

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

HECTOR REIS ALMEIDA

**LEVANTAMENTO DE EMBARCAÇÕES DE PEQUENO PORTE COMUNS NA
REGIÃO AMAZÔNICA E ESTUDO DA RESPOSTA EM ONDAS DE UMA
EMBARCAÇÃO DO TIPO VOADEIRA**

MANAUS
2024

HECTOR REIS ALMEIDA

**LEVANTAMENTO DE EMBARCAÇÕES DE PEQUENO PORTE COMUNS NA
REGIÃO AMAZÔNICA E ESTUDO DA RESPOSTA EM ONDAS DE UMA
EMBARCAÇÃO DO TIPO VOADEIRA**

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

Orientador: 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.

A4471 Almeida, Hector Reis
Levantamento de embarcações de pequeno porte comuns na região amazônica e estudo da resposta em ondas de uma embarcação do tipo voadeira / Hector Reis
Almeida. Manaus : [s.n], 2024.
60 f.: color.; 30 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Naval - Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2024.
Inclui bibliografia
Orientador: Fontes, Jassiel Vladimir Hernández Fontes

1. Comportamento em ondas. 2. Embarcação regional.
3. Ondas regulares. 4. Região amazônica. 5. Voadeira.
I. Fontes, Jassiel Vladimir Hernández Fontes (Orient.).
II. Universidade do Estado do Amazonas. III.
Levantamento de embarcações de pequeno porte comuns na região amazônica e estudo da resposta em ondas de uma embarcação do tipo voadeira

HECTOR REIS ALMEIDA

**LEVANTAMENTO DE EMBARCAÇÕES DE PEQUENO PORTE COMUNS NA
REGIÃO AMAZÔNICA E ESTUDO DA RESPOSTA EM ONDAS DE UMA
EMBARCAÇÃO DO TIPO VOADEIRA**

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

Aprovado em: 16 de fevereiro 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

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

MANAUS
2024

AGRADECIMENTOS

A elaboração do presente trabalho recebeu suporte do Governo do Estado do Amazonas, com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), por meio do projeto “Divulgação de avanços científicos que possam contribuir com a prevenção de acidentes com embarcações na região amazônica” (Edital nº 014/2022 - PAPD/FAPEAM), por meio do qual o graduando foi bolsista de apoio técnico. Também, agradece-se o suporte proporcionado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil (CNPq), o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FNDCT), e o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), para a realização do projeto “Identificação de desafios para prevenir acidentes com embarcações de alta velocidade na região amazônica”, por meio da Chamada CNPq-FNDCT-MCTI nº14/2022 - Faixa A (Processo: 405529/2022-8). Agradecimentos especiais são dados para a empresa ANSYS Inc., pela licença acadêmica do software ANSYS Aqwa.

RESUMO

É possível que a Amazônia brasileira possua uma das maiores concentrações de embarcações de pequeno porte do Brasil, principalmente devido à falta de rodovias e à necessidade de transporte aquaviário de pessoas e cargas entre diversas cidades. Grande parte dessas embarcações, registradas ou não perante as autoridades marítimas, podem alcançar altas velocidades, sendo ainda necessário aprofundar estudos que permitam caracterizar seu comportamento hidrodinâmico. O presente trabalho visa contribuir no levantamento de embarcações de pequeno porte, motorizadas, típicas na região amazônica, e realizar uma análise do comportamento em ondas regulares de uma embarcação regional conhecida como “voadeira”. O objetivo principal consiste em avaliar os movimentos possíveis que uma embarcação desse tipo pode apresentar em condições de ondas, sem propulsão. Essas condições podem ocorrer durante eventos climáticos adversos, comuns na região, os quais podem gerar ondas eventuais na superfície dos rios. Para o levantamento de embarcações, foi considerada a cidade de Itacoatiara, no Estado do Amazonas, como o local representativo para o estudo. Foi selecionada uma embarcação do tipo voadeira como caso de estudo. O casco da embarcação foi modelado usando desenho assistido por computador e os seus movimentos em ondas foram pesquisados foram utilizados métodos de escoamento potencial de hidrodinâmica. Foram pesquisados o efeito da variação do ângulo de incidência das ondas e da posição vertical do centro de gravidade nos movimentos resultantes. Os resultados permitiram conhecer os movimentos mais significantes, incluindo a frequência da onda que os pode causar. Os movimentos de rotação apresentaram aumentos significantes para diferentes condições de ondas. A metodologia apresentada pode ser estendida para avaliar outras embarcações regionais.

Palavras-chave: Comportamento em ondas. Embarcação regional. Ondas regulares. Região amazônica. Voadeira.

ABSTRACT

It is possible that the Brazilian Amazon has one of the largest concentrations of small boats in Brazil, mainly due to the lack of roads and the need for water transport of people and cargo between different cities. Many of these vessels, registered or not registered by the maritime authorities, can reach high speeds, making it necessary to further study to characterize their hydrodynamic behavior. This work aims to contribute to the classification of small, motorized vessels, typical of the Amazon region, and to carry out an analysis of the behavior on regular waves of a regional vessel known as “voadeira”. The main objective is to evaluate the possible movements that a ship of this type can present in wave conditions, without propulsion. These conditions may occur during adverse climatic events, common in the region, as they may generate eventual waves on the surface of the rivers. For the survey of vessels, the city of Itacoatiara, in the State of Amazonas, was considered as the representative location for the study. A voadeira type vessel was selected as a case study. The ship's hull was modeled using computer-assisted design and its response in waves was investigated using hydrodynamic potential theory methods. We investigated the effect of the variation of the angle of incidence of the waves and the vertical position of the center of gravity of the resulting movements. The results allowed determining the most significant movements, including the wave frequency that may cause them. The rotational movements show significant increases for different wave conditions. The methodology presented can be extended to evaluate other regional vessels.

