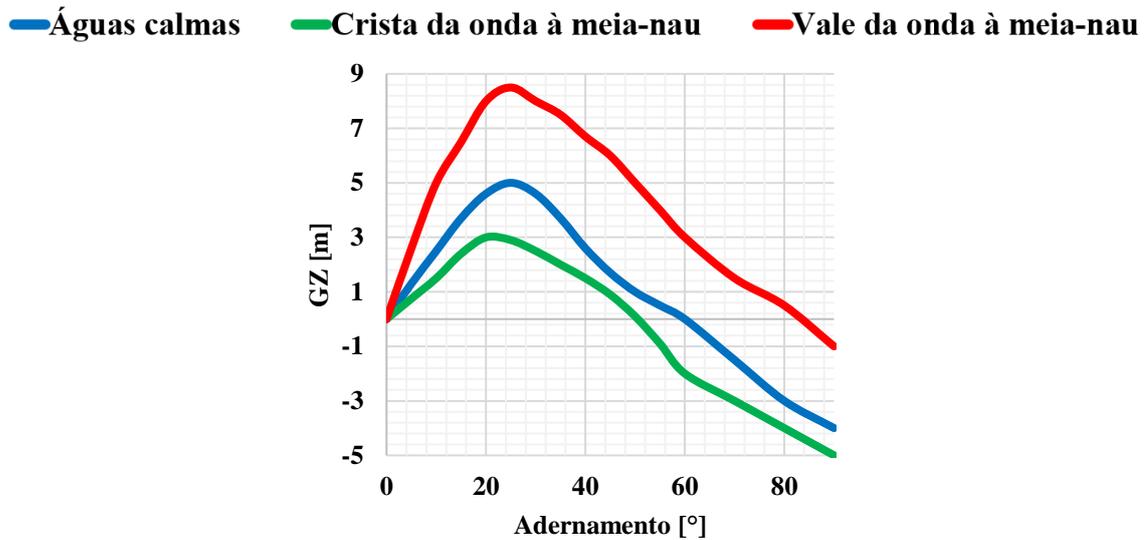


Fonte: Autor.

5.1. Curvas de estabilidade estática (CEE) e dinâmica (CED)

A análise das curvas de CEEs e CEDs fornece informações sobre a capacidade da embarcação de manter a sua estabilidade em diferentes condições estáticas e dinâmicas, o que influencia diretamente na resposta do sistema naval (a embarcação); além de ajudar na identificação de falhas de operação, expondo a influência do carregamento ∇ e CGVs nos OARs. Outro fator que reduz ou amplifica a resposta de um sistema naval são as funções de entrada no sistema. Segundo Lewis (1988b) e Belenky, Bassler e Spyrou (2011), ondas senoidais com crista à meia-nau, o sistema naval tende a ter respostas de braços de adriçamento reduzidos em relação às curvas GZ em águas calmas. Vales de ondas à meia-nau tendem ao sistema um comportamento de amplificação das curvas de braços de adriçamento (Figura 24).

Figura 24: Variação dos braços de adriçamentos em águas calmas em comparação a ondas senoidais com crista à meia-nau e ondas senoidais com vale à meia-nau.



Fonte: Adaptado de Lewis, E. V. (1988b), p.85, Fig. 26.

5.1.1. Águas calmas

Na análise dos nove casos de estudo de estabilidade estática e dinâmica em águas calmas (Tabela 15 e Figura 25), conclui-se que 66,66 [%] dos resultados obtidos cumprem os critérios mínimos estabelecidos pelos critérios normativos, apresentando dados preliminares para a avaliação da estabilidade dinâmica. Os valores negativos na Tabela 15 representam áreas sob o eixo da abscissa (eixo representativo da variação do adernamento) na Figura 25.

Tabela 15: Critérios NORMAM-02/DPC para as CEDs em condição de Estabilidade Intacta (EI) em águas calmas para múltiplos deslocamentos volumétricos (∇) e CGVs.

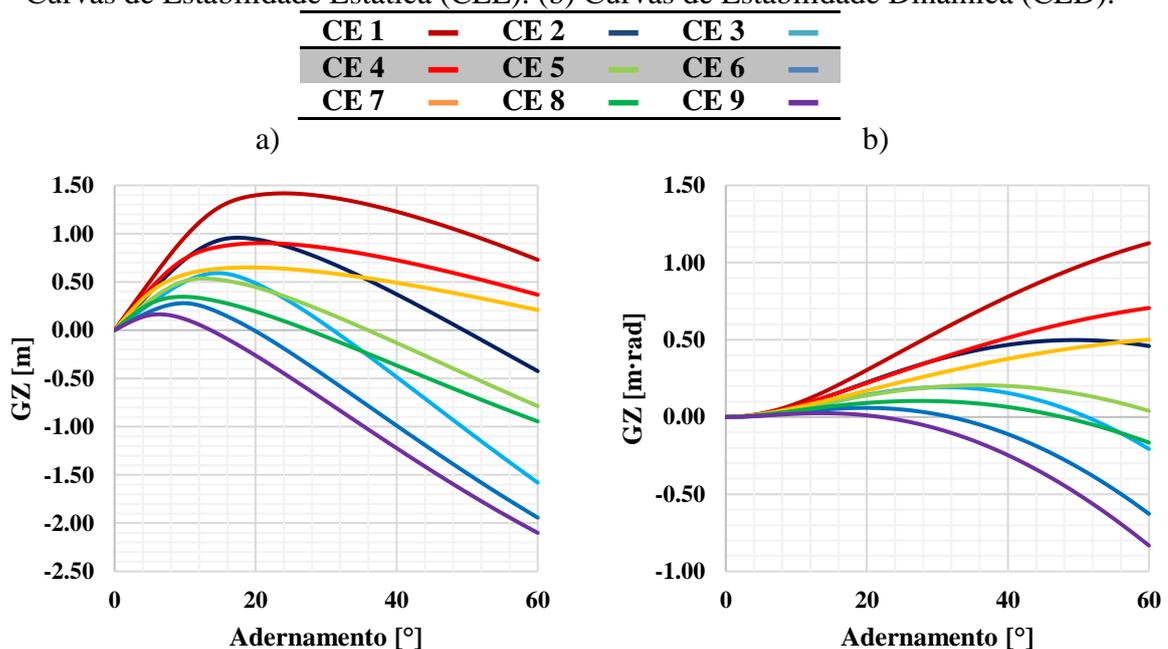
Critérios mín. sobre a EI	0° a 30°	0° a 40°	30° a 40°	GMt inicial
	[m.rad] ≥ 0.055	[m.rad] ≥ 0.09	[m.rad] ≥ 0.03	[m] ≥ 0.15
Caso de estudo (CE)				
CE 1	0.55	0.78	1.33	5.72
CE 2	0.37	0.47	0.84	4.39
CE 3	0.19	0.16	0.35	3.06
CE 4	0.37	0.51	0.89	4.61
CE 5	0.20	0.20	0.40	3.28
CE 6	0.02	-0.11	-0.09	1.95
CE 7	0.28	0.38	0.66	3.77
CE 8	0.10	0.06	0.17	2.44
CE 9	-0.08	-0.25	-0.32	1.12

Fonte: Autor.

Os resultados de CEES e CEDS para águas calmas (Figura 25), com 3 caldos: Calado a, Calado b e Calado c e 3 CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m] demonstraram falhas nas CEDs. A Figura 25 (a) mostra as tendências dos braços de adriçamento GZ, que demonstram influência

na variação de carregamentos, GZ (carregamento ∇C) < GZ (carregamento ∇B) < GZ (carregamento ∇A). De forma análoga, os GZ com variação de CGVs se comportam similarmente, GZ (CGV A) < GZ (CGV B) < GZ (CGV A). A tendência dos resultados é detalhada no capítulo 3, subcapítulos 3.5, 3.6 e 3.7. O aumento de deslocamento reduz a posição vertical metacêntrica; conseqüentemente há uma redução nos braços GZ s. Conceitualmente, o aumento do CGV tende a fazer o sistema naval ter uma tendência similar em relação aos braços GZ s, uma vez que o aumento dos CGVs se aproxima da posição vertical metacêntrica. Na condição de aumento de CGVs tanto quando no aumento do deslocamento, o GM_t é ser reduzido. A Figura 25 (b) mostra a variação das áreas em relação à estabilidade dinâmica é critério estabelecido pela NORMAM-02 (2022c); os critérios estão dispostos na Tabela 11, para intervalos de avaliação do comportamento do sistema naval de 0° a 30° , 0° a 40° e 30° a 40° . Espera-se como consequência da redução das CEEs a redução das CEDs.

Figura 25: Curvas de Estabilidade para águas calmas com variação de calado e CGV. (a) Curvas de Estabilidade Estática (CEE). (b) Curvas de Estabilidade Dinâmica (CED).



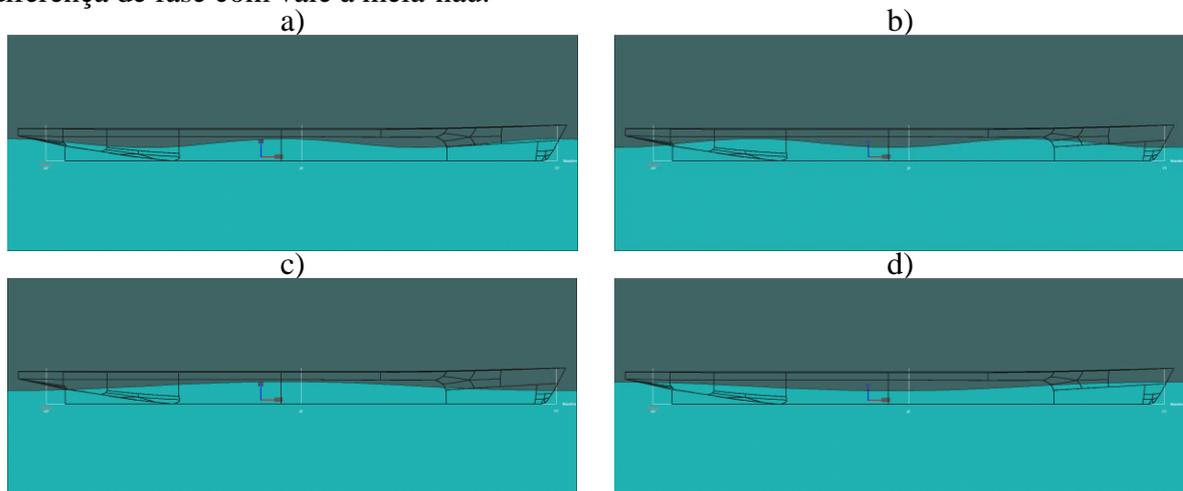
Fonte: Autor.

Os resultados supracitados para águas calmas na Figura 25 demonstram inépcias em critérios normativos, uma vez que para o Calado b e CGV de 4 [m], Calado c, CGV de 2,66 [m] e 4 [m] não atendem aos requisitos mínimos estabelecidos pela NORMAM-02 para as CEDs. Conseqüentemente, os resultados em ondas senoidais para cristas de ondas à meia-nau tentem a CEEs reduzidas (Figura 24), conseqüentemente CEDs são reduzidas.

5.1.2. Ondas senoidais

A Figura 26 estabelece visualmente as considerações de ondas senoidais, suas amplitudes e diferenças de fases consideradas no subcapítulo 4.2., de acordo com Lewis, E. V. (1988b) e Belenky, Basser e Spyrou (2011). Como demonstrado na Figura 24, espera-se resultados sutis de aumento de CEEs e CEDs para ondas com vales à meia-nau e diminuições sutis nos resultados com ondas com cristas à meia-nau, tendo em vista as variações de calados considerados serem significativamente pequenos em comparação aos observados em embarcações de navegação offshore, muito maiores do que 1 [m] de calado. Para este estudo, diversas condições de onda foram consideradas, como mostrado na Figura 26 (a): λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e sem diferença de fase e com crista à meia-nau; Figura 26 (b): λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com vale à meia-nau; Figura 26 (c): λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com crista à meia-nau; e Figura 26 (d) λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5, sem diferença de fase com vale à meia-nau.

Figura 26: Ondas senoidais com amplitude ζ [m] = 0,5, comprimentos de onda de λ [m] = 15,225 e λ [m] = 30,45 e diferenças de fase de 0 e $\pi/2$. (a) λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e sem diferença de fase com crista à meia-nau. (b) λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com vale à meia-nau. (c) λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com crista à meia-nau. (d) λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5, sem diferença de fase com vale à meia-nau.



Fonte: Autor.

A Tabela 16 apresenta os resultados para as CEDs em λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e sem diferença de fase com crista à meia-nau. Esses resultados com variação de carregamento e CGVs são comparados na Figura 27 com os resultados obtidos em águas calmas. A comparação tem como objetivo compreender as tendências com a variação dos pesos e a distribuição dos seus centros de gravidade.

Tabela 16: Casos de estudo de com λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e sem diferença de fase com crista à meia-nau e variação de calado e CGV.

