

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

HIAGO FRANCISCO ANDRADE MARINHO

**ESTUDO PRELIMINAR DA ESTABILIDADE TRANSVERSAL E DA DINÂMICA
DE UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL QUE NAUFRAGOU NA AMAZÔNIA**

MANAUS

2024

HIAGO FRANCISCO ANDRADE MARINHO

**ESTUDO PRELIMINAR DA ESTABILIDADE TRANSVERSAL E DA DINÂMICA
DE UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL QUE NAUFRAGOU NA AMAZÔNIA**

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

Orientador: Prof. Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes

MANAUS

2024

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.

M338ee Marinho, Hiago Francisco Andrade
Estudo preliminar da estabilidade transversal e da
dinâmica de uma embarcação regional que naufragou na
Amazônia. / Hiago Francisco Andrade Marinho. Manaus :
[s.n], 2024.
78 f.: color.; 30 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Naval - Universidade
do Estado do Amazonas, Manaus, 2024.

Inclui bibliografia

Orientador: Jassiel Vladimir Hernández Fontes

1. Acidentes de embarcações. 2. Amazônia. 3.
Engenharia Naval. 4. Estabilidade. 5. Movimento de
balanço. I. Jassiel Vladimir Hernández Fontes (Orient.).
II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Estudo
preliminar da estabilidade transversal e da dinâmica de uma
embarcação regional que naufragou na Amazônia.

HIAGO FRANCISCO ANDRADE MARINHO

**ESTUDO PRELIMINAR DA ESTABILIDADE TRANSVERSAL E DA DINÂMICA
DE UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL QUE NAUFRAGOU NA AMAZÔNIA**

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

Aprovado em: 16 de julho de 2024

BANCA EXAMINADORA:

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

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

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

MANAUS

2024

AGRADECIMENTOS

Para que este trabalho tenha sido realizado, várias pessoas contribuíram e apoiaram de maneira irrestrita. O ato de agradecê-las é o mínimo a se fazer para demonstrar a minha gratidão.

Primeiramente agradeço ao Pai Celestial, que sempre esteve comigo, iluminando a minha mente, abonando sabedoria, me entusiasmando e conduzindo a levar em minha vida os preceitos da honestidade, seguindo um caminho correto.

Agradeço a minha mãe, Francinete Andrade, por ser meu alicerce e por me apoiar durante todas as fases de minha vida. Agradecimento ao meu querido e amado pai, Pedro Marinho, por me orientar a seguir o caminho correto e por me dá forças para seguir em frente. Agradeço, a minha noiva, Katllen Alfaia, que esteve ao meu lado sempre que possível me acalmando e dando forças para o êxito deste trabalho. Agradeço meus irmãos, Thiago e Gabrielle, que sempre torceram pelo meu sucesso.

Aos meus avós maternos Arilza Andrade e Francisco Andrade, por conduzir e seguir os caminhos bons vida, me aconselhando e por todo amor doado à minha pessoa.

Gratidão ao corpo docente, a Coordenação e aos funcionários do Curso de Engenharia Naval, da Universidade do Estado do Amazonas – UEA, pela estrutura, convivência e aperfeiçoamento profissional e intelectual neste ciclo da minha vida.

Ao meu orientador Jassiel Vladimir Hernández Fontes, um agradecimento muito especial. A ele agradeço por todas as trocas de ideias e ensinamentos, pelas aulas ministradas, por todo tempo dedicado à minha pessoa, pela paciência e compreensão neste período.

Por fim não podia deixar de agradecer ao meu amigo Kleyphide Silva, que me concedeu apoio incondicional nesta jornada, assim como aos meus gestores e companheiros de trabalho Philippe Godoi e Felipe Arruda, que nos momentos de necessidade me concederam o tempo precioso para confecção deste trabalho.

A todas essas pessoas e instituições, e a todos que não citei diretamente, agradeço por todo o apoio a mim concedido.

Ao Grupo de Pesquisa do CNPq da Universidade do Estado do Amazonas, TNS – Tecnologias Navais e Sustentáveis, coordenado pelo professor Jassiel Fontes, no qual tive a oportunidade de participar como bolsista de iniciação científica do programa PAIC/FAPEAM (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas) no período 2022 – 2023.

Este trabalho foi apoiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil, CNPq, por meio do projeto intitulado “Identificação dos desafios para prevenir acidentes com embarcações de alta velocidade na região amazônica”, chamada CNPq-FNDCT-MCTI N° 14/2022 – Faixa A (Processo: 405529/2022-8). O autor agradece o suporte desse projeto para a aquisição e uso da licença acadêmica dos softwares *Orca3D*[®] V3 e *Ansys*[®] *Aqwa* 2024 R1 (licença *Ansys Academic Research*).

RESUMO

Diversos acidentes de embarcações têm acontecido ao longo dos anos na região amazônica, causando impactos ambientais, econômicos, e sociais negativos. Embora não existam detalhes das causas de todos os acidentes que acontecem na região, alguns naufrágios possuem relatos detalhados do que pode ter acontecido, sendo possível abrir tópicos de discussão baseados em evidências técnicas. O presente trabalho apresenta um estudo técnico preliminar de uma embarcação que sofreu naufrágio na região amazônica, analisando alguns fatores de estabilidade e movimentos com possível contribuição na ocorrência do acidente. A primeira fase do estudo apresenta a problemática de acidentes de embarcações regionais de carga e passageiros, descrevendo vários casos ocorridos na Amazônia brasileira. Subsequentemente, foi considerado um caso de estudo de naufrágio para realizar a análise técnica, cuja primeira etapa de estudo consistiu na geração de uma geometria tridimensional que assemelhasse o casco da embarcação. Logo, foi realizada uma análise de estabilidade transversal intacta, verificando os efeitos de diferentes calados e posições do centro de gravidade. Finalmente, foi selecionada uma condição de estabilidade crítica para avaliar o movimento de balanço da embarcação quando submetida à interação de ondas regulares com diferentes amplitudes de onda. Os resultados obtidos demonstraram que combinações inadequadas de calado e de distribuição de peso, podem reduzir a capacidade de restauração em condições de águas calmas. Nessa situação, algumas condições de ondas, mesmo como pouca amplitude, podem agravar o problema devido às amplificações do movimento de balanço e o embarque de água. Sugere-se que em situações em que as embarcações operam com pouca borda livre, as quais são comuns na região amazônica, existe o risco de embarque de água, que pode alagar espaços internos caso não exista vedação adequada do convés, comprometendo ainda mais a sobrevivência da embarcação. Espera-se que o presente estudo possa ser estendido para avaliar as possíveis causas de outros acidentes com embarcações regionais.

Palavras-chave: acidentes de embarcações, Amazônia, Engenharia Naval, estabilidade, movimento de balanço.

ABSTRACT

Several ship accidents have occurred over the years in the Amazon region, causing negative environmental, economic and social impacts. Although there are no details of the causes of all accidents that occur in the region, some shipwrecks have detailed accounts of what may have happened, making it possible to open discussion topics based on technical evidence. The present work presents a preliminary technical study of a vessel that sank in the Amazon region, analyzing some stability and movement factors with a possible contribution to the occurrence of the accident. The first phase of the study presents the problem of accidents on regional cargo and passenger vessels, describing several cases that occurred in the Brazilian Amazon. Subsequently, a shipwreck case study was considered to carry out the technical analysis, whose first stage of study consisted in generating a three-dimensional geometry that resembled the vessel's hull. Therefore, an intact transverse stability analysis was carried out, verifying the effects of different drafts and positions of the center of gravity. Finally, a critical stability condition was selected to evaluate the vessel's roll movement when subjected to the interaction of regular waves with different amplitudes. The results obtained demonstrated that inadequate combinations of draft and weight distribution can reduce the restoration capacity in calm water conditions. In this situation, some wave conditions, even those with low amplitude, can aggravate the problem due to amplifications of the roll movement and water shipping the deck. It is suggested that in situations where vessels operate with little freeboard, which are common in the Amazon region, there is a risk of shipping water, which can flood internal spaces if there is no adequate sealing of the deck, further compromising the survivability of the vessel. It is hoped that the present study can be extended to evaluate the possible causes of other accidents with regional vessels.

Keywords: ship accidents, Amazon, Naval Engineering, stability, roll motion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplos de embarcações que navegam nos rios amazônicos.....	14
Figura 2. Percentual das principais causas de acidentes com embarcações na Amazônia, segundo o estudo de Padovezi (2021).	20
Figura 3. Barco Renascer IV antes da explosão.	22
Figura 4. Destroços do Barco Renascer IV.	23
Figura 5. NM Haidar antes do acidente.....	24
Figura 6. NM Haidar depois do acidente.....	24
Figura 7. B/M Capitão Ribeiro após naufrágio no Rio Xingu	26
Figura 8. N/M Anna Karoline III antes do naufrágio.	27
Figura 9. N/M Anna Karoline III depois do naufrágio.....	27
Figura 10. Área interna do navio Anna Karoline III lotada de mercadorias.	28
Figura 11. Proximidade da linha d'água em relação ao convés principal.	29
Figura 12. Demonstração da relação KG no navio.....	31
Figura 13. Demonstração da relação KB no navio.....	32
Figura 14. Visualização esquemática do braço de endireitamento GZ.	32
Figura 15. Curva GZ e diagrama de estabilidade.	33
Figura 16. Visualização esquemática da reta KN.....	34
Figura 17. Condições de estabilidade do navio.	35
Figura 18. Ilustração do raio metacêntrico.	35
Figura 19. Comparação entre navios com bocas diferentes e com a mesma imersão e altura do centro de gravidade KG.	38
Figura 20. Representação dos seis graus de liberdade de uma embarcação.....	39
Figura 21. Interface do <i>Rhinoceros</i> [®] com a inicialização do plug-in <i>Orca3D</i> [®]	45
Figura 22. Exemplo de algumas páginas dos relatórios proporcionados pelo software <i>Orca3D</i> [®]	46
Figura 23. Exemplo da orientação de sistemas coordenados definidos no software <i>Ansys</i> [®] <i>Aqwa</i>	47
Figura 24. Definição dos movimentos da embarcação no software <i>Ansys Aqwa</i> [®]	48
Figura 25. Etapas principais do estudo.	49
Figura 26. Arranjo Geral do navio Anna Karoline III.....	52
Figura 27. Balizas do casco modelado.	52
Figura 28. Casco modelado no <i>Rhinoceros</i> [®]	53

Figura 29. Variação do calado da embarcação. As imagens representam as seguintes condições da Tabela 3: (a) A, B e C. (b) D, E e F. (c) G, H e I. (d) J, K e L.	55
Figura 30. Domínio computacional da simulação.	57
Figura 31. Disposição final da malha escolhida.	58
Figura 32. Configuração da posição do centro de gravidade no software <i>Ansys</i> [®]	58
Figura 33. Curvas de estabilidade estática GZ para 4 calados diferentes do caso de estudo, considerando um VCG = 2 m.	61
Figura 34. Ilustrações da disposição de linha d'água nas condições iniciais B1 e E1, com ângulo de inclinação de 20°.	63
Figura 35. Comparação de operadores de amplitude de resposta (RAO's) do movimento de balanço (<i>roll</i>) para diferentes frequências e ângulos de incidências de onda, com TCG = 0 m (Caso 1).	64
Figura 36. Comparação de operadores de amplitude de resposta (RAO's) do movimento de balanço (<i>roll</i>) para diferentes frequências e ângulos de incidências de onda, com TCG = 0,072 m (Caso 2).	64
Figura 37. Comparação da posição da embarcação para diferentes TCG's quando submetida a uma onda regular de 1,44 rad/s e 0,5 m de amplitude, incidindo pelo través. (a) TCG = 0,072 m. (b) TCG = 0 m.	66
Figura 38. Comparação da posição da embarcação, no mesmo instante de tempo, durante com a interação com uma onda regular de 1,44 rad/s, considerando ondas regulares com diferentes amplitudes. (a) Amplitude de 0,1 m. (b) Amplitude de 0,3 m. (c) Amplitude de 0,5 m. (d) Amplitude de 0,7 m.	67
Figura 39. Artigo publicado pelo autor relacionado com a prevenção de acidentes de embarcações regionais, realizado durante o desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso. Revista com classificação CAPES Qualis B2 na área de Engenharias III no período de avaliação 2017-2020.	76
Figura 40. Artigo publicado com participação do autor, relacionado com a prevenção de acidentes de embarcações regionais, que contribuiu com desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso.	77
Figura 41. Valores de KN obtidos para variação de 0,5 a 2,0 metros de calado com um VCG fixo em 2,0 metros.	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Acidentes motivadores de reações por parte da IMO.....	20
Tabela 2: Dados da embarcação Anna Karoline III	51
Tabela 3. Condições de posição de VCG e calado considerados na análise de estabilidade no software <i>Orca3D</i> [®]	55
Tabela 4. Domínio computacional da análise.....	57
Tabela 5. Variação de B _{Mt} , GMT, KG e KB para as condições de estudo.	60
Tabela 6. Condições com inclinação do casco.	62
Tabela 7. Condições com inclinação do casco.	63

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Contextualização	13
1.2. Justificativa	16
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo geral	17
1.3.2. Objetivos específicos	17
1.4. Estrutura do trabalho	17
2. ESTADO DA ARTE	19
2.1. Revisão de acidentes com embarcações regionais	22
2.1.1. O acidente da embarcação Renascer IV	22
2.1.2. O acidente da embarcação NM Haidar	23
2.1.3. O acidente da embarcação B/M Capitão Ribeiro.....	25
2.1.4. O acidente da embarcação N/M Anna Karoline III	26
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
3.1. Estabilidade intacta transversal do navio	30
3.2. Fatores que influenciam a estabilidade transversal	36
3.2.1. Mudança do centro de gravidade	36
3.2.2. Movimentação lateral de pesos	36
3.2.3. Variação de altura da borda livre	37
3.2.4. Efeito de superfície livre	37
3.2.5. Variação do tamanho da boca	38
3.3. Dinâmica de uma embarcação	39
3.4. Conceitos básicos da teoria de escoamento potencial	41
3.5. Operador de Amplitude de Resposta – RAO	43
3.6. Descrição dos softwares utilizados para análise	44

3.6.1.	Softwares <i>Rhinoceros</i> [®] e <i>Orca3D</i> [®]	44
3.6.2.	O software <i>Ansys Aqwa</i> [®]	46
4.	METODOLOGIA	49
4.1.	Diagrama de fluxo da metodologia aplicada	49
4.2.	Estudo de caso	50
4.2.1.	Modelagem 3D do casco do caso de estudo	51
4.2.2.	Análise de estabilidade intacta no <i>Orca3D</i> [®]	54
4.2.3.	Análise do movimento da embarcação no software <i>Ansys</i> [®] <i>Aqwa</i>	56
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1.	Resultados de estabilidade da embarcação	60
5.2.	Resultados de movimentos da embarcação	64
6.	CONCLUSÕES	70
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	APÊNDICE A	76
	APÊNDICE B	77
	APÊNDICE C	78

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Na Amazônia brasileira é indispensável o uso de embarcações para o transporte de cargas e passageiros, pois existe uma carência de rodovias que permitam a locomoção entre as principais cidades e as comunidades ribeirinhas. Diversos tipos de embarcações são utilizados para tais atividades, sendo comum o transporte irregular de cargas, cuja quantidade e distribuição na embarcação podem propiciar problemas de estabilidade.

Em várias regiões na Amazônia, a desconsideração das normas de segurança à navegação tem propiciado a ocorrência de acidentes, que muitas vezes têm causado o decesso de pessoas (FILHO et al., 2019; FONTES et al., 2023; PADOVEZI, 2012). Somado ao sobrepeso e a sua má distribuição, podem acontecer condições climáticas adversas, não previstas, como trombas de água e fortes ventos, que podem causar ondas afetando a estabilidade das embarcações (BECHMAN, 2024; DE SOUZA et al., 2023).

O modal hidroviário tem uma atuação de destaque para a economia global, pois pode se considerar como um meio com boa capacidade de transporte de cargas e passageiros, sendo responsável pela movimentação de cerca de 90% do comércio global (WANG et al., 2020). Isto se deve, entre outros motivos, ao consumo de combustível por tonelada ser mais barato quando comparado com outros meios de transporte. Este efeito global também é refletido localmente na região amazônica, que possui um importante sistema de navegação interior, provido de hidrovias (FILHO et al., 2019).

A região amazônica possui muitas peculiaridades, inclusive com relação às atividades que utilizam o meio fluvial, pois nela está localizada a maior bacia hidrográfica do mundo, a bacia amazônica, com uma enorme malha de rios navegáveis (DOS SANTOS et al., 2018). Por este fato, há uma grande demanda de atividades navais nesta região, fazendo com que o transporte aquaviário integre o cotidiano da população, atendendo os seus anseios pessoais e comerciais. Neste contexto, o transporte por embarcações regionais chega a ser uma demanda socioeconômica que necessita de atenção quanto a segurança deste modal (BASTOS, 2006).

Navegar nos rios da Amazônia é uma tarefa desafiadora, mas essencial, pois os rios são fonte de desenvolvimento socioeconômico na região, com grande importância para população ribeirinha, que se locomove diariamente, e também para empresas multinacionais de grande

porte que utilizam estas hidrovias, evidenciando um tráfego intenso de embarcações dos mais variados tipos e classes. Porém a fiscalização de todas essas embarcações é ainda um grande desafio devido à grande extensão da malha navegável, tornando a navegação perigosa (FILHO et al., 2019).

Assim como existem vários tipos de embarcações, dos mais variados tamanhos, navegando nesses rios (Figura 1), a região também apresenta diferentes níveis de conhecimentos acerca da navegação, indo desde o saber um pescador ribeirinho em sua canoa, até as habilidades de um comandante de um navio de grande porte (SANT'ANNA, 1998; TRINDADE; OTHERS, 2012). Ou seja, a fiscalização por parte da autoridade marítima na região é logisticamente complicada, cabendo ao governo, à indústria e à academia a responsabilidade de propor iniciativas para obter uma navegação mais segura.

Figura 1. Exemplos de embarcações que navegam nos rios amazônicos.



Fonte: Marinho et al. (2024).

A navegação na Amazônia pode se definir como uma indústria, constituída de várias partes, como tripulação, órgãos reguladores de segurança marítima, sociedades classificadoras, entre outros, que têm um papel importante na prevenção de acidentes com embarcações. Todos os ramos desta indústria são fundamentais para segurança das operações navais, uma vez que a ocorrência de acidentes pode causar tragédias com danos ambientais e materiais, assim como impactos sociais, os quais podem incluir as perdas de vidas (AKYUZ, 2015).

As causas de acidentes de embarcações podem ter várias origens e ser atribuídas a várias categorias. Os tipos de acidentes com embarcações são de fato numerosos, mas estaticamente os mais comuns são colisão, naufrágio, encalhe e abalroação, que normalmente são provocados por uma sequência de eventos, como o erro humano, deficiências técnicas e mecânicas, entre outras (BAALISAMPANG et al., 2018; FONTES et al., 2023).

Apesar de existir várias possibilidades de sequências de acontecimentos que, eventualmente, podem resultar em acidentes marítimos, a literatura disponível enfatiza que o erro humano é o responsável pela maioria destes acidentes (aproximadamente 80%), e por cerca de 90% de todos os incidentes envolvendo embarcações. Um comportamento similar pode ser observado também nos outros meios de transportes e indústrias, não sendo exclusividade do setor marítimo (CORADDU et al., 2020).

Mesmo que o estudo sobre fatores humanos tenham uma abordagem recente, já faz mais de um século que as primeiras tentativas para regular o transporte aquaviário foram feitas. Essas tentativas, à priori surgiram após os acidentes, como uma resposta imediata para tentativa de prevenção de perdas semelhantes. Por exemplo, após o naufrágio do RMS Titanic, em 1912, uma nova era nos regulamentos de segurança marítima foi inaugurada, resultando na criação da Convenção de Segurança no Mar, SOLAS, em 1914 (IMO, 1974), que mais tarde serviu de base para convenções futuras da Organização Marítima Internacional, IMO (SCHRÖDER-HINRICHS et al., 2013).

Várias convenções promovidas pela IMO, após sua criação em 1948, mesmo com todas as dificuldades e tendo uma influência modesta nos primeiros anos, foram concebidas com o intuito de estabelecer regras justas e eficientes para a segurança da navegação internacional, incluindo discussões sobre a influência do fator humano nos acidentes. Porém, os documentos publicados por cada convenção não são leis e cabe as autoridades marítimas de cada país ou união de nações aderirem ou não (CHAUVIN et al., 2013; SCHRÖDER-HINRICHS et al., 2013).

De todas as convenções realizadas pela IMO, destacam-se quatro: MARPOL – trata de questões relacionadas a prevenção da poluição marinha provocadas por navios; COLREG – discute questões relacionadas a prevenção de colisões no mar; STCW – trata de questões que definem padrões de treinamentos, certificação e serviços de quartos para marítimos; SOLAS – aborda questões relacionadas à salvaguarda da vida humana no mar.

Com o passar do tempo, todas essas convenções resultaram em melhorias, principalmente, na estrutura e confiabilidade dos sistemas das embarcações. Uma vez que a estrutura (casco, propulsão e etc.) e o sistemas de navegação dos navios deram um salto de qualidade nos últimos anos, esses melhoramentos não foram tão impactantes nas reduções dos riscos de acidentes, evidenciando que melhorias de determinados procedimentos ainda precisam ser feitas para minimizar o erro humano em ocorrências com embarcações (HANZU-PAZARA et al., 2008; WANG et al., 2020).

O presente estudo está relacionado com o problema de acidentes com embarcações na região amazônica, que é uma região extensa e que ainda se encontra em desenvolvimento em várias áreas da Engenharia. Visa-se contribuir com a solução de desafios existentes relacionados com a prevenção de acidentes com embarcações, analisando tecnicamente possíveis causas da ocorrência de um naufrágio na região. Nesse contexto, busca-se relacionar a aplicação da Engenharia Naval com os objetivos de desenvolvimento sustentável da Organização Marítima Internacional (IMO, 2024), especificamente com os objetivos 3 (bem-estar para todos), 9 (indústria, inovação, e infraestrutura) e 10 (redução de desigualdades).

1.2. Justificativa

Além dos fatores técnicos, tem sido constatado que fatores humanos e ambientais estão associados a uma gama de acidentes com embarcações regionais. Dentre os acidentes de embarcações regionais que têm registrado vítimas fatais, podem ser mencionados os naufrágios do B/M Capitão Ribeiro em 2017 e do N/M Ana Karoline III em 2020, nos quais após navegarem sob condições adversas provocadas por tempestades, vieram a naufragar, vitimando dezenas de pessoas (MARINHO et al., 2024). Estes dois naufrágios têm em comum o fato de ambas as embarcações estarem inseridas num contexto de chuvas e ventos fortes, que por sua vez podiam ter gerado ondas. Quando em contato com o casco, é possível que essas ondas tenham aumentado os movimentos das embarcações. Dependendo também de outros fatores como a distribuição de cargas, é possível que tais movimentos pudessem ter contribuído no seu

naufrágio. Porém, para ter uma compreensão melhor do que pode ter acontecido, é necessário realizar análises quantitativas. Assim, no presente trabalho, tentou-se avaliar um caso de estudo de embarcação naufragada na Amazônia, visando entender possíveis cenários de estabilidade transversal e movimentos de balanço, para discutir condições de risco. O estudo envolve a modelagem tridimensional da embarcação, bem como estudos de estabilidade intacta e comportamento em ondas regulares.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Estudar de maneira técnica e preliminar o caso de estudo de uma embarcação que naufragou na região amazônica, analisando diversas condições de estabilidade transversal do movimento de balanço, para identificar possíveis cenários de risco aplicáveis a outras embarcações regionais.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar uma revisão da literatura e descrever alguns dos naufrágios de embarcações mais relevantes que têm acontecido na região amazônica, selecionando um naufrágio como caso de estudo para compreender os elos que se juntaram para o acontecimento.
- Desenvolver a modelagem tridimensional do casco do caso de estudo, usando o software de desenho assistido por computador *Rhinoceros*[®].
- Com o casco modelado, realizar um estudo de estabilidade intacta usando o software *Orca3D*[®], avaliando o efeito de diferentes calados e posições do centro de gravidade.
- Selecionar uma condição crítica no estudo de estabilidade e usá-la para avaliar o movimento de balanço em ondas regulares no software *Ansys*[®] *Aqwa*, identificando os efeitos da variação da altura das ondas.
- Avaliar, relacionar e discutir os resultados, visando estabelecer relações entre as suposições levantadas e identificar possíveis riscos aplicáveis em outras embarcações regionais.