Keywords: Behavior in waves. Regional vessel. Regular waves. Amazon region. Voadeira.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplos de embarcações menores comuns na Amazônia. Fotografia obtida na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.	14
Figura 2. Graus de liberdade de uma embarcação.....	23
Figura 3. Etapas da metodologia.	29
Figura 4. Exemplo ilustrativo das fases de modelagem do casco no software Rhinoceros.	30
Figura 5. Exemplo das etapas de modelagem no software Ansys Aqwa (Hydrodynamic Diffraction).	31
Figura 6. Ângulos de interação das ondas com a embarcação.	31
Figura 7. Vista de perfil e do interior da embarcação tipo expresso. Fotografias obtidas na margem do rio em Itacoatiara – AM, 01/07/2023.	34
Figura 8. Embarcações tipo voadeira. Fotografias obtidas na margem do rio em Itacoatiara – AM, 01/07/2023.	35
Figura 9. Embarcações tipo rabeta. Fotografias obtidas na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.	36
Figura 10. Embarcação do tipo lancha rápida. Fotografias obtidas na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.	37
Figura 11. Embarcação tipo ambulancha. Fotografias obtidas na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.	38
Figura 12. Embarcação tipo viatura. Fotografia obtida na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.	39
Figura 13. Embarcação tipo “hidro a jato”. Fotografia obtida na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.	40
Figura 14. Embarcação tipo lancha escolar. Fotografias obtidas na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/06/2023.	41
Figura 15. Embarcação tipo casco de corrida. Fotografia obtida na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.	41
Figura 16. Exemplar de voadeira. Fotografia obtida na margem do rio em Itacoatiara – AM, 01/07/2023.	42
Figura 17. Versão final da modelagem do casco da embarcação "voadeira" utilizando o software Rhinoceros.	43
Figura 18. Comparação dos operadores de amplitude de resposta do movimento de avanço (<i>surge</i>) para diferentes frequências de onda. As curvas dos gráficos mostram os resultados de	

diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação. (a) VCG em 0 m. (b) VCG em 0,25 m. (c) VCG em 0,5 m.	46
Figura 19. Comparação dos operadores de amplitude de resposta de <i>surge</i> para diferentes frequências de onda, considerando o ângulo de incidência das ondas que causaram os maiores deslocamentos para diferentes posições do VCG (neste caso: 0 graus).....	47
Figura 20. Comparação dos operadores de amplitude de resposta do movimento de deriva (<i>sway</i>) para diferentes frequências de onda. As curvas dos gráficos mostram os resultados de diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação. (a) VCG em 0 m. (b) VCG em 0,25 m. (c) VCG em 0,5 m.	47
Figura 21. Comparação dos operadores de amplitude de resposta de <i>sway</i> para diferentes frequências de onda, considerando o ângulo de incidência das ondas que causaram os maiores deslocamentos para diferentes posições do VCG (neste caso: 90 graus).....	49
Figura 22. Comparação dos operadores de amplitude de resposta do movimento de arfagem (<i>heave</i>) para diferentes frequências de onda. As curvas dos gráficos mostram os resultados de diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação. (a) VCG em 0 m. (b) VCG em 0,25 m. (c) VCG em 0,5 m.	49
Figura 23. Comparação dos operadores de amplitude de resposta de <i>heave</i> para diferentes frequências de onda, considerando o ângulo de incidência das ondas que causaram os maiores deslocamentos para diferentes posições do VCG (neste caso: 180 graus).....	51
Figura 24. Comparação dos operadores de amplitude de resposta do movimento de balanço (<i>roll</i>) para diferentes frequências de onda. As curvas dos gráficos mostram os resultados de diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação. (a) VCG em 0 m. (b) VCG em 0,25 m. (c) VCG em 0,5 m.	51
Figura 25. Comparação dos operadores de amplitude de resposta de <i>roll</i> para diferentes frequências de onda, considerando o ângulo de incidência das ondas que causaram os maiores deslocamentos para diferentes posições do vcg (neste caso: 45 graus).....	53
Figura 26. Comparação dos operadores de amplitude de resposta do movimento de cabeceio (<i>pitch</i>) para diferentes frequências de onda. As curvas dos gráficos mostram os resultados de diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação. (a) VCG em 0 m. (b) VCG em 0,25 m. (c) VCG em 0,5 m.	53
Figura 27. Comparação dos operadores de amplitude de resposta de <i>pitch</i> para diferentes frequências de onda, considerando o ângulo de incidência das ondas que causaram os maiores deslocamentos para diferentes posições do VCG (neste caso: 135 graus).....	54

Figura 28. Comparação dos operadores de amplitude de resposta do movimento de guinada (*yaw*) para diferentes frequências de onda. As curvas dos gráficos mostram os resultados de diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação. (a) VCG em 0 m. (b) VCG em 0,25 m. (c) VCG em 0,5 m. 55

Figura 29. Comparação dos operadores de amplitude de resposta de *yaw* para diferentes frequências de onda, considerando o ângulo de incidência das ondas que causaram os maiores deslocamentos para diferentes posições do VCG (neste caso: 45 graus). 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características das malhas avaliadas.	44
Tabela 2. Disposição das Malhas A, B e C para análise.	44
Tabela 3. Resultados do campo de pressão gerado no casco para diferentes períodos de ondas regulares (ângulo de incidência de 0° e amplitude de onda de 0,2 m), para as três malhas consideradas (Malha A, Malha B e Malha C).	45
Tabela 4. Resumo dos deslocamentos angulares que alcançaram as máximas amplitudes nas análises.	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Descrição do problema	13
1.2 Revisão bibliográfica	15
1.3 Justificativa	20
1.4 Objetivos	20
1.4.1 Objetivo geral	20
1.4.2 Objetivos específicos	21
1.5 Estrutura do trabalho	21
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	22
2.1 Movimentos da embarcação	23
2.2 Massa e momento de inércia da embarcação.....	24
2.3 Equação de movimento e RAO	25
2.4 Descrição do software de escoamento potencial utilizado	26
2.6 Normativas aplicáveis para o estudo de riscos de acidentes de embarcações e alternativas para prevenção.....	26
3 METODOLOGIA.....	29
3.1 Etapa 1: Levantamento de embarcações.....	29
3.2 Etapa 2: Modelagem da embarcação selecionada como caso de estudo	30
3.3 Etapas 3 e 4: Configuração de software e análise da dinâmica da embarcação	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 Levantamento de embarcações de pequeno porte regionais.....	33
4.2 Resultados do caso de estudo da embarcação analisada do tipo “voadeira”	42
4.3 Resultados da análise da dinâmica da embarcação	43
4.3.1 Estudo preliminar da malha.....	43
4.3.2 Análise do movimento de avanço (<i>surge</i>)	45

4.3.3 Análise do movimento de deriva (<i>sway</i>)	47
4.3.4 Análise do movimento de arfagem (<i>heave</i>)	49
4.3.5 Análise do movimento de balanço (<i>roll</i>)	51
4.3.6 Análise do movimento de cabeceio (<i>pitch</i>)	53
4.3.7 Análise do movimento de guinada (<i>yaw</i>).	55
4.3.8 Discussão dos maiores deslocamentos	56
5 CONCLUSÕES.....	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do problema

A utilização de embarcações de pequeno porte na região amazônica é de extrema importância devido às características geográficas e logísticas na região, as quais limitam a existência de rodovias que conectam comunidades e rotas de difícil acesso. A Amazônia, com sua vasta extensão de rios e florestas, apresenta desafios significativos de transporte de pessoas e cargas, que até agora tentam ser superados com o uso de embarcações de variados tamanhos e modos de operação. Geralmente, as embarcações menores são de grande relevância, sendo utilizadas para acessar zonas de difícil acesso e desenvolver atividades cotidianas, incluindo transporte escolar, atividades de resgate e atenção médica, transporte de pessoas entre comunidades ribeirinhas, segurança e inspeção, entre outras atividades (HERNÁNDEZ-FONTES et al., 2021).