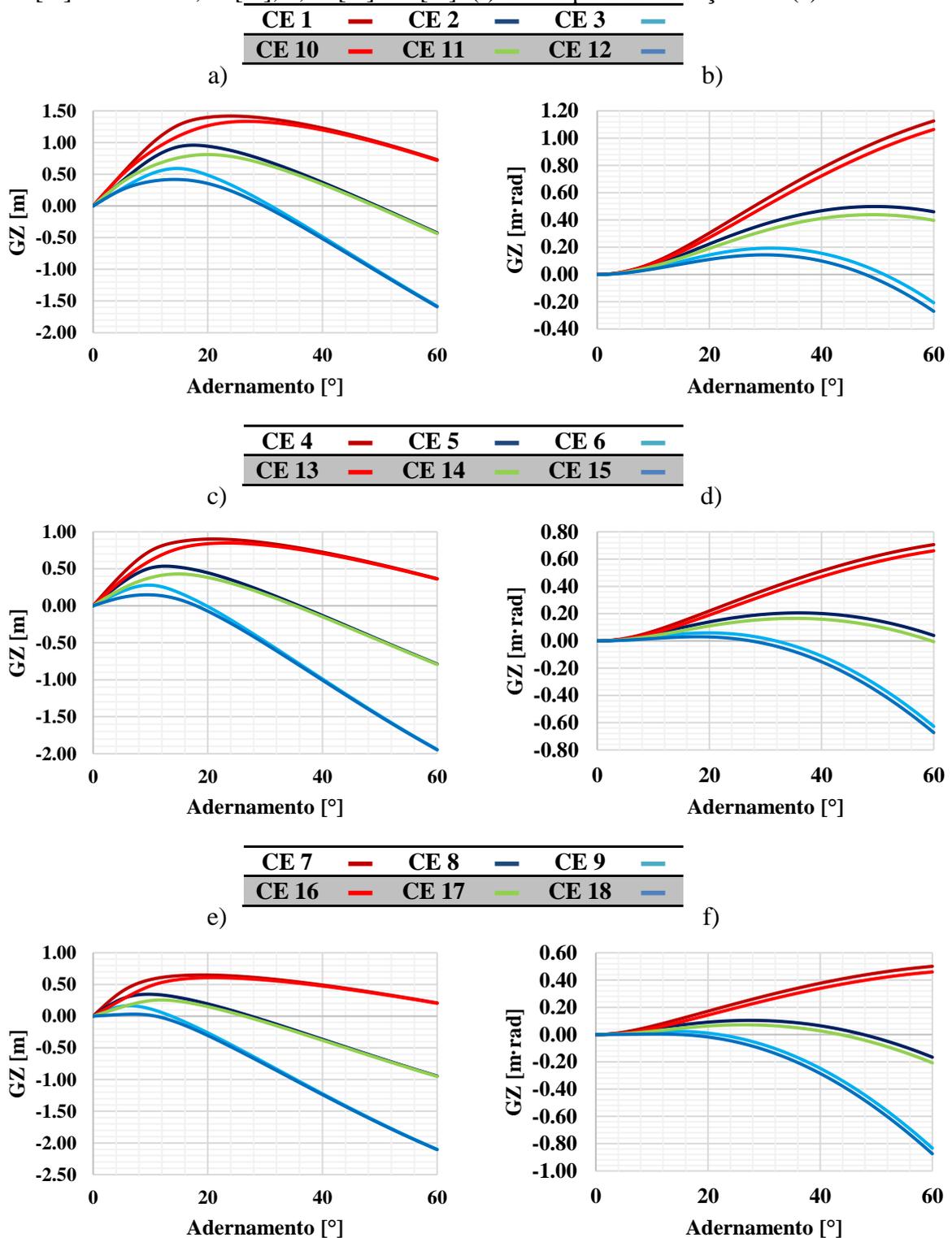
Critérios mín. sobre a EI	0° a 30°	0° a 40°	30° a 40°	GMt inicial
	[m.rad] \geq 0.055	[m.rad] \geq 0.09	[m.rad] \geq 0.03	[m] \geq 0.15
Caso de estudo (CE)				
CE 10	0.50	0.72	1.22	4.88
CE 11	0.32	0.41	0.73	3.55
CE 12	0.14	0.10	0.24	2.22
CE 13	0.34	0.47	0.81	3.58
CE 14	0.16	0.16	0.32	2.25
CE 15	-0.02	-0.15	-0.17	0.92
CE 16	0.25	0.34	0.59	2.97
CE 17	0.07	0.03	0.1	1.59
CE 18	-0.11	-0.29	-0.40	0.27

Fonte: Autor.

Os resultados obtidos e comparados com a proposta de Lewis, E. V. (1988b) na Figura 27 correspondem ao estudo proposto. Os resultados em ondas senoidais e águas calmas para os deslocamentos volumétricos ∇ : A, B e C, e CGVs: A, B e C demonstram a redução da capacidade de restauração através das CEEs e CEDs. Observando-se que as margens de estabilidade positiva e os GZs máximos nas CEEs, são reduzidas com o aumento dos deslocamentos volumétricos e para CGVs em 2,66 [m] e 4 [m], esse indicativo demonstra suscetibilidade de redução de CEEs em variações de cargas e seus centros de gravidade. A análise dos gráficos das Figura 27 (a)-(f), apresenta tendência de redução de capacidade de estabilidade por variação de centro de gravidade e descolamento volumétrico em ondas senoidais de comprimento λ [m] = 15,225. Destacam-se as seguintes observações:

- I. Gráfico da Figura 27-(a): CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. Diminuição nas curvas GZs para todo intervalo.
- II. Gráfico da Figura 27-(b): CEDs para as restrições de (a), pouca variação nas CEDs.
- III. Gráfico da Figura 27-(c): CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1,309 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. Diminuição nas curvas GZs para todo intervalo.
- IV. Gráfico da Figura 27-(d): CEDs para as restrições de (c), pouca variação de CDEs.
- V. Gráfico da Figura 27-(e): CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1,445 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. Esta condição de deslocamento volumétrico obtém os menores GZs máximos, e há redução nos GZs para todo intervalo.
- VI. Gráfico da Figura 27-(f): CEDs para as restrições de (e). A restrição de Calado 1,445 [m], apresenta variação negativa de CEDs em relação aos resultados em águas calmas.

Figura 27: Ondas com λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e sem diferença de fase com crista à meia-nau e variação de carga ∇ e CGV. (a) CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (b) CEDs para as restrições de (a). (c) CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1,309 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (d) CEDs para as restrições de (c). (e) CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1,445 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (f) CEDs para as restrições de (e).



Fonte: Autor.

A Tabela 17 apresenta os resultados para as e CEDs em λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com vale à meia-nau. Esses dados com variação de calado e CGVs são comparados na Figura 28 com os resultados obtidos em águas calmas. A sutil variação negativa nos resultados, nestas restrições de navegação parece que há o não cumprimento de critérios mínimos exigidos para as CEDs; esses descumprimentos serão levados em considerações nas conclusões.

Tabela 17: Casos de estudo de com λ [m] = 15,225, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com vale à meia-nau e variação de calado e CGV.

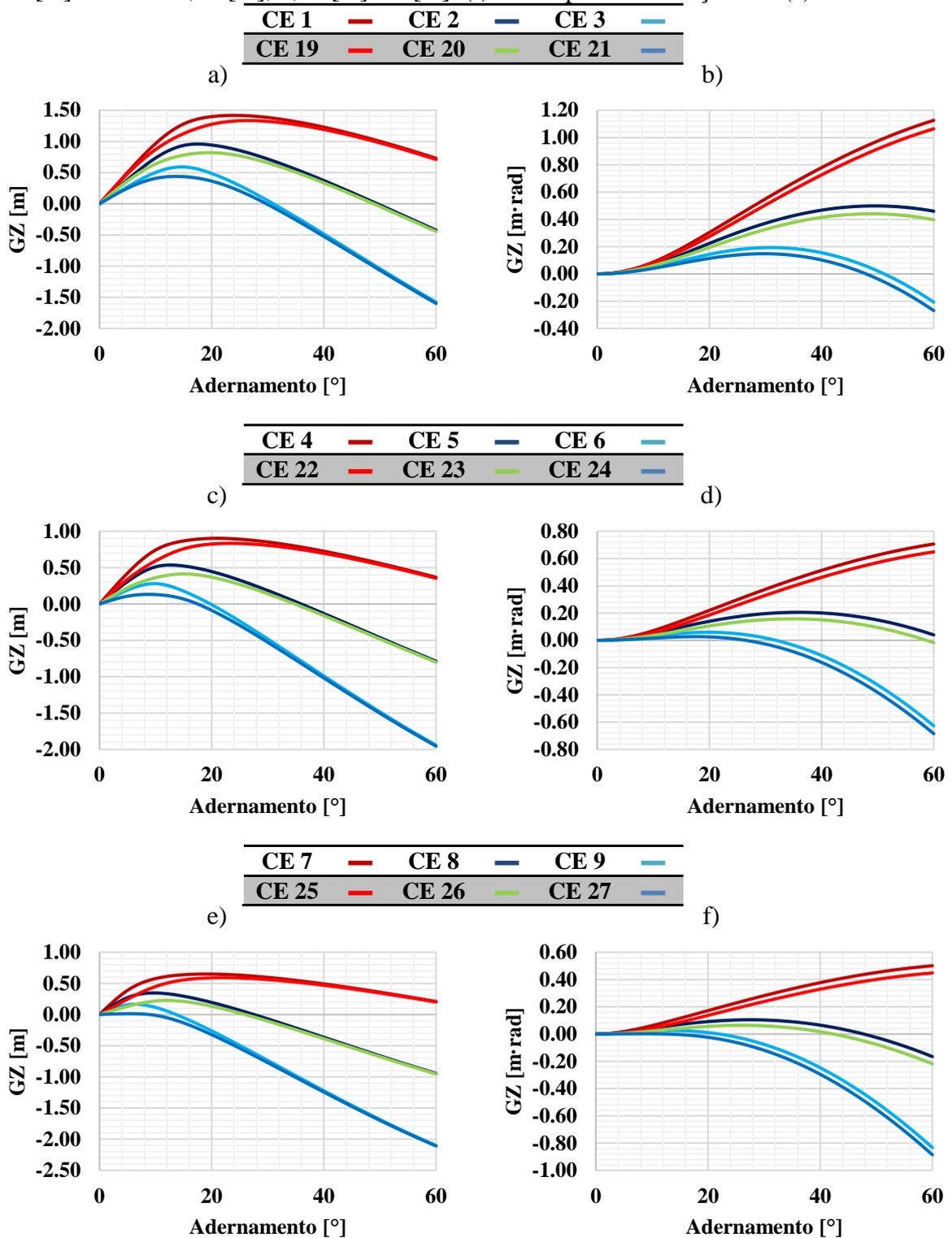
Critérios mín. sobre a EI	0° a 30°	0° a 40°	30° a 40°	GMt inicial
	[m.rad] \geq 0.055	[m.rad] \geq 0.09	[m.rad] \geq 0.03	[m] \geq 0.15
Caso de estudo (CE)				
CE 19	0.51	0.73	1.23	5.22
CE 20	0.33	0.41	0.74	3.89
CE 21	0.15	0.10	0.25	2.56
CE 22	0.33	0.46	0.79	3.34
CE 23	0.15	0.15	0.30	2.02
CE 24	-0.03	-0.16	-0.19	0.69
CE 25	0.24	0.33	0.57	2.70
CE 26	0.06	0.02	0.08	1.37
CE 27	-0.12	-0.30	-0.41	0.047

Fonte: Autor.

Com relação à descrição da análise dos gráficos da Figura 28, apresenta-se tendência de redução de estabilidade por variação de centro de gravidade e calados em ondas senoidais de comprimento λ [m] = 15,225. Destacam-se as seguintes observações:

- I. Figura 28-(a): CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. Diminuição nas curvas GZs para todo intervalo.
- II. Figura 28-(b): CEDs para as restrições de (a), pouca variação nas CEDs.
- III. Figura 28-(c): CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1,309 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. Diminuição nas curvas GZs para todo intervalo.
- IV. Figura 28-(d): CEDs para as restrições de (c), pouca variação de CDEs.
- V. Figura 28-(e): CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1,445 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. Esta condição de deslocamento volumétrico obtém os menores GZs máximos, e há redução nos GZs para todo intervalo.
- VI. Gráfico da Figura 28-(f): CEDs para as restrições de (e). A restrição de deslocamento volumétrico ∇C , apresenta variação negativa de CEDs em relação aos resultados em águas calmas.

Figura 28: Ondas com λ [m] = 15,22, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com vale à meia-nau, variação de calado e CGV. (a) CEEs com λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$ Calado 1 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (b) CEDs para as restrições de (a). (c) CEEs com λ [m] = 15,22, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1,309 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (d) CEDs para as restrições de (c). (e) CEEs com λ [m] = 15,22, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1,445 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (f) CEDs para as restrições de (e).



Fonte: Autor.

Os resultados apresentados nas Figuras 27 e 28 para ondas com comprimentos λ [m] = 15,225, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$ e $\Phi = \pi/2$, variação de Calado e CGVs, em comparação com os CEEs e CEDs em águas calmas, demonstram tendências nos fatores de deslocamento volumétrico e distribuição dos centros de gravidade. O aumento do carregamento e CGVs reduz os braços de adriçamento, ou seja, os GZs máximos são reduzidos e as áreas das CEDs conseqüentemente; este comportamento já estava previsto segundo Lewis, E. V. (1988b).

Os resultados nas Tabelas 16 e 17 se concentram na análise em ondas senoidais com $\lambda \approx Lo/2$, como supracitado, os resultados foram teoricamente esperados. Dando seguimento à proposta, as duas análises seguintes irão observar a influência alterando apenas o comprimento de onda, sendo a partir de agora, $\lambda \approx Lo$.