1.4. Estrutura do trabalho

Além da presente seção, este trabalho está estruturado e dividido em mais 5 Capítulos. O Capítulo 2 é referente ao estado da arte, a respeito das atualidades que envolvem os acidentes

marítimos, bem como das normas que regem a navegação marítima internacional e nacional. O capítulo inclui uma descrição de alguns acidentes mais significantes na região amazônica. O Capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica, onde são apresentados os conceitos mais importantes dos métodos e softwares utilizados no presente trabalho. O Capítulo 4 mostra a metodologia proposta para realizar a análise do caso de estudo, incluindo o procedimento a seguir nas análises da estabilidade e dos movimentos da embarcação selecionada. Na sequência, no Capítulo 5, são apresentados os resultados de estabilidade e da dinâmica da embarcação. Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as conclusões do trabalho e as recomendações para estudos futuros.

2. ESTADO DA ARTE

De acordo com Pinheiro (2015), quando algo ou uma situação inesperada ocorre causando qualquer tipo de dano, e quando não há intenções de viabilizar tal fato ou que o dano não seja caracterizado como um crime, a isto definimos como um acidente.

Em seu trabalho, Luz (2017) afirma que um acidente é muitas vezes consequência de um incidente, não sendo exclusividade do setor naval. No entanto, a resolução MSC.255 (84) aprovada oficialmente pela IMO, traz uma definição técnica sobre os acidentes marítimos, sendo que estes são ocasionados após uma sequência de eventos que causam danos como: morte ou ferimentos de pessoas, perda ou desaparecimento de uma pessoa em um navio, dano material causado em uma embarcação, perda ou abandono de um navio, entre outras ocorrências.

Balisampang et al. (2018) enfatiza que embora na maioria das vezes, as causas de um acidente sejam atribuídas há apenas um tipo de categoria, como aterramento, naufrágio, colisão, incêndio, etc., é errado pensar dessa maneira. A razão se deve a que costuma se ignorar o fato de que para isso acontecer, na realidade uma série de fatores que ocorrem anteriormente ao acidente, como falhas mecânicas, de instrumentação, e principalmente, o erro humano, são desconsiderados.

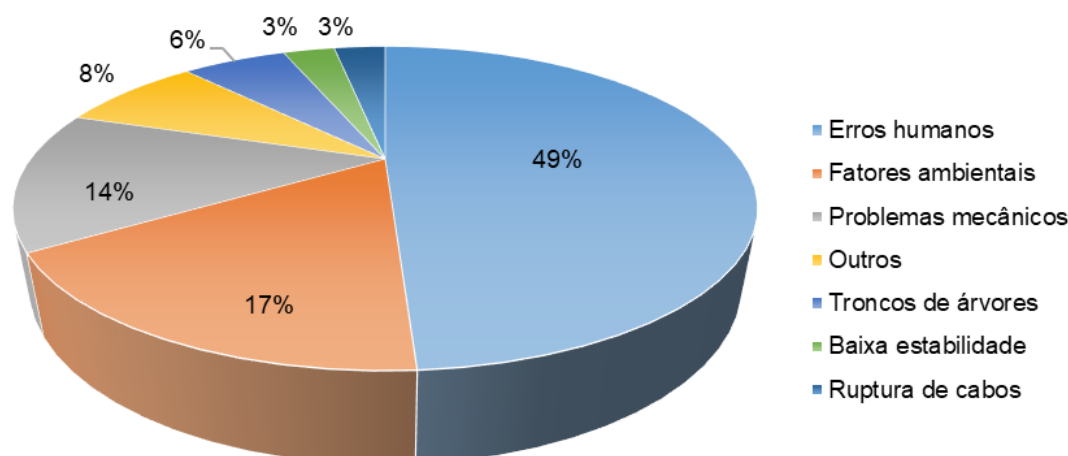
Na região amazônica, a movimentação de cargas e pessoas utilizando os rios, lagos e paranás é uma questão socioeconômica, existindo o fato da grande utilização de barcos de pequeno porte, conhecidos como canoas, que são muito utilizadas pelos ribeirinhos da região. A necessidade do uso de embarcações permite caracterizar, segundo Bastos (2006), uma grande demanda de transporte fluvial, onde podem operar embarcações de diversos tamanhos e tipos, que merecem atenção quanto à segurança.

Padovezi (2021) realizou uma pesquisa sobre as principais causas de acidentes com embarcações fluviais nos rios da bacia amazônica, tirante aquelas cuja função seja transporte de passageiros, de acordo com dados do Tribunal Marítimo entre os anos de 2016 e 2020. A Figura 2 mostra os resultados apresentados, na qual é possível verificar que os fatores humanos possuem o maior percentual de responsabilidade, cerca de 49%. Marinho et al. (2024), Apêndice A, apresentaram esta problemática na região amazônica, enquanto Aziz et al. (2022), Apêndice B, propuseram algumas alternativas para enfrentar esses desafios.

Diante das tragédias no passado, de acordo com Schröder-Hinrichs et al. (2012), a criação da IMO em 1948 se deu inicialmente para funcionar como uma agência técnica com o

intuito de melhorar a segurança marítima. Porém, por haver conflitos de interesses por parte das nações, dificultando a concordância e chegada a um denominador comum, sua concepção não foi fácil.

Figura 2. Percentual das principais causas de acidentes com embarcações na Amazônia, segundo o estudo de Padovezi (2021).



Fonte: Adaptado de Padovezi (2021).

Entretanto, conforme pode ser visto na Tabela 1, a IMO obteve êxito em suas convenções que regem a navegação marítima internacional. Várias convenções da IMO surgiram, em sua maioria, motivadas por acidentes de grandes proporções.

Tabela 1. Acidentes motivadores de reações por parte da IMO.

Ano do acidente	Nome do navio	Convenção/Medida Resultante	Em vigor desde
1912	Titanic	SOLAS, 1914	1960
		Convenção de Intervenção, 1969	1975
1967	Torrey Canyon	Convenção de Responsabilidade Civil, 1969	1975
		Convenção MARPOL, 1973	1983
		Convenção STCW, 1978	1984
1976	Argo Merchant	Convenção MARPOL, protocolo de 1978	1984
1987	Herald of Free Enterprise	Código ISM, 1994	1998
		Convenção OPRC, 1990	1995
1989	Exxon Valdez	Convenção MARPOL, 1992 emenda que determinou regras sobre casco duplo	1995
1994	Estonia	Convenção SAR, 1998 – emenda de melhoria da cooperação	2000
1999	Erika	Resolução 949(23). Dispõe sobre locais de refúgio em navios em casos de necessidade de ajuda	2003
2002	Prestige		

Fonte: Adaptado de Schröder-Hinrichs et al. (2013) *apud* Schröder (2004).

No que se refere ao contexto nacional, as normas regulamentadoras que regem a navegação brasileira são as Normas da Autoridade Marítima – NORMAM (MARINHA, 2023), com um total de 34 documentos publicados via Portarias disponíveis ao público no site da Marinha do Brasil. Cada norma trata um assunto específico, e em geral, seguem as recomendações propostas nos documentos da IMO, sendo que, para o bom funcionamento da indústria marítima no Brasil, há alguns órgãos reguladores que possuem diferentes designações.

Contudo, acidentes envolvendo embarcações na Amazônia são comuns. Em seu estudo, Soares e De Britto (2014) sugeriram que o principal fator ligado a segurança da navegação nessa região é a estabilidade transversal destas embarcações por eles levantadas, considerando que a maioria das embarcações regionais são feitas de madeiras. Embora muitas das embarcações avaliadas obedecem aos requisitos mínimos exigidos pelas normas brasileiras, verificou-se que o centro de gravidade (CG) delas é elevado acima do convés principal e esse fator somado a incidência de ondas e ventos, além da movimentação de passageiros, pode alterar a estabilidade desses tipos de embarcações regionais.

De acordo com Americo (2009), o estudo de estabilidade intacta de uma embarcação deve ser feito de maneira dinâmica, buscando compreender a interação entre esses dois ramos que compõem o sistema naval. Isto é necessário já que as guinadas e as forças de restauração podem ser influenciadas por fontes dinâmicas como fatores ambientais, tais como o vento e as ondas.

A estabilidade intacta de uma embarcação é o fator que atrai muita atenção das normas atuais, visando aumentar sempre as condições de segurança e navegabilidade. A partir disso, Monteiro (2017) ressalta as gerações de estudos abordados pela IMO, na qual a segunda geração de critérios para a estabilidade de navios é discutida desde o início dos anos 2000. Pode-se constatar que, mesmo com todos os critérios da primeira geração, a incidência de acidentes que envolvem a estabilidade de uma embarcação ainda é significativa.

Diante disso, Monteiro (2017) diz que além da questão física que envolve a estabilidade de um navio, outras questões como a guinada brusca, a aceleração excessiva, e o balanço paramétrico, são assuntos pertinentes que merecem atenção com relação ao aumento da segurança da navegação dos mares e rios, que também envolve a navegação na bacia amazônica. Cabe ressaltar que a área 2 de navegação na Amazônia brasileira pode apresentar a presença frequente de ondas e ventos durante condições ambientais adversas.

2.1. Revisão de acidentes com embarcações regionais

2.1.1. O acidente da embarcação Renascer IV

Segundo Marinha (2011), no dia 5 de novembro de 2011, por volta das 6:15 horas, nas proximidades da Comunidade São José da Chapada, localizada no Rio Urucu, na cidade de Coari – AM, a embarcação Renascer IV (Figura 3) sofreu acidente do tipo explosão seguida de naufrágio, enquanto transportava 19.000 litros de gasolina.

Figura 3. Barco Renascer IV antes da explosão.



Fonte: Marinha (2011).

Tal fato se deu após a tripulação pernoitar no local, devido à falta de visibilidade ao anoitecer no dia anterior às 21:00 horas. Após o amanhecer do dia do acidente, por volta das 6:00 horas, a tripulação tentou dar a partida no motor, porém a bateria estava sem carga. Neste momento outra embarcação passava pelo local e cederam o equipamento necessário para dar a partida no motor. Após isso, um dos tripulantes foi para a sala de máquinas e ao fechar os contatos da bateria cedida ocorreu a explosão.

A explosão se deu por conta de a sala de máquinas estar com a presença de gases inflamáveis que, quando o circuito das baterias se fechou, foi gerada uma centelha que provocou

a explosão instantânea no local. A explosão afetou toda a estrutura da embarcação, tendo como fator agravante a presença de mais combustível líquido no interior dos seus tanques.

Segundo testemunhas, a condição climática na região era boa, sem chuva, com ventos fracos, temperatura moderada, céu claro e com o leito do rio normal para a época. Na embarcação havia três pessoas, que não eram certificadas e foram contratadas para a viagem apenas por ter conhecimento práticos de navegação naquela região. Houve perda total da embarcação (Figura 4) e três vítimas com queimadura, sendo que uma delas veio a óbito quinze dias depois do acidente.

Figura 4. Destroços do Barco Renascer IV.



Fonte: Marinha (2011).

2.1.2. O acidente da embarcação NM Haidar

De acordo com Marinha (2015), em 6 de outubro de 2015, por volta das 8:45 horas, ocorreu o adernamento e, em sequência, o naufrágio do NM Haidar (Figura 5), de bandeira libanesa. O acidente ocorreu enquanto a embarcação estava atracada no porto Vila do Conde no município de Bacarena – PA, em decorrência de perda de estabilidade após o embarque de carga viva (gado), que seguiria uma viagem para o exterior.

Figura 5. NM Haidar antes do acidente.



Fonte: Marinha (2015).

O navio tombou completamente para bombordo (Figura 6). As condições ambientais no momento do acidente eram de tempo bom, mar agitado, boa visibilidade, vento fraco. As condições de águas agitadas com ondas de ressaca foram fatores contribuintes para o acidente. Não houve vítimas fatais, porém houve danos ambientais com vazamento de óleos combustíveis, além da morte de grande quantidade de gado, acarretando poluição hídrica.

Figura 6. NM Haidar depois do acidente.



Fonte: Marinha (2015).

É possível que o fator humano não tenha sido a causa preponderante para a ocorrência do fato do acidente mostrado na figura anterior. Entretanto, o provável descontrole de abastecimento de bois, principalmente nos conveses superiores, pode ter contribuído para a perda de estabilidade da embarcação. Também é possível que por conta da movimentação da carga, em conjunto com as ondas provenientes da ressaca, a embarcação possa ter aumentado os seus movimentos de balanço.

2.1.3. O acidente da embarcação B/M Capitão Ribeiro

Segundo Marinha (2017), no dia 22 de agosto de 2017, por volta das 21:30 horas, ocorreu o naufrágio do B/M Capitão Ribeiro, de bandeira brasileira, construído em 2004. O naufrágio aconteceu no Rio Xingu, cerca de 30 milhas náuticas a montante de Porto de Moz – PA, em decorrência do clima instável na região do acidente. Na embarcação eram transportadas um total de 53 pessoas, sendo que 23 vieram a óbito.

A embarcação fazia a rota de Santarém – PA com destino Vitória do Xingu – PA. Porém, durante a viagem a embarcação entrou em uma região onde ocorria um vórtice colunar, que veio ao encontro da embarcação atingindo-a na proa a bombordo. Conseqüentemente, esse evento veio a comprometer sua estabilidade transversal, fazendo a embarcação entrar em movimentos de balanço, provocando o adernamento da embarcação para boreste e em seguida seu naufrágio (Figura 7).

O comandante poderia ter pausado a viagem abarrancando a embarcação na margem, haja vista o tempo desfavorável para navegação. Além disso, havia o descumprimento das regras da NORMAM-02, como por exemplo o transporte de um carro do convés principal, no qual não havia permissão para isso. Por se tratar de uma carga rolante, a movimentação desta carga pode ter contribuído na instabilidade da embarcação. Houve também desrespeito quanto ao CTS elaborado para ela, podendo ter causado fadiga na tripulação. Vários fatores contribuíram para a perda de estabilidade, como por exemplo, o uso de sanefas que aumentaram a área velica da embarcação, além de que, as forças do vento exercidas nas proteções contra a chuva não estavam previstas nos cálculos de estabilidade.

Figura 7. B/M Capitão Ribeiro após naufrágio no Rio Xingu



Fonte: Marinha (2017).

2.1.4. O acidente da embarcação N/M Anna Karoline III

O Navio Anna Karoline III (Figuras 8 e 9), saiu do porto da cidade de Santana, no Estado do Amapá, com destino final a cidade de Santarém, no Estado do Pará, em uma sexta-feira, dia 28 de fevereiro do ano 2020, em mais uma viagem de rota semanal com escalas em portos intermediários ao longo da linha.

A viagem foi autorizada pela Capitania dos Portos de Santana-AP, a qual realizou a vistoria da embarcação momentos antes de sua partida às 18h. Em seu trecho inicial, a viagem ocorreu normalmente com condições climáticas favoráveis, mas estas condições mudaram bruscamente em pouco tempo, o que é normal na navegação em qualquer região. Aproximadamente às 5:00 horas, a embarcação naufragou no Rio Amazonas, ainda no Estado do Amapá.

O naufrágio do Navio Anna Karoline III ocorreu há cerca de 130 km de Macapá-AP, nas proximidades da ilha de Aruãs e da Reserva Extrativista do Rio Cajari, em uma região isolada com dificuldade de acesso e de comunicação. Na embarcação estavam 93 pessoas a bordo, sendo que 40 pessoas vieram a óbito e 2 não foram encontradas.

Figura 8. N/M Anna Karoline III antes do naufrágio.



Fonte: Adaptado de Globo (2020).

Figura 9. N/M Anna Karoline III depois do naufrágio.



Fonte: Adaptado de Globo (2021).

Segundo a Marinha, chovia no local na hora do acidente. Testemunhas afirmaram que a viagem, apesar do mau tempo, ocorria normalmente, mas a embarcação fez uma parada imprevista e irregular para um abastecimento clandestino de combustível, junto a outra embarcação de menor porte, ficando à deriva no rio. Após o abastecimento, a embarcação iniciou uma manobra no local para retomar a direção original da rota, pois por conta da correnteza a embarcação tendeu a seguir o fluxo para jusante. É possível que este fato tenha sido crucial para o naufrágio, uma vez que, segundo os sobreviventes, as ondas e os ventos estavam muito fortes durante a execução desta manobra de retorno. Em determinado momento a embarcação deve ter perdido a sua estabilidade, entrando em um movimento de balanço significativo, vindo à pique em cerca de 30 segundos.

Foi destacado também, pela imprensa, que mesmo com a autorização da Capitania do Portos, a embarcação estava supercarregada, conforme vídeos feitos no dia do acidente, como pode ser observado nas Figuras 10 e 11, sendo notório a baixa altura da borda-livre. Este fator, comum em outras embarcações que costumam operar sobrecarregadas, pode contribuir na perda de estabilidade transversal de uma embarcação, e além do mais, ao embarque de água no convés caso existam ondas.

Figura 10. Área interna do navio Anna Karoline III lotada de mercadorias.



Fonte: Nafes (2020).

Figura 11. Proximidade da linha d'água em relação ao convés principal.



Fonte: Nafes (2020).

A embarcação, além da sobrecarga e da autorização por parte da Capitania dos Portos local, estava operando em uma rota clandestina não autorizada pela ANTAQ, que regula a navegação de barcos entre os Estados da Federação, sendo que a rota autorizada era de Santarém-PA para Manaus-AM. Esse fato, pode ser determinante, pois a rota clandestina de Santana-AP para Santarém-PA, compreende a área 02 de navegação, que tem influência de marés e a rota autorizada compreende a área 01 de navegação. Isso interfere nos cálculos e nos critérios de estabilidades da NORAMAN-02|DPC.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, é apresentada a fundamentação teórica sobre a estabilidade transversal, buscando apresentar os conceitos básicos. Também são descritos alguns fatores que afetam a estabilidade das embarcações. Ademais, são introduzidos conceitos importantes acerca dos movimentos que um navio pode apresentar quando interage com ondas, descrevendo de maneira breve alguns conceitos que regem tal dinâmica, como a teoria do escoamento potencial.

3.1. Estabilidade intacta transversal do navio

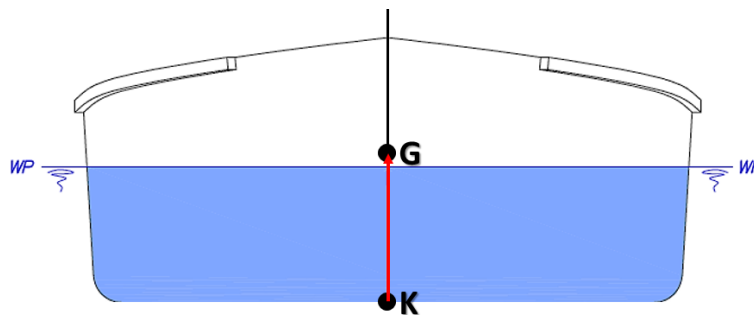
De acordo com os estudos apresentados por Americo (2009), um navio nada mais é que um corpo imerso na água, que segue o Princípio de Arquimedes. Este princípio afirma que qualquer corpo imerso em um fluido estará sob ação da força da gravidade (P), que o atrairá para centro da Terra, e da força de empuxo (E), que é contrária a força da gravidade. Neste sentido, um navio também obedecerá às três condições existentes, que são $E = P$, $E < P$ e $E > P$, sendo que:

- Quando $E = P$, o corpo ficará estático na posição onde essas forças são semelhantes;
- Quando $E < P$, o corpo sofrerá o afundamento no líquido, já que a força exercida pela gravidade é maior que a força de empuxo;
- Quando $E > P$, significará que o corpo está sob o fluido, neste caso sob a água, já que a força exercida pelo empuxo é maior do que a atração exercida pelo centro de gravidade da Terra.

Com isso, um navio é projetado para que quando seja imerso na água, a força empuxo vença a força da gravidade, e para isso, como qualquer outro corpo, haverá nele seu centro de gravidade (G), que é o ponto onde é considerada a aplicação de todo seu peso. Contudo, por se tratar de uma estrutura flutuante, esse corpo também estará sob ação da força de empuxo, na qual, assim como visto anteriormente para P , é considerado o ponto B como o ponto em que se concentra a força exercida pelo empuxo, conhecida como o centro de carena da embarcação.

Para o estudo de estabilidade do navio, o ponto de centro de gravidade G não varia nas condições de adernamento nas quais o navio pode ser submetido. Essa análise é feita em relação a sua posição vertical e relação à quilha (K) da embarcação, que é o ponto mais inferior do corpo. Com isso teremos a relação KG , que nada mais é a posição vertical do centro de gravidade da embarcação em relação à sua linha de base, denotada por VGC , conforme abaixo na Figura 12.

Figura 12. Demonstração da relação KG no navio.



Fonte: Autoria própria.

Quando um peso é adicionado ou retirado da embarcação, o VCG sofre alteração, em especial quando essa adição ou remoção ocorre fora da linha de centro do navio. Nestes casos, G move-se conforme o sentido de onde fora adicionado peso ou contrário quando se retira peso, sendo representado pela Equação 1, na qual o novo VCG será dado por:

$$\text{VCG} = \frac{w \times d_v}{W \pm w} \quad (1)$$

onde:

- $w \rightarrow$ valor do peso deslocado;
- $d_v \rightarrow$ distância vertical de deslocamento do peso;
- $W \rightarrow$ deslocamento inicial do navio.

Da mesma maneira, o cálculo para o novo centro de gravidade transversal (TCG), é dado pela Equação 2:

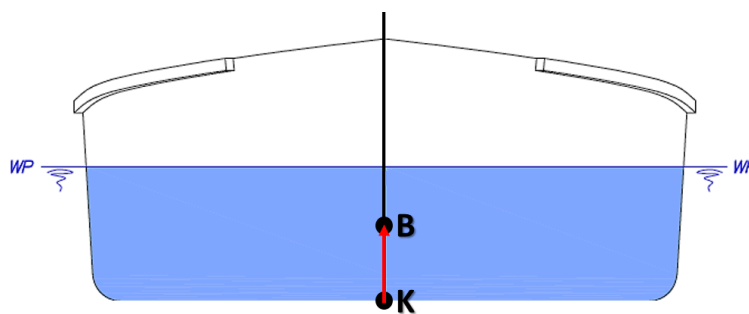
$$\text{TCG} = \frac{w \times d_T}{W \pm w} \quad (2)$$

onde:

- $d_T \rightarrow$ distância transversal de deslocamento do peso.