Cabe mencionar que, muitas vezes, as embarcações menores podem operar em alta velocidade, apresentando uma série de benefícios significativos que podem impactar positivamente tanto a economia regional quanto a qualidade de vida das comunidades locais. Porém, em alta velocidade os desafios para uma operação segura também aumentam (FALTINSEN, 2005), sendo necessário acrescentar pesquisas nesse tema.

Embora o uso de embarcações menores é comum em todas as regiões da Amazônia, a eficiência no transporte de pessoas e mercadorias é crucial para atender às necessidades das comunidades remotas, onde a única forma de acesso é por via aérea ou pelos rios, sendo esta última a alternativa mais econômica e viável para a maioria das atividades. Com o uso de embarcações menores em alta velocidade, é possível reduzir drasticamente o tempo de viagem, o que não apenas aumenta a frequência dos serviços de transporte, mas também torna todo o comércio local e atendimentos de saúde mais eficientes. Isso significa que as pessoas podem acessar mais rápido serviços básicos de atendimento e os produtos da região podem ser distribuídos com maior agilidade. Algumas das embarcações menores comuns na região amazônica, dependendo da potência do motor, podem alcançar altas velocidades. A Figura 1 mostra um exemplo de algumas embarcações menores atracadas na beira do rio, na cidade de Itacoatiara – AM. Esse tipo de arranjo de embarcações é muito comum de ser observado na região amazônica.

Figura 1. Exemplos de embarcações menores comuns na Amazônia. Fotografia obtida na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

O impacto que causa o uso de embarcações de pequeno porte na economia regional é considerável, tendo em vista que o transporte fluvial é uma espinha dorsal da economia amazônica e melhorar a conectividade entre áreas urbanas e rurais pode impulsionar o desenvolvimento econômico local. Com o aumento da circulação de bens e serviços, as oportunidades de negócios crescem, criando empregos e melhorando o padrão de vida das pessoas.

A acessibilidade a serviços de saúde e educação é outra área crucial. Muitas comunidades amazônicas sofrem com a falta de acesso a clínicas médicas e escolas. As embarcações menores que alcançam altas velocidades desempenham um papel fundamental ao facilitar o transporte de pessoas até esses serviços essenciais, melhorando assim a qualidade de vida e o acesso à educação e assistência médica.

Por último, mas não menos importante, a preservação ambiental é uma preocupação fundamental na região amazônica (FONTES et al., 2023). Existem embarcações de alta velocidade projetadas para atividades de pesquisa, segurança e monitoramento ambiental. Isso é particularmente relevante na Amazônia, um dos ecossistemas mais preciosos do planeta, onde a conservação ambiental é essencial para manter o equilíbrio ecológico e proteger a biodiversidade.

Em resumo, o uso de embarcações de alta velocidade na região amazônica não apenas melhora a eficiência no transporte e impulsiona a economia local, mas também desempenha um papel crucial na melhoria da acessibilidade a serviços essenciais e da preservação do ambiente

da Amazônia. Por tanto, pesquisas que relacionem a Engenharia Naval com o estudo e melhoramento das embarcações de alta velocidade regionais podem trazer benefícios significativos para as comunidades locais e para o meio ambiente. Porém, o uso desse tipo de embarcações requer de estudos que identifiquem os desafios que precisam ser superados para realizar operações seguras, prevenindo assim os riscos de acidentes.

O presente trabalho propõe identificar e descrever os tipos de embarcações menores, que podem alcançar altas velocidades, mais comuns no Estado do Amazonas. Também, visa-se propor uma análise dos movimentos de uma embarcação de alta velocidade em condições de ondas regulares utilizando métodos de escoamento potencial de hidrodinâmica.

1.2 Revisão bibliográfica

O estudo de embarcações na região amazônica tem sido amplificado com o tempo, evidenciando as dificuldades de operação, pois se trata de uma região extensa e com variação de profundidades, causada pelos períodos de cheia e vazante. A seguir são apresentadas algumas das contribuições de relevância relacionadas a esta área de estudo.

De acordo com Moraes et al. (2013), o transporte fluvial de passageiros na Amazônia desempenha um papel vital devido à localização de comunidades ribeirinhas sem acesso a rodovias. Apesar de algumas melhorias recentes, o sistema enfrenta desafios significativos, como a falta de infraestrutura nos terminais, a ausência de organização entre os armadores e uma frota predominantemente composta por embarcações obsoletas.

Em complemento à informação anterior, Oliveira Cunha e Isper Jr. (2020) consideram o desafio de regular o transporte aquaviário intermunicipal no estado do Amazonas, Brasil. O transporte aquaviário é um dos principais meios de transporte público de passageiros na região devido à extensa rede de vias navegáveis, à falta de estradas interligadas, ao baixo custo do transporte aquaviário e à ausência de aeroportos em muitos municípios.

O fato de diversas comunidades do interior do Estado do Amazonas, muitas vezes alocadas em comunidades ribeirinhas, depender deste modal, faz com que o estudo sobre estes tipos de embarcação se torne primordial, uma vez que com o passar do tempo, ainda grande parte dos armadores trabalhavam de forma artesanal, utilizando de meio empíricos para a construção e manutenção das embarcações. Dessa forma, novos estudos podem contribuir na otimização operacional e aumento da segurança desse tipo de embarcações.

Lima (2017) sustenta o comentado anteriormente, articulando que devido às características geográficas singulares da Amazônia Legal, a exigência por um sistema de transporte aquaviário de alta qualidade é mais evidente quando comparada a outras regiões do

Brasil. A melhoria do sistema de transporte aquaviário na Amazônia pode, não apenas impulsionar a competitividade econômica local, dada a natureza fundamental do transporte para a circulação de mercadorias e pessoas, mas também servir como um elemento de conexão socioeconômica dentro e fora da região.

Devido à proximidade com a capital do Estado do Amazonas é possível compreender que a fiscalização por conta dos órgãos responsáveis é muito mais intensificada. Por outro lado, em regiões mais afastadas da capital pode existir mais dificuldade de fiscalização, sendo comuns o descumprimento das regulamentações, a existência de embarcações sem manutenção, sobrecarga, sinalização e balizamento.