O estudo de dados numéricos na Tabela 18, neste caso de estudo com λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com crista à meia-nau é uma análise fundamental para compreender o comportamento do sistema naval em relação à ação das ondas e suas características. Os dados numéricos coletados e analisados nessa tabela permite uma investigação de parâmetros como de estabilidade, e outros fatores críticos que influenciam o comportamento estático e dinâmico da embarcação sob essas condições específicas de ondas. Os resultados obtidos demonstram a significativa redução dos braços GZs com o aumento dos CGVs e deslocamentos volumétricos.

Tabela 18: Casos de estudo de com λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5 e sem diferença de fase com crista à meia-nau e variação de calado e CGV.

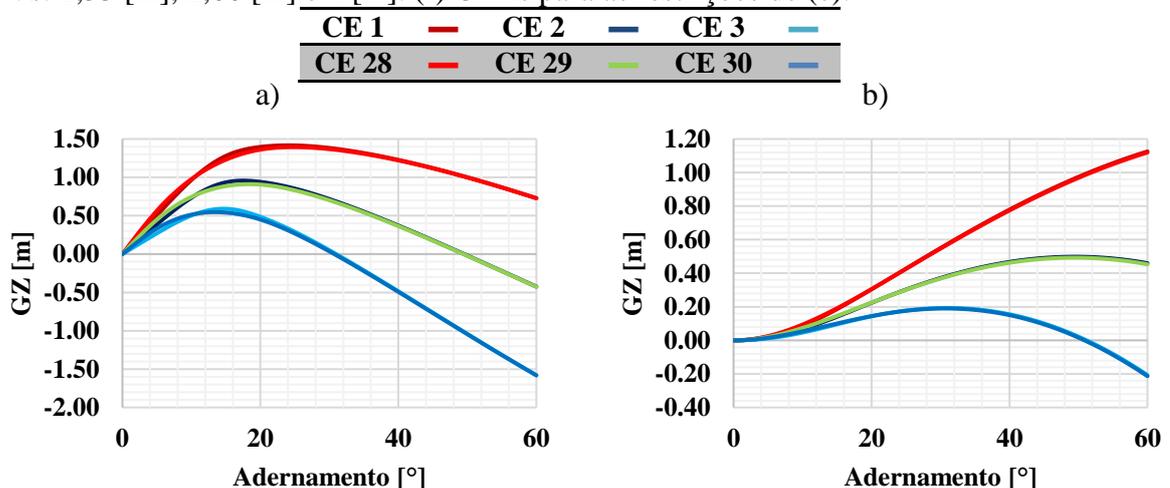
Critérios mín. sobre a EI	0° a 30°	0° a 40°	30° a 40°	GMt inicial
	[m.rad] ≥ 0.055	[m.rad] ≥ 0.09	[m.rad] ≥ 0.03	[m] ≥ 0.15
Caso de estudo (CE)				
CE 28	0.55	0.77	1.32	5.74
CE 29	0.37	0.46	0.83	4.42
CE 30	0.19	0.15	0.34	3.09
CE 31	0.37	0.50	0.87	4.10
CE 32	0.19	0.19	0.38	2.77
CE 33	0.01	-0.12	-0.11	1.44
CE 34	0.27	0.36	0.63	3.22
CE 35	0.09	0.05	0.14	1.89
CE 36	-0.09	-0.26	-0.35	0.56

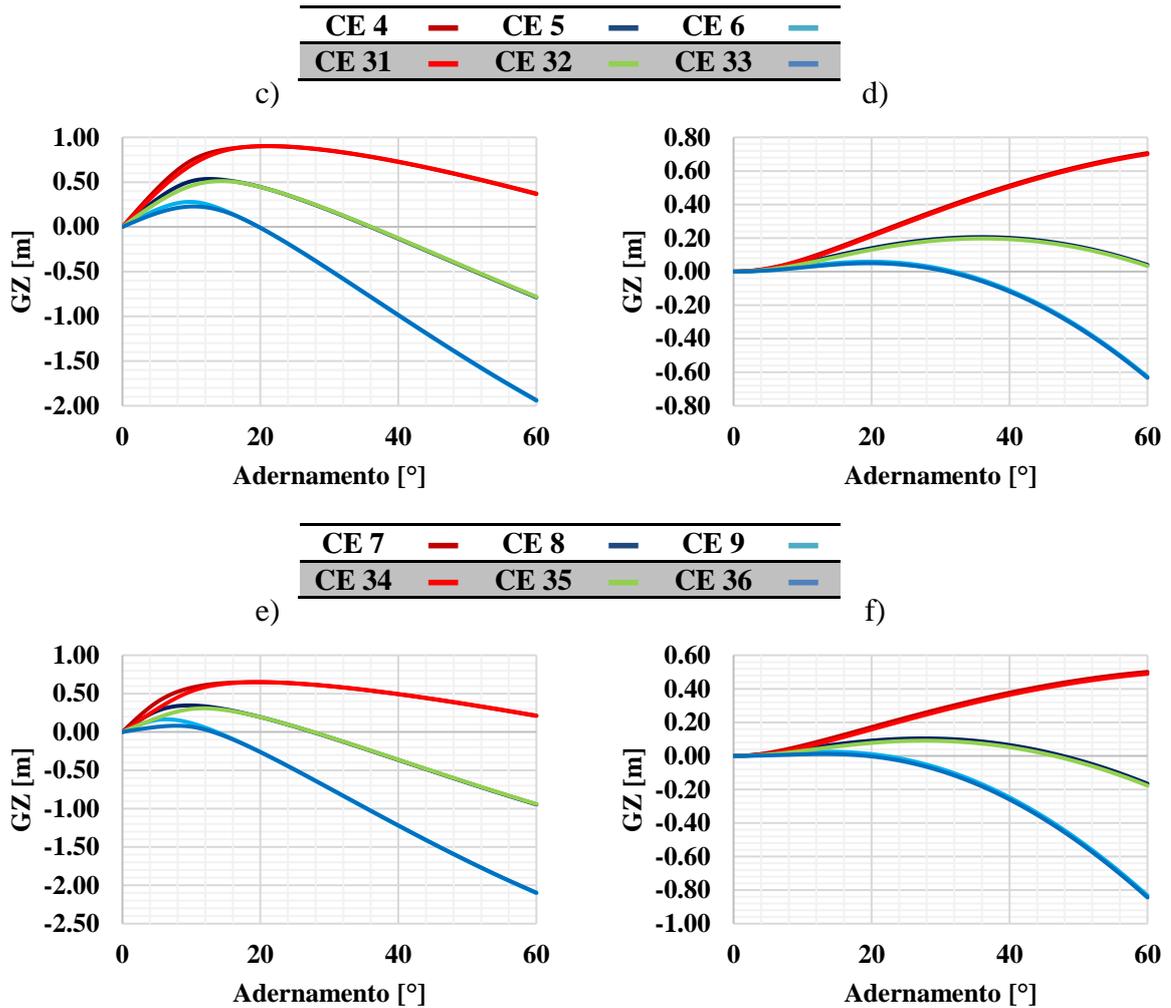
Fonte: Autor.

A Figura 29 apresenta redução de estabilidade no intervalo de 0° a 12° . Destacam-se para a Figura 29 as seguintes observações:

- I. Figura 29-(a): CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. Pequeno aumento nas curvas GZs em relação às curvas GZs em águas calmas de 0° a $\sim 12^\circ$, valores acima de $\sim 12^\circ$ os GZs são menores em relação aos resultados para águas calmas para $\sim 12^\circ$ a $\sim 28^\circ$;
- II. Figura 29-(b): CEDs para as restrições de (a), pouca variação nas áreas das CEDs;
- III. Figura 29-(c): CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1,309 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. Há redução dos braços de adriçamento de 0° a $\sim 16^\circ$, acima de $\sim 16^\circ$ não é observado mudanças significativas nos GZs;
- IV. Figura 29-(d): CEDs para as restrições de (c), pouca variação nas áreas das CDEs;
- V. Figura 29-(e): CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1,445 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. Esta condição de deslocamento volumétrico obtém o menor GZ máx. nas condições estudadas nas restrições para a Figura 29, a redução dos braços de adriçamento de 0° a $\sim 16^\circ$ é um fator combinado de deslocamento e centros de gravidade, acima de $\sim 16^\circ$ não é observado mudanças significativas nos GZs;
- VI. Figura 29-(f): CEDs para as restrições de (e). O calado 1,445 [m] apresenta pouca variação nas áreas das CEDs em relação aos resultados em águas calmas, contudo as curvas GZs expõe a perda de capacidade e redução nos GZs com aumento dos CGVs.

Figura 29: Ondas com λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5, sem diferença de fase com vale à meia-nau, variação de calado e CGV. (a) CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (b) CEDs para as restrições de (a). (c) CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1,309 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (d) CEDs para as restrições de (c). (e) CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = 0$, Calado 1,445 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (f) CEDs para as restrições de (e).





Fonte: Autor.

Os dados numéricos na Tabela 19 concluem os 4 cenários de casos de estudo. O caso de estudo com comprimentos de onda λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com crista à meia-nau é fundamental para a compreensão da resposta do sistema naval modelado com 2 comprimentos de ondas e 2 diferenças de fase. Assim, podem-se compreender tendências de respostas em relação a forças excitantes senoidais, com variação de calados e distribuição de pesos. A tabela pretende mostrar as tendências de suscetibilidade em condições de mar com ondas de comprimentos próximos ao comprimento da embarcação em si, em relação às respostas estáticas e dinâmicas e sua influência na resposta do sistema para ressonância.

Tabela 19: Casos de estudo com λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com crista à meia-nau e variação de calado e CGV.

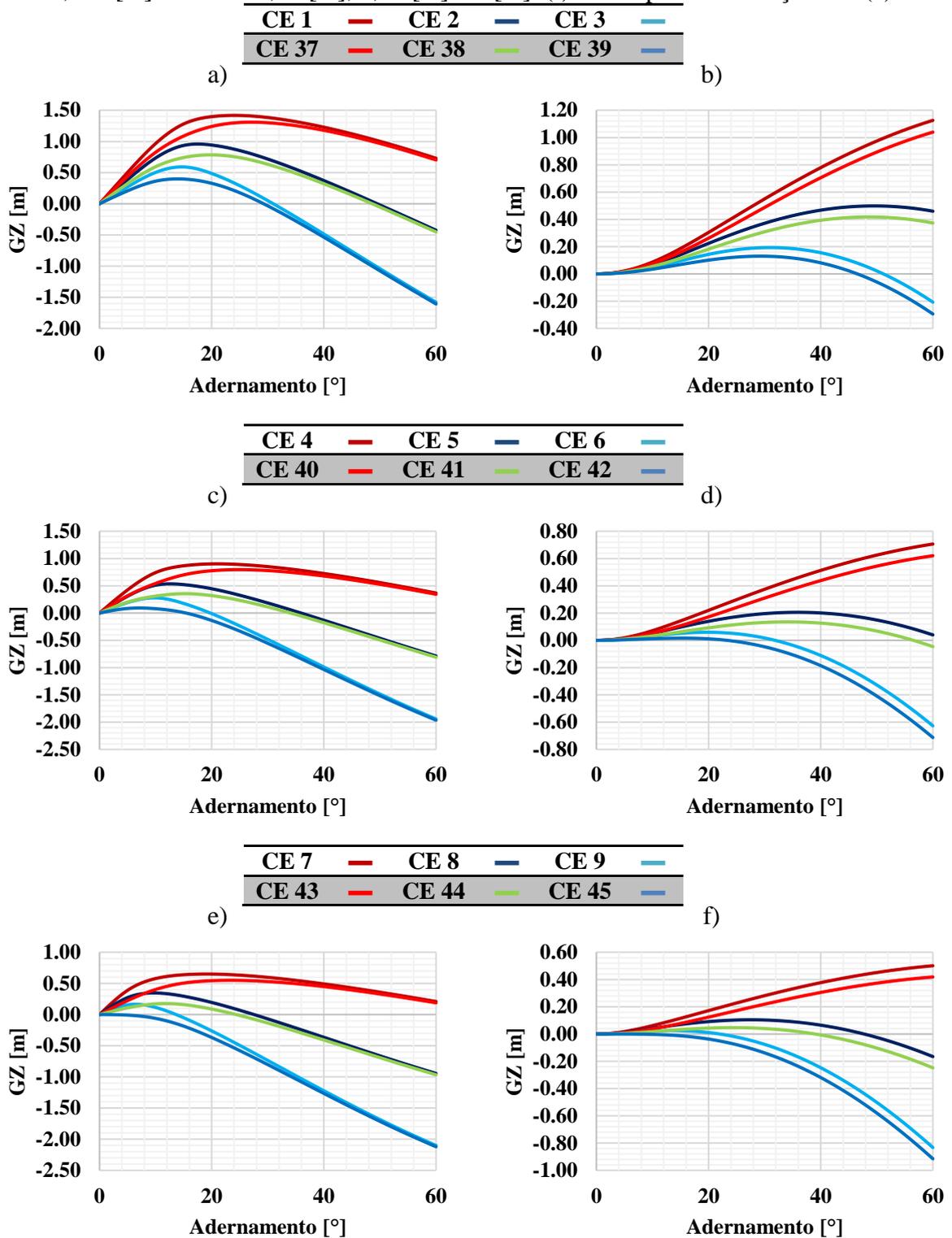
Critérios mín. sobre a EI	0° a 30°	0° a 40°	30° a 40°	GMt inicial
	[m.rad] ≥ 0.055	[m.rad] ≥ 0.09	[m.rad] ≥ 0.03	[m] ≥ 0.15
Caso de estudo (CE)				
CE 37	0.49	0.71	1.19	4.90
CE 38	0.31	0.39	0.70	3.57
CE 39	0.13	0.08	0.21	2.24
CE 40	0.31	0.44	0.75	3.02
CE 41	0.13	0.13	0.26	1.69
CE 42	-0.05	-0.19	-0.23	0.36
CE 43	0.22	0.30	0.52	2.36
CE 44	0.04	-0.01	0.03	1.03
CE 45	-0.14	-0.32	-0.46	-0.29

Fonte: Autor

A Figura 30 apresenta para o caso de estudo de comprimentos de onda próximas ao comprimento da embarcação, de redução de estabilidade por variação de centro de gravidade e descolamento volumétrico. Esta condição, como demonstrado na Figura 24, justifica esta redução uma vez que o deslocamento, área de superfície molhada, distribuição de centro de flutuação e empuxo são alterados. Tendo em vista esse comportamento teórico, destacam-se para a Figura 30 as seguintes observações:

- I. Figura 30-(a): CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. Redução nos braços GZs para todo intervalo de adernamento.
- II. Figura 30-(b): CEDs para as restrições de (a), significativa redução nas CEDs.
- III. Figura 30-(c): CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1,309 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. Há redução dos braços de adriçamento para todo intervalo avaliado de adernamento.
- IV. Figura 30-(d): CEDs para as restrições de (c) com variação de CDEs significativas.
- V. Figura 30-(e): CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1,445 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. Esta condição de deslocamento volumétrico obtém s menores GZs máximos, o comportamento se mantém contante, os braços GZs são reduzidos para todo o intervalo.
- VI. Figura 30-(f): CEDs para as restrições de (e). A restrição de deslocamento volumétrico VC, apresenta muita variação de CEDs em relação aos resultados em águas calmas.