Também, é considerado para o estudo de estabilidade do navio o centro onde se concentra a força exercida pelo empuxo, sendo que este ponto é denominado como centro de carena do navio (B). Porém, diferentemente de G, não é estático e se movimentará conforme as mudanças de balanço transversal, que alteram o volume de carena da embarcação, e assim como G, B tem sua posição vertical denotada pela distância da quilha da embarcação, conhecida por (KB), conforme a Figura 13.

Figura 13. Demonstração da relação KB no navio.

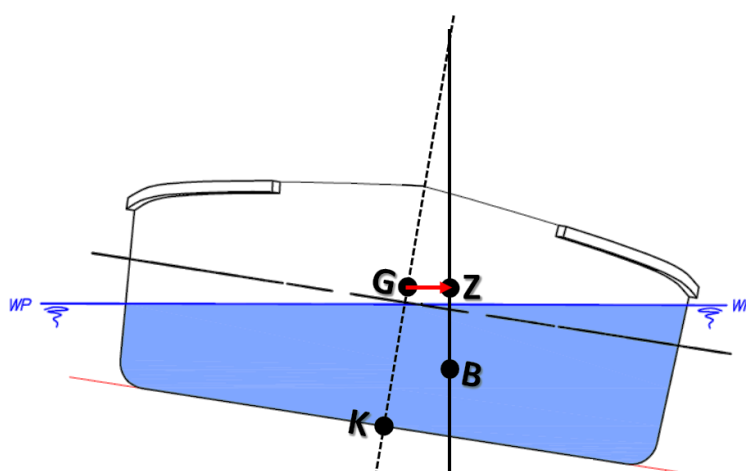


Fonte: Autoria própria.

A relação entre G e B, é determinante na análise da estabilidade intacta do navio, uma vez que se busca compreender a capacidade de uma embarcação para retornar ao equilíbrio, com uma inclinação transversal $= 0^\circ$, após esta ser submetida a forças como o vento, ondas, colisões com outras estruturas flutuantes etc. Dependendo das condições ambientais, as análises variam quando as embarcações são submetidas a situações críticas.

Quando o navio está sob ação de alguma força externa que resulta em oscilações transversais, o centro de carena (B) varia. Porém, a componente da força de empuxo continua sendo vertical para cima. Entretanto, agora há uma distância horizontal entre as componentes verticais de G e B, sendo que essa distância é denominada como o braço de endireitamento da embarcação (GZ), conforme a Figura 14.

Figura 14. Visualização esquemática do braço de endireitamento GZ.

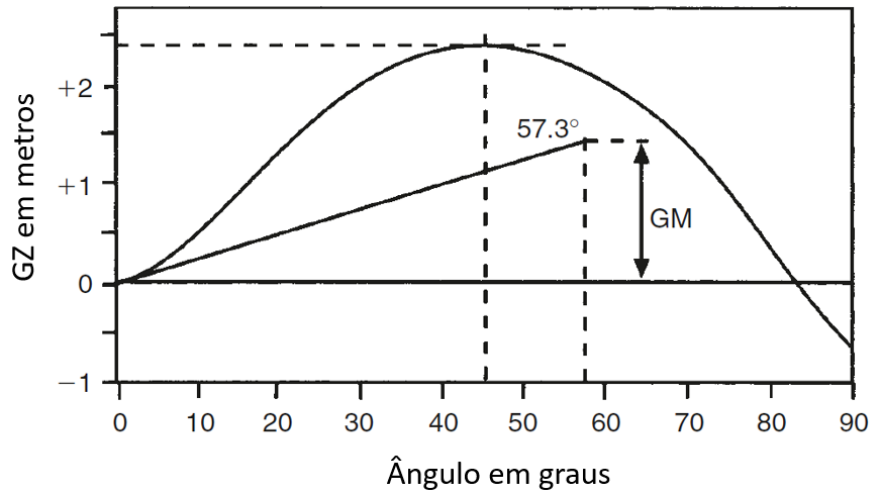


Fonte: Autoria própria.

Conforme aumenta a inclinação transversal da embarcação, GZ também aumenta, mas até um certo ângulo, na qual começará a diminuir, impactando na capacidade de restauração

para a posição original do navio. Tais braços de endireitamento variam conforme a inclinação e assim é conhecida a Curva de Estabilidade Intacta do Navio, a Curva GZ, como pode ser observada no exemplo da Figura 15.

Figura 15. Curva GZ e diagrama de estabilidade.



Fonte: Adaptado de Barrass e Derrett (2005).

Desta maneira, o GM da embarcação pode ser definido pela Equação 3:

$$GM = KM - KG \quad (3)$$

onde:

- KM → distância da quilha até o metacêntrico da embarcação;
- KG → distância da quilha até o centro de gravidade da embarcação.

Com tais inclinações de ângulos grandes e o adernamento do casco, nota-se a formação do triângulo GMZ, com o que é possível estabelecer outras relações, sendo que uma delas nos apresenta a equação de estabilidade transversal aplicada para pequenos ângulos de inclinação, na qual o braço de endireitamento é dado pela Equação 4:

$$GZ = GM \times \sin(\theta) \quad (4)$$

onde:

- GZ → Braço de endireitamento da embarcação;
- GM → Altura metacêntrica transversal da embarcação;
- θ → Ângulo formado entre as retas GM e GZ.

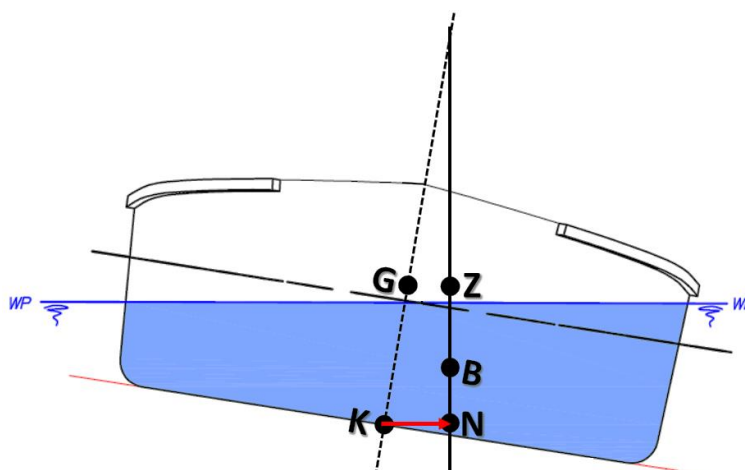
Porém, para facilitar a implementação da curva de estabilidade GZ, é comum associar o ponto G à quilha do navio, que é o ponto N, sendo que a partir dessa nova condição surge a reta KN, conforme a Figura 16, e em termos de KN, após correções para a verdadeira posição de G, obtém-se GM, conforme a Equação 5:

$$GZ = KN - [KG \times \sin(\theta)] \quad (5)$$

onde:

- KN → Distância horizontal da força resultante de empuxo para o ponto K;

Figura 16. Visualização esquemática da reta KN.



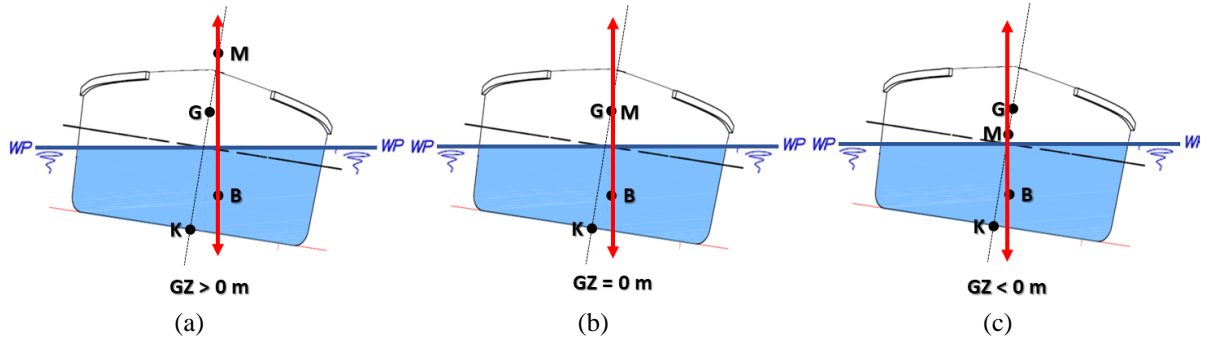
Fonte: Autoria própria.

Em termos das condições de estabilidade de um navio, conforme o mesmo princípio de Arquimedes, esta pode ser dividida em estabilidade positiva, estabilidade neutra e estabilidade negativa.

De acordo com Montenovo (2019), na condição de estabilidade positiva temos que, a embarcação, após sofrer a ação de alguma força externa que a excite em pequenos ângulos de inclinação transversal, tende a retornar para sua posição original, conforme a Figura 17a. Nessa situação o metacêntrico geométrico da embarcação está acima de seu centro de gravidade. Já na condição de estabilidade neutra, o navio tende a ter seu movimento de adernamento indefinido, uma vez que o metacêntrico geométrico e o centro de gravidade coincidem, resultando em um braço de endireitamento (GZ) igual a zero, conforme a Figura 17b. Por fim, a condição de estabilidade negativa, é o caso em que o navio estará instável, continuando a

adernar para algum bordo mesmo com o fim da interação da força externa, neste caso GM é um valor negativo, como visto na Figura 17c.

Figura 17. Condições de estabilidade do navio.



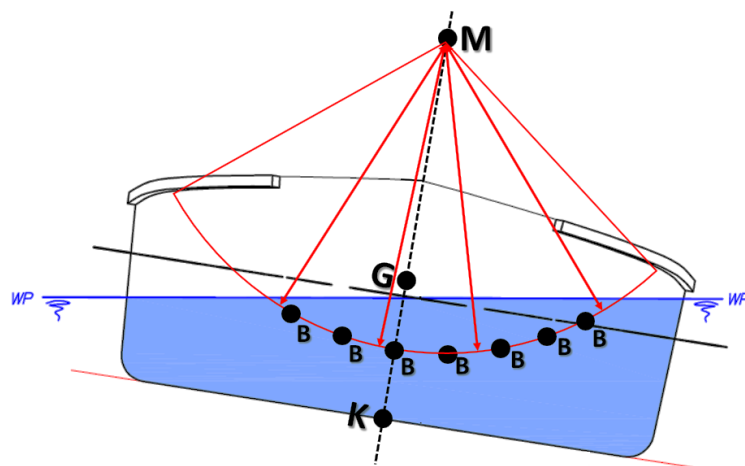
Fonte: Autoria própria.

Como visto anteriormente, B varia conforme a imersão do casco na água. Para cada ângulo de variação transversal, tem-se um B diferente, sendo que, quando se verificam a suas posições nestas diversas variações, percebe-se a formação de um círculo com centro em M , conforme a Figura 18. Essa distância é chamada de raio metacêntrico (BM), e a partir dela tem-se mais algumas relações entre KM e KB , como pode ser visto na Equação 6:

$$BM = KM - KB \quad (6)$$

onde BM é a distância do centro de carena da embarcação até a sua altura metacêntrica.

Figura 18. Ilustração do raio metacêntrico.



Fonte: Autoria própria.

3.2. Fatores que influenciam a estabilidade transversal

Segundo Americo (2009), destacam-se alguns fatores que podem alterar a estabilidade intacta de uma embarcação por conta da distribuição de cargas ao longo do casco que, por consequência, variam o centro de gravidade da embarcação, sendo que tal variação ocorre por fatores subjacentes como a mudança de posição transversal de peso e o aumento ou diminuição da borda livre.

3.2.1. Mudança do centro de gravidade

A mudança do centro de gravidade do navio interfere diretamente na distância KG. Americo (2009) lista alguns motivos que resultam nesta variação, como o acréscimo ou retirada de cargas em geral e acréscimos, retiradas, ou mudança de bordo, de lastros ou consumíveis líquidos; assim como a introdução de água no convés ou nos porões da embarcação.

Tais configurações implicam em variações no braço de endireitamento do navio GZ, nas quais, quando em situação de adernamento, o aumento de KG resultará na diminuição de GZ, portanto crescerá na instabilidade. Entretanto, ele não se aplica quando KG diminui, sendo que neste último caso GZ aumentará, acrescentando a tendência de restauração de equilíbrio do navio.

Conforme Americo (2009), é notado que quando ocorre o deslocamento do centro de gravidade para cima, a altura metacêntrica GM irá diminuir e a aversão do navio ao movimento de adernamento para um bordo será menor, pois GZ é menor também quando comparada com um KG mais baixo. Desta maneira, a estabilidade intacta do navio é comprometida negativamente pela adição de pesos acima do KG original.

3.2.2. Movimentação lateral de pesos

Da mesma maneira como descrito na subseção anterior, a movimentação lateral de pesos pode ser provocada por operações de cargas e descargas, movimentação de líquidos ao longo de uma viagem, embarque de água, içamento de botes e objetos transportados nos bordos dos navios e outros fatores.

A movimentação de pesos, por exemplo, de bombordo para boreste, fará com que o centro de gravidade também se desloque para boreste, pois nesta situação GZ é suprimindo,

uma vez que considerando que o volume de carena não mude, isto é, KB e BM continuam os mesmos, o braço GZ conseqüentemente diminuirá.

Desta maneira, de acordo com Americo (2009), GM é inalterável nessa situação e para pequenos ângulos de inclinação, GZ diminui em todas as situações, sendo que em uma situação na qual a embarcação já esteja inclinada, a ação de uma força externa será mais impactante quando comparada quando o centro de gravidade esteja centrado na sua linha de centro.

3.2.3. Variação de altura da borda livre

Segundo Americo (2009), a partir do trabalho desenvolvido por Rhodes (2003), quando duas embarcações com mesmo centro de gravidade, ou seja, mesmo KG, mesma boca moldada e imersão na água, mas com altura de borda livre diferentes são comparadas, nota-se que a que detém o costado mais alto o braço de endireitamento GZ é maior, por conta da maior reserva de flutuabilidade dessa embarcação.

Em contrapartida, a embarcação que possui menor altura de costado possui também menor GZ, uma vez que o ângulo de imersão total do casco é menor para este caso e como a curva de estabilidade estática é a mesma para ambos os casos, tem-se que enquanto o ângulo de imersão já fora atingido na de menor borda-livre, a curva GZ do casco de maior borda-livre estende-se a maiores ângulos.

3.2.4. Efeito de superfície livre

O efeito de superfície livre é considerado como um dos fatores que mais alteram a estabilidade estática de um navio, uma vez que o líquido localizado nos compartimentos internos, como porões e tanques, tende a movimentar-se para o fundo da embarcação seguindo o movimento de balanço resultante de forças externas. Essa situação pode fazer com que o centro de gravidade G se movimente paralelamente no sentido da inclinação.

Na prática, de acordo com Barrass e Derret (2011), o efeito de superfície livre ocasionará a redução da altura metacêntrica, GM, e a perda de GM resulta em perda de estabilidade, sendo que a disposição da compartimentagem dos tanques que transportam líquidos deve ser considerada no projeto, de maneira a diminuir o efeito desse deslocamento interno. Opções como a divisão do tanque em questão em mais um ou dois tanques podem amortizar o efeito,

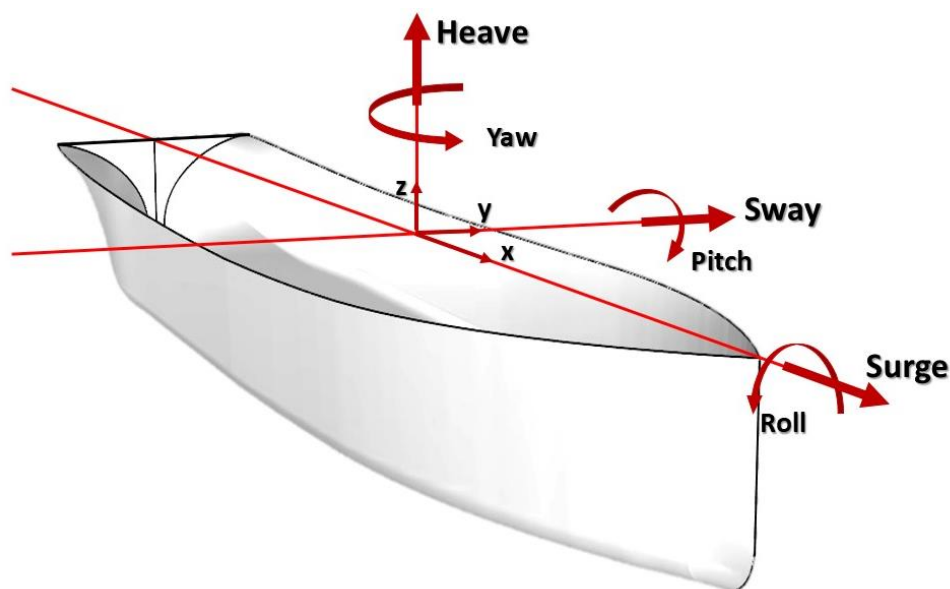
3.3. Dinâmica de uma embarcação

A dinâmica de uma embarcação pode ser avaliada utilizando métodos analíticos (SALVESEN; TUCK; FALTINSEN, 1970), numéricos (HE et al., 2022) ou experimentais (SILVA; COUTINHO; ESPERANÇA, 2017). No presente estudo será utilizado o software *Ansys Aqwa*[®], que utiliza métodos dos painéis, seguindo a teoria potencial de hidrodinâmica, para avaliar o movimento de balanço e uma embarcação sem velocidade de avanço.

Segundo Neto (2023), forças externas provocadas por ondas, ventos e correnteza marítima ou de rios, contribuem para que o navio se movimente, tanto no plano horizontal, quanto no plano vertical. Desta maneira, o navio possui 6 movimentos desacoplados possíveis, os quais podem ser translacionais ou rotacionais.

Conforme Carvalho (2021), os movimentos de translação do navio são conhecidos como avanço (*surge*), caimento (*sway*) e arfagem (*heave*), enquanto os movimentos de rotação são denominados balanço (*roll*), caturro (*pitch*), e cabeceio (*yaw*), como pode ser observado na Figura 20. Os movimentos de *heave*, *pitch* e *yaw*, estão diretamente ligados à flutuabilidade da embarcação.

Figura 20. Representação dos seis graus de liberdade de uma embarcação.



Fonte: Autoria própria.

A dinâmica de uma embarcação pode ser modelada inicialmente pela equação de movimento de um corpo rígido, fundamentada na segunda Lei de Newton, aplicada de forma acoplada ou desacoplada nos 6 graus de liberdade (JOURNÉE; MASSIE, 2001; SALVESEN;

TUCK; FALTINSEN, 1970; SHENG et al., 2022). Quando se leva em consideração um único grau de liberdade, essa lei pode ser expressa pela Equação 7.

$$(m + \alpha(\omega))\ddot{x} + b(\omega)\dot{x} + cx = F(t) \quad (7)$$

onde:

- \ddot{x} , \dot{x} e x → são aceleração, velocidade e deslocamento, respectivamente;
- m e $\alpha(\omega)$ → são a massa do navio e a massa adicional hidrodinâmica e ω é a frequência de oscilação da embarcação;
- $b(\omega)$ → é o coeficiente de amortecimento, dependente da frequência;
- c → rigidez do sistema;
- $F(t)$ → força (ou momento) externa que age sobre o corpo variando no tempo.

Sendo assim, o movimento de uma embarcação pode ser modelado como um sistema massa-mola-amortecedor, variando conforme a frequência e forças advindas das ondas, ventos e correntezas (JOURNÉE; MASSIE, 2001).

Contudo, dar-se atenção para a força externa proveniente das ondas é importante, pois de acordo com Americo (2009), sua intensidade e impacto tem fortes ligações nos movimentos de balanço do navio. Os movimentos das ondas podem ser considerados como funções senoidais, podendo gerar no navio acelerações angulares. Quando as ondas têm uma frequência similar à frequência natural do navio, em algum grau de liberdade específico, podem formar um sincronismo não desejável. Quando o período da onda e o período natural de balanço do navio são semelhantes, pode acontecer um aumento da amplitude do movimento devido à condição de ressonância proveniente desta situação.

Conforme Maki et al. (2011), existe uma situação crítica denominada rolagem paramétrica, definida como um movimento de balanço seguindo padrões não lineares (difíceis de prever sob a ótica da dinâmica linear), que afetam o braço de endireitamento da embarcação. Esse tipo de fenômeno contribuiu na ocorrência de alguns acidentes que, conseqüentemente, motivaram a criação de critérios de estabilidade adotados pela Organização Marítima Internacional (IMO). Esses critérios foram necessários devido à frequência com que as embarcações são expostas ao fenômeno, principalmente, quando em manobras de atracação ou desatracação dos portos.

3.4. Conceitos básicos da teoria de escoamento potencial

As análises de movimento realizadas no presente trabalho estão baseadas na teoria do escoamento potencial de hidrodinâmica. Sheng et al. (2022) descreveram que a teoria de escoamento potencial leva considerações três fatores, na qual o escoamento analisado é irrotacional, invíscido e incompressível, logo trata-se de um escoamento ideal.

Fontes (2014) descreve aplicações da teoria potencial na dinâmica de embarcações, onde a teoria de faixas proposta por Salvesen et al. (1970) é bem difundida na Engenharia Naval, pois permite levar em consideração uma velocidade de avanço da embarcação, por meio de resolução de problemas de interação hidrodinâmica entre seções bidimensionais. No entanto, outras técnicas de modelagem de movimentos de corpos flutuantes, usando a teoria potencial, são conhecidas como métodos dos painéis e estão disponíveis em softwares como *Nemoh* (PENALBA; KELLY; RINGWOOD, 2017), *Wamit* (LEE, 1995), *Ansys Aqwa* (ANSYS, 2024a), entre outros.

Sheng et al. (2022) apresentaram comparações entre resultados obtidos por meio de diferentes softwares baseados em métodos de painéis, propondo um resumo da teoria potencial na qual eles estão baseados, levando em consideração o manual do software *Wamit* (WAMIT, 2023) e outras fontes como base. Segundo Sheng et al. (2022), as funções potenciais podem ser expressas conforme a Equação 8.

$$\phi(\vec{X}, t) = \text{Re}[\varphi(\vec{X})e^{i\omega t}] \quad (8)$$

onde:

- $\phi \rightarrow$ é a função de velocidade potencial instantânea;
- $\vec{X} \rightarrow$ é o vetor de posição
- $\omega \rightarrow$ é a frequência do sistema dinâmico;
- $t \rightarrow$ é o tempo de ocorrência;

Essa equação governante demonstra a conexão que a amplitude complexa e a função potencial possuem em relação ao espaço. A equação de Laplace permite modelar um escoamento potencial incompressível:

$$\nabla^2 \phi = \nabla^2 \varphi = 0 \quad (9)$$

Nesse contexto, para aplicações de movimento de embarcações, apenas a parte complexa da função governante é solucionada, sendo que essa função potencial no domínio da frequência depende somente da frequência de incidência das ondas junto a estrutura flutuante.