Segundo Aziz et al. (2022), a relevância das tecnologias da Indústria 4.0 como estratégias preventivas para acidentes de navios na região amazônica tem grande destaque, abordando a escassez de informação na Engenharia Naval. Contudo, ressalta a necessidade de pesquisa e desenvolvimento no Brasil, reconhecendo os desafios de implementação, especialmente em regiões em desenvolvimento. A sua conclusão enfatiza a importância de considerar as limitações específicas da Indústria 4.0 e os desafios únicos da região amazônica ao planejar e implementar projetos voltados para a prevenção de acidentes de navios na indústria naval. A indústria 4.0 torna viável o acompanhamento e facilitação na obtenção de dados que antes era uma tarefa um tanto atenuante e massiva, bem como suas outras diretrizes demonstram meios de utilizar estes dados para obtenção de meios e melhorias. Ao se tratar do meio naval podem contribuir de diversas maneiras, não apenas tratando do sentido autônomo presente na indústria 4.0, mas também meios de prevenção de acidentes, e redução de gastos exacerbados com manutenção.

Silva et al. (2015) pesquisaram sobre a influência no modal aquaviário, analisando sua importância na logística de transporte brasileira. Ao longo de um período definido, o trabalho aborda a estrutura atual, perspectivas, limitações, investimentos e incentivos do Governo Federal para esse modal. Também destaca a necessidade de integração com outros modais para a eficiência da navegação, recomendando um estudo adicional sobre multimodalidade.

Devido à abundância de hidrovias na região amazônica, para certos casos se torna fundamental um bom estudo de rota para maximizar as possibilidades de transporte, principalmente ao se tratar de transporte de mantimentos, alimentos perecíveis, atividades de salvação, assistência social, dentre outras. Assim, torna-se fundamental o uso de embarcações de alta velocidade que estejam habilitadas com as necessidades para esse transporte em águas amazônicas.

Segundo Nakanishi (2015) se considerarmos a forma do casco e o modo como as embarcações se movem sobre a água, podemos categorizá-las em três tipos distintos: deslocamento, semi-planeio e planeio. No caso de uma embarcação de deslocamento, a sustentação é principalmente derivada do empuxo gerado pelo volume submerso do casco. Em contraste, uma embarcação de planeio obtém sustentação por meio de forças dinâmicas resultantes de seu movimento sobre a superfície da água. Por fim, uma embarcação de semi-planeio é sustentada pela combinação de forças dinâmicas e hidrostáticas. A caracterização do modo de operação de embarcações pode ajudar no entendimento das embarcações presentes na região amazônica, pois nela transitam embarcações de grande porte, até embarcações menores como no caso das canoas regionais.

Fontes et al. (2022) realizaram um estudo vasto sobre os principais problemas que navios de passageiros de longa distância enfrentam na Amazônia brasileira, apresentando um quadro integrado rumo à prevenção de acidentes, tratando principalmente de embarcações do tipo "gaiolas" ou "recreios", "ferries" e "expressos", gerando um panorama da necessidade cumprida sobre cada tipo de embarcação. Essa diversidade de embarcações reflete a necessidade de adaptabilidade às características específicas da região, contribuindo para a vitalidade do transporte fluvial na Amazônia brasileira. Por meio de pesquisas similares podemos perceber a necessidade de regulação e incentivo na área naval na região amazônica, fator culminante para o desenvolvimento desta região, pois se trata de uma região de grande fluxo de embarcações.

De acordo com Aziz et al. (2022), embora o uso de embarcações desempenhe um papel essencial nas atividades comerciais da região, desafios significativos de segurança persistem, potencialmente resultando em perdas humanas, danos materiais e impactos ambientais adversos. A pesquisa revisa e detalha alguns dos acidentes mais comuns que podem ocorrer, como colisões, incêndios, explosões, alagamentos, encalhes e derramamentos de óleo. Adicionalmente, são explorados exemplos de estudos recentes conduzidos globalmente para avaliar esses incidentes. Salienta barreiras específicas da região amazônica que devem ser consideradas na análise de riscos associados a acidentes com embarcações.

Luz et al. (2017) realizaram uma análise abrangente dos acidentes de navegação em águas brasileiras entre 2006 e 2015, utilizando as decisões do Tribunal Marítimo como base. O estudo estabelece critérios para a análise de dados, classificando os tipos de acidentes, suas causas e as embarcações envolvidas. A maioria dos acidentes ocorreu em embarcações de médio a grande porte, com 57% envolvendo embarcações de médio porte. Naufrágios, colisões e colisões com outras embarcações foram os acidentes mais comuns, sendo o erro humano a

principal causa, responsável por 60% das ocorrências e 81% das fatalidades. A região Sudeste liderou em incidência, enquanto a região Norte teve a maior taxa de fatalidade, principalmente devido a naufrágios. O estudo oferece descrições importantes sobre padrões de acidentes, suas causas predominantes e sugere áreas de pesquisa futura, incluindo uma expansão nos tipos de acidentes analisados e uma variedade maior de classes de embarcações.

Luz et al. (2017) descreveram que a região Norte do Brasil ainda enfrenta uma significativa ocorrência de acidentes com embarcações, muitos dos quais são mitigados pela presença de ondas de baixa amplitude, em contraste com as regiões costeiras e marítimas. Aziz et al. (2022) destacaram a necessidade de estudar meios para prevenção. Esses meios podem incluir abordagens comunicativas para dissuadir comportamentos inadequados e investigações científicas que envolvem análises dinâmicas e estruturais, visando aprimorar a segurança no transporte fluvial.

Vorus e Paulling (2010) abordaram uma pesquisa sobre a evolução das embarcações na região amazônica e os desafios relacionados à segurança nesse contexto. Cada uma tem características distintas em relação à velocidade, eficiência, estabilidade e uso, justificando assim a dinâmica de cada embarcação.

Segundo Rose (2015) a visualização computacional tridimensional tornou-se uma ferramenta indispensável na atualidade, proporcionando meios poderosos para a documentação, reconstrução e análise de estruturas diversas. A crescente acessibilidade de software e hardware ampliou significativamente o leque de ferramentas digitais disponíveis. De acordo com Pereira e Laurindo (2007), que analisaram a aplicabilidade de meios de modelagem virtual, esse tipo de tecnologias modernas pode reduzir os custos de planejamento e produção. O uso de modelagem virtual e simulação contribuem para uma análise mais eficaz dos projetos, reduzindo erros e otimizando recursos.

Existem diversos softwares que permitem avaliar o comportamento de embarcações em diversas situações de interação com escoamentos. Exemplos de abordagens são os softwares baseados em métodos de escoamento potencial (exemplo: Ansys Aqwa, Nemoh, Wamit, Maxsurf Motions) e métodos de escoamento viscoso (exemplo: Ansys Fluent, Flow3D, StarCCM+, entre outros). No entanto, a velocidade de processamento, tem feito que os métodos potenciais sejam ferramentas muito utilizadas, em fases de anteprojeto, para avaliar o comportamento de estruturas e embarcações. Como exemplo, segundo Samaei et al. (2016), a aplicação do software Ansys Aqwa tem tido relevância na análise de estruturas marítimas. O Ansys Aqwa destaca-se por sua capacidade de modelar e simular o comportamento dinâmico

de estruturas submersas, considerando os efeitos das ondas, correntes e demais condições ambientais, desprezando os efeitos da viscosidade da água.