Figura 30: Ondas com λ [m] = 30,45, amplitude ζ [m] = 0,5 e diferença de fase de $\pi/2$ com crista à meia-nau, variação de calado e CGV. (a) CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (b) CEDs para as restrições de (a). (c) CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1,309 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (d) CEDs para as restrições de (c). (e) CEEs com λ [m] = 30,45, ζ [m] = 0,5, $\Phi = \pi/2$, Calado 1,445 [m] e CGVs: 1,33 [m], 2,66 [m] e 4 [m]. (f) CEDs para as restrições de (e).



Fonte: Autor.

Após a análise das 4 Tabelas [16-19] de dados referentes à variação de deslocamento e centro de gravidade, podem-se destacar alguns pontos negativos, os quais têm implicações significativas na estabilidade e segurança dessas embarcações em diferentes condições de operação e navegação.

Observou-se que, em todas as tabelas analisadas, há uma clara relação entre o deslocamento do centro de gravidade e a estabilidade da embarcação. À medida que o centro de gravidade é deslocado para posições mais elevadas em relação à linha d'água, a estabilidade geral da embarcação é comprometida, há redução dos braços GZs de forma que não atende critérios mínimos. Isso ocorre porque um centro de gravidade mais alto torna a embarcação mais suscetível a movimentos excessivos e instabilidade, especialmente em ondas senoidais com cristas à meia-nau.

Identificou-se que variações significativas no centro de gravidade podem levar a um risco aumentado de capotamento, tendo em vista que maiores deslocamentos volumétricos tendem a reduzir os braços de adriçamento e conseqüentemente os momentos adriçantes.

A variação do centro de gravidade pode impactar negativamente a navegabilidade da embarcação. Em particular, manobras como curvas e mudanças rápidas de direção podem se tornar mais inseguras, pois o deslocamento do centro de gravidade pode influenciar a capacidade da embarcação de se manter estável durante essas manobras.

Uma distribuição inadequada da carga a bordo da embarcação pode levar a uma mudança indesejada no centro de gravidade. É fundamental garantir que a carga seja distribuída de maneira equilibrada e de acordo com as especificações de projeto, a fim de manter a estabilidade ideal em diferentes condições de carga, especialmente o CGV.

5.2. Operadores de amplitude de respostas (OARs)

A análise de operadores de amplitude de respostas (OARs) permite avaliar os movimentos da embarcação considerando diferentes parâmetros, como velocidade de avanço, frequência de encontro, deslocamento volumétrico e distribuição de centros de gravidade. A análise dos OARs inclui fundamentalmente funções de transferência, um conceito fundamental na teoria de controle e análise de sistemas dinâmicos (neste estudo, um sistema dinâmico naval), usada para descrever a relação entre a entrada e a saída de um sistema em termos de sua resposta em frequência. A função de transferência é uma representação matemática que descreve como a saída de um sistema responde a uma entrada específica. A partir da função de transferência, é possível determinar a estabilidade de um sistema e a resposta em frequência (OGATA, 2011).

A análise de resposta de OARs através de funções de transferência, requerem restrições inerentes ao sistema naval, como de carregamento, ângulos de incidência de ondas, ângulo de encontro de ondas e da embarcação e centros de gravidade. As restrições admitidas no presente estudo se apresentam nas Tabelas [16-18].

As Tabelas [20-23] restringem para a variação de calado (1 [m] - 1,445 [m]), com a embarcação navegando a 135° em relação à propagação de ondas com diversos centros de gravidade verticais e números de Froude [0 - 0,4] conforme descrito no subcapítulo 4.2.

O pico de ressonância das funções de transferência do grau de liberdade η_4 tende a ser máximo em marés de través conforme demonstrado na seção 3.9.

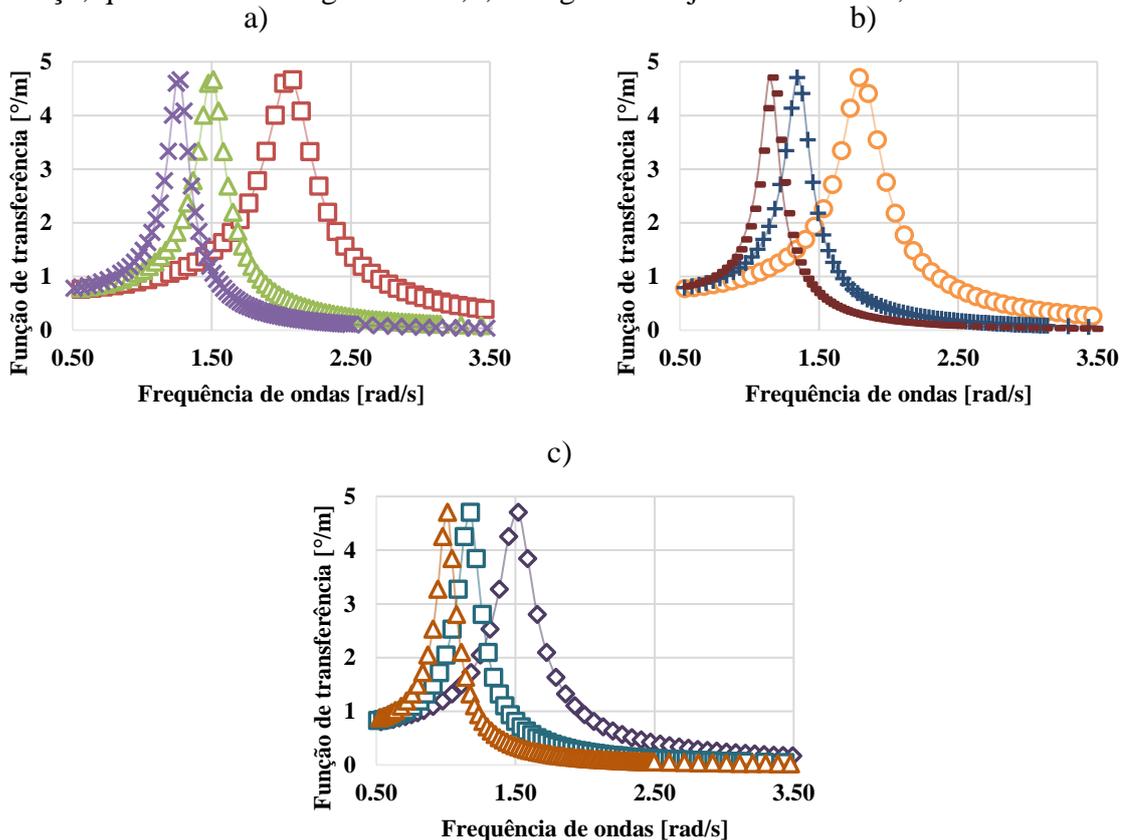
Tabela 20: Restrições para o OAR η_4 desacoplado em deslocamento volumétrico ∇A , 135° de ângulo de encontro, variação de centro de gravidade vertical e velocidade de avanço.

Figura	31-(a)			31-(b)			31-(c)		
GdL	Calado 1 [m]								
η_4	135°								
	CGV [m] = 1,33			CGV [m] = 2,66			CGV [m] = 4		
	-	Fn a	Fn b	-	Fn a	Fn b	-	Fn a	Fn b
Símbolo	□	△	x	o	+	-	◇	□	△

Fonte: Autor.

A Figura 31 demonstra as respostas para as influências de restrições da Tabela 20. Conforme se alteram os Fns, os picos de resposta tendem a acontecer em frequências de ondas cada vez mais baixas. Este comportamento demonstra que o avanço de velocidade faz os picos de ressonância ocorrerem a baixas frequências de ondas. Na Figura 31 - (a), observa-se que o baixo CGV = 1,33 [m] tem um pico de ressonância sem velocidade de avanço $>\sim 2$ [rad/s], o avanço da velocidade reduz a frequência do pico de ressonância a $\sim 1,5$ [rad/s], e o estágio final de velocidade a reduz a frequência do pico a uma frequência de $\sim 1,3$ [rad/s]. Na Figura 31 - (b), verifica-se que médio CGV = 2,66 [m] tem um pico de ressonância sem velocidade de avanço $>\sim 1,8$ [rad/s], o avanço para Fn a reduz a frequência do pico de ressonância a $\sim 1,3$ [rad/s], e o estágio final de velocidade, Fn b, reduz a frequência do pico a uma frequência de $\sim 1,2$ [rad/s]. Por último, na Figura 31 - (c), pode-se observar que o alto CGV = 4 [m] tem um pico de ressonância sem velocidade de avanço $>\sim 1,5$ [rad/s], o avanço da velocidade, Fn a, reduz a frequência do pico de ressonância a $\sim 1,2$ [rad/s], o estágio final de velocidade, Fn b, reduz a frequência do pico a uma frequência de ~ 1 [rad/s].

Figura 31: Restrições para o OAR n4 desacoplado em calado 1 [m], variação de centro de gravidade vertical e velocidade de avanço. (a) Funções de transferência para o calado 1 [m] com CGV = 1,33 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; quadrado vermelho = Sem vel. de avanço, triângulo verde = Fn 0,2, xis roxo = Fn 0,4. (b) Funções de transferência para o calado 1 [m] com CGV 2,66 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; círculo laranja = Sem vel. de avanço, mais azul escuro = Fn 0,2, menos vinho = Fn 0,4. (c) Funções de transferência para o calado 1 [m] com CGV 4 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; quadrado roxo = Sem vel. de avanço, quadrado verde-água = Fn 0,2, triângulo laranja escuro = Fn 0,4.



Fonte: Autor.

A Tabela 21, para a segunda fase do estudo dos OARs, muda em relação à Tabela 20, as restrições de deslocamento volumétrico, passando do calado 1 [m] → 1,309 [m].

Tabela 21: Restrições para o OAR n4 desacoplado com calado 1,309 [m], 135° de ângulo de encontro, variação de centro de gravidade vertical e velocidade de avanço.