Com as condições de contorno que envolvem a interação das ondas com a estrutura flutuante satisfeitas, a solução da equação de Laplace também deve considerar a condição de contorno de impermeabilidade. Nessa condição, as componentes vetoriais do escoamento e do deslocamento do navio, quando estão na direção normal a superfície do corpo submerso são as mesmas. Isto é, as componentes do escoamento são tangenciais à superfície que, por sua vez, não pode ser penetrada. Logo, a componente da velocidade normal à superfície é igual a zero,

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} - \vec{V} \cdot \vec{n} = 0 \quad (10)$$

onde:

- $\vec{V} \rightarrow$ é o vetor velocidade do movimento do corpo;
- $\vec{n} \rightarrow$ é o vetor unitário normal a superfície do casco submerso do navio.

O atendimento das condições descritas anteriormente, permite solucionar a parte complexa no domínio da frequência da equação governante, por conta da linearização, que permite eliminar o tempo como fator e, sendo assim, permite também a utilização do método de superposição.

Dessa maneira, a função potencial de análise da interação do casco submerso do navio e das ondas podem ser divididas em outras duas funções potenciais (Equação 11) de radiação e de difração. A primeira explica a formação de outras ondas após excitação da estrutura flutuante, enquanto a segunda aborda a questão do momento que uma onda se choca em uma estrutura flutuante inicialmente estacionária, que difratará em sentidos contrários ou conforme a superfície a onda.

$$\varphi = \varphi_R + \varphi_D \quad (11)$$

onde:

- $\varphi_R \rightarrow$ função do potencial de radiação;
- $\varphi_D \rightarrow$ função do potencial de difração.

3.5. Operador de Amplitude de Resposta – RAO

A determinação do comportamento de um sistema dinâmico sob ação de ondas pode ser analisada através dos operadores de amplitude de respostas (descritos a partir de agora como RAO – *Response Amplitude Operators*). Os RAOs representam a resposta, em cada grau de liberdade do movimento da embarcação, em relação à amplitude unitária da onda. Os movimentos representados pelos RAO estão em função da frequência de encontro da onda com a embarcação.

Para isso, o estado estacionário do sistema é assumido, sendo que o resultado da interação entre as ondas e a estrutura flutuante é o produto entre o RAO e a característica da onda incidente no corpo. Desta maneira, pelo cálculo da equação massa-mola-amortecedor, quando analisadas várias frequências diferentes, tem-se a noção do comportamento da estrutura naval em diversas situações.

Para o cálculo da dinâmica de um sistema naval rígido, excitado no domínio da frequência, a 2ª Lei de Newton é obedecida, na qual considerando todos os graus de liberdade do sistema pode ser reescrita conforme a Equação 12:

$$\sum_{k=1}^6 \{-\omega^2 [M_{jk} + A_{jk}(\omega)] + i\omega B_{jk}(\omega) + C_{jk}\} \xi_k(\omega) = F_j(\omega) \quad (12)$$

onde:

- M_{jk} → é a matriz de massas e inércias da estrutura flutuante;
- C_{jk} → é a matriz de restauração da estrutura flutuante;
- A_{jk} → é a matriz de massa adicional;
- B_{jk} → é a matriz de coeficiente de radiação.
- $F_j(\omega)$ → é a amplitude complexa em função da frequência da força de excitação da onda sobre a estrutura flutuante.
- $\xi_k(\omega)$ → representa os seis graus de liberdade, os movimentos possíveis na dinâmica do sistema naval.

Dessa maneira, a resposta do sistema do movimento a uma onda com uma amplitude normalizada, pode ser reescrita conforme a Equação 13. Cabe mencionar que a análise de um sistema dinâmico naval pode ser feita avaliando os graus de liberdade de forma acoplada ou

desacoplada. Assim, vale a pena consultar os manuais dos softwares utilizados para verificar o tipo de acoplamento na obtenção dos RAOs.

$$RAO = \frac{\xi_k}{A} = \frac{F_j(\omega)}{\{C_{jk} - [M_{jk} + A_{jk}(\omega)]\omega^2 + iB_{jk}(\omega)\omega\}A} \quad (13)$$

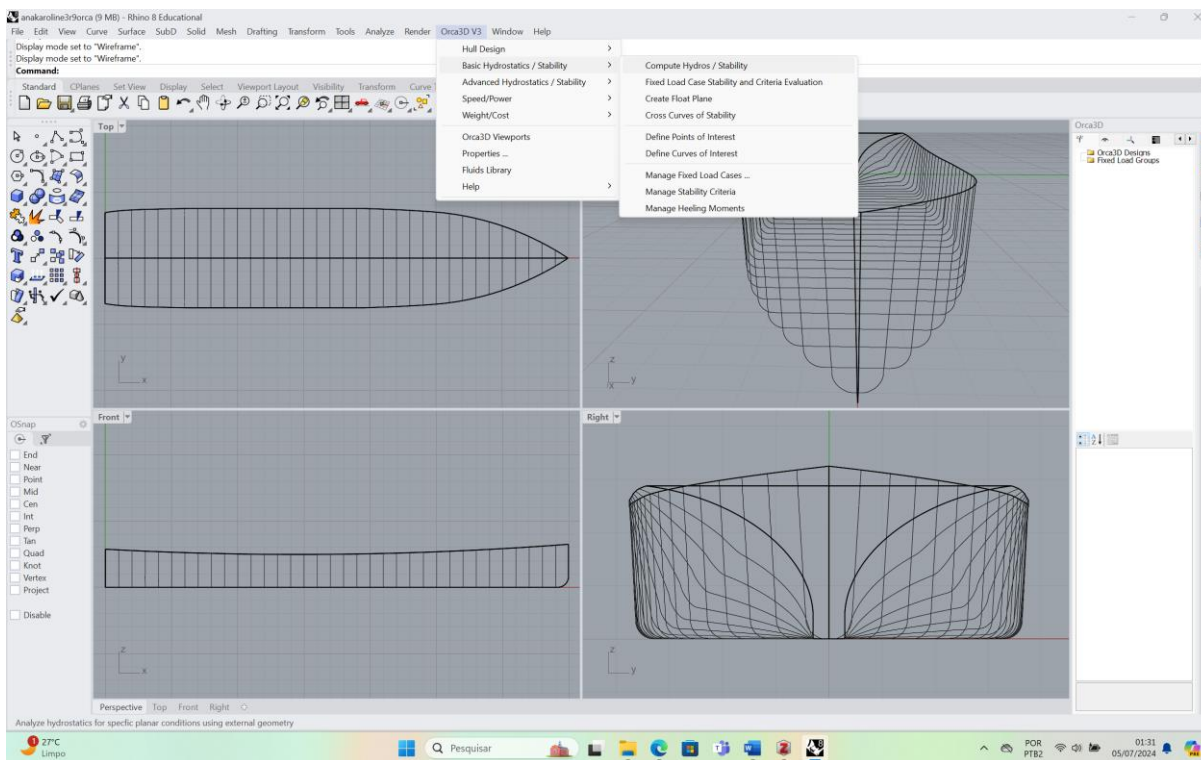
3.6. Descrição dos softwares utilizados para análise

3.6.1. Softwares *Rhinoceros*[®] e *Orca3D*[®]

O *Rhinoceros*[®] é um software de desenho assistido por computador para modelagem tridimensional (3D), que tem capacidade de criar, editar e analisar com flexibilidade, exatidão e rapidez qualquer tipo de forma (MCNEEL, 2021). Para isso, o *Rhinoceros*[®] utiliza superfícies NURBS, que possuem capacidade de representar com facilidade e precisão geometrias bidimensionais (2D), como círculos, arcos, curvas etc., em um espaço 3D. Por conta dessa grande flexibilidade, ele permite a sua utilização em qualquer processo até mesmo em animações 3D.

Somando-se ao *Rhinoceros*[®], o *Orca3D*[®] *Marine Design for Rhinoceros* (Figura 21) é uma ferramenta plug-in do *Rhinoceros*[®], que também utiliza as curvas e superfícies NURBS, mas é voltado para análises de Engenharia Naval. Dessa maneira, soma-se aos vários recursos já existentes no *Rhinoceros*[®] para criação e edição de superfícies. Além disso, permite assistência de modelagem de casco que utiliza parâmetros para formar novos cascos, programação que permite identificar rapidamente parâmetros navais como linha d'água, balizas e outros, assim como flexibilidade instantânea de atualização destes mesmos parâmetros conforme varia a superfície.

Figura 21. Interface do *Rhinoceros*[®] com a inicialização do plug-in *Orca3D*[®].



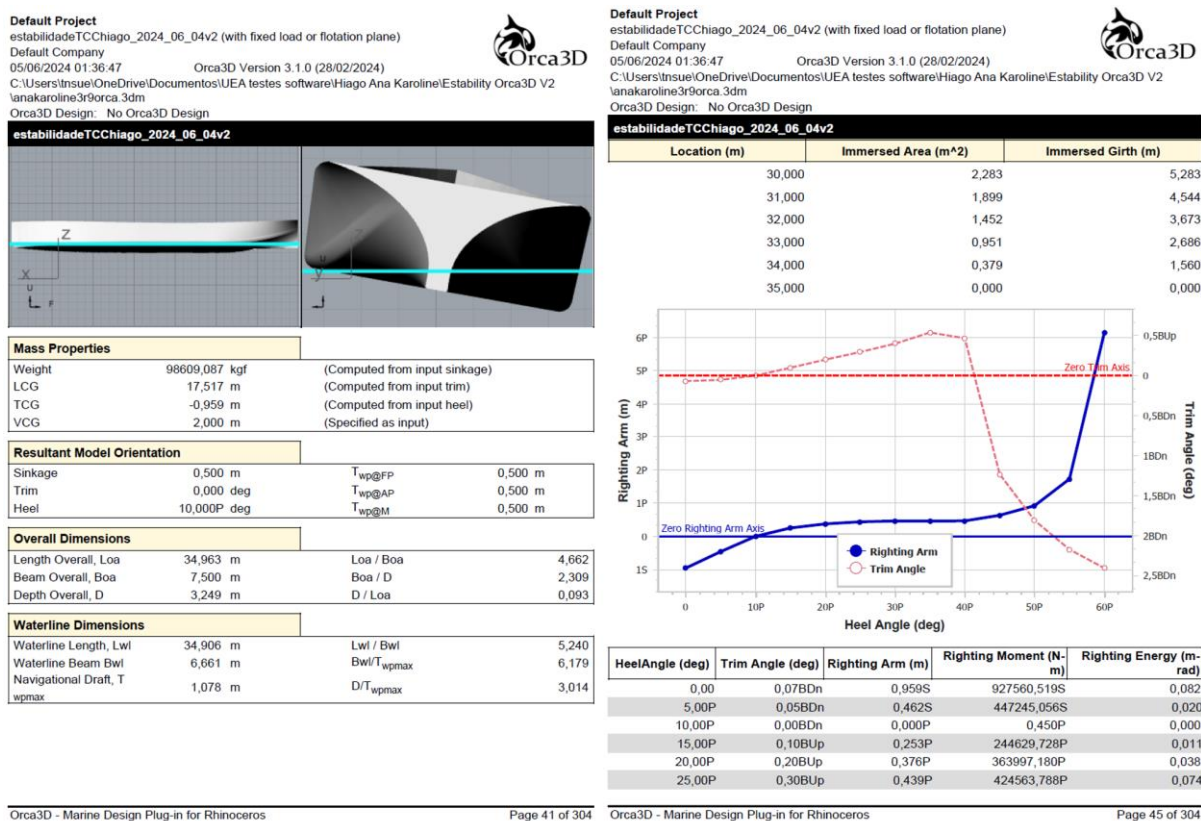
Fonte: *Rhinoceros*[®] versão 8 e *Orca3D*[®] versão 3.

A versão acadêmica do *Orca3D*[®] permite fazer análises hidrostáticas básicas, apenas com metade do modelo, na qual, é necessário que a força normal à superfície submersa seja apontada para fora do casco, uma vez que se esse requisito não for atendido, os volumes serão negativos.

As análises hidrostáticas feitas pelo *Orca3D*[®] (Figura 21) retornam parâmetros de dimensões principais, volumes, coeficientes de formas do casco, posições de centros de forças atuantes. Por consequência, consegue-se definir, pelo plano de flutuação adotado, a altura metacêntrica, momentos de inercia transversal e longitudinal e as curvas de estabilidade GZ, de acordo com os dados fornecidos.

Como o *Orca3D*[®] suporta a variação na distribuição de cargas como dados de entrada, o software retorna relatórios detalhados de análise hidrostática (Figura 22), com os dados conforme à condição de flutuação, e de estabilidade, calculando os braços de endireitamento, ângulo de alagamento, cálculos de borda livre e momentos, que podem ser exportados em diversos formatos para análises mais detalhadas.

Figura 22. Exemplo de algumas páginas dos relatórios proporcionados pelo software *Orca3D*[®].



Fonte: Versão acadêmica do software *Orca3D*[®] versão 3.

3.6.2. O software *Ansys Aqwa*[®]

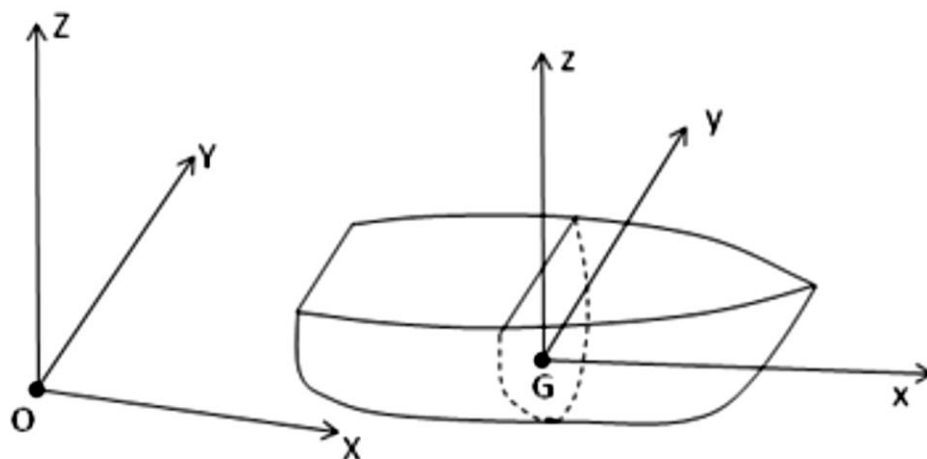
O software *Ansys*[®] é um software comercial de simulação computacional, baseada em métodos numéricos, muito conhecido na Engenharia. O software possui diversos módulos para a análise de vários problemas físicos, sendo dividido em módulos de análise mecânica (*Ansys*[®] *Mechanical*) e fluidodinâmica computacional (*Ansys*[®] *CFD*). Dentro do conjunto *Ansys*[®] *Mechanical*, está o *Ansys*[®] *Aqwa*, o qual possui os submódulos *Hydrodynamic Diffraction* e *Hydrodynamic Response*.

O *Ansys*[®] *Aqwa* é um software de análise de estruturas offshore e marítimas, que tem por base a utilização da teoria do escoamento potencial para cálculos e análises envolvendo estruturas flutuantes. O módulo *Hydrodynamic Diffraction* permite a utilização do método dos painéis da teoria potencial para avaliar a resposta de uma estrutura flutuante no domínio da frequência. Na modelagem no domínio da frequência se leva em consideração a influência de ondas regulares e outros tipos de ondas, para análise do comportamento dinâmico da estrutura. A utilização da teoria potencial, permite soluções práticas com baixo computacional em

comparação com software de modelagem de escoamentos viscosos. O software permite soluções de características hidrodinâmicas básicas, incluindo campos de pressão no casco, elevações de onda, movimentos da embarcação, cálculo de coeficientes hidrodinâmicos, entre outras variáveis no domínio da frequência.

É importante considerar a orientação dos sistemas coordenados requeridos pelo *Ansys® Aqwa*, pois a definição do calado, posicionamento do centro de massa, bem como as forças nas estruturas e os seus movimentos, serão dados com relação a esses sistemas. O principal sistema de coordenadas tem por base a regra da mão direita, que consiste em um plano horizontal formado pelos eixos X e Y, complementados pelo eixo Z que é apontado para cima. Nesse contexto, o *Ansys® Aqwa* adota como a origem do sistema de eixos de referências com origem na superfície livre média do fluido, conforme a Figura 23. Sugere-se que o sistema local xyz localizado no corpo, seja posicionado no seu centro de gravidade.

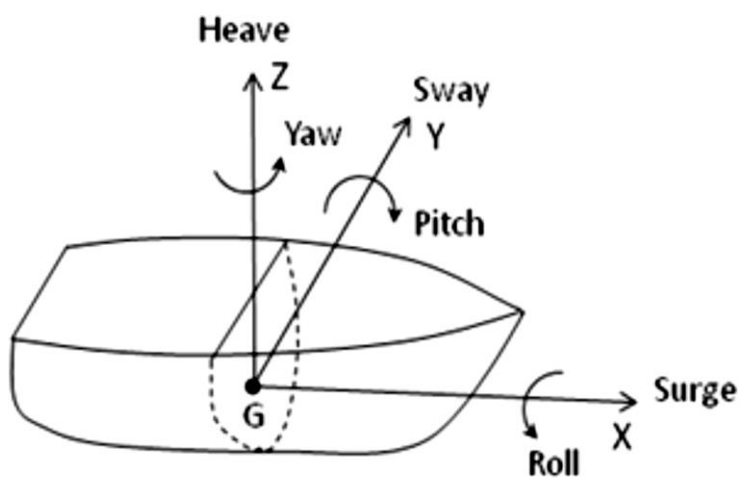
Figura 23. Exemplo da orientação de sistemas coordenados definidos no software *Ansys® Aqwa*.



Fonte: Ansys (2024b).

Segundo a Figura 23, os movimentos de translação do centro de gravidade do sistema naval, *surge*, *sway* e *heave*, são denotados pelas coordenadas sobre o eixo X, sobre o eixo Y, e sobre o eixo Z, respectivamente. Por outro lado, os movimentos de rotação em torno do centro de gravidade são denotados no software como *roll* (em torno ao eixo X), *pitch* (em torno ao eixo Y), e *yaw* (em torno ao eixo Z), conforme a Figura 24.

Figura 24. Definição dos movimentos da embarcação no software *Ansys Aqwa*[®].



Fonte: Ansys (2024b).

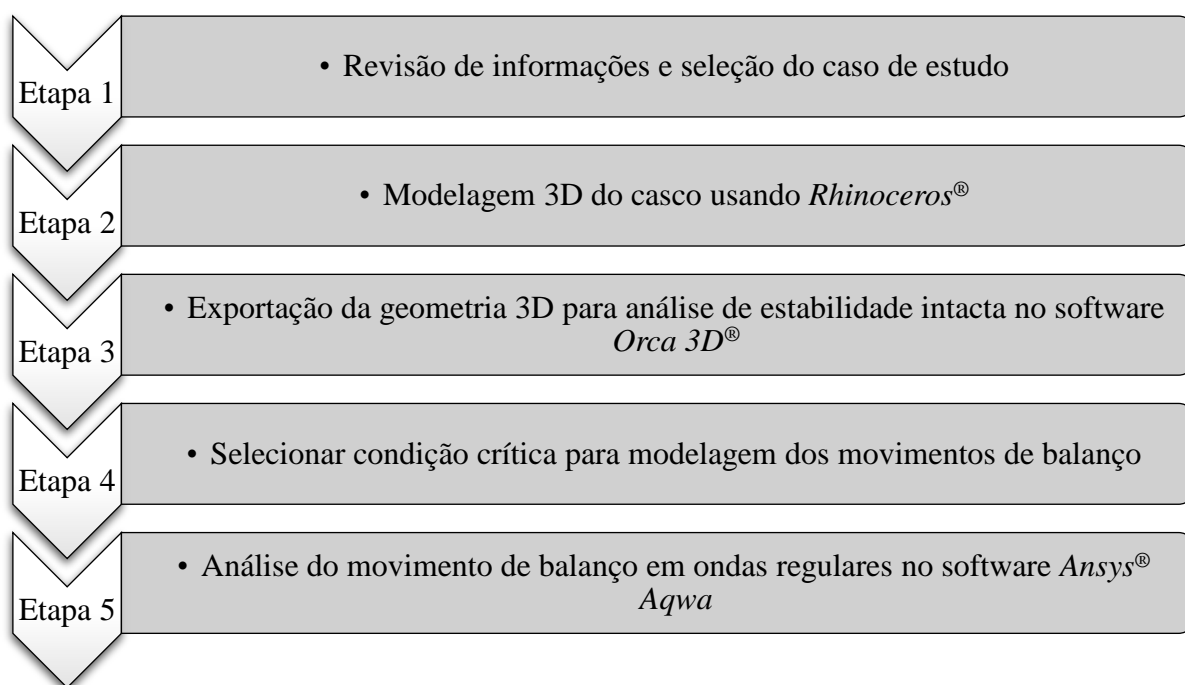
A partir da definição dos parâmetros de coordenadas e da utilização das teorias de ondas regulares e de escoamento potencial, o software pode analisar os movimentos do casco, sendo comum avaliar os Operadores de Amplitude e Resposta obtidos nas análises.

4. METODOLOGIA

4.1. Diagrama de fluxo da metodologia aplicada

A análise técnica apresentada neste trabalho é feita por meio de cinco etapas, que incluem a revisão de informações e a seleção do caso de estudo de embarcação naufragada, a modelagem do seu casco, e o estudo da sua estabilidade e movimentos. A Figura 25 resume cada uma das etapas que foram consideradas, as quais são descritas nos parágrafos seguintes.

Figura 25. Etapas principais do estudo.



Fonte: Elaboração própria.

Etapa 1: A revisão de acidentes com embarcações regionais, se deu através de busca na literatura disponível, fontes jornalísticas e dados oficiais da Marinha do Brasil. Foram coletados, quando possível, dados importantes que compuseram os fatos da navegação, como número de vítimas, local, data e hora, assim como as condições climáticas e circunstâncias que envolveram os acidentes. Após a revisão, um acidente (naufrágio) dentre os revisados foi selecionado, pela gravidade, circunstâncias e importância no contexto atual.

Etapa 2: A geometria do caso de estudo selecionado foi a base para a modelagem tridimensional da superfície do seu casco, que mais tarde seria analisada sob várias hipóteses de variações de parâmetros, que ocasionalmente pudessem ocorrer durante as circunstâncias

supostas no momento do acidente. A modelagem do casco foi realizada usando uma versão acadêmica de software de desenho assistido por computador (CAD), *Rhinoceros*[®] (*Rhino 8*), a partir de um croqui bidimensional do navio estudado.

Etapa 3: Após obter uma modelagem 3D inspirada no casco da embarcação do caso de estudo selecionado (casco parecido), a sua geometria foi utilizada em uma versão acadêmica do software *Orca 3D*[®] (*Marine Design for Rhinoceros*), versão 3, que é um *plugin* instalado dentro do mesmo software *Rhinoceros*[®]. O software usado permitiu o cálculo de propriedades hidrostáticas e de estabilidade. Foram utilizados os relatórios do software para as análises, os quais mostram gráficos, tabelas e dados de acordo com os parâmetros desejados. Cabe mencionar que, embora foram gerados vários relatórios para o presente estudo, os dados foram analisados para proporcionar informações mais resumidas.

Etapa 4: Diante dos dados entregues pelo *Orca 3D*[®], uma análise comparativa entre as variações da posição do centro de gravidade e do calado foi feita observando as alterações nos parâmetros hidrostáticos de braço de endireitamento GM e curva de estabilidade GZ do modelo.