Xu et al. (2019) conduziram um estudo abrangente, intitulado "Análise de resposta de movimento de embarcação de mineração baseada em Ansys Aqwa", que examina detalhadamente a resposta ao movimento de uma embarcação de mineração em condições marítimas diversas. O artigo utiliza o software de simulação hidrodinâmica Ansys/Aqwa para analisar as características de resposta tempo-frequência da embarcação, considerando o acoplamento de vento, onda e fluxo. Os resultados revelam que o ângulo da onda influencia o operador de amplitude de resposta (RAO) nos seis graus de liberdade, sendo a frequência correspondente ao pico do RAO relativamente próxima. A velocidade da corrente marítima afeta de forma distinta os movimentos, enquanto a força da onda em diferentes graus de liberdade é impactada pelo ângulo de incidência das ondas. O estudo também destaca a influência da velocidade da correnteza marítima na resposta do movimento do casco, incluindo uma análise estatística das forças das ondas em diferentes ângulos.

O comportamento em ondas de embarcações na região amazônica tem sido pouco estudado. Exemplos recentes têm avaliado o comportamento em ondas de uma barça regional e de uma embarcação de carga e passageiros do tipo gaiola recreio (DE ALMEIDA, 2023; JUNIOR et al., 2023). No entanto, é evidente que a compreensão aprofundada das respostas de movimento de outras embarcações regionais submetidas à interação com ondas pode fornecer insights valiosos para o design e operação segura dessas embarcações em ambientes fluviais complexos. É importante mencionar que embora as embarcações regionais naveguem a maior parte do tempo em águas calmas, pode ocorrer a incidência das ondas de maneira eventual, principalmente por causa das condições ambientais adversas com chuva e fortes ventos que acontecem na região (FONTES et al., 2023).

Além das embarcações que operam em regime de deslocamento, as embarcações de alta velocidade, geralmente operando em semi-deslocamento e planeio, são muito comuns na região amazônica, e a análise do seu comportamento em ondas é fundamental pois este é o meio mais comum de transporte de ribeirinhos. O estudo da sua dinâmica pode ajudar na caracterização do comportamento da embarcação em situações adversas.

Este trabalho de conclusão concentra-se na análise de embarcações de pequeno porte regionais e comuns no Estado do Amazonas, especialmente as que podem alcançar altas velocidades. É considerada apenas uma embarcação de médio porte conhecida como Expresso.

Primeiro, é feito um levantamento de embarcações regionais desse tipo, principalmente localizadas na cidade de Itacoatiara, no Estado do Amazonas. Logo, é selecionada uma embarcação do tipo “voadeira” para realizar uma modelagem computacional do casco e, posteriormente, realizar uma análise da resposta da embarcação em ondas regulares utilizando software de análise hidrodinâmica. A intenção do estudo é avaliar a situação na qual a embarcação fica sem propulsão, provavelmente em uma situação climática adversa e está sujeita à interação com ondas. Foi analisado o efeito da variação do ângulo de incidência das ondas e da posição vertical do centro de gravidade nos movimentos resultantes.

1.3 Justificativa

Existem muitas embarcações de pequeno porte, regularizadas e não regularizadas, as quais operam continuamente na região amazônica, transportando pessoas e cargas diversas. Grande parte dessas embarcações são motorizadas e podem alcançar altas velocidades, pelo que estão sujeitas a instabilidades dinâmicas, problemas de sobrepeso, condições climáticas, dentre outros fatores. Esse tipo de embarcações regionais ainda requer da aplicação de estudos técnicos e científicos baseados na Engenharia Naval que permitam aumentar a sua eficiência, segurança e sustentabilidade. Muitas das embarcações de pequeno porte regionais ainda são projetadas e construídas de maneira semiempírica, sem avaliar condições operacionais, incluindo o comportamento em ondas. Embora a região amazônica não apresente condições de ondas frequentes, como no oceano, elas podem ocorrer por períodos específicos. Por exemplo, trens de ondas eventuais podem se suscitar devido a condições climáticas adversas, como trombas de água com fortes ventos, ou bem, por causa das ondas geradas por outras embarcações. Assim, é requerido realizar estudos que permitam conhecer o comportamento de embarcações menores regionais quando estejam sujeitas à interação com ondas, sem ter a capacidade de avançar. Por esse motivo, neste estudo é feito um levantamento das embarcações de pequeno porte mais comuns no Estado do Amazonas, selecionando uma delas como caso de estudo para estudar a sua dinâmica em ondas regulares.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Contribuir na identificação e levantamento dos tipos de embarcações de pequeno porte comuns na região amazônica, selecionando uma delas para avaliar os seus movimentos em ondas regulares, considerando a embarcação em flutuação livre e com diferentes ângulos de incidência das ondas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica e levantamento em campo para descrever as embarcações de pequeno porte comuns no Estado do Amazonas, considerando a cidade de Itacoatiara como o local representativo do estudo.
- A partir do levantamento feito, selecionar como caso de estudo uma embarcação regional com impacto social relevante.
- Modelar o casco da embarcação selecionada utilizando software de desenho assistido por computador.
- Avaliar a resposta em ondas regulares da embarcação flutuando livremente, assumindo que ficou sem propulsão, por meio de métodos de hidrodinâmica baseados na teoria do escoamento potencial disponíveis na versão acadêmica do software Ansys Aqwa.
- Pesquisar os efeitos do ângulo de incidência das ondas e da posição vertical do centro de gravidade (vcg) nos movimentos de translação e rotação da embarcação.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho de conclusão de curso está organizado como segue: o Capítulo 2 apresenta a Fundamentação Teórica, a qual mostra os conceitos teóricos mais relevantes do estudo. O Capítulo 3 descreve a Metodologia seguida para realizar o estudo. Logo, no Capítulo 4, estão apresentados os Resultados e Discussões, incluindo subseções relacionadas com cada uma das fases da pesquisa. Finalmente, o Capítulo 5 apresenta as Conclusões principais do estudo realizado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Embarcações de pequeno porte que podem alcançar altas velocidade na região amazônica são comumente utilizadas na navegação nos rios sinuosos, muitas vezes de difícil acesso para embarcações maiores, e em águas rasas. Essas embarcações são caracterizadas por cascos leves e motores potentes, sendo capazes de alcançar velocidades consideráveis, permitindo uma redução significativa no tempo de viagem entre os diversos pontos da região. Sua capacidade de deslocamento rápido não apenas agiliza o transporte de pessoas e mercadorias, mas também oferece uma plataforma versátil para atividades como patrulha e fiscalização ambiental, resgate e turismo, entre outras.