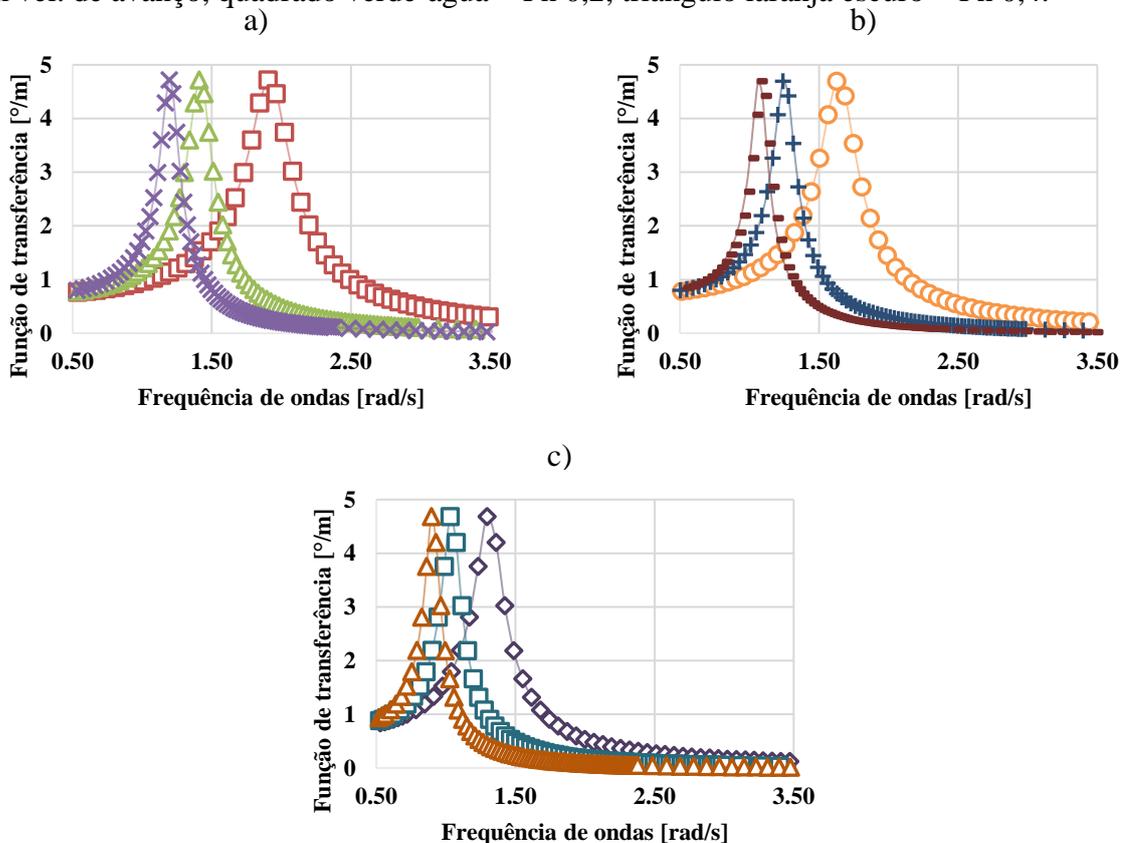
Figura	32-(a)			32-(b)			32-(c)		
GdL	Calado 1,309 [m]								
	135°								
η4	CGV [m] = 1,33			CGV [m] = 2,66			CGV [m] = 4		
	-	Fn a	Fn b	-	Fn a	Fn b	-	Fn a	Fn b
Símbolo	□	△	×	○	+	-	◇	□	△

Fonte: Autor.

A Figura 32 mostra as respostas para as influências de restrições da Tabela 21. Conforme se altera os Fns, os picos de resposta tentem a acontecer em frequências de ondas cada vez mais baixas; este comportamento demonstra que o avanço de velocidade faz os picos

de ressonância ocorrerem a baixas frequências de ondas. Figura 32 - (a): o baixo CGV A tem um pico de ressonância sem vel. de avanço $\sim 1,9$ [rad/s], o avanço da velocidade reduz a frequência do pico de ressonância a $\sim 1,4$ [rad/s], o estágio final de velocidade a reduz a frequência do pico a uma frequência de $\sim 1,2$ [rad/s]. Figura 32 - (b): o médio CGV B tem um pico de ressonância sem vel. de avanço $> \sim 1,6$ [rad/s], o avanço da velocidade reduz a frequência do pico de ressonância a $\sim 1,3$ [rad/s], o estágio final de velocidade a reduz a frequência do pico a uma frequência de ~ 1 [rad/s]. Figura 32 - (c): o alto CGV C tem um pico de ressonância sem vel. de avanço $\sim 1,3$ [rad/s], o avanço da velocidade reduz a frequência do pico de ressonância a ~ 1 [rad/s], o estágio final de velocidade a reduz a frequência do pico a uma frequência de $\sim 0,9$ [rad/s].

Figura 32: Restrições para o OAR n4 desacoplado em calado 1,309 [m], variação de centro de gravidade vertical e velocidade de avanço. (a) Funções de transferência para o calado 1,309 [m] com CGV = 1,33 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; quadrado vermelho = Sem vel. de avanço, triângulo verde = Fn 0,2, xis roxo = Fn 0,4. (b) Funções de transferência para o calado 1,309 [m] com CGV 2,66 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; círculo laranja = Sem vel. de avanço, mais azul escuro = Fn 0,2, menos vinho = Fn 0,4. (c) Funções de transferência para o calado 1,309 [m] com CGV 4 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; quadrado roxo = Sem vel. de avanço, quadrado verde-água = Fn 0,2, triângulo laranja escuro = Fn 0,4.



Fonte: Autor.

A Tabela 22, para a terceira fase do estudo dos OARs, muda em relação à Tabela 21 e 20 as restrições de deslocamento volumétrico, passando de 1,309 [m] → 1,445 [m].

Tabela 22: Restrições para o OAR n4 desacoplado com calado 1,445 [m], 135° de ângulo de encontro, variação de centro de gravidade vertical e velocidade de avanço.

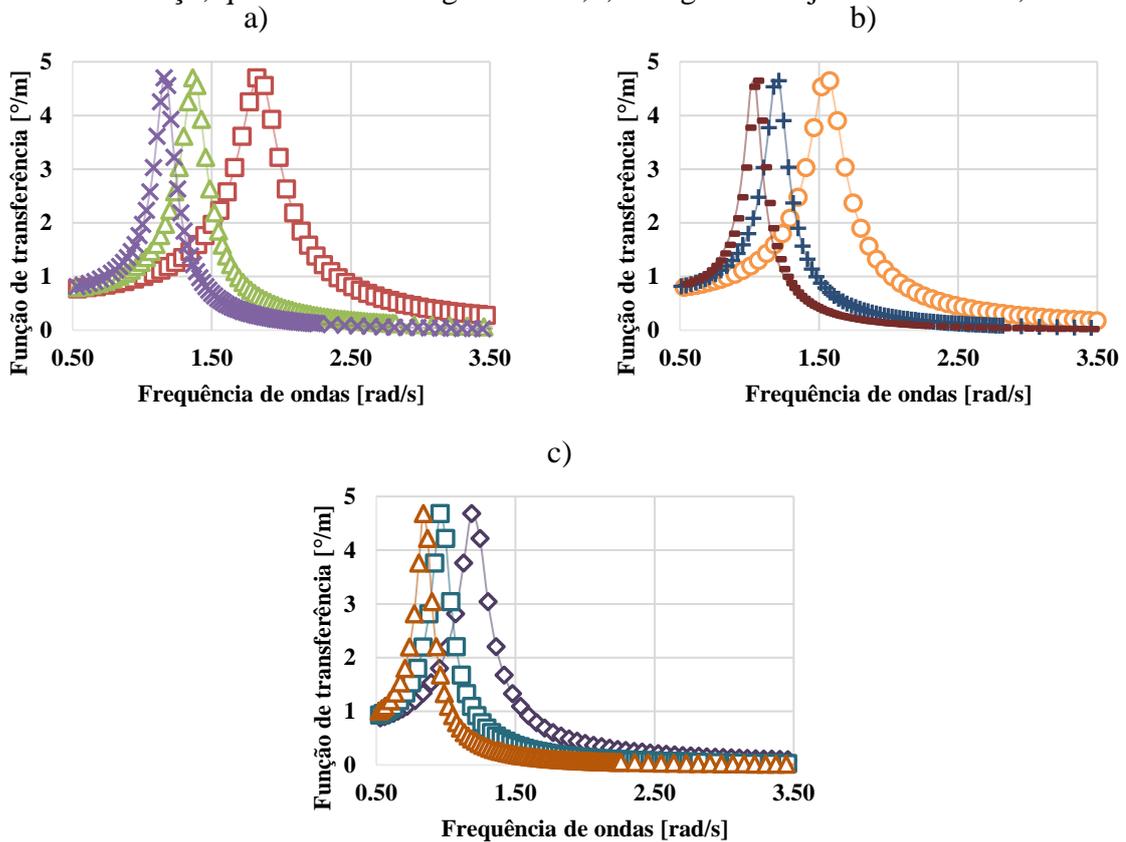
Figura	33-(a)			33-(b)			33-(c)		
GdL	Calado 1,445 [m]								
η4	135°								
	CGV [m] = 1,33			CGV [m] = 2,66			CGV [m] = 4		
	-	Fn a	Fn b	-	Fn a	Fn b	-	Fn a	Fn b
Símbolo	□	△	x	o	+	-	◇	□	△

Fonte: Autor.

A Figura 33 demonstra as respostas para as influências de restrições da Tabela 18. Conforme se alteram os Fns, os picos de resposta tendem a acontecer em frequências de ondas mais baixas; este comportamento demonstra que o avanço de velocidade faz os picos de ressonância ocorrerem a baixas frequências de ondas. Figura 33 - (a): o baixo CGV = 1,33 [m] tem um pico de ressonância sem vel. de avanço ~1,8 [rad/s], o avanço da velocidade reduz a frequência do pico de ressonância a ~1,36 [rad/s], o estágio final de velocidade a reduz a frequência do pico a uma frequência de ~1,16 [rad/s]. Figura 33 - (b): o médio CGV = 2,66 [m] tem um pico de ressonância sem vel. de avanço > ~1,58 [rad/s], o avanço da velocidade reduz a frequência do pico de ressonância a ~1,21 [rad/s], o estágio final de velocidade a reduz a frequência do pico a uma frequência de ~1 [rad/s]. Figura 33 - (c): o alto CGV = 4 [m] tem um pico de ressonância sem vel. de avanço ~1,2 [rad/s], o avanço da velocidade reduz a frequência do pico de ressonância a ~0,96 [rad/s], o estágio final de velocidade a reduz a frequência do pico a uma frequência de ~0,84 [rad/s].

O deslocamento volumétrico influencia os picos de ressonância acontecerem à baixas frequências de ondas. Somado a este fator, a velocidade de avanço se comporta como um agente contribuinte a esta redução. Não obstante destas afirmações, o aumento do centro de gravidade vertical age como outro agente contribuinte. A soma desses três fatores forma um conjunto de elos que poderia propiciar abalroamento na condição ressonância. Considerando os fatores de baixa estabilidade estática e dinâmica, observa-se o emborcamento como uma possibilidade.

Figura 33: Restrições para o OAR n4 desacoplado em calado 1,445 [m], variação de centro de gravidade vertical e velocidade de avanço. (a) Funções de transferência para o calado 1,445 [m] com CGV = 1,33 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; quadrado vermelho = Sem vel. de avanço, triângulo verde = Fn 0,2, xis roxo = Fn 0,4. (b) Funções de transferência para o calado 1,445 [m] com CGV 2,66 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; círculo laranja = Sem vel. de avanço, mais azul escuro = Fn 0,2, menos vinho = Fn 0,4. (c) Funções de transferência para o calado 1,445 [m] com CGV 4 [m] e variação de velocidade [Fn b - Fn c]; quadrado roxo = Sem vel. de avanço, quadrado verde-água = Fn 0,2, triângulo laranja escuro = Fn 0,4.



Fonte: Autor.

A Tabela 23, para a quarta fase do estudo dos OARs, muda em relação às análises anteriores. A intenção desta fase é avaliar em mar de través, o comportamento da embarcação em diferentes velocidades de avanço, em três condições de deslocamento volumétrico, sendo cada cenário de variação de volume deslocado e tendo a variação de três CGVs.

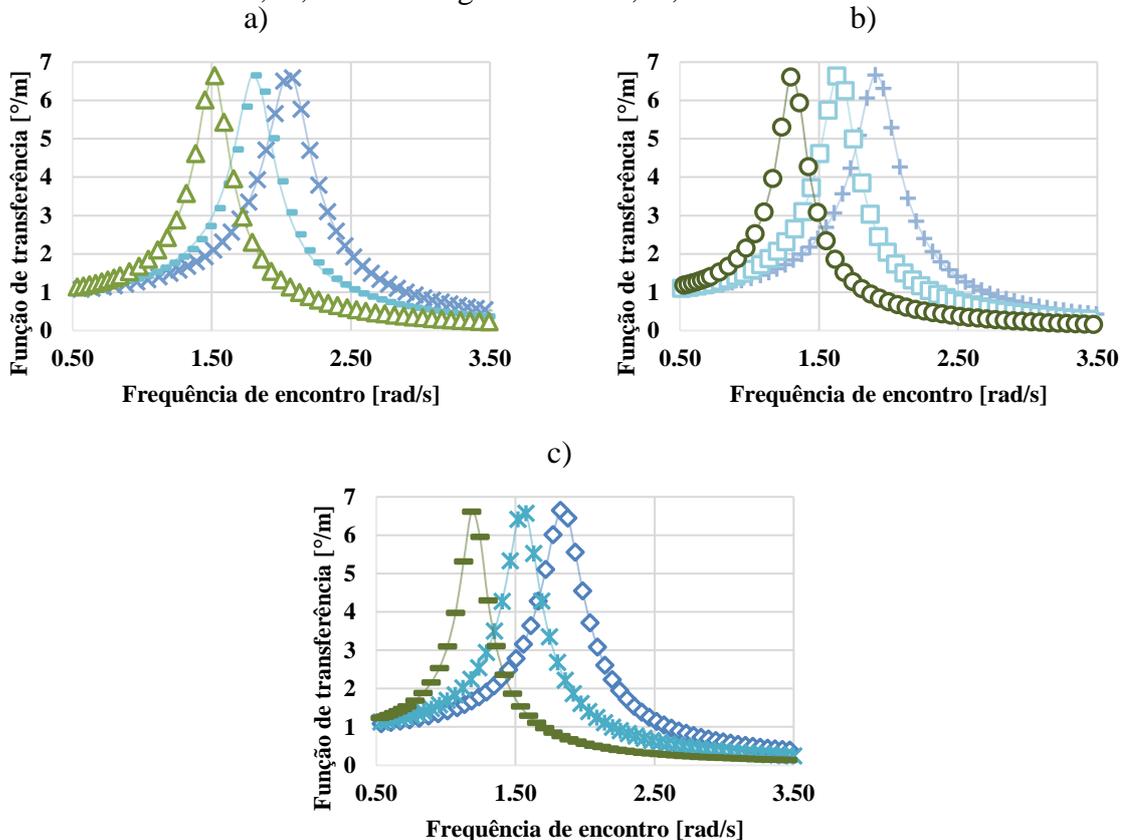
Tabela 23: Restrições para o OAR n4 desacoplado em velocidade de avanço Fn n em mar de través e variação de deslocamento volumétrico e centros de gravidade verticais.