Etapa 5: Após a análise feita na etapa anterior, foi selecionada uma das situações mais críticas e a situação mais semelhante ao acidente inspirador do caso de estudo, na qual a geometria inicial feita no *Rhinoceros*[®] foi exportada como superfície única para análise das interações de ondas regulares no software *Ansys Aqwa*[®]. Nesse software foram calculados os Operadores de Resposta de Amplitude do movimento de balanço, identificando a frequência de ressonância. Com essa frequência, simulou-se o movimento de balanço no domínio do tempo para ondas regulares com diferentes amplitudes, sem exceder 1 m, avaliando o deslocamento angular da embarcação sob a condição de onda regular mais crítica.

4.2. Estudo de caso

Para tentar entender condições de estabilidade e movimentos de embarcações que naufragaram na região amazônica, foi selecionado um caso de estudo representativo, para realizar uma análise técnica usando conhecimentos de Engenharia Naval.

Foi escolhido o naufrágio do N/M Anna Karoline III, por conta do impacto na região. As condições que contornam o acidente, não são raras de acontecer na navegação da região, uma vez que a fiscalização por conta das autoridades marítimas apresenta desafios, devido à grande demanda e as grandes extensões da malha hidroviária da região amazônica, que

impactam negativamente na logística dessas operações. Trata-se de uma embarcação certificada e com décadas de operação no ramo de transporte de cargas e passageiros, que naufragou relativamente a pouco tempo, em 2020. Tornou-se importante analisar esse tipo de embarcação, que ainda é comum atualmente, sendo importante contribuir, de maneira preliminar, na compreensão dos motivos que causaram a perda de estabilidade da embarcação.

4.2.1. Modelagem 3D do casco do caso de estudo

É importante salientar que para as análises, a concepção do casco de uma embarcação permite determinar parâmetros hidrostáticos importantes, devendo levar em consideração os possíveis calados e posições do centro de gravidade. Para a modelagem da embarcação foram pesquisadas as dimensões principais do navio Anna Karoline III. A Tabela 2 apresenta esses dados coletados no portal G1 com base nos dados oficiais da ANTAQ da época do acidente.

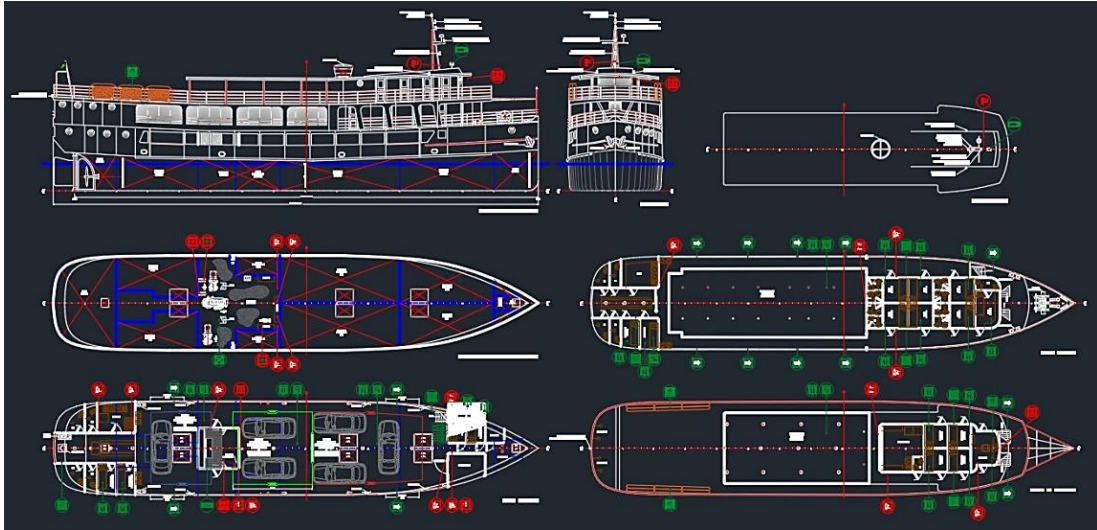
Tabela 2: Dados da embarcação Anna Karoline III

Linha autorizada	Santarém – Manaus - Santarém
Comprimento Total	38,25 metros
Boca	7,30 metros
Pontal	3,25 metros
Calado de Projeto	2,10 metros
Lotação de Passageiros	242 passageiros, sem adição de carga
Capacidade Máxima de Carga	89 toneladas

Fonte: Globo (2020).

A modelagem do casco foi feita no software de *Rhinoceros*®, tendo como base os parâmetros da Tabela 1 e projetos de arranjo geral, disponibilizados pela empresa RGF Tecnologia Naval Ltda na extensão *dwg* (Figura 26). As informações possibilitaram uma modelagem 3D que assemelhou o casco do navio estudado.

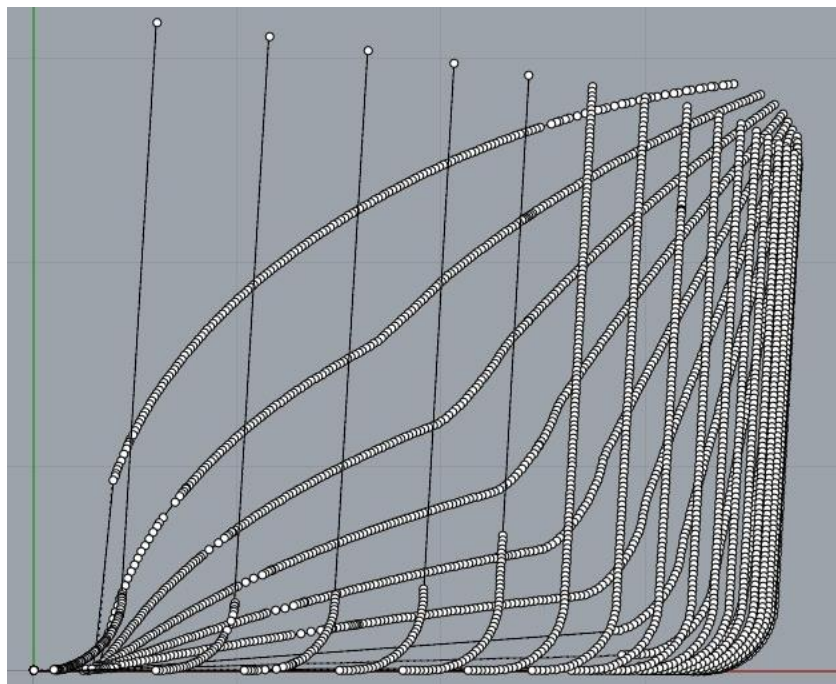
Figura 26. Arranjo Geral do navio Anna Karoline III.



Fonte: Cortesia de RGF Tecnologia Naval Ltda.

Apesar da dificuldade em não possuir o plano de linhas da embarcação, que comprometeu principalmente a modelagem das regiões da popa do navio, as linhas foram traçadas e interpoladas por meio da ferramenta *Polyline*. Após esse processo, em torno da linha de centro, foram utilizados outros comandos tais como, *Copy*, *Move* e *Trim*, que viabilizam a criação de balizas, conforme o comprimento do casco; baseando-se na vista superior como base da largura do casco (Figura 27).

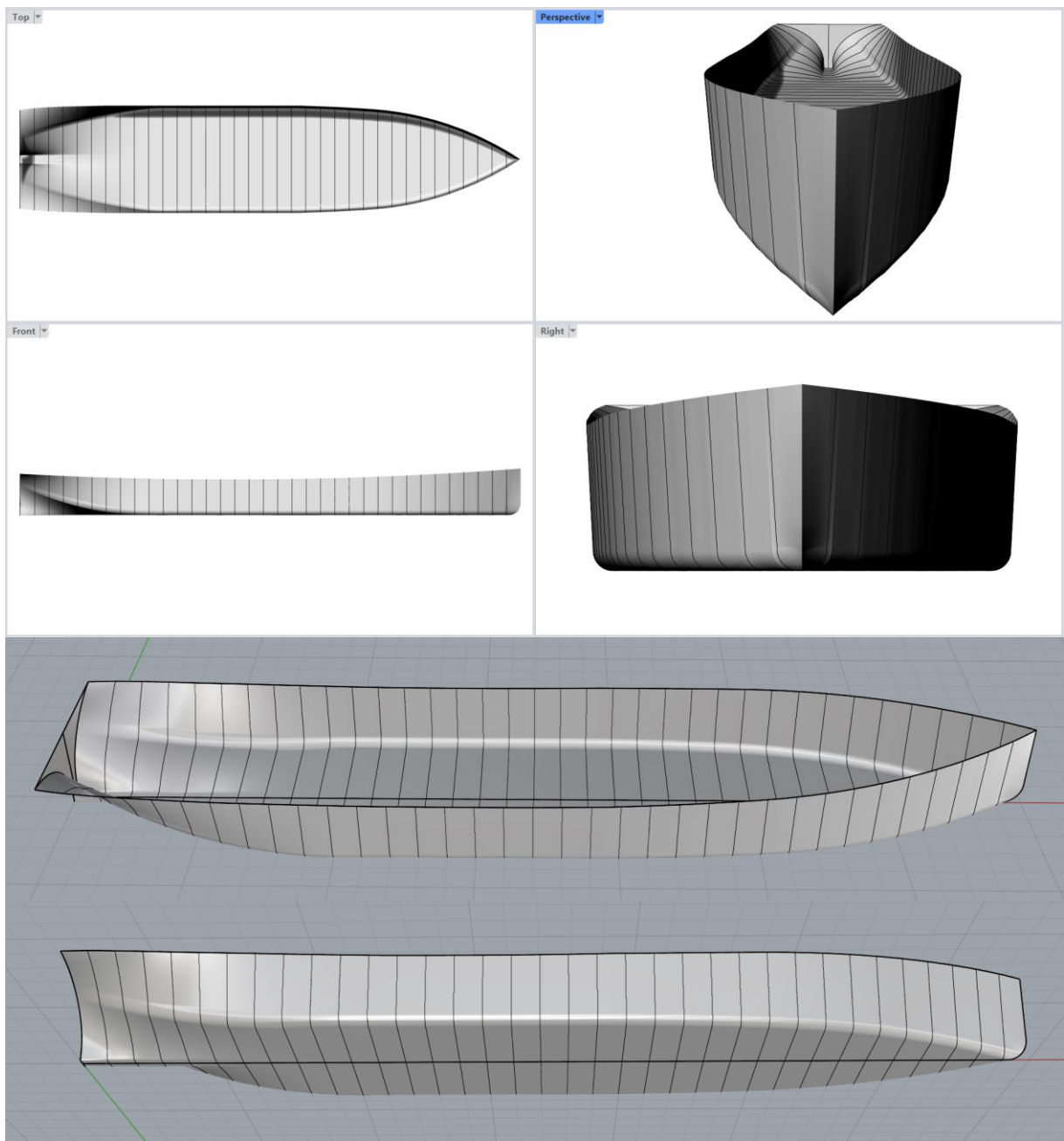
Figura 27. Balizas do casco modelado.



Fonte: Autoria própria usando *Rhinoceros*®.

Após a criação das balizas, foram utilizadas diversas ferramentas disponíveis no software para a criação de superfícies como *Loft*, *Sweep*, *Patch* e *Mergesrf*. Em esta etapa, buscou-se ser o mais fiel às representações do casco do caso de estudo, criando várias superfícies diferentes entre as balizas e unindo-as posteriormente através de comandos como o *Join*, resultando no modelo geométrico do casco do navio conforme a Figura 28.

Figura 28. Casco modelado no *Rhinceros*®.



Fonte: Autoria própria usando *Rhinceros*®.

Com a geometria tridimensional finalizada e a aplicação da ferramenta *Join*, que resultou em uma única superfície e, por consequência, em um objeto, a próxima etapa foi a de exportação do software *Rhinoceros*[®] para os softwares de análise. Alguns softwares, como o *Ansys*[®], possuem requisitos para que as geometrias possam ser reconhecidas, garantindo a confiabilidade das análises.

Para o *Orca3D*[®], não ocorre uma exportação, pois ele é um plug-in dentro do próprio *Rhinoceros*[®], focado no design e análises navais, que praticamente consegue analisar qualquer estrutura desde que a parte submersa esteja completamente vedada. Entretanto, para o *Ansys*[®] *Aqwa*, a geometria foi exportada no formato *.obj* que é lido pelo software. Quando uma geometria é importada no *Ansys*[®] *Aqwa*, é recomendável que esta tenha sido exportada como um objeto único, daí a importância da utilização da ferramenta *Join* de união de superfícies. Cabe mencionar que existem opções para consertar as geometrias dentro do próprio *Ansys*[®]; porém, essas ferramentas não foram abordadas no presente trabalho.

4.2.2. Análise de estabilidade intacta no *Orca3D*[®]

Para as análises de estabilidade dentro do *Orca3D*[®], levou-se em consideração o fato da embarcação estar supercarregada, com pouca borda-livre, como foi visto no calado de projeto na Figura 26. Nesse contexto, o software permite a inserção de dados como o VCG (posição vertical do centro de gravidade), TCG (posição transversal do centro de gravidade) e o calado. Os parâmetros escolhidos para o caso de estudo são apresentados na Tabela 3, na qual são mostradas todas as condições para 3 alturas diferentes de calado e de VCG, com o TCG fixado em zero. As condições de calado de 0,5 m, 1,0 m, 1,5m, e 2,0, são mostradas nas Figuras 29a, 29b, 29c, e 29d, respectivamente, assim como as variações de calados no casco da embarcação proporcionadas pelo *Orca3D*[®].

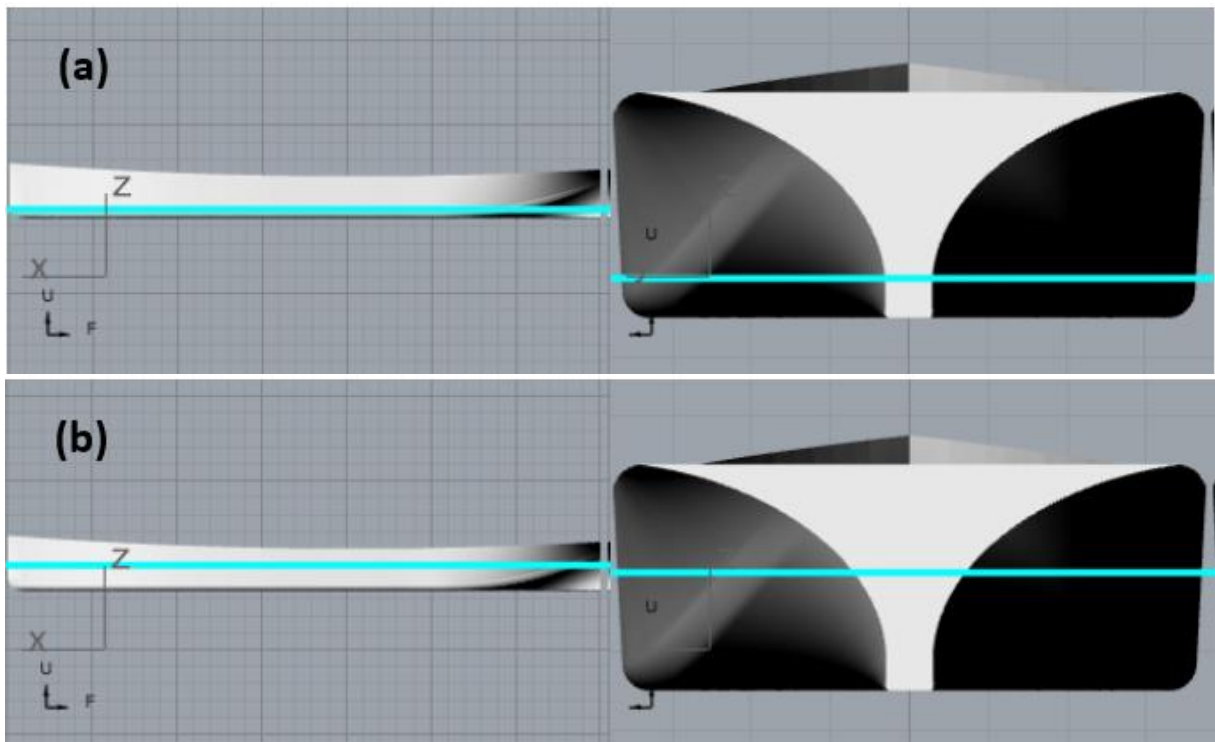
É possível que as condições J, K e L estejam próximas da condição em que a embarcação se encontrava no momento da partida e do acidente. Entretanto é válido levar em consideração as demais condições de calado, pois essas condições seriam se a embarcação estivesse dentro de sua capacidade máxima de carregamento ou mesmo apenas com seu peso leve.

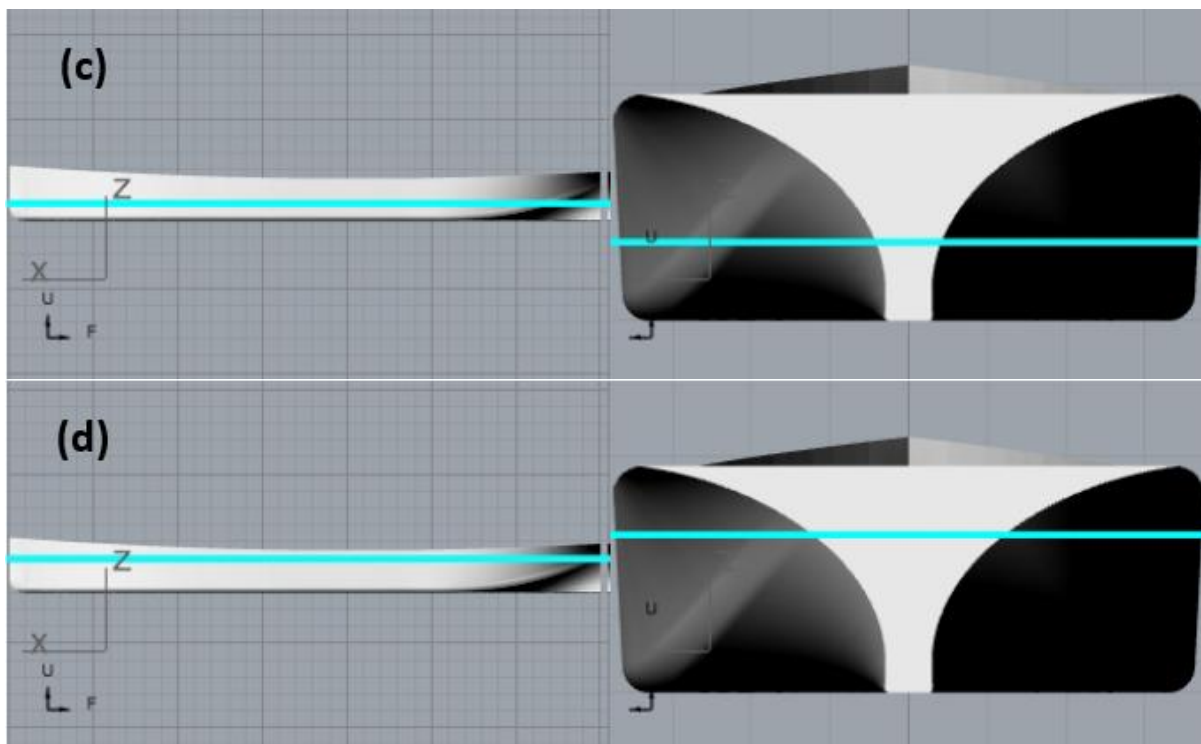
Tabela 3. Condições de posição de VCG e calado consideradas na análise de estabilidade no software *Orca3D*®.

Condição	VCG (m)	Calado (m)
A	1,0	0,5
B	2,0	0,5
C	3,0	0,5
D	1,0	1,0
E	2,0	1,0
F	3,0	1,0
G	1,0	1,5
H	2,0	1,5
I	3,0	1,5
J	1,0	2,0
K	2,0	2,0
L	3,0	2,0

Fonte: Autoria própria.

Figura 29. Variação do calado da embarcação. As imagens representam as seguintes condições da Tabela 3: (a) A, B e C. (b) D, E e F. (c) G, H e I. (d) J, K e L.





Fonte: Orca3D®.

4.2.3. Análise do movimento da embarcação no software Ansys® Aqwa

Para o caso de estudo, o nível de calado para a situação do naufrágio pode ter tido impacto negativo na estabilidade intacta da embarcação, somando-se ao fator de negligência por parte da tripulação e das autoridades que deram o aval para a viagem. Então, a condição mais crítica encontrada na análise de estabilidade (posição do CG e calado; sob as hipóteses do presente trabalho), foi considerada para avaliar a sua resposta em ondas. A intenção é identificar a onda regular que pode causar a maior ressonância do movimento de balanço nessa condição, verificando o efeito de várias amplitudes de onda, as quais não superaram 1,0 m de amplitude. As amplitudes foram assumidas como 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, e 0,7 m, tentando simular possíveis ocorrências durante alguma condição ambiental adversa. Cabe ressaltar que essas amplitudes foram assumidas pelo autor, pois nos rios da Amazônia as ondas não chegam a ser como as que acontecem no mar aberto e, no conhecimento do autor, não existem dados públicos de medições das elevações das ondas causadas por temporais na região amazônica.

Para realizar as análises dos movimentos da embarcação foi utilizada a versão acadêmica do software Ansys® Aqwa (licença do tipo *Academic Research Mechanical and CFD* 2024 R1), especificamente no módulo *Hydrodynamic Diffraction*, que permite realizar análises da resposta em ondas no domínio da frequência. A geometria foi importada no módulo *Design*

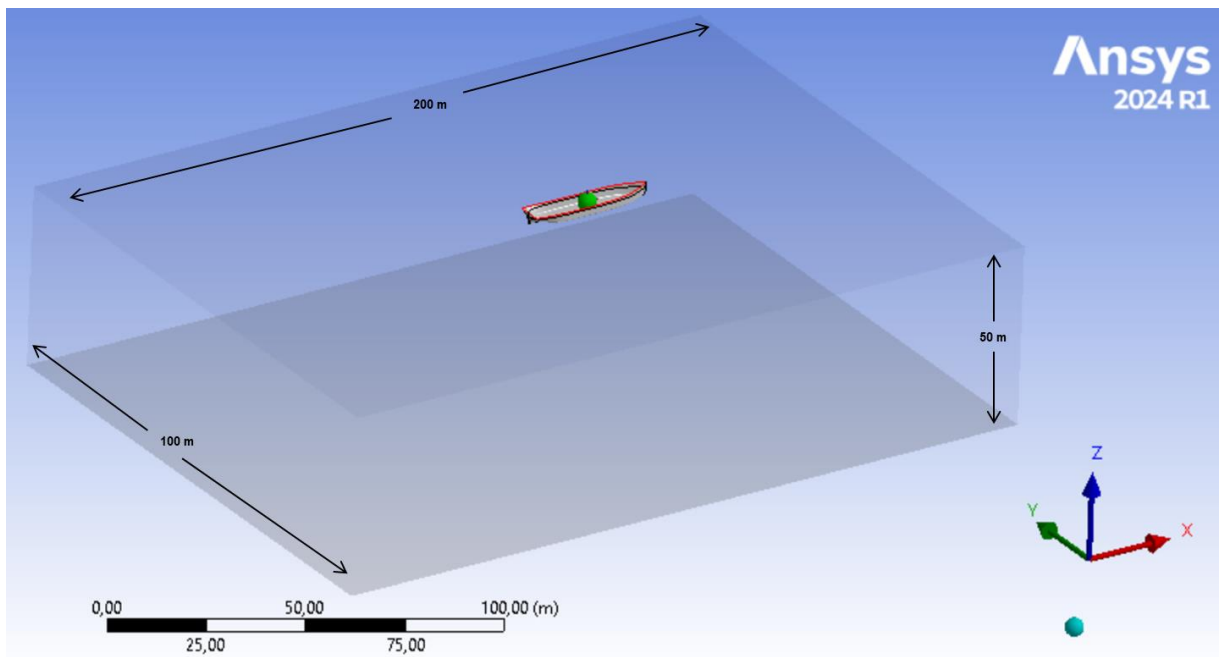
Modeler do Ansys®, onde foi configurado o calado da embarcação. Uma vez definido o calado, foi aberto o módulo *Hydrodynamic Diffraction* para configurar o domínio computacional e a malha para as análises. Os parâmetros utilizados no domínio computacional são apresentados na Tabela 4 e na Figura 30.