A concepção dessas embarcações é influenciada pelas necessidades específicas da região amazônica, sendo baseadas muitas vezes na experiência. A estrutura do casco precisa ser projetada para navegar em águas rasas e para enfrentar as variações sazonais nos níveis dos rios, permitindo que as embarcações acessem áreas remotas que seriam inacessíveis para embarcações convencionais. Além disso, sistemas de propulsão eficientes são necessários para maximizar o desempenho nas águas turbulentas da região.

Molland (2017) descreve alguns desafios enfrentados pelas embarcações de alta velocidade, destacando a resistência hidrodinâmica em altas velocidades como um tema relevante. Ao abordar a otimização do design do casco, propõem-se estratégias inovadoras para lidar com complexidades específicas desse cenário operacional. Também são discutidos minuciosamente os sistemas de propulsão adotados, oferecendo uma visão profunda sobre tecnologias que impulsionam a eficácia propulsiva nesse contexto e de algumas contribuições recentes no campo da engenharia naval.

Segundo Faltinsen (2005), uma embarcação de alta velocidade é projetada para alcançar e manter velocidades superiores às embarcações convencionais, destacando-se por um design de casco que minimiza a resistência hidrodinâmica, favorecendo maior eficiência em altas velocidades. A propulsão eficiente, a estabilidade aprimorada, e o uso de materiais leves são características fundamentais. Em suma, em uma embarcação de alta velocidade se busca otimizar sua hidrodinâmica, propulsão e estabilidade, para operar com eficácia em condições de velocidade elevada.

No entanto, a implementação das embarcações de alta velocidade não é isenta de riscos de operação, os quais podem estar relacionados a instabilidades dinâmicas durante sua interação com vento e ondas, os quais podem propiciar acidentes. A integração bem-sucedida dessas embarcações requer um equilíbrio entre a modernização tecnológica e a consideração das preocupações ambientais e sociais na região amazônica. É essencial adotar abordagens que

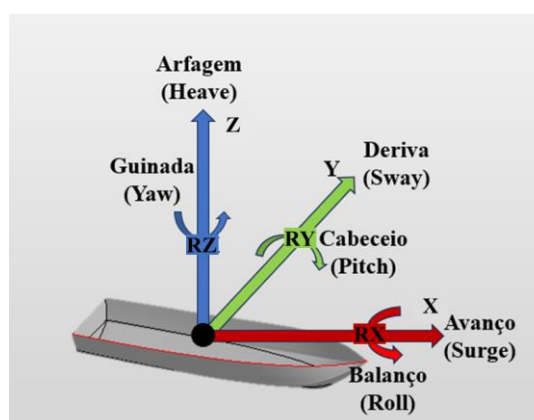
minimizem os impactos negativos sobre a fauna, a flora e as comunidades locais, garantindo que o desenvolvimento seja sustentável e respeitoso com a rica biodiversidade e os modos de vida tradicionais da região. Na região amazônica, esse tipo de embarcações está sujeito à interação constante com as correntezas dos rios e, eventualmente, com a ocorrência eventual de condições climáticas adversas que incluem chuva, fortes ventos e a geração de ondas na superfície da água. Sendo assim, é necessário avaliar o seu comportamento dinâmico em diversas condições de operação.

2.1 Movimentos da embarcação

A Engenharia Naval enfrenta desafios significativos relacionados aos movimentos instáveis e ao carregamento estrutural das embarcações. Os movimentos de uma embarcação em ondas regulares podem ser modelados por equações diferenciais baseadas na segunda lei de Newton, as quais equilibram forças e momentos externos causados pelas ondas com as forças e momentos hidromecânicos da estrutura (NEWMAN, 1979).

Uma embarcação cuja massa é concentrada em um ponto pode ter seis graus de liberdade, como o demonstrado pela Figura 2. Esses graus de liberdade de movimento são frequentemente descritos em inglês, sendo três movimentos de translação ao longo dos eixos principais x, y e z, respectivamente: *surge* (avanço, η_1), *sway* (deriva, η_2), *heave* (arfagem, η_3), e três movimentos de rotação em torno esses eixos: *roll* (balanço, η_4), *pitch* (cabeceio, η_5), *yaw* (guinada, η_6). A determinação e análise desses movimentos, seja de forma acoplada ou desacoplada, é fundamental para compreender o comportamento dinâmico de uma embarcação em resposta a forças externas, como ondas, vento e correntes. O entendimento e o controle desses movimentos são necessários para avaliar a estabilidade, segurança e conforto durante a navegação.

Figura 2. Graus de liberdade de uma embarcação.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

2.2 Massa e momento de inércia da embarcação

Na análise de estruturas flutuantes segundo Journée (2001), a compreensão dos momentos de inércia é essencial para avaliar a estabilidade e o comportamento hidrodinâmico. Para os movimentos de translação, as equações de movimento são modeladas com relação à massa. Porém, no caso da determinação dos movimentos de rotação de uma embarcação, visa-se necessário conhecer os momentos de inércia principais com relação aos eixos principais da embarcação para o estudo dos movimentos desacoplados (I_{xx} , I_{yy} e I_{zz}). No caso do estudo de movimentos de rotação acoplados, é necessário conhecer os produtos de inércia (I_{xy} , I_{xz} , I_{yz} , I_{yx} , I_{zx} , I_{zy}), os quais são utilizados dependendo do tipo de acoplamento do movimento. Frequentemente, para fins práticos em termos de solução das equações de movimento, esses momentos são expressos em termos dos raios de giração (k , ou raios de inércia; *gyration ratio*). O produto da massa do corpo vezes o raio de giração ao quadrado equivale ao momento de inércia com relação ao eixo considerado. Segundo Journée (2001), quando a distribuição exata da massa sólida de um navio com relação aos seus eixos principais é desconhecida, é comum utilizar estimativas para os raios de giração. Essa abordagem é particularmente útil na modelagem e análise preliminar de estruturas flutuantes. Os raios de inércia podem ser aproximados por uma fração da massa total, e estudos empíricos mostram que uma relação aceitável para essas estimativas é: $k_{xx} \approx 0,30B$ até $0,40B$; $k_{yy} \approx 0,22L$ até $0,28L$; $k_{zz} \approx 0,22L$ até $0,28L$, para o caso de uma embarcação.

Para este caso temos que k representa o raio de inércia, seguido de B para boca da embarcação e L para o comprimento. A adoção desses coeficientes simplificados para estimar os raios de inércia (k_{xx} , k_{yy} , k_{zz}) em função da massa sólida da estrutura é particularmente vantajosa em uma pesquisa, especialmente nos estágios iniciais do projeto, onde detalhes precisos sobre a distribuição de massa podem não estar prontamente disponíveis. Em um contexto de pesquisa, a simplicidade desses coeficientes é valiosa para fornecer uma visão inicial sobre os momentos de inércia da embarcação, sem a necessidade de dados detalhados que poderiam não estar acessíveis em fases iniciais.