Figura	34-(a)			34-(b)			34-(c)		
GdL	Qualquer velocidade de avanço – Fn n								
η4	90° (Mar de través)								
	Calado 1 [m]			Calado 1,309 [m]			Calado 1,445 [m]		
	CGV - 1,33 [m]	CGV - 2,66 [m]	CGV - 4 [m]	CGV - 1,33 [m]	CGV - 2,66 [m]	CGV - 4 [m]	CGV - 1,33 [m]	CGV - 2,66 [m]	CGV - 4 [m]
Símbolo	x	-	Δ	+	□	o	◇	x	-

Fonte: Autor.

A Figura 34 mostra as influências de restrições da Tabela 23, para a alteração dos calados e os CGVs. Figura 33 - (a): o baixo Calado 1 [m], tem um pico de ressonância a um baixo CGV 1,33 [m] de ~ 2 [rad/s], o aumento do CGV para 2,66 [m] reduz a frequência do pico de ressonância a $\sim 1,8$ [rad/s], o estágio final de análise com CGV em 4 [m] reduz a frequência do pico a uma frequência de $\sim 1,5$ [rad/s]. Figura 33 - (b): o médio calado 1,309 [m] tem um pico de ressonância a um baixo CGV 1,33 [m] de $\sim 1,9$ [rad/s], o aumento do CGV para 2,66 [m] reduz a frequência do pico de ressonância a $\sim 1,6$ [rad/s], o estágio final de análise com CGV em 4 [m] reduz a frequência do pico a uma frequência de $\sim 1,3$ [rad/s]. Figura 33 - (c): o calado de 1,445 [m] tem um pico de ressonância a um baixo CGV de 1,33 [m] de $\sim 1,8$ [rad/s], o aumento do CGV para 2,66 [m] reduz a frequência do pico de ressonância a $\sim 1,6$ [rad/s], o estágio final com o CGV em 4 [m] reduz a frequência do pico a uma frequência de $\sim 1,2$ [rad/s].

Figura 34: Restrições para o OAR n4 desacoplado em velocidade de avanço F_n n em mar de través e variação de Calado e CGVs. (a) Funções de transferência para o calado 1 [m] com variação de CGV [1,33 - 4]; xis azul = CGV 1,33, menos verde-água = CGV 2,66, triângulo verde = CGV 4. (b) Funções de transferência para o Calado de 1,309 com variação de CGV [1,33 - 4]; mais azul = CGV 1,33, quadrados verde-água = CGV 2,66, círculo verde-limão = CGV 4. (c) Funções de transferência para o Calado 4 [m] com variação de CGV [1,33 - 4]; quadrado azul = CGV 1,33, xis verde-água = CGV 2,66, menos verde = CGV 4.



Fonte: Autor.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho visou o estudo da estabilidade e a dinâmica de uma embarcação regional submetida a diferentes condições de carregamento. A seguir, são descritas as principais conclusões dos tópicos de estudo abordados.

- Análise de estabilidade intacta estática e dinâmica em águas calmas:

Os resultados em águas calmas demonstram que em relação à estabilidade estática, os critérios mínimos para todas as restrições são atendidos. Contudo, em relação à estabilidade dinâmica, os critérios mínimos não são obedecidos em três restrições: i) Calado 1,309 e CGV 4 [m]; ii) Calado 1,445 e CGV 2,66 [m]; e iii) Calado 1,445 e CGV 4 [m].

Os resultados em águas calmas evidenciam que, para ondas senoidais com cristas de ondas à meia-nau, conforme teoria, os mesmos valores reprovados, i, ii e iii, em águas calmas podem falhar, ressalvado um pequeno aumento nesses valores para vales de ondas à meia-nau, calados acima de 1,309 [m] reduzem significativamente os GZs máximos positivos. Outro fator a salientar é o fato de CGVs acima de 2,66 [m] serem componentes elementais para a grande perda de valores máximos de GZs.

- Análise de estabilidade intacta estática e dinâmica em águas com ondas senoidais:

Conforme proposto em teoria e representado na Figura 24, os valores obtidos para estabilidade dinâmica considerando ondas senoidais de comprimentos $\lambda \approx L_{oa}$ e $\lambda \approx L_{oa}/2$ e amplitude de 0,5 [m], os casos de crista e vale à meia-nau ainda estão em margem de reprovação. Contudo, os critérios mínimos falham na estabilidade estática para diferença de fase de $\pi/2$ com vale à meia-nau no calado 1,445 e CGV 4 [m].

- Análise dos operadores de amplitude de respostas:

As funções de transferência em relação às frequências de ondas demonstram influência dos deslocamentos volumétricos, centros de gravidade e velocidades de avanço nas respostas da embarcação. As funções de transferência em relação aos ângulos de encontro para mares de través demonstram sofrer influências do deslocamento volumétrico e mudanças dos centros de gravidade. Não se observou influência das velocidades de avanço das funções em relação às frequências de encontro tanto para 90° tanto quanto para $90^\circ \pm \Omega^\circ$ de ângulo de encontro, sendo Ω° todo ângulo no intervalo de $0^\circ \leq \Omega^\circ \leq 180^\circ$. Foi verificado que a variação do centro de gravidade vertical da embarcação muda a condição de onda na qual pode ocorrer o máximo deslocamento angular.

REFERÊNCIAS

AM, G. **Justiça condena responsáveis por naufrágio que matou 16 no AM**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2016/05/justica-condena-responsaveis-por-naufragio-que-matou-16-no-am.html>>. Acesso em: 6 set. 2022.

AMAPÁ, G. D. E. D. **Polícia Civil indicia 6 pessoas por naufrágio do Anna Karoline III**. Disponível em: <<https://www.portal.ap.gov.br/noticia/2705/policia-civil-indicia-6-pessoas-por-naufragio-do-anna-karoline-iii>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

AMAZÔNICO, F. **Naufrágio do Comandante Sales que matou 48 pessoas em Manacapuru é lembrando por moradores. Fato Amazônico**, 5 maio 2014. Disponível em: <<https://fatoamazonico.com.br/naufragio-do-comandante-sales-que-matou-48-pessoas-em-manacapuru-e-lembrando-por-moradores/>>. Acesso em: 6 set. 2022

BARRASS, B.; DERRETT, D. R. **Ship Stability for Masters and Mates**. [s.l: s.n.].

BARRETO, B. **A Importância da Inspeção Naval Para a Prevenção de Acidentes no Mar**. , 2019.

BELENKY, V.; BASSLER, C. C.; SPYROU, K. J. **Second Generation Intact Stability Criteria**. , 2011.

BELENKY, VADIM; SEVASTIANOV, NIKITA B. **Stability and Safety of Ships - Risk of Capsizing**. . Acesso em: 15 nov. 2022.

BNDES. **Informe Infra-Estrutura**. , 1998. Disponível em: <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/15265/3/Informe%20infra-estrutura%20-%20n.22%20maio%201998.PDF>>

BUČA, M. P.; IVO, S. **Nonlinear Ship Rolling and Capsizing**. 2006.

CAPITANIA DOS PORTOS. **Rios da Amazônia desafiam autoridades e já somam 142 naufrágios desde 2017**. Disponível em: <<https://noticias.uol.com.br/meio-ambiente/ultimas-noticias/redacao/2020/03/07/rios-da-amazonia-desafiam-autoridades-e-ja-somam-142-naufragios-desde-2017.htm>>. Acesso em: 20 set. 2022.

CHAI, W. **Stochastic dynamic analysis and reliability evaluation of the roll motion for ships in random seas**. [s.l: s.n.].

DE ABREU, G. M. **Responsabilidades do Brasil no atlântico sul: O serviço de busca e salvamento**. p. 4, 2011.

DE CASTRO, R. **Apostila de Vibrações Mecânicas**. , 2018. Disponível em: <https://www.puc-rio.br/ensinopesq/ccpg/pibic/relatorio_resumo2018/relatorios_pdf/ctc/MEC/MEC-Ricardo%20de%20Castro.pdf>

DNIT. **A Hidrovia dos rios Solimões e Amazonas. ÁGUA, VIDA & CIA - Fernando José de Sousa**, 24 maio 2018. Disponível em: <<https://ferdinandodesousa.com/2018/05/24/a-hidrovia-dos-rios-solimoes-e-amazonas/>>. Acesso em: 24 abr. 2023

DNIT. **HN - 100 Hidrovia do Amazonas**. Disponível em: <<https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/aquaviario/old/hidrovia-do-amazonas>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

ELSON DE AZEVEDO BURITY. **O naufrágio do barco a motor Princesa Amanda e os desdobramentos no poder judiciário**. , 2000.

ESTADÃO. **Tripulantes estavam bêbados na hora do acidente, dizem sobreviventes**. Disponível em: <<https://brasil.estadao.com.br/noticias/geral,tripulantes-estavam-bebados-na-hora-do-acidentes-dizem-sobreviventes,20021218p21953>>. Acesso em: 16 out. 2022.

FIGUEIREDO, F. **Anna Karoline 3: um ano após naufrágio que matou 40 no AP, culpados ainda não foram punidos**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2021/02/28/anna-karoline-3-um-ano-apos-naufragio-que-matou-42-no-ap-culpados-ainda-nao-foram-punidos.ghtml>>. Acesso em: 20 set. 2022.

FONTES, J. V. H. et al. Marine Accidents in the Brazilian Amazon: The Problems and Challenges in the Initiatives for Their Prevention Focused on Passenger Ships. **Sustainability**, v. 15, n. 1, p. 328, jan. 2023.

G1 AMAZONAS. **Embarcação é flagrada com excesso de passageiros a caminho de praia em Manaus**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2020/08/16/embarcacao-e-flagrada-com-excesso-de-passageiros-a-caminho-de-praia-em-manaus.ghtml>>. Acesso em: 24 abr. 2023.

GOMES, C. R. C. **Arquitetura Naval Para Oficiais de Náutica**. [s.l.: s.n.].

GUIMBERTEAU, M. et al. Future changes in precipitation and impacts on extreme streamflow over Amazonian sub-basins. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, p. 014035, 1 mar. 2013.

HO, K. Y. et al. **Projeto de Embarcações Para o Transporte Interior de Passageiros e Cargas - Metodologia e Critérios**. , 1989. Disponível em: <<https://sigaa.ufpa.br/sigaa/public/docente/producao.jsf?siape=1644906>>

JÉZÉQUEL, C. et al. Geomorphological diversity of rivers in the Amazon Basin. **Geomorphology**, v. 400, p. 108078, 1 mar. 2022.

JOURNÉE, J. M. J.; MASSIE, W. W. **Offshore Hydromechanics**. 1. ed. [s.l.: s.n.].

L7273. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1980-1988/l7273.htm>. Acesso em: 21 nov. 2022.

L8617. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l8617.htm>. Acesso em: 22 nov. 2022.

L9537. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9537.htm>. Acesso em: 20 nov. 2022.

LEBRE, E. A. T.; ULYSSÉA, M. A.; SELAU, C. B. **A Estrutura Brasileira de Busca e Salvamento (SAR)**. , 2011. Disponível em: <<http://www.aquaseg.ufsc.br/files/2011/06/A-estrutura-brasileira-do-Servi%C3%A7o-de-Busca-e-Salvamento.pdf>>

LEWIS, EDWAR V. **Principles of Naval Architecture - Motions in Waves and Controllability**. [s.l: s.n.].

LEWIS, EDWAR V. **Principles of Naval Architecture - Stability and Strength**. [s.l: s.n.].

LEWIS, EDWAR V. **Principles of Naval Architecture - Resistance, propulsion and vibration**. [s.l: s.n.].

LIMA, I. **Novo Amapá: Saiba a história do maior naufrágio do Amapá**. Disponível em: <<https://portalamazonia.com/estados/amapa/novo-amapa-recorde-o-maior-naufragio-do-amapa-40-anos-depois>>. Acesso em: 5 set. 2022a.

LIMA, I. **Sobral Santos II; Relembra a maior tragédia fluvial da Amazônia**. Disponível em: <<https://portalamazonia.com/estados/para/sobral-santos-ii-relembra-a-maior-tragedia-fluvial-da-amazonia>>. Acesso em: 5 set. 2022b.

LOUREIRO, E. S. P. **Análise da Eficiência Energética e Modicidade do Transporte Hidroviário de Passageiros na Amazônia: Uma Abordagem Via Análise Envoltória de Dados**. 2021.

LUSA. **Pelo menos 15 mortos em naufrágio num rio da Amazônia**. Disponível em: <https://www.rtp.pt/noticias/mundo/pelo-menos-15-mortos-em-naufragio-num-rio-da-amazonia_n100282>. Acesso em: 20 set. 2022.

MARINHA DO BRASIL. **Estatística SAR - 2019**. , 2020. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/salvamarbrasil/sites/www.marinha.mil.br.salvamarbrasil/files/Estatistica/estatistica_sar_2019_grafico.pdf>

MARINHA DO BRASIL. **NORMAM-09/DPC**. , 2021a.