Tabela 4. Domínio computacional da análise.

Descrição	Magnitude	Unidade
Profundidade da água	50	m
Densidade do fluido	1.000	kg/m ³
Gravidade	9,80665	m/s ²
Domínio eixo X	200	m
Domínio eixo Y	150	m

Fonte: Autoria própria.

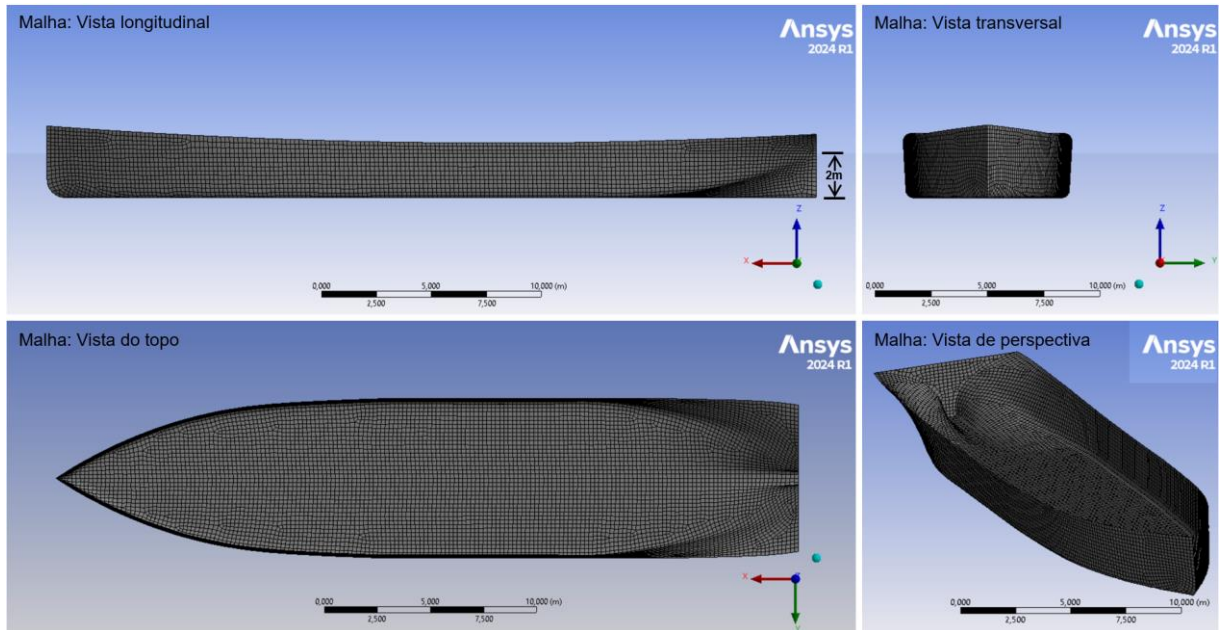
Figura 30. Domínio computacional da simulação.



Fonte: Ansys® 2024 R1.

Para a análise, foi considerada uma malha cujo número de elementos se mantivesse dentro dos permitidos pelo software. Dessa maneira optou-se por utilizar uma malha fina, gerada de maneira automática, de 0,20 metros por painel, resultando em um total de 10.534 nós distribuídos entre 10.347 elementos constituintes da malha global, conforme pode ser observado na Figura 31.

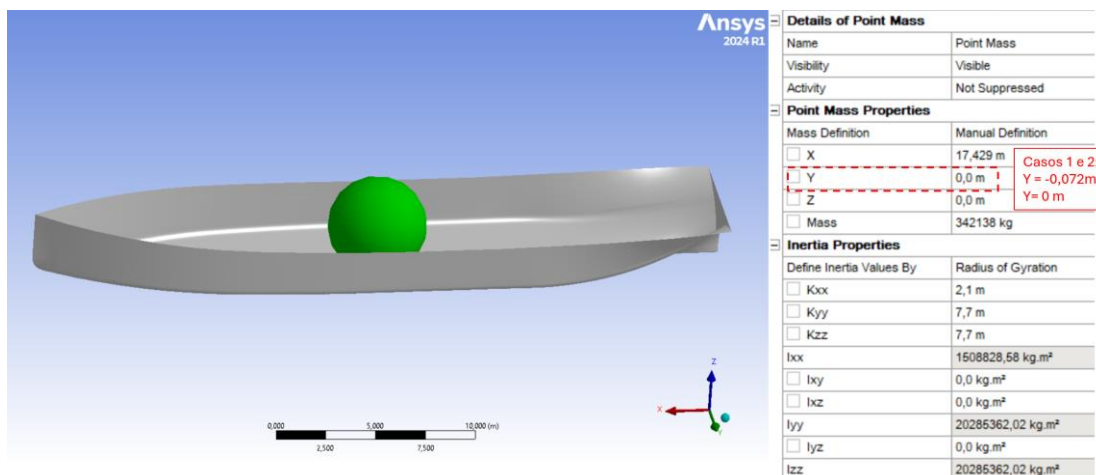
Figura 31. Disposição final da malha escolhida.



Fonte: Ansys® 2024 R1.

Uma vez que a malha foi definida, foi necessário especificar as propriedades de massa e inércia da embarcação. A determinação do ponto de concentração da massa do objeto de estudo no Ansys® Aqwa (Figura 32), seguiu por base os parâmetros obtidos no Orca3D®, na qual a coordenada longitudinal ao longo do eixo X é seu LCG de 17,429 metros. Considerou-se a posição de Y igual a zero, como se a carga estivesse sobre a linha de centro da embarcação (caso 1) e a posição de Y igual a 0,072 metros para boreste (caso 2), que representa o TCG obtido para uma inclinação de 20°. No eixo Z, considerou-se a altura da linha d'água, onde o calado é de 2,0 metros.

Figura 32. Configuração da posição do centro de gravidade no software Ansys®.



Fonte: Ansys® 2024 R1.

As propriedades inerciais do objeto inseridas no *Ansys Aqwa*[®], foram calculadas de forma empírica, seguindo as recomendações apresentadas por Journée e Massié (2001). Nesse contexto, os raios de giração K_{xx} foram considerados como 30% da largura da embarcação, enquanto K_{yy} e K_{zz} como 22% do seu comprimento. Com isso, os parâmetros de K_{xx} , K_{yy} , e K_{zz} correspondem a 2,1 m, 7,7m e 7,7 m, respectivamente. É importante mencionar que Journée e Massié (2001) apenas propõem faixas aproximadas para determinar esses parâmetros em navios, a partir dos quais foram assumidos os valores do presente estudo. Sugere-se pesquisar mais alternativas para determinar a matriz de inércia das embarcações em estudos posteriores.

O software foi configurado para encontrar a resposta (movimentos de balanço) para ondas regulares incidindo em 180° (pela proa; *head sea*), 135° (*quartering sea*), e 90° (pelo través; *beam sea*). A embarcação foi considerada sem velocidade de avanço. Os operadores de amplitude de resposta do movimento de balanço foram obtidos para duas condições de TCG (caso 1 e caso 2, descritos acima).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Resultados de estabilidade da embarcação

Os resultados de estabilidade mostrados a seguir foram resumidos a partir dos dados dos relatórios proporcionados pelo software *Orca3D*[®]. O software emite um relatório de estabilidade do objeto com vários parâmetros hidrostáticos, como BM_T e GM_T, além dos coeficientes de forma do casco, que variam de acordo com a imersão no fluido. Os dados obtidos referentes aos parâmetros hidrostáticos para as condições estabelecidas conforme a Tabela 3, podem ser observados através da Tabela 5.

Tabela 5. Variação de BM_T, GM_T, KG e KB para as condições de estudo.

Condição	BM _T (m)	GM _T (m)	KG (m)	KB (m)
A	7,708	6,966	1,00	0,258
B	7,708	5,966	2,00	0,258
C	7,708	4,966	3,00	0,258
D	3,992	3,437	1,00	0,445
E	3,992	2,437	2,00	0,445
F	3,992	1,437	3,00	0,445
G	2,689	2,462	1,00	0,773
H	2,689	1,462	2,00	0,773
I	2,689	0,462	3,00	0,773
J	2,099	2,133	1,00	1,034
K	2,099	1,133	2,00	1,034
L	2,099	0,133	3,00	1,034

Fonte: Autoria própria.

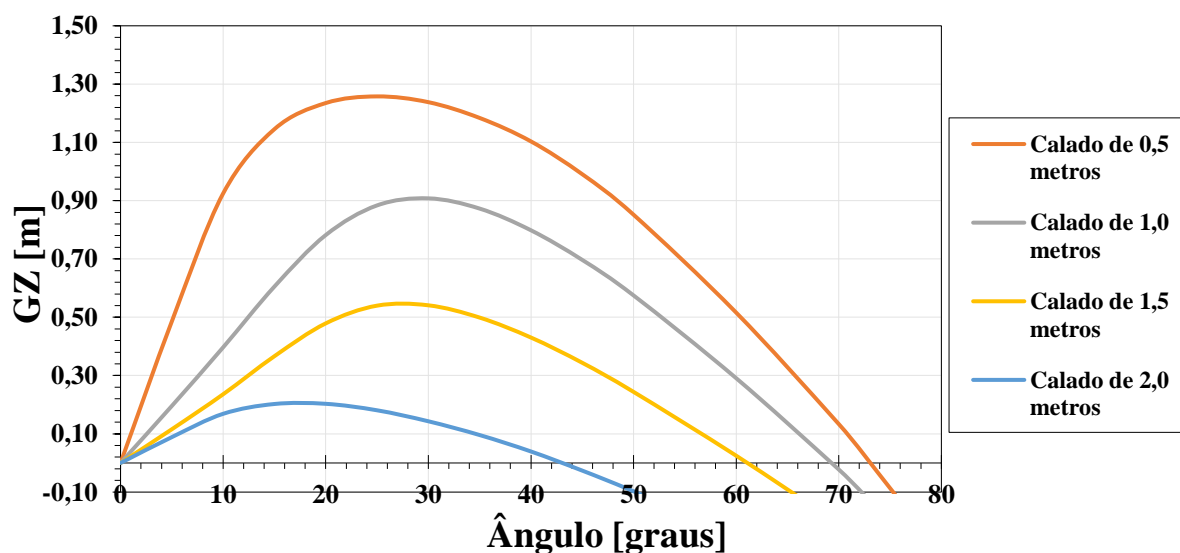
É possível notar que as condições C, F, I e L representam condições mais extremas; umas vezes GM_T diminui conforme o VCG se eleva a 3,0 metros de altura. Tal elevação pode representar, na prática, o acúmulo de cargas e até mesmo a movimentação de pessoas nas regiões mais altas da embarcação, sugerindo uma maior instabilidade. É possível que em uma condição de movimentos amplos de balanço, os passageiros do navio Anna Karoline III poderiam, de forma instintiva, ter-se movimentado de um bordo para o outro nessa situação.

A curva de estabilidade da embarcação também é disponibilizada pelos parâmetros obtidos no *Orca3D*[®], mediante o cálculo das curvas cruzadas do objeto de análise de onde são retirados os valores de KN para vários ângulos de inclinação, conforme pode ser visto no

Apêndice C. Neste trabalho, optou-se por fixar o VCG em 2,0 m, a partir da linha base, e variar o calado de 0,5 m até o calado de 2,0 m, que é próximo à situação antecedente ao naufrágio.

Foram selecionadas três situações que representam as condições J e K da Tabela 3, onde os calados são iguais a 1 e 2 m, respectivamente. Também, com o intuito de agregar mais informações, mais duas análises foram realizadas nas quais, observou-se o menor calado de 0,5 metros, e um calado intermediário às condições J e K, de 1,5 metros. Desta maneira os resultados podem ser vistos na Figura 33, que apresenta as curvas GZ para os calados de 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 metros.

Figura 33. Curvas de estabilidade estática GZ para 4 calados diferentes do caso de estudo, considerando um VCG = 2 m.



Fonte: Autoria própria.

Podemos constatar que as condições J e K, com 1,5 e 2,0 metros de calado, respectivamente, de fato apresentam curvas de estabilidade menores, por conta da baixa altura de borda-livre o ângulo de imersão do convés é menor. Dessa maneira, a estabilidade transversal da embarcação é reduzida, e movimentos de amplitude pequenos, que seriam normalmente absorvidos pela estrutura, podem-se tornar perigosos nas condições de carregamento máximo ou superior ao permitido.

O acidente estudado, teve as características das condições em que a altura de calado é próxima a 2,0 metros. Esse fator foi importante para a perda repentina de estabilidade que culminou no acidente. A embarcação é considerada segura dentro das limitações impostas pelas

autoridades, porém o baixo ângulo de imersão do convés principal também pode ter sido um fator adicional da tragédia.

É notável a perda de estabilidade à medida que a altura da borda livre da embarcação se reduz. No caso da condição K, a curva de estabilidade mostra que para um ângulo menor de 45°, a embarcação já é considerada instável. Isto é, levando em consideração que a embarcação objeto desse estudo supostamente estaria em uma situação pior à da condição K, ou seja, com um calado superior a 2,0 metros, as condições de navegação do navio eram de extrema periculosidade para passageiros e tripulantes.

Contudo, essas análises simulam a possível influência de forças externas que atuam sobre o casco de maneira hidrostática. Porém, não é levada em consideração a atuação de ondas na embarcação, sendo também desconsiderado a possível variação do centro de gravidade no eixo transversal, que simularia um possível deslocamento lateral de cargas e passageiros durante o acidente.

Para entender o impacto da variação do centro de gravidade no eixo transversal, também se realizaram algumas análises observando as variações do TCG da embarcação estudada. Para isso, foram definidas algumas condições de entrada no *Orca3D*[®], que permite inserir diferentes ângulos de inclinação. Para cada parâmetro inserido, o software retorna o valor de TCG no relatório.

Foram selecionados para tal análise os casos que apresentaram o menor braço de endireitamento, sendo eles assumidos como a pior situação à qual a embarcação pode estar submetida. Nesse sentido, os parâmetros inseridos no *Orca3D*[®], são apresentados na Tabela 6, na qual a variação dos ângulos é de 0° até 30°

Tabela 6. Condições com inclinação do casco.

Condição	VCG (m)	Calado (m)	Ângulo de Inclinação
A1	1,0	2,0	10°
B1	1,0	2,0	20°
C1	1,0	2,0	30°
D1	2,0	2,0	10°
E1	2,0	2,0	20°
F1	2,0	2,0	30°

Fonte: Autoria própria.

Pode-se observar que essas situações poderiam representar, aproximadamente, o cenário do acidente. Desta maneira, os resultados obtidos, que mostram os parâmetros hidrostáticos de cada condição da Tabela 6, podem ser observados na Tabela 7:

Tabela 7. Condições com inclinação do casco.

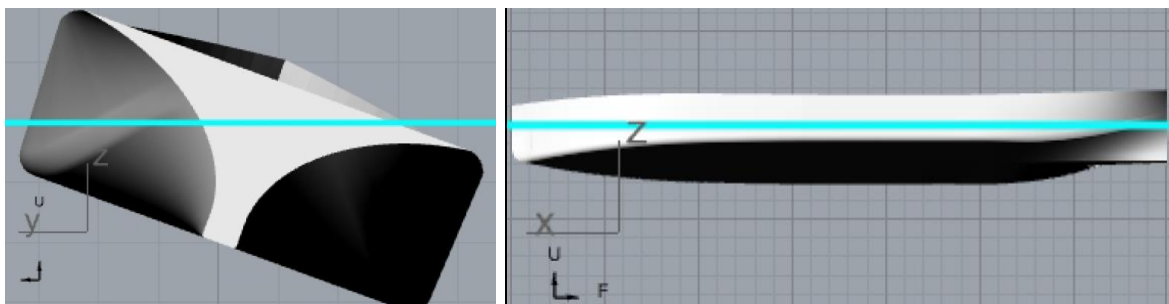
Condição	BM _t	GM _T	TCG	KG	KB
A1	1,071	1,123	-0,334	1,00	2,123
B1	0,360	0,291	-0,436	1,00	1,291
C1	0,299	0,102	-0,527	1,00	1,102
D1	1,071	0,108	-0,158	2,00	2,108
E1	0,360	-0,773	-0,072	2,00	1,227
F1	0,299	-1,053	0,051	2,00	0,947

Fonte: Autoria própria.

Com esses dados é possível inferir condições de instabilidade da embarcação caso ela tenha apresentado uma condição similar, uma vez que o GM varia em valores próximos a zero, sendo que nas situações E1 e F1 o seu valor é negativo. Isso evidencia que o acidente poderia ser evitado em um contexto no qual as condições de carregamento máximo fossem respeitadas e a altura de borda-livre fosse maior, fato que geraria maior estabilidade da estrutura flutuante.

Nota-se que não é preciso um grande ângulo de inclinação para a água adentrar sobre o convés, para ângulos curtos como o dos casos B1 e E1, a imersão de água já ocorre, como pode ser observado na Figura 34, que mostra o aspecto da embarcação com relação à superfície livre da água para um ângulo de 20°. Para ângulos maiores a imersão é maior ainda, sendo que isso pode explicar o adernamento, coincidindo com relatos feitos pelos sobreviventes no naufrágio, somado a movimentação de cargas e dos passageiros.

Figura 34. Ilustrações da disposição de linha d'água nas condições iniciais B1 e E1, com ângulo de inclinação de 20°.



Fonte: Autoria própria usando Orca3D®.

5.2. Resultados de movimentos da embarcação

A continuação, são apresentados os resultados do movimento da embarcação obtidos no software *Ansys Aqwa*[®]. Primeiro, buscou-se compreender o comportamento dinâmico do casco quando submetido a três ângulos de incidência diferentes das ondas, para os casos 1 (TCG = 0 m) e 2 (TCG = 0,072 m), cujos operadores de amplitude de resposta do movimento de balanço (*roll*) para diferentes frequências de onda são mostrados nas Figuras 35 e 36, respectivamente. Nessas figuras são comparados os operadores de resposta para três diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação: 90° (ondas pelo través), 135°, e 180° (ondas pela proa).

Figura 35. Comparação de operadores de amplitude de resposta (RAO's) do movimento de balanço (*roll*) para diferentes frequências e ângulos de incidências de onda, com TCG = 0 m (Caso 1).

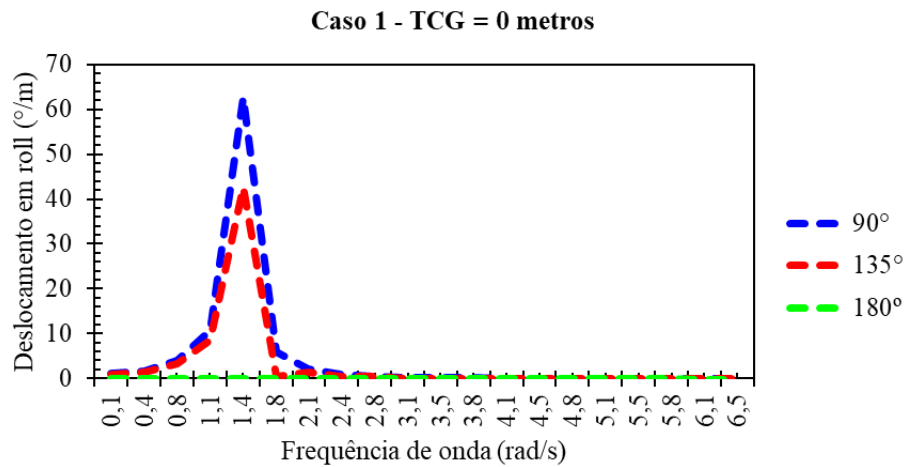
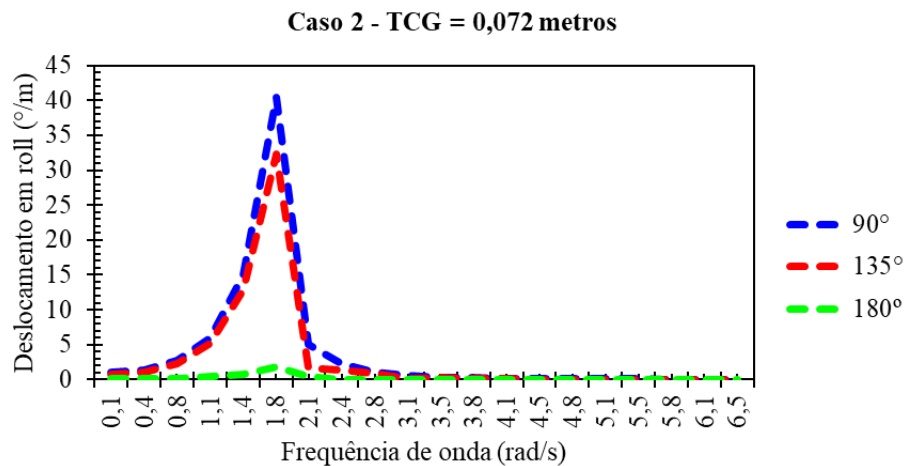


Figura 36. Comparação de operadores de amplitude de resposta (RAO's) do movimento de balanço (*roll*) para diferentes frequências e ângulos de incidências de onda, com TCG = 0,072 m (Caso 2).



Cabe mencionar que, embora os seis movimentos da embarcação sejam analisados no *Ansys Aqwa*[®] de forma acoplada, apenas os resultados do movimento de balanço são mostrados, pois é o movimento considerado mais crítico na situação do acidente avaliado. Verifica-se uma redução nas amplitudes dos movimentos de balanço para o Caso 2, sendo o Caso 1 (TCG = 0) quem mais apresentou ampliações do movimento (mais de 60° por amplitude unitária de onda).

O ângulo de incidência das ondas que causou mais amplificação do balanço foi 90°, ou seja, quando as ondas incidem pelo costado da embarcação. Segundo os valores proporcionados pelo software, a frequência de ressonância nesta condição é de 1,44 rad/s (Figura 35; Caso 1).