No presente estudo, foram selecionados de maneira arbitrária raios de giração $0,3B$, $0,22L$ e $0,22L$ para o cálculo dos raios de giração k_{xx} , k_{yy} , e k_{zz} , necessários para calcular os movimentos de *roll*, *pitch* e *yaw*, respectivamente.

2.3 Equação de movimento e RAO

O estudo dos movimentos das embarcações é de extrema importância na engenharia naval e na navegação, uma vez que influencia diretamente a estabilidade, o conforto e a segurança. A aplicação da equação massa-mola-amortecedor nesse contexto revela-se uma ferramenta fundamental para a modelagem desses movimentos. Esta análise tem como objetivo discutir a relação entre essa equação os movimentos de uma embarcação, considerando fatores como a ação das ondas. A equação 1 mostra um exemplo desta equação para o movimento de heave.

A solução da equação massa-mola- amortecedor proporciona o Operador de Amplitude de Resposta (OAR, ou *Response Amplitude Operator* – RAO) que permite representar as respostas de estruturas navais por amplitude unitária de onda, para diferentes frequências de encontro com as ondas. O conhecimento profundo das características do RAO é essencial para otimizar o design e a operação de embarcações em diversas aplicações, desde transporte marítimo até operações offshore.

Ao tratar desses tipos de movimentos será demonstrado brevemente na equação 1 a equação desacoplada de arfagem (*heave*), responsável por representar o movimento de translação da embarcação ao longo do eixo vertical. A equação é descrita com fins explicativos; a mudança dos seus índices faz com que seja possível representar também os outros movimentos translacionais, como no caso do avanço(*surge*) e deriva (*sway*).

$$(m + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 = F_3 \quad (1)$$

η_{33} : movimento do corpo na direção de *heave*;

ω : frequência de oscilação;

M: massa da estrutura;

$A_{33}(\omega)$: coeficiente de massa adicional;

$B_{33}(\omega)$: coeficiente de amortecimento;

C_{33} : coeficiente de restauração;

$F(\omega)$: somatório de forças atuantes no sistema.

Em seguida, para outro exemplo, porém de maneira mais detalhada, analisamos a equação que governa o movimento de cabeceio (*pitch*) de uma embarcação, que pode ser representada por um sistema massa-mola-amortecedor, descrito na equação 2. (FALTINSEN, 1993). Também é válido compreender que ao mudar seus índices desta fórmula também se torna possível representar os outros movimentos e rotação, como guinada (*yaw*) e balanço (*roll*).

$$(I_{yy} + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 = F5(\omega) \quad (2)$$

η_5 : movimento do corpo na direção de *pitch*;

ω : frequência de oscilação;

I_{yy} : momento de inércia principal;

$A_{55}(\omega)$: momento de inércia adicional;

$B_{55}(\omega)$: coeficiente de amortecimento;

C_{55} : coeficiente de restauração;

$F(\omega)$: somatório de forças atuantes no sistema.

Resolvendo a equação para $\eta_5 = \eta_5 e^{i\omega t}$ encontra-se o RAO. Uma das maneiras de expressar esse operador é a seguinte:

$$\text{RAO}(\omega) = \frac{\eta_5}{\xi_a} = \frac{F}{C_{55} - (I + A_{55})\omega^2 + iB(\omega)\omega} \quad (3)$$

A definição de frequência natural de um sistema é dada pela raiz quadrada da relação da rigidez com a massa do sistema, $\omega_n = (\text{rigidez}/\text{massa})^{1/2}$.

2.4 Descrição do software de escoamento potencial utilizado

Para a realização de análises das características hidrodinâmicas de embarcações, optou-se pela combinação de dois softwares: Rhinoceros e ANSYS Aqwa (*Hydrodynamic Diffraction*). Essa escolha foi feita devido à capacidade complementar dessas ferramentas na modelagem e análise dinâmica dessas embarcações.

A nomenclatura utilizada no software para análise dinâmica segue os seguintes parâmetros, x, y, z, rx, ry, rz. As translações de surge, Sway e heave correspondem aos deslocamentos ao longo dos eixos x, y e z, respectivamente. No contexto de rotações, os termos rx, ry, e rz geralmente estão associados com os conceitos de pitch, roll e yaw, que são rotações em torno dos eixos x, y e z, respectivamente. O roll refere-se à rotação em torno do eixo transversal (x), o pitch à rotação em torno do eixo longitudinal (y), e o yaw à rotação em torno do eixo vertical (z). O software utilizado calcula as respostas (RAO) de maneira acoplada, pelo que detalhes da modelagem dos movimentos pode ser encontrada no manual do ANSYS Aqwa (ANSYS, 2013).

2.6 Normativas aplicáveis para o estudo de riscos de acidentes de embarcações e alternativas para prevenção

As embarcações de alta velocidade na região Amazônica desempenham um papel crucial na conectividade e no desenvolvimento socioeconômico dessa vasta região fluvial. No

entanto, a busca por maior eficiência e segurança na navegação também traz consigo desafios significativos. Os acidentes envolvendo essas embarcações podem ter impactos devastadores, ameaçando vidas humanas, o ambiente e a infraestrutura fluvial. Diante desses riscos, torna-se essencial explorar alternativas de prevenção de acidentes, seguindo normas e convenções marítimas.

As normas e convenções marítimas, como as estabelecidas pela Organização Marítima Internacional (OMI) e as regulamentações nacionais, fornecem um quadro normativo que visa assegurar a segurança da navegação em águas interiores e marítimas. No contexto amazônico, a Norma da Autoridade Marítima nº 02 (Normam-02/DPC) da Marinha do Brasil desempenha um papel essencial na regulamentação da operação de embarcações. Para embarcações de pequeno porte que possam alcançar altas velocidades, essas normas abordam questões como equipamentos de segurança, habilitação dos condutores, limites de velocidade, navegação em áreas restritas e muito mais.

No entanto, a eficácia dessas normas depende de sua aplicação rigorosa e de uma abordagem proativa na adoção de medidas de prevenção. Isso inclui o desenvolvimento e implementação de treinamentos especializados para os condutores, o estabelecimento de rotinas de manutenção preventiva para as embarcações e a promoção de campanhas de conscientização para usuários e stakeholders.

A resolução da OMI conhecida como Regulamentos Internacionais para Evitar Abalroamentos no Mar (RIPEAM), é um documento crucial que estabelece diretrizes e regulamentos para garantir a segurança da navegação e a prevenção de colisões no mar. Esses regulamentos são essenciais para promover a segurança dos navios, tripulações e o meio ambiente marinho, pois ajudam a evitar acidentes graves que podem resultar em danos significativos.