MARINHA DO BRASIL. **Estatística SAR - 2020**. , 2021b. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/salvamarbrasil/sites/www.marinha.mil.br.salvamarbrasil/files/Estatistica/estatistica_sar_2020_grafico.pdf>

MARINHA DO BRASIL. **Salvamar Brasil**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/salvamarbrasil/content/historico>>. Acesso em: 21 abr. 2023a.

MARINHA DO BRASIL. **Estatística SAR - 2021**. , 2022b. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/salvamarbrasil/sites/www.marinha.mil.br.salvamarbrasil/files/Estatistica/estatistica_sar.pdf>

MARINHA DO BRASIL. **NORMAM-02/DPC**. , 2022c.

MARINHA DO BRASIL. **Você sabe o que é um Distrito Naval (DN)? | Serviço de Seleção do Pessoal da Marinha**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/sspm/?q=noticias/voc%C3%AA-sabe-o-que-%C3%A9-um-distrito-naval-dn>>. Acesso em: 20 nov. 2022a.

MARINHA DO BRASIL. **Histórico | Salvamar Brasil**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/salvamarbrasil/content/historico>>. Acesso em: 23 nov. 2022b.

- MARINHA DO BRASIL. **Estrutura SAR | Salvamar Brasil**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/salvamarbrasil/Estrutura/estrutura-sar>>. Acesso em: 21 nov. 2022c.
- MARQUES, J.; INDRIUNAS, L. **Acidente: Naufrágio mata 4 e deixa 50 desaparecidos**. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff12029916.htm>>. Acesso em: 5 set. 2022.
- MARTINI, P. R.; DUARTE, V.; ARAI, E. Metodologia de medição das extensões do rios Amazonas e Nilo utilizando imagens modis e Geocover. 2008.
- MENDONÇA, R. **A Tragédia do Freire II. Blog do Coronel Roberto**, 1 out. 2010. Disponível em: <<http://catadordepapeis.blogspot.com/2010/10/tragedia-do-freire-ii.html>>. Acesso em: 5 set. 2022
- MISTREE, F. et al. Decision-Based Design: A Contemporary Paradigm for Ship Design. v. 98, p. 565–597, 1990.
- OGATA, K. **Moder Control Engineering**. 5. ed. [s.l: s.n.].
- OLIVEIRA, T. V. E C. **Transporte de cargas por navegação na Amazônia aumenta 235% em dez anos**. Disponível em: <<https://www.oliberal.com/liberalamazonant/transporte-de-cargas-por-navegacao-na-amazonia-aumenta-235-em-dez-anos-1.397045>>. Acesso em: 15 nov. 2022.
- PARENTE, Y.; SZLAFSZTEIN, C. Analysis of the level of municipal exposure to technological hazards in the Amazon region of Brazil. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 70, p. 102782, 5 jan. 2022.
- PEREZ, T.; BLANKE, M. Ship roll motion control. **Proc. CAMS 2010**, p. 1–12, 1 jan. 2010.
- RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. [s.l: s.n.].
- ROCHA, V. M. et al. Impacts of land cover and greenhousegas (GHG) concentration changes on the hydrological cycle in Amazon basin a regional climate model study. 2015.
- SALVESEN, N.; TUCK, E. O.; FALTINSEN, O. Ship Motions and Sea Loads. 1970.
- SILVA, J. S. Altimetria espaciais em zonas úmidas da bacia Amazônica – Aplicações hidrológicas. 2010.
- SOARES, F. J. A.; FILHO, W. DE B. V. Caracterização Dinâmica de Embarcações Regionais do Amazonas. **UNOPAR Científica Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 13, n. 1, 2014.
- VASCONCELOS, L. **São 40 os mortos no naufrágio do barco Luiz XV**. Disponível em: <<https://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2002-12-21/sao-40-os-mortos-no-naufragio-do-barco-luiz-xv>>. Acesso em: 16 out. 2022.
- ZAPPES, C. A. et al. Accidents between artisanal fisheries and cetaceans on the Brazilian coast and Central Amazon: Proposals for integrated management. **Ocean & Coastal Management**, v. 85, p. 46–57, 1 dez. 2013.

APÊNDICE A - Revisão de acidentes na região amazônica

Devido a importância da floresta amazônica e seus rios para locomoção e abastecimento de cargas (LOUREIRO, 2021), além de explorações e pesquisas, as informações apresentadas aqui são voltadas às consequências de naufrágios.

O entendimento do comportamento de uma embarcação regional amazônica é crucial pois assim, é possível conhecer a obediência de critérios estabelecidos pelas normas brasileiras. Em estudos experimentais desenvolvidos por Soares e Filho (2014), observou-se que os critérios de estabilidade atendidos são mínimos para as embarcações amazônicas, o que condiciona a mínima segurança para a navegação.

Não obstante, inúmeras embarcações navegam em condições perigosas. Somente em 1998, estimou-se que havia 100 mil embarcações transportando passageiros na Amazônia (BNDES, 1998). No entanto, com o avanço de desenvolvimento do setor naval, novos problemas surgiram em proporções paralelas.

Um fator agravante que representa um elo significativo para a segurança da navegação é a fiscalização, pois havendo fiscalizações mais rígidas nos portos antes das embarcações zarparem, ao olhar de agentes rigorosos, seria percebido o desatendimento de critérios de segurança, como o excesso de carga e/ou passageiros e sua má distribuição de carga.

É urgente, mesmo atualmente, que sejam implementadas medidas efetivas para garantir a segurança na navegação fluvial, incluindo ações de fiscalização, investimentos em infraestrutura; assim como a conscientização dos proprietários de embarcações sobre a importância de respeitar as normas de segurança.

A conduta de agentes de órgãos fiscalizadores também é um fator importante para a navegação segura, pois é um vetor que pode interromper irregularidades normativas. A omissão ou má conduta dos tripulantes pode gerar consequências em diversas escalas. De forma paralela, a perícia dos comandantes pode ser fator decisivo na navegação para influenciar a segurança da navegação, onde a responsabilidade ou a falta dela pode culminar em fatos ou acidentes de navegação.

Fiscalizações pouco rígidas cooperam para o aumento de acidentes, já que rápidas fiscalizações identificariam irregularidades. Exemplifica-se, de forma qualitativa, o excesso de passageiros e conseqüentemente de carga na embarcação mostrada na Figura 35.

Figura 35: Flagrante de excesso de passageiros.

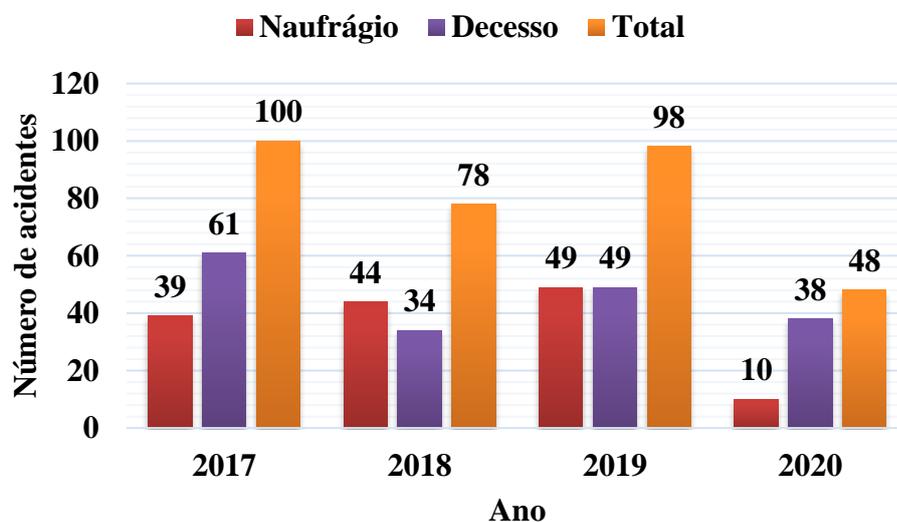


Fonte: Adaptado de G1 Amazonas (2020).

Devido aos 25 mil [km] de hidrovias navegáveis, atingir uma fiscalização completa de todas as embarcações regionais é uma tarefa extremamente complexa (DNIT, 2018). Cabe ressaltar que grande parte dos dados estatísticos existentes se baseiam no levantamento de informações das Capitânicas dos Portos da Amazônia, que tentam realizar fiscalizações hidroviárias. Considerando que a navegação na Amazônia é o principal meio de locomoção intermunicipal, a navegação pode ser realizada por vários dias em áreas sem cobertura de sinal, onde a ausência de um posto de contato seguro pode propiciar riscos de segurança à navegação.

Conforme exposição estatística na Figura 36, de 2017 a 2020, houve um total 142 naufrágios e 182 decessos; esses números transparecem a necessidade de estudos que contribuam na redução do alarmante número de incidentes na região Amazônica (CAPITANIA DOS PORTOS, 2020).

Figura 36: Relação estatística anual de Naufrágios e Decessos.



Fonte: Dados adaptados de Marinha do Brasil (2020).

Procedimentos protocolares de investigação são adotados em todos os casos de naufrágios. Contudo, há elos que se mostram muito claros em situações de naufrágios, alguns fatores podem ser possíveis contribuintes para desastres, cita-se então:

- I. **Condições climáticas adversas** - A Amazônia experimenta condições climáticas extremas, como tempestades que podem prejudicar a navegação;
- II. **Falhas mecânicas** - As embarcações de carga e passageiros podem sofrer falhas mecânicas, como problemas no motor, que podem levar ao naufrágio, a falta de manutenção adequada pode levar a fadiga estrutural;
- III. **Sobrecarga** - Sobrecarrega instabiliza e propicia embarcações emborcamento;
- IV. **Falta de treinamento** - A tripulação pode não ter o treinamento adequado para lidar com emergências, o que pode levar ao naufrágio; e
- V. **Falta de fiscalização** - A fiscalização inadequada das autoridades permite condições precárias ou inseguras nas operações navais, aumentando o risco de acidentes.

Alguns registros de naufrágios na região Amazônica que são marcos⁹ na navegação fluvial não apenas pelo impacto social, mas ambiental e econômico, são expostos na Tabela 24.

Tabela 24: Dados dos naufrágios mais significativos entre 1975 e 2020.

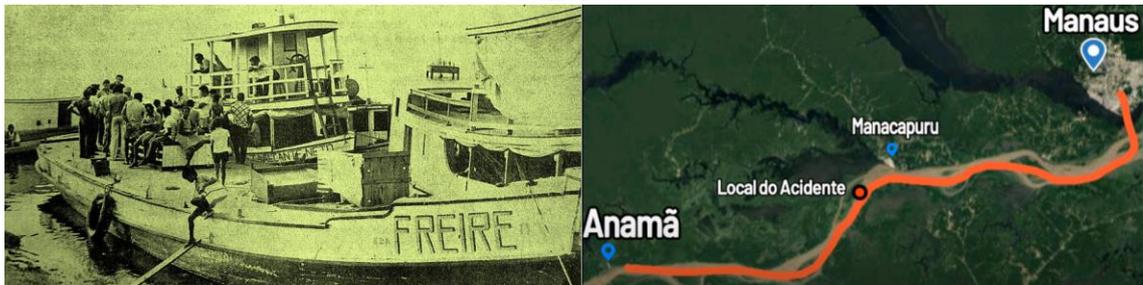
Embarcação	Ano do Acidente	Local do acidente	Decessos	Fonte
Freire II	1975	Ilha do Marrecão, Amazonas	58	(MENDONÇA, 2010)
Novo Amapá	1981	Rio Cajari, Almeirim, Pará	400	(LIMA, 2021a)
Sobral Santos II	1981	Óbitos, Pará	340	(LIMA, 2021b)
Ana Maria VIII	1999	Manicoré, Amazonas	61	(MARQUES; INDRIUNAS, 1999)
Princesa Amanda	2000	Praia da Maria Antônia, Iranduba, Amazonas	19	(ELSON DE AZEVEDO BURITY, 2000)
Luiz XV	2002	Rio Pará	40	(VASCONCELOS, 2002)
Princesa Laura	2004	Comunidade de Santa Maria, no Rio Negro	15	(LUSA, 2004)
Comandante Sales	2008	Rio Solimões, em Manacapuru, Amazonas	48	(AMAZÔNICO, 2014)
Almirante Monteiro	2008	Itacoatiara, Amazonas	16	(AM, 2016)
Anna Karoline III	2020	Entre os rios Amazonas e Jari, na divisa do Amapá com o Pará	42	(FIGUEIREDO, 2021)

Fonte: Autor.

⁹ **Marco** – Qualquer ação ou acontecimento que, por sua importância, caracteriza um período na história individual ou coletiva, simbolizando um evento ou conjunto de eventos importantes para o aperfeiçoamento de diretrizes.

- I. **Freire II** (Tabela 24) - O naufrágio do Freire II em 1975 aconteceu no Rio Solimões, próximo à ilha do Marrecão, resultando no decesso de 58 pessoas (Figura 37). Dados indicam que após a embarcação passar por um banco de areia, toda a superestrutura se desmembrou, restando apenas o convés principal. Esse fato demonstrou a fragilidade da resistência estrutural das embarcações regionais. Esse naufrágio destaca a necessidade de investimento em segurança marítima e em melhores condições de infraestrutura para as embarcações que operam na região. O evento evidencia a importância de se realizar manutenções preventivas e inspeções regulares nas embarcações para garantir sua segurança e a proteção da vida humana, especialmente em áreas com características geográficas e climáticas desafiadoras.