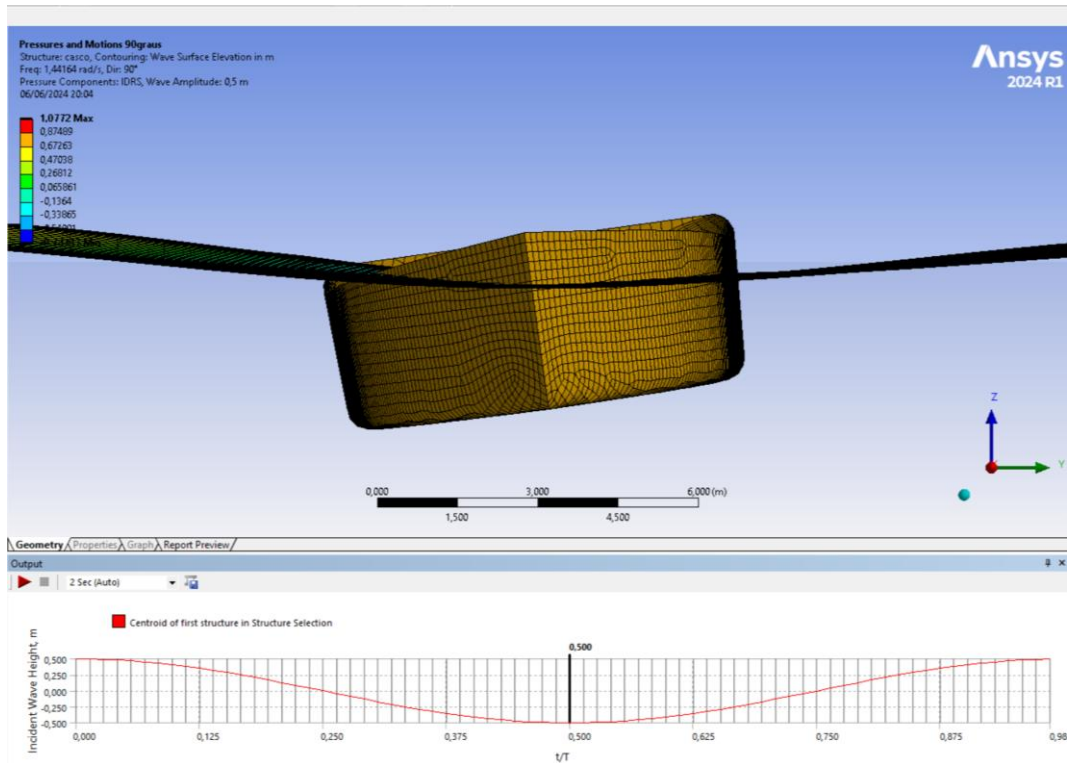
Diante dos gráficos expostos nas Figuras 35 e 36, podemos constatar que o Caso 2, onde há um deslocamento do TCG para fora da linha de centro da embarcação, não necessariamente significou um movimento mais significativo do casco. O máximo deslocamento angular neste caso foi de 40,51°/m a uma frequência de 1,84 rad/s, considerando a condição de ondas incidindo pelo costado (90°), Figura 36.

Entretanto, no Caso 1 é notável que os deslocamentos são maiores do que no Caso 2, sendo que a maior amplitude mensurada na análise foi de 62,76°/m na frequência de 1,44 rad/s na condição de ondas pelo costado (Figura 35). Há de se ressaltar que os movimentos para um ângulo de encontro de 135° também se demonstraram de magnitude ampla, enquanto para a incidência de 180°, era esperando não haver grandes deslocamentos em *roll*.

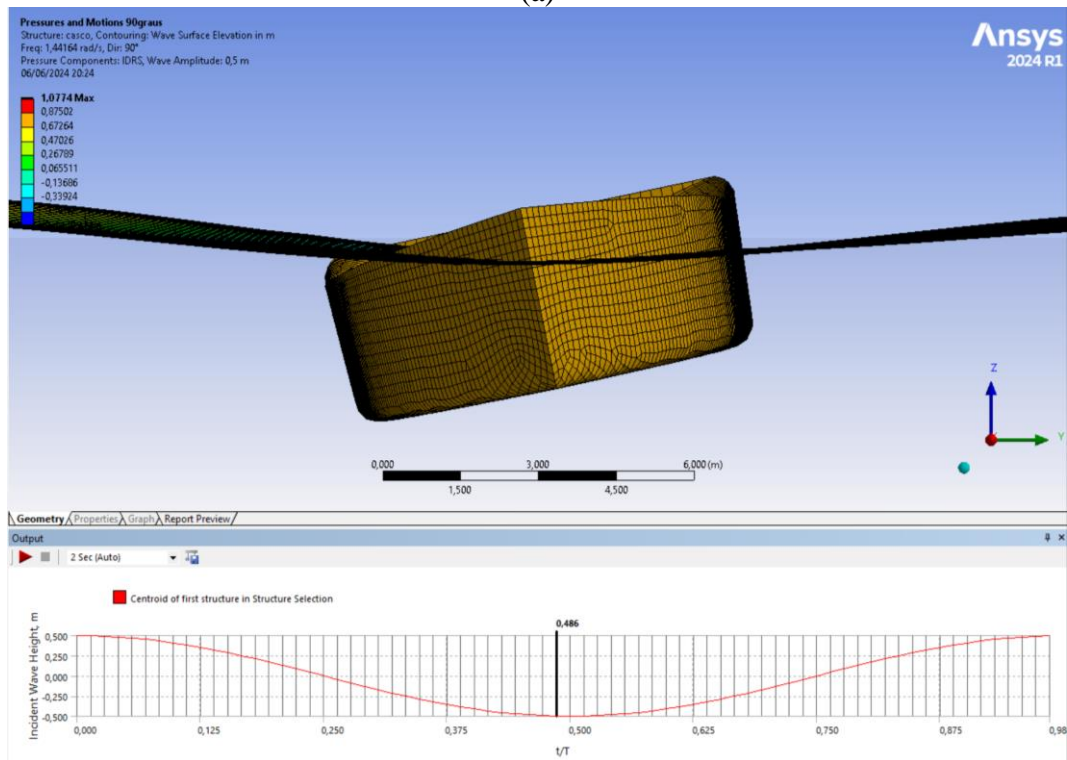
A frequência de ressonância do Caso 1, para o ângulo de incidência de 90°, foi considerada para realizar simulações no domínio do tempo, considerando uma onda regular incidindo pelo costado, variando a sua amplitude para verificar o seu efeito na resposta da embarcação, como mostrado nas seguintes análises.

A Figura 37 mostra uma comparação do efeito do TCG na posição da embarcação, considerando uma onda regular de 1,44 rad/s (frequência de ressonância nos RAO's anteriores) e 0,5 m de amplitude, incidindo em 90° (pelo costado). A comparação foi feita no mesmo instante do tempo. As Figuras 38a e 38b mostram os resultados para TCG = 0,072 m e TCG = 0 m, respectivamente.

Figura 37. Comparação da posição da embarcação para diferentes TCG's quando submetida a uma onda regular de 1,44 rad/s e 0,5 m de amplitude, incidindo pelo través. (a) TCG = 0,072 m. (b) TCG = 0 m.



(a)



(b)

Fonte: Ansys® 2024 R1.

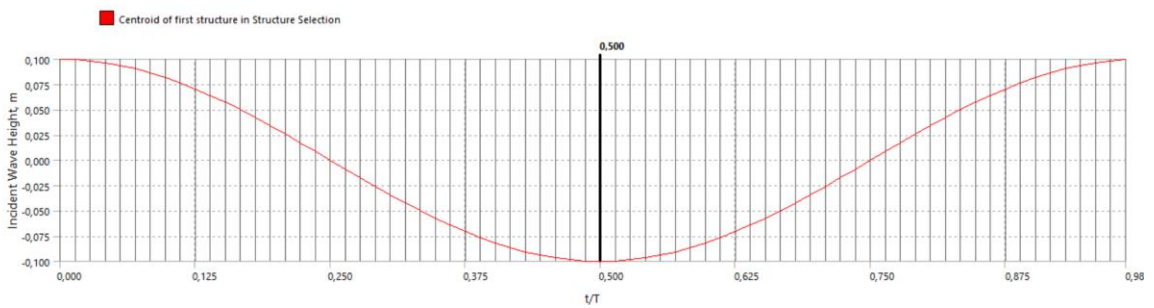
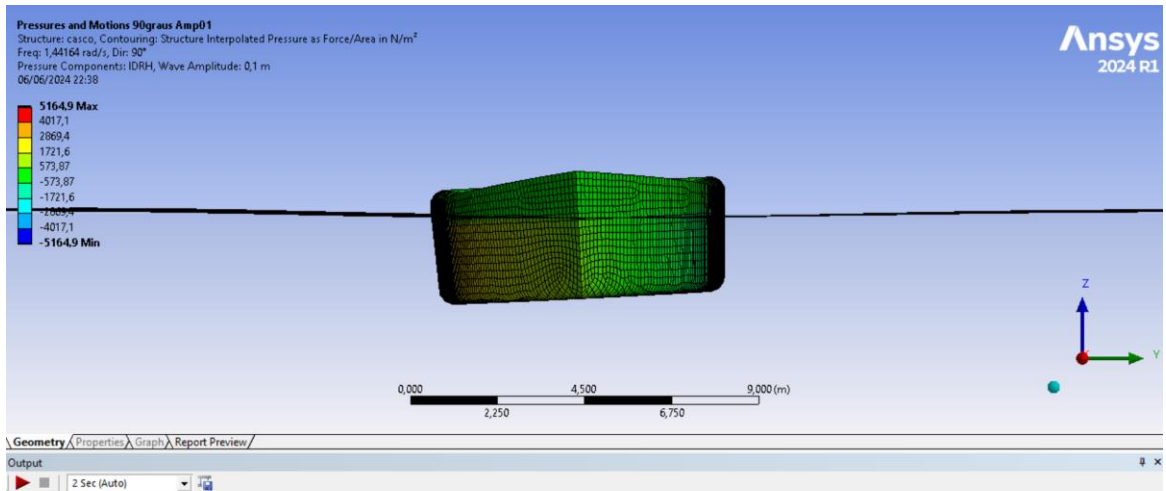
Considerando a borda-livre limitada, quatro análises foram feitas para analisar o comportamento do casco quando submetido a interações com uma onda regular com frequência

próxima da ressonância no Caso 1, de 1,44 rad/s, na condição de mar de través. Foram avaliadas as interações dessa onda regular com diferentes amplitudes: 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m e 0,7 m, como mostrado nas Figuras 38a, 38b, 38c e 38d, respectivamente. Devido a que não existem registros das amplitudes de onda típicas no acidente, essas amplitudes foram assumidas para fins avaliativos. Assume-se que a amplitude de 0,1 m pode acontecer em qualquer momento na região, enquanto a amplitude de 0,7 m poderia ser menos comum. Já, as amplitudes de 0,3 e 0,5 poderiam acontecer em alguma situação intermediária.

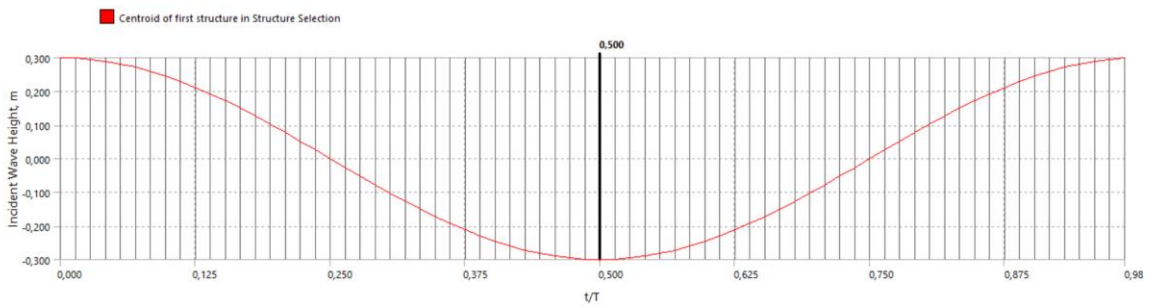
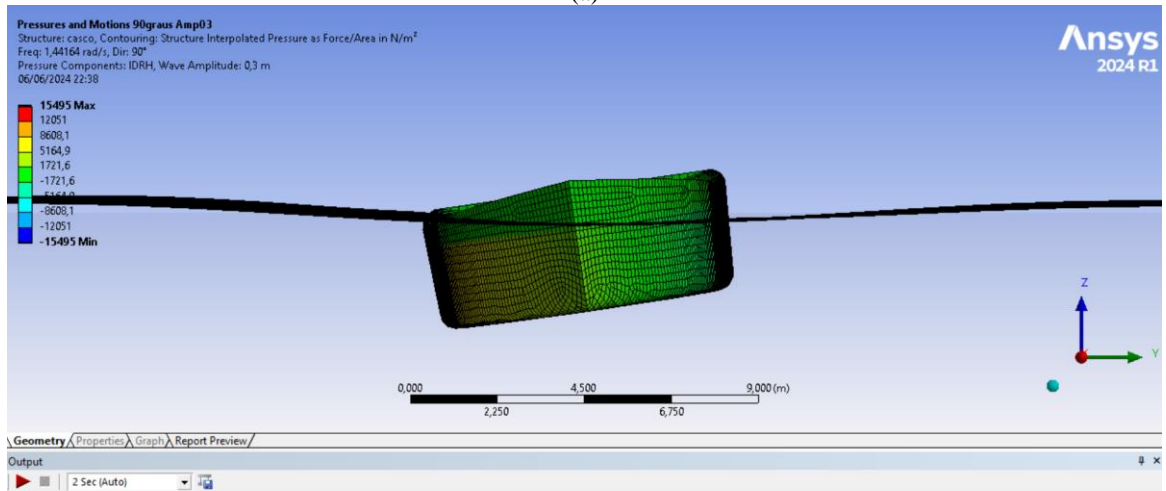
Vale deixar documentada a necessidade de monitorar as condições de ondas comuns na região amazônica, pois podem ajudar na validação de análises do comportamento de embarcações em ondas. Embora a região amazônica possua rios com águas calmas comumente, a ocorrência de ondas de diferentes frequências e amplitudes pode ocorrer de forma eventual, seja por causa do movimento de outras embarcações ou por eventos climáticos adversos. Essa geração eventual de ondas pode ser suficiente para desestabilizar embarcações de porte menores ou em condições críticas de carga e borda livre, como o caso avaliado neste estudo.

A partir dos resultados da Figura 38, é possível atestar que ondas com amplitude maior do que 0,3 m, na frequência avaliada, já teriam a capacidade de embarcar no convés da embarcação, causando possíveis sobrecarregamentos hidrodinâmicos não previstos nas análises de estabilidade. Essa água embarcada também pode ser um problema caso o convés da embarcação possua aberturas, possibilitando o alagamento de espaços internos ao casco.

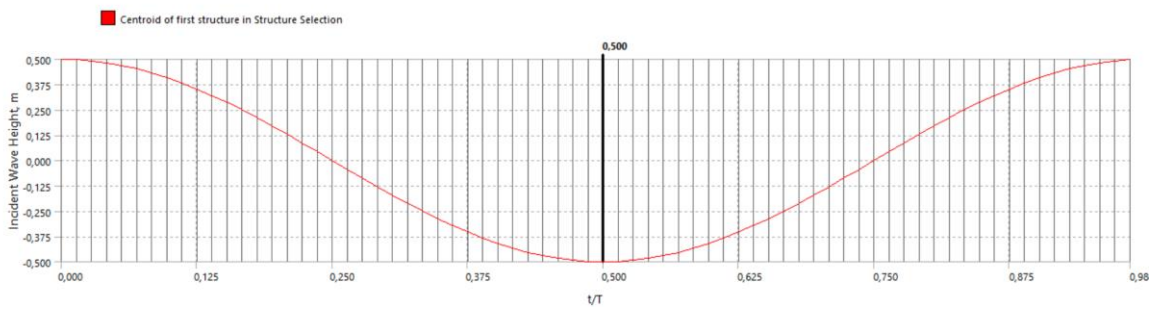
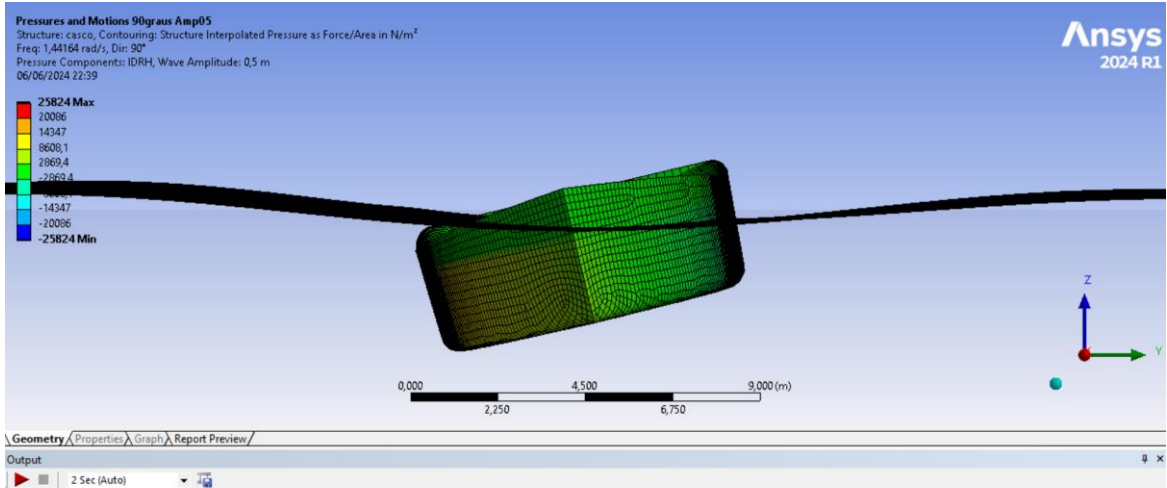
Figura 38. Comparação da posição da embarcação, no mesmo instante de tempo, durante com a interação com uma onda regular de 1,44 rad/s, considerando ondas regulares com diferentes amplitudes. (a) Amplitude de 0,1 m. (b) Amplitude de 0,3 m. (c) Amplitude de 0,5 m. (d) Amplitude de 0,7 m.



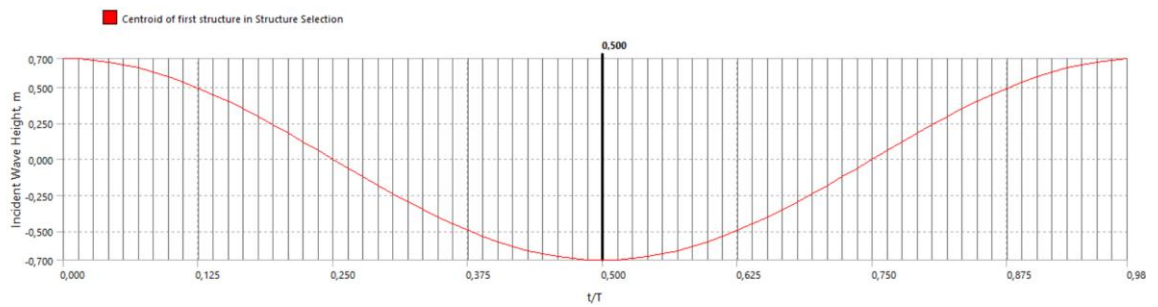
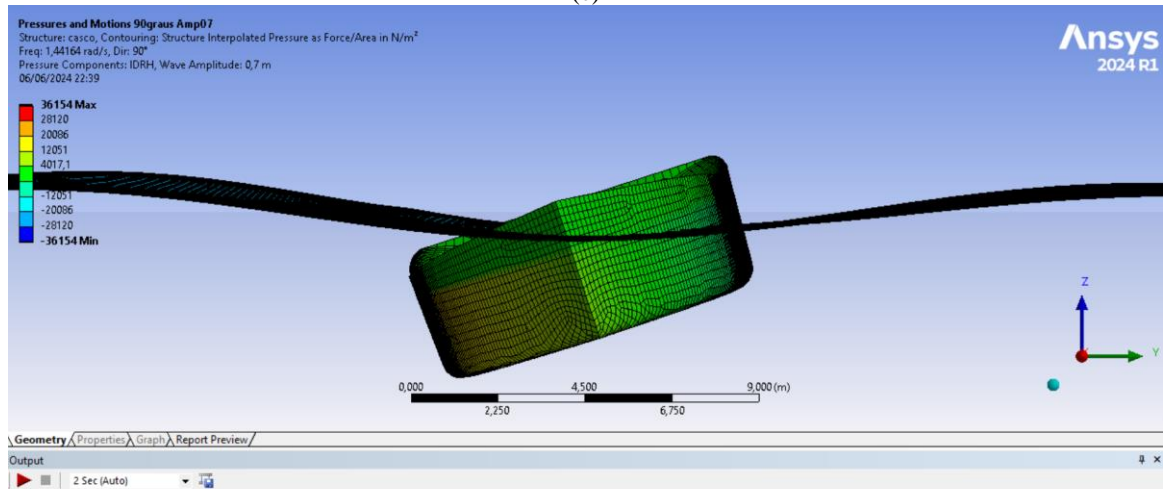
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Ansys® 2024 R1.

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou compreender mais com relação às causas técnicas que podem estar contribuindo na ocorrência de acidentes de embarcações na região amazônica. Apesar de não ser a região com o maior número de registros de fatos da navegação, é a que apresenta o maior percentual de fatalidades nesses casos, evidenciando a falta de segurança e a periculosidade da navegação regional. Muitas vezes, a falta de conhecimento em questões de estabilidade e dinâmica das embarcações regionais, causam condições de navegação no limite da capacidade de carga, sem prever aspectos dinâmicos, como a movimentação de cargas, manobras, e influência de vento e ondas, as quais podem causar embarque de água no convés, dificultando a capacidade de restauração quando se navega com pouca borda livre.

Esse trabalho fez uma revisão de alguns acidentes marcantes na região. Entre eles destacou-se a pesquisa sobre o naufrágio recente do navio Anna Karoline III, na qual a embarcação em sua rota semanal zarpuou do porto de Santana-AP, mas não concluiu a viagem. O excesso de cargas transportado pelo navio foi um fator impactante, que resultou na diminuição da altura de borda-livre, sendo que este fator pode ter sido fundamental para perder a estabilidade transversal. Para verificar essa hipótese, foi considerada essa embarcação como caso de estudo, para realizar análises de estabilidade intacta transversal e do movimento de balanço em ondas, utilizando softwares de uso na Engenharia Naval.

Foram pesquisados, de maneira preliminar, o efeito da variação das posições verticais e transversais do centro de gravidade da embarcação na sua estabilidade intacta, bem como o efeito das ondas no movimento transversal da embarcação. A análise em ondas foi feita pois o navio fez uma manobra de retorno para rota, sendo bem possível que tivesse sido atingida por ondas de través no momento prévio ao acidente.

Os resultados da presente análise sugerem algumas conclusões que poderiam ser aplicáveis a outras situações de risco em embarcações regionais, as quais podem acontecer devido à falta de fiscalização, sobrecarregamento, navegação com borda livre reduzida, e falta de estudos técnicos de estabilidade e comportamento em ondas:

- O calado e a distribuição de pesos, representada de maneira simplificada pela posição do centro de gravidade, têm influência na estabilidade intacta e nos movimentos da embarcação.
- Uma embarcação com pouca borda livre, com variação da posição do seu centro de gravidade de maneira vertical ou transversal, pode ter a sua capacidade de restauração limitada.

Somado a isso, a possibilidade de embarque de água pode causar carregamentos adicionais não previstos na análise de estabilidade intacta, sendo necessário pesquisar mais com relação a este efeito.

- Se a embarcação sobrecarregada interagir com ondas cuja frequência for próxima à frequência de balanço, pode amplificar os movimentos angulares, agravando a necessidade de restauração transversal e, sendo possível o embarque de mais água.

- A amplitude das ondas pode agravar a necessidade de restauração transversal e a quantidade de água embarcada. Foram avaliadas ondas com amplitude pequena, de 0,1 m, o qual pode ser comum na região amazônica em qualquer momento, até uma condição mais significativa, de 0,7 m de amplitude. Verificou-se que, em ondas com amplitude a partir de 0,3 m, existe a possibilidade de embarque de água. Essa situação pode contribuir no emborcamento de embarcações caso os espaços do convés não estejam vedados, podendo inundar os espaços internos em cada interação com as ondas.

O presente estudo é uma abordagem preliminar para analisar o que aconteceu no acidente do caso de estudo, cujos fatores técnicos podem ser representativos de outros casos na região amazônica. Estudos similares podem ser realizados, incluindo análises de estabilidade em avaria e cálculos mais detalhados da distribuição de carga e momentos de inércia das embarcações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKYUZ, E. A hybrid accident analysis method to assess potential navigational contingencies: The case of ship grounding. **Safety Science**, v. 79, p. 268–276, 1 nov. 2015.
- AMÉRICO, M. J. **Sistema de Avaliação da Estabilidade Transversal de Navios em Tempo Real**. PhD Thesis—[s.l.] Dissertação (Mestrado em Instrumentação, Manutenção Industrial e Qualidade ..., 2009.
- ANSYS. Aqwa Reference Manual - Release 2024 R1. **Ansys 2024 R1**, 2024a.
- ANSYS. Aqwa Theory Manual - Release 2024 R1. **Ansys 2024 R1**, 2024b.
- AZIZ, G. M. P. A. et al. Rumo à prevenção de acidentes com embarcações na região amazônica. Parte I: acidentes comuns e métodos de avaliação recentes: Towards prevention of ship accidents in the amazon region. Part I: common accidents and recent evaluation methods. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 11, p. 75973–75995, 2022.
- BAALISAMPANG, T. et al. Review and analysis of fire and explosion accidents in maritime transportation. **Ocean Engineering**, v. 158, p. 350–366, 2018.
- BARRAS, B.; DERRETT, C. D. **Ship stability for Masters and Mates**. 6. ed. Oxford: Elsevier, 2005.
- BASTOS, M. **Geografia dos Transportes: Trajetos e Conflitos nos Percursos Fluviais da Amazônia paraense: Um Estudo sobre acidentes em embarcações**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- BECHMAN, V. S. **Metodologia para caracterizar a geometria do casco e o comportamento hidrodinâmico de uma embarcação regional amazônica do tipo expreso**. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2024.
- CARVALHO, A. I. VAN L. B. **Contribuições às análises estática e dinâmica do sistema de amarração de navios atracados em dolphins**. Dissertação de Mestrado—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2021.
- CHAUVIN, C. et al. Human and organisational factors in maritime accidents: Analysis of collisions at sea using the HFACS. **Accident Analysis & Prevention**, v. 59, p. 26–37, 1 out. 2013.
- CORADDU, A. et al. Determining the most influential human factors in maritime accidents: A data-driven approach. **Ocean Engineering**, v. 211, p. 107588, 1 set. 2020.
- DE SOUZA, J. A. et al. A problemática dos acidentes de embarcações no Rio Madeira e os desafios para a engenharia naval regional. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 14, n. 12, p. 20814–20834, 2023.
- DOS SANTOS, E. S. et al. The impact of channel capture on estuarine hydro-morphodynamics and water quality in the Amazon delta. **Science of the total environment**, v. 624, p. 887–899, 2018.

FILHO, L. et al. **Caracterização e Espacialização de Acidentes na Navegação ocorridos no Médio e Baixo Amazonas (in Portuguese)**. 11º Seminário Internacional de Transporte e Desenvolvimento Hidroviário Interior - October 22-24. **Anais...** Brasília, Brazil: 2019.

FONTES, J. V. 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, 2023.

FONTES, J. V. H. **Avaliação do carregamento vertical sobre o convés de um navio devido ao embarque de água**. Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

GLOBO. **Anna Karoline 3: naufrágio no AP completa um mês e três suspeitos podem ser responsabilizados**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2020/03/29/anna-karoline-3-naufragio-no-ap-completa-um-mes-e-tres-suspeitos-podem-ser-responsabilizados.ghtml>>. Acesso em: 23 maio. 2024.

GLOBO. **MPF denuncia vereador de Santarém por homicídio culposo e atentado contra a segurança do transporte fluvial**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/pa/santarem-regiao/noticia/2021/06/08/mpf-denuncia-vereador-de-santarem-por-homicidio-culposo-e-atentado-contra-a-seguranca-do-transporte-fluvial.ghtml>>. Acesso em: 3 abr. 2024.

HANZU-PAZARA, R. et al. Reducing of maritime accidents caused by human factors using simulators in training process. **Journal of Maritime Research**, v. 5, n. 1, p. 3–18, 25 abr. 2008.

HE, T. et al. CFD simulation and experimental study on coupled motion response of ship with tank in beam waves. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 1, p. 113, 2022.

IMO. **International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974**. Disponível em: <[https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx)>. Acesso em: 2 ago. 2021.

IMO. **IMO and the Sustainable Development Goals**. Disponível em: <<https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/SustainableDevelopmentGoals.aspx>>. Acesso em: 20 jun. 2024.

JOURNÉE, J. M.; MASSIE, W. W. Offshore hydromechanics. **TU Delft, Lecture Notes**, 2001.

LEE, C.-H. **WAMIT theory manual**. [s.l.] Massachusetts Institute of Technology, Department of Ocean Engineering, 1995.

LUZ, H. **Análise quantitativa dos acidentes de navegação em águas brasileiras entre 2006 e 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Naval**. Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2017.

MAKI, A. et al. Parametric rolling prediction in irregular seas using combination of deterministic ship dynamics and probabilistic wave theory. **Journal of marine science and technology**, v. 16, p. 294–310, 2011.

MARINHA. **Explosão na embarcação “Renascer IV” - 05 de novembro de 2011. Relatório de investigação de segurança marítima**. Disponível em:

<<https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br.dpc/files/ISAIM%20EMB.%20RENASCER%20IV%20portugu%C3%AAs.pdf>>. Acesso em: 13 maio. 2024.

MARINHA. **Adernamento e naufrágio sem vítimas do NM “Haidar” - 06 de outubro de 2015. Relatório de investigação de segurança.** Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br.dpc/files/ISAIM-NM-HAIDAR-ptbr.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2024.

MARINHA. **Naufrágio da embarcação Capitão Ribeiro - 22 de setembro de 2017. Relatório de segurança dos acidentes e incidentes marítimos.** Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dpc/sites/www.marinha.mil.br.dpc/files/ISAIM%20%20-%20CAPITAO%20RIBEIRO.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2024.

MARINHA. **Diretoria de Portos e Costas. Marinha do Brasil. NORMAM - Normas da Autoridade Marítima.** Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dpc/normas-autoridade-maritima-brasileira>>. Acesso em: 27 jul. 2021.

MARINHO, H. F. A. et al. Importância de considerar os fatores humanos nas iniciativas de prevenção de acidentes de embarcações na região amazônica. **Revista Foco (Interdisciplinary Studies Journal)**, v. 17, n. 1, 2024.

MCNEEL. **Rhino user’s guide for Windows.** Disponível em: <<https://docs.mcneel.com/rhino/8/usersguide/en-us/index.htm>>. Acesso em: 12 jun. 2024.

MONTEIRO, F. V. **Análise da estabilidade intacta de navios de apoio offshore sob perspectiva da segunda geração de critérios de estabilidade da IMO.** Dissertação de Mestrado—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

MONTENOVO, M. **Verifica della posizione del baricentro e calcolo della stabilità di una nave con aggiornamento dell’esponente dei pesi.** Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica—Delle Marche, Itália: Università Politecnica Delle Marche, 2019.

NAFES, S. **Delegado confirma autenticidade de vídeos no navio Anna Karoline III (vídeo de Youtube).** Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=oYSjlk-6s4c>>. Acesso em: 3 abr. 2024.

NETO, B.; PONTES, H. Uso do Arduino para monitoramento de ângulos em plataformas de petróleo para fins didáticos. **Diversitas Journal**, v. 8, n. 2, p. 840–854, 2023.

PADOVEZI, C. **Avaliação de riscos do transporte fluvial de passageiros na Região Amazônica.** Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore-2012, SOBENA, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...**2012.

PADOVEZI, C. D. **Evaluation of risk factors present in inland navigation in Brazil. In 12th International Seminar on Inland Waterways and Waterborne Transportation. 20/October/2021. SOBENA - Brazilian Society of Naval Engineering.** São Paulo: 2021.

PENALBA, M.; KELLY, T.; RINGWOOD, J. Using NEMOH for modelling wave energy converters: A comparative study with WAMIT. 2017.

PINHEIRO, I. S. **Análise e modelação da contribuição dos factores humanos em acidentes marítimos.** PhD Thesis—[s.l.] INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, 2015.

SALVESEN, N.; TUCK, E.; FALTINSEN, O. Ship motions and sea loads. **The Society of Naval Architects and Marine Engineers**, 1970.

SANT'ANNA, J. L. Rede Básica de Transportes da Amazônia. Texto para discussão nº 562. **Repositório IPEA**, 1998.

SCHRÖDER-HINRICHS, J.-U.; HOLLNAGEL, E.; BALDAUF, M. From Titanic to Costa Concordia—a century of lessons not learned. **WMU journal of maritime affairs**, v. 11, p. 151–167, 2012.

SHENG, W. et al. Hydrodynamic studies of floating structures: Comparison of wave-structure interaction modelling. **Ocean Engineering**, v. 249, p. 110878, 2022.

SILVA, D. F.; COUTINHO, A. L.; ESPERANÇA, P. T. Green water loads on FPSOs exposed to beam and quartering seas, part I: Experimental tests. **Ocean Engineering**, v. 140, p. 419–433, 2017.

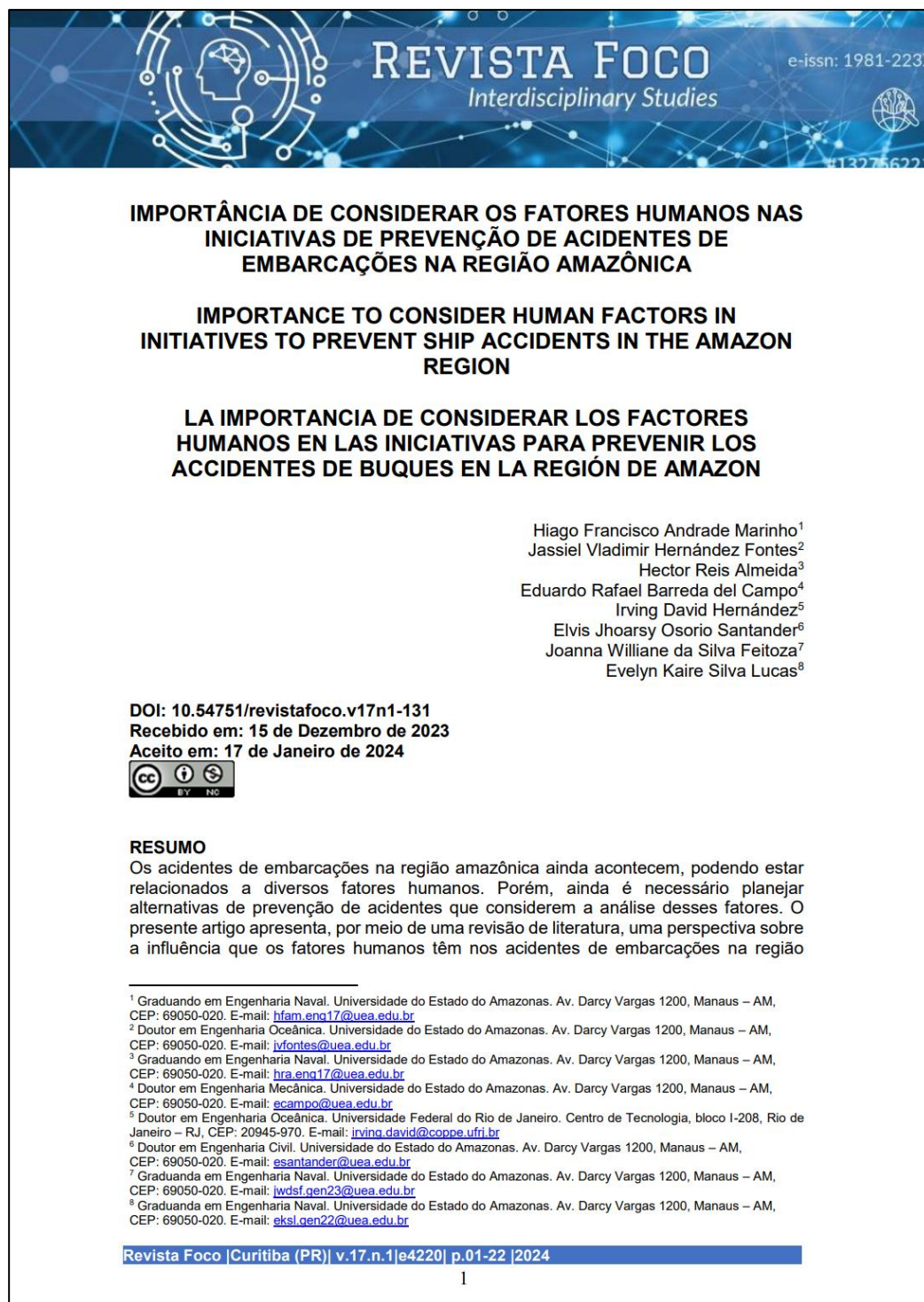
SOARES, F.; DE BRITTO, V. Caracterização Dinâmica de Embarcações Regionais do Amazonas. **UNOPAR Científica Ciências Exatas e Tecnológicas**, v. 13, n. 1, 2014.

TRINDADE, G. O.; OTHERS. A ver navios, barcos e canoas... vivências urbanas e relação cidade-Rio na Amazônia Ribeirinha. **Geografia Ensino & Pesquisa**, p. 35–54, 2012.

WAMIT. **WAMIT User Manual Version 7.5**. Disponível em: <<https://www.wamit.com/manual.htm>>. Acesso em: 3 jul. 2024.

APÊNDICE A


Figura 39. Artigo publicado pelo autor relacionado com a prevenção de acidentes de embarcações regionais, realizado durante o desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso. Revista com classificação CAPES Qualis B2 na área de Engenharias III no período de avaliação 2017-2020.



Fonte: Marinho et al. (2024).

APÊNDICE B

Figura 40. Artigo publicado com participação do autor, relacionado com a prevenção de acidentes de embarcações regionais, que contribuiu com desenvolvimento do presente trabalho de conclusão de curso.



Brazilian Journal of Development | 75973
ISSN: 2525-8761

Rumo à prevenção de acidentes com embarcações na região amazônica. Parte I: acidentes comuns e métodos de avaliação recentes

Towards prevention of ship accidents in the amazon region. Part I: common accidents and recent evaluation methods

DOI:10.34117/bjdv8n11-349

Recebimento dos originais: 28/10/2022
Aceitação para publicação: 29/11/2022

Giovanna Mabily Pinto Abdel Aziz
Graduanda em Engenharia Naval
Instituição: Universidade do Estado do Amazonas
Endereço: Av. Darcy Vargas, 1200, Parque Dez, Manaus - AM, CEP: 69050-020
E-mail: gmpaa.eng16@uea.edu.br

Jassiel Fontes
Doutor em Engenharia Oceânica
Instituição: Universidade do Estado do Amazonas
Endereço: Av. Darcy Vargas, 1200, Parque Dez, Manaus - AM, CEP: 69050-020
E-mail: jvfontes@uea.edu.br

Harlysson Maia
Mestre em Engenharia Naval
Instituição: Universidade do Estado do Amazonas
Endereço: Av. Darcy Vargas, 1200, Parque Dez, Manaus - AM, CEP: 69050-020
E-mail: hwmaia@uea.edu.br

Paulo Rodrigo Ramos de Almeida
Graduando em Engenharia Naval, Bolsista FAPEAM
Instituição: Universidade do Estado do Amazonas
Endereço: Av. Darcy Vargas, 1200, Parque Dez, Manaus - AM, CEP: 69050-020
E-mail: prra.gen18@uea.edu.br

Hiago Francisco Andrade Marinho
Graduando em Engenharia Naval, Bolsista PAIC/FAPEAM
Instituição: Universidade do Estado do Amazonas
Endereço: Av. Darcy Vargas, 1200, Parque Dez, Manaus - AM, CEP: 69050-020
E-mail: hfam.eng17@uea.edu.br

Irving Hernández
Doutor em Engenharia Oceânica
Instituição: Núcleo de Estruturas Oceânicas, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Endereço: Bloco I-208, Cidade Universitária - RJ, CEP: 20945-970
E-mail: irving.david@coppe.ufrj.br

Brazilian Journal of Development, Curitiba, v.8, n.11, p. 75973-75995, nov., 2022

Fonte: Aziz et al. (2022).

APÊNDICE C

Figura 41. Valores de KN obtidos para variação de 0,5 a 2,0 metros de calado com um VCG fixo em 2,0 metros.

Deslocamento (intacto) (TON)	Altura de calado meia- nau (m)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)	0,0 deg	5,0 deg	10,0 deg	15,0 deg	20,0 deg	25,0 deg	30,0 deg	35,0 deg	40,0 deg	45,0 deg	50,0 deg	60,0 deg	70,0 deg	80,0 deg	KN
88,92	0,500	17,056	0,0	2,0	0,00	0,660	1,272	1,663	1,919	2,103	2,238	2,331	2,389	2,405	2,384	2,248	2,013	1,702	KN
98,40	0,550	17,056	0,0	2,0	0,00	0,605	1,188	1,594	1,860	2,054	2,201	2,307	2,369	2,386	2,365	2,232	2,001	1,696	KN
107,90	0,600	17,056	0,0	2,0	0,00	0,560	1,109	1,528	1,806	2,009	2,166	2,282	2,345	2,363	2,343	2,213	1,988	1,689	KN
117,50	0,650	17,056	0,0	2,0	0,00	0,522	1,040	1,467	1,755	1,967	2,132	2,254	2,319	2,337	2,318	2,193	1,974	1,682	KN
127,10	0,700	17,056	0,0	2,0	0,00	0,490	0,980	1,409	1,707	1,928	2,101	2,224	2,290	2,309	2,292	2,171	1,959	1,675	KN
136,70	0,750	17,056	0,0	2,0	0,00	0,462	0,927	1,354	1,662	1,891	2,070	2,192	2,258	2,279	2,264	2,148	1,943	1,667	KN
146,40	0,800	17,056	0,0	2,0	0,00	0,439	0,881	1,302	1,619	1,856	2,039	2,159	2,225	2,248	2,234	2,124	1,927	1,659	KN
156,00	0,850	17,056	0,0	2,0	0,00	0,418	0,840	1,253	1,578	1,823	2,007	2,125	2,191	2,215	2,204	2,100	1,910	1,650	KN
165,80	0,900	17,056	0,0	2,0	0,00	0,400	0,804	1,206	1,539	1,792	1,975	2,090	2,156	2,181	2,172	2,075	1,893	1,642	KN
175,50	0,950	17,056	0,0	2,0	0,00	0,384	0,772	1,163	1,502	1,761	1,941	2,055	2,120	2,146	2,140	2,049	1,875	1,633	KN
185,30	1,000	17,056	0,0	2,0	0,00	0,370	0,744	1,123	1,466	1,729	1,908	2,020	2,084	2,111	2,107	2,023	1,857	1,624	KN
195,10	1,050	17,056	0,0	2,0	0,00	0,357	0,719	1,087	1,432	1,698	1,873	1,984	2,047	2,076	2,074	1,997	1,839	1,615	KN
204,90	1,100	17,056	0,0	2,0	0,00	0,346	0,697	1,055	1,399	1,665	1,838	1,947	2,011	2,040	2,041	1,970	1,821	1,606	KN
214,70	1,150	17,056	0,0	2,0	0,00	0,336	0,677	1,025	1,368	1,632	1,803	1,911	1,975	2,005	2,007	1,943	1,802	1,597	KN
224,60	1,200	17,056	0,0	2,0	0,00	0,327	0,659	0,998	1,337	1,598	1,767	1,874	1,938	1,969	1,974	1,916	1,783	1,587	KN
234,50	1,250	17,056	0,0	2,0	0,00	0,319	0,643	0,974	1,307	1,564	1,730	1,837	1,901	1,934	1,941	1,889	1,764	1,577	KN
244,40	1,300	17,056	0,0	2,0	0,00	0,312	0,628	0,952	1,277	1,529	1,693	1,799	1,864	1,899	1,908	1,862	1,745	1,568	KN
254,40	1,350	17,056	0,0	2,0	0,00	0,306	0,615	0,932	1,248	1,494	1,656	1,762	1,828	1,863	1,875	1,836	1,727	1,558	KN
264,30	1,400	17,056	0,0	2,0	0,00	0,300	0,604	0,915	1,219	1,458	1,618	1,723	1,791	1,828	1,842	1,809	1,708	1,548	KN
274,30	1,450	17,056	0,0	2,0	0,00	0,295	0,593	0,898	1,191	1,421	1,580	1,685	1,753	1,793	1,809	1,783	1,689	1,537	KN
284,30	1,500	17,056	0,0	2,0	0,00	0,290	0,583	0,884	1,163	1,385	1,541	1,646	1,716	1,758	1,776	1,757	1,671	1,527	KN
294,30	1,550	17,056	0,0	2,0	0,00	0,286	0,575	0,870	1,135	1,348	1,502	1,607	1,678	1,722	1,744	1,730	1,652	1,517	KN
304,40	1,600	17,056	0,0	2,0	0,00	0,282	0,567	0,856	1,108	1,311	1,462	1,568	1,640	1,686	1,710	1,704	1,634	1,507	KN
314,40	1,649	17,056	0,0	2,0	0,00	0,279	0,560	0,841	1,081	1,274	1,423	1,528	1,602	1,650	1,677	1,678	1,615	1,497	KN
324,50	1,699	17,056	0,0	2,0	0,00	0,275	0,554	0,826	1,053	1,238	1,383	1,488	1,563	1,614	1,644	1,651	1,596	1,487	KN
334,60	1,749	17,056	0,0	2,0	0,00	0,273	0,548	0,811	1,026	1,202	1,342	1,448	1,524	1,577	1,610	1,624	1,578	1,478	KN
344,80	1,799	17,056	0,0	2,0	0,00	0,270	0,543	0,795	0,999	1,166	1,302	1,407	1,485	1,540	1,576	1,597	1,559	1,468	KN
354,90	1,849	17,056	0,0	2,0	0,00	0,268	0,538	0,777	0,972	1,131	1,262	1,366	1,446	1,503	1,541	1,569	1,540	1,458	KN
365,10	1,899	17,056	0,0	2,0	0,00	0,266	0,532	0,760	0,944	1,096	1,222	1,325	1,406	1,465	1,506	1,542	1,520	1,448	KN
375,20	1,949	17,056	0,0	2,0	0,00	0,264	0,525	0,741	0,916	1,061	1,183	1,284	1,365	1,427	1,471	1,514	1,501	1,438	KN
385,50	2,000	17,056	0,0	2,0	0,00	0,263	0,516	0,720	0,887	1,026	1,143	1,243	1,325	1,388	1,435	1,485	1,481	1,428	KN

Fonte: Elaboração própria.