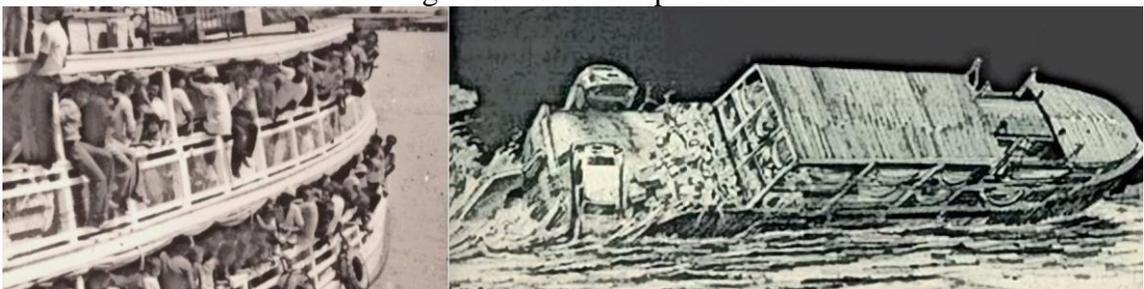
Figura 37: Superestrutura da embarcação Freire II destruída à esquerda e local do acidente à direita.



Fonte: Adaptado de Mendonça (2010).

- II. **Novo Amapá** (Tabela 24) - O naufrágio do Novo Amapá em 1981, no Estado do Amapá, tornou-se conhecido internacionalmente devido ao seu grau de perda de vidas humanas (Figura 38). Registros históricos indicam que a embarcação tinha capacidade máxima para transportar 150 pessoas e $\frac{1}{2}$ [ton] de carga. Porém transportava cerca de 600 pessoas e 1 [ton] de carga, o que comprometeu sua estabilidade e o tornou mais suscetível a acidentes através das perdas de reserva de flutuabilidade e capacidade de estabilidade sob condições de forças externas e internas, resultando em mais de 400 decessos.

Figura 38: Embarcação Novo Amapá superlotada à esquerda, representação artística do naufrágio do Novo Amapá à direita.



Fonte: Adaptado de Lima (2021a).

III. **Sobral Santos II** (Tabela 24) - O naufrágio do Sobral Santos II em 1981 é um dos eventos de divisão na navegação fluvial amazônica (Figura 39). Dados oficiais indicam 530 passageiros e 200 [ton] de carga, constando nos registros de tripulantes apenas 430 nomes; estimam-se oficialmente 340 decessos. O acidente ocorreu por causa de falhas no sistema de atracamento. Devido à concentração de passageiros a um dos bordos a embarcação, ela começou a adernar. Em pânico, os passageiros se deslocaram em grande massa para a saída, deslocando ainda mais o centro de gravidade (CG) e tornando a embarcação mais suscetível ao emborcamento. Após um certo ângulo de adernamento, cargas se desprenderam do convés e esmagaram passageiros. Este acidente demonstrou a precariedade nos sistemas de amarração e a sua importância; além de mais uma vez terem sido registrados acidentes com fatores determinantes sobre a perda de estabilidade frente ao deslocamento do CG. A superlotação de embarcações é um fator recorrente nos naufrágios ocorridos na região, demonstrando a falta de fiscalização e a busca pelo lucro acima da segurança dos passageiros.

Figura 39: Embarcação Sobral Santos II.



Fonte: Adaptado de Lima (2021b).

IV. **Ana Maria VIII** (Tabela 24) - O naufrágio da embarcação Ana Maria VIII em 1999 resultou em 61 decessos (Figura 40). A perícia constatou que a embarcação estava em condição de sobrecarga e superlotada de passageiros no momento do acidente, com mais de 93 [ton] de cargas e 192 passageiros a bordo, enquanto sua capacidade máxima de passageiros era de 150. A causa do acidente foi o fato da embarcação ter entrado em um “rebojo” (i.e., um redemoinho causado pela sinuosidade do rio), que fez com que a embarcação adernasse além da sua capacidade de restauração. O excesso de carga comprometeu a capacidade de estabilidade da embarcação, o que impossibilitou a sua recuperação durante o acidente.

Figura 40: Embarcação Ana Maria VIII.



Fonte: Adaptado de Marques e Indriunas (1999).

- V. **Princesa Amanda** (Tabela 24) - O naufrágio da embarcação Princesa Amanda em 2000 no Rio Solimões (Figura 41) levou a decesso 19 pessoas por afogamento. A embarcação transportava 82 passageiros e 42 [ton] de carga. Investigações apontaram que a capacidade máxima para navegação segura era de 40 [ton] e 70 passageiros, o que significa que estava em desacordo com os critérios de segurança. Após investigação, constatou-se que o material de salvatagem era inadequado para o número de passageiros e tripulantes. A análise da tragédia revelou uma série de violações às normas de segurança. Destaca-se que a embarcação não possuía documentos emitidos pela Capitania dos Portos que comprovassem vistorias para a emissão do Certificado de Segurança da Navegação (CSN) e de arqueação. A tragédia envolvendo a embarcação Princesa Amanda também destaca a importância do treinamento adequado da tripulação. Em emergências, é essencial que a tripulação esteja preparada para lidar com a situação e ajudar os passageiros a evacuar a embarcação com segurança.

Figura 41: Embarcação Princesa Amanda.



Fonte: Adaptado de Burity (2000).

- VI. **Luiz XV** (Tabela 24) - O naufrágio da embarcação Luiz VX aconteceu no ano 2002, no Rio Pará, em Barcarena. A capacidade de passageiros era 140 passageiros, entretanto navegava com mais de 300 passageiros (ESTADÃO, 2002; VASCONCELOS, 2002, p. 40). Mesmo superlotada, relatos indicam que a tripulação ainda adicionou a bordo mais 0,6 [ton] de milho. Além disso, existem alguns registros processuais de que mais 70 passageiros subiram a bordo nos portos de Monte Alegre, Oriximiná e Gurupá.
- VII. **Princesa Laura** (Tabela 24 - O naufrágio levando a decesso ao menos 15 pessoas (LUSA, 2004) da embarcação Princesa Laura em 2004 ocorreu devido a fatores climatológicos extremos, um forte vento de través emborcou a embarcação, a Princesa Laura não navegava com excesso de carga e/ou passageiros, contudo, devido ao momento provocado pelo vento de través, a mesma não teve capacidade de resistir ao momento emborcadador.
- VIII. **Comandante Sales** (Tabela 20) - O naufrágio da embarcação Comandante Sales em 2008 no Rio Solimões (Figura 42) levou a decesso 48 pessoas. A insuficiência de equipamentos de salvatagem e alterações estruturais realizadas sem o acompanhamento de um responsável técnico habilitado.

Figura 42: Embarcação Comandante Sales naufragado.



Fonte: Adaptado de Amazônico (2014).

- IX. **Almirante Monteiro** (Tabela 24) - O naufrágio da embarcação Almirante Monteiro (Figura 43), em 2008, foi o resultado do abalroamento com a balsa de carga Carlos Eduardo, levando a decesso 16 pessoas. A embarcação tinha lotação de 90 pessoas, a capacidade da embarcação era de 165 pessoas. O Ministério Público inferiu que havia transporte de carga e passageiros juntos, o que viola os critérios de segurança, destacando falha de vistoria.

Figura 43: Embarcação Almirante Monteiro naufragado.



Fonte: Adaptado de G1 Am (2016).

- X. **Ana Karoline III** (Tabela 24) - Na investigação do naufrágio da embarcação Anna Karolinne III em 2020 (Figura 44), segundo a Polícia Civil do Amapá (2020), indícios indicam o excesso de carga de 70% da capacidade de carga foi determinante. Dados informam que a embarcação transportava 170 [ton] de carga. Quem conduzia a embarcação no momento do abastecimento era um tripulante e não o comandante do Anna Karoline III. Conforme o inquérito, não houve excesso de passageiros, somente de carga, pois a embarcação transportava 93 passageiros.

Figura 44: Embarcação N/M Anna Karoline III.



Fonte: Adaptado de Figueiredo (2021).

De acordo com as investigações da Polícia Civil do Amapá (2020), elas indicam não haver pontualmente um fator agravante que culminou no naufrágio, mas uma série consecutiva de fatores que foram determinantes, dentre eles, cita-se:

- i. A rota navegada não era autorizada pela capitania dos portos;
- ii. Documento despachado pelo porto sobre a carga embarcada foi falseado;
- iii. A fiscalização não passou mais de 5 minutos a bordo;
- iv. A embarcação fez um abastecimento irregular no meio da rota;
- v. As condições climáticas foram desfavoráveis para manobras.

APÊNDICE B - Procedimento de análise usando software

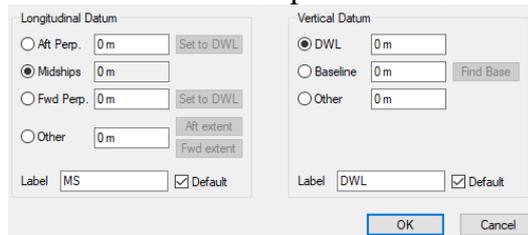
I. AutoCAD

Desenvolvimento livre do casco a partir dos estudos de características regionais. Após o modelo ser definido o modelo foi utilizado como base para a criação do conceito de modelo em 3D.

II. Maxsurf Modeler

A primeira etapa é importar o modelo IGES para fazer os ajustes do modelo no Modeler. O modelo deve receber ajustes dos valores das perpendiculares de vante e ré através da ferramenta “Data” → “Frame of reference” para a introdução dos valores das perpendiculares, meia-nau, linha de base e de linha d’água.

Figura 45: Quadro de referências ao ponto zero da embarcação.



Fonte: Autor.

Após os ajustes de referências, o modelo está pronto para ser exportado para análises de estabilidade intacta e o estudo dos seus movimentos em condições de estudos, o modelo deve ser salvo no formato Modeler Design Files (.msd) para leitura tanto no Maxsurf Stability quanto no Maxsurf motions.

III. MaxSurf Stability

O arquivo de entrada para importação no Maxsurf Stability em formato (.msd), deve introduzir as restrições de carregamento e distribuição de centros de gravidade, na configuração de “Loadcase”.

Figura 46: Tabela de configuração de carga e distribuição de centros de gravidade.

	Item Name	Quantity	Unit Mass tonne	Total Mass tonne	Unit Volume m³	Total Volume m³	Long. Arm m	Trans. Arm m	Vert. Arm m	Total FSM tonne.m	FSM Type
1	Lightship	1	1234,000	1234,000			1,000	2,000	3,000	4,000	User Specific
2	Total Loadcase			1234,000	0,000	0,000	1,000	2,000	3,000	4,000	
3	FS correction								0,003		
4	VCG fluid								3,003		

Fonte: Autor.

As restrições de análise de calados são introduzidas à parte, para a análise em “Loadcase”, em águas calmas ou em ondas senoidais.

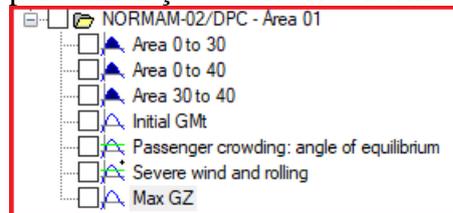
Figura 47: Tabela de restrições de incremento de calado, com CGL e CGV pré-estabelecidos.

Draft Range	
Initial draft amidships	0 m
Final draft amidships	2 m
Draft increment	0,02 m
Number of drafts	100
LCG from zero point	14,277 m
VCG from zero point	2 m
<input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/>	

Fonte: Autor.

Antes de analisar a simulação, os critérios normativos NORMAM-02 devem ser ativados na aba “criteria” no menu principal.

Figura 48: Seleção para simulação de critérios normativos NORMAM-02.



Fonte: Autor.

Análise das curvas GZ deve ser selecionada no menu principal como “large angle Stability”.

Figura 49: Menu de seleção de análise de simulação.



Fonte: Autor.

IV. Maxsurf Motions

Com a leitura do arquivo (.msd) disponibilizado pelo Modeler, define-se os critérios de análise:

- I. Menu de Análise (Analysis):
 - i. Teoria das faixas (Strip Theory);

- ii. Adernamento: 0° a 60° de 5° em 5° ;
- iii. Calado e Trim: Calado conforme o caso de estudo e trim fixo;
- iv. Medidas do casco: 100 seções de mapeadas e 15 números máximo de mapeamento;
- v. Tipo de embarcação: Monocasco;
- vi. Distribuição de massa: Dependente do caso de estudo;
- vii. Fatores de amortecimento: Heave/Pitch = 0 e Roll = 0,075;
- viii. Ambiente: Densidade do fluido: 1 [ton/m³];
- ix. Número de frequência de avaliação de OARs: 100; e
- x. Método da teoria das faixas (Strip Theory): Termos Transom não considerados, resistência adicional pelo método de Salvesen e Força de ondas com direções de ondas arbitrárias.

Antes de iniciar os cálculos, coloca-se as restrições impostas ao estudo na aba “inputs” no menu principal, as restrições de tipos de ondas, ângulos de encontro e velocidades são introduzidas nesta aba, de modo que se pode definir:

- I. Localizações – Definição dos locais que se pretende avaliar as influências dos OARs;
- II. Velocidades – Velocidades a serem analisadas nos OARs;
- III. Direções de ondas – Influência das direções das ondas nos OARs, definidas nas restrições;
- IV. Espectros de ondas – Características de ondas a serem avaliadas nos OARs.