De acordo com a RIPEAM, os navios devem seguir regras estritas de navegação, incluindo o uso de luzes de sinalização, sirenes e regras de passagem que determinam qual navio tem prioridade quando se aproximam uns dos outros. Essas regras são projetadas para evitar colisões e incidentes no mar, especialmente em áreas congestionadas e próximas à costa. Para que assim se torne possível a prevenção de acidentes, uma vez que esta resolução também está válida para águas interiores.

A classificação de riscos de acidentes em embarcações de alta velocidade na Amazônia deve levar em consideração diversos fatores, considerando as particularidades da região, o tipo de embarcação e as condições operacionais. Alguns destes riscos podem ser relacionados a condições hidrográficas, dificuldade de visibilidade, condições meteorológicas, cumprimento

das regulamentações, treinamento dos operadores, manutenção das embarcações, sobrecarga, velocidade excessiva, sinalização e balizamento.

A prevenção de acidentes com embarcações é uma preocupação fundamental para a segurança marítima em todo o mundo. Para garantir a navegação segura em mares e rios, marinheiros e operadores de embarcações dependem de uma série de regulamentos e convenções internacionais, como o SOLAS (Convenção Internacional para a Salvaguarda da Vida Humana no Mar), COLREG (Regras de Governo para Evitar Colisões no Mar) e RIPEAM (Regulamento Internacional para Evitar Abalroamentos)

Esses instrumentos legais fornecem orientações precisas sobre como as embarcações devem se comportar, tanto em mar aberto quanto em vias navegáveis interiores, a fim de evitar acidentes graves. O SOLAS, por exemplo, estabelece padrões rigorosos para a segurança das embarcações, incluindo requisitos para equipamentos de salvamento, sistemas de comunicação e medidas de prevenção de incêndios a bordo (SIMÕES et al., 1995).

A importância das COLREGs é enfatizada por sua aceitação generalizada na comunidade marítima internacional. Como destaca a própria Organização Marítima Internacional (IMO, 2018): "As COLREGs são reconhecidas internacionalmente como a melhor maneira de evitar abalroamentos no mar e desempenham um papel crucial na segurança da navegação e na proteção do meio ambiente marinho."

Em resumo, o cumprimento dessas convenções e regulamentos desempenha um papel crucial na prevenção de acidentes com embarcações, ajudando a manter a segurança de marinheiros, passageiros e o meio ambiente marítimo.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido por meio de quatro etapas de análise, as quais são resumidas na Figura 3 e descritas a seguir.

Figura 3. Etapas da metodologia.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

3.1 Etapa 1: Levantamento de embarcações

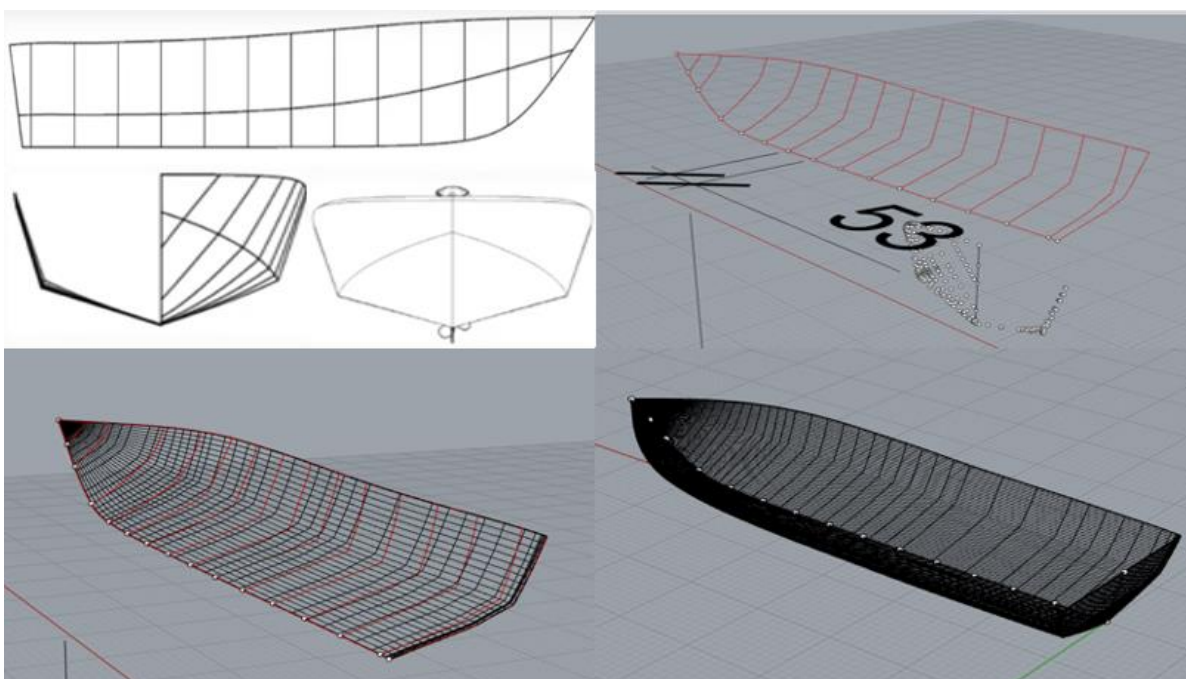
Para a Etapa 1, foram feitas algumas visitas estratégicas a pontos específicos nas cidades de Manaus e Itacoatiara, situadas no Estado do Amazonas, Brasil. As regiões visitadas são relevantes por concentrarem um intenso fluxo de embarcações de alta velocidade, tornando-as locais ideais para a coleta de dados. Durante essas visitas, foi possível obter alguns dados das

dimensões principais das embarcações. A documentação das embarcações foi realizada por meio da captura de imagens utilizando um smartphone modelo Samsung A75. As fotos foram reunidas desde o dia 29 de junho de 2022.

3.2 Etapa 2: Modelagem da embarcação selecionada como caso de estudo

A partir do levantamento de embarcações de alta velocidade realizado, foi selecionada a embarcação do tipo voadeira como caso de estudo para avaliar a sua resposta dinâmica em ondas (os resultados são apresentados no Capítulo 3). A embarcação tem comprimento, boca e calado de 7,13, 1,6 e 0,6 m, respectivamente. Para fins de avaliar os movimentos da embarcação em ondas regulares, foi necessário realizar a modelagem tridimensional do casco da embarcação selecionada. Para isso, foi escolhido o software Rhinoceros, pois esse software facilita a transferência de modelos 3D para outros programas. A modelagem tridimensional do casco permitiu a avaliação de diversos aspectos da embarcação selecionada, como ilustrado na Figura 4, que mostra de maneira geral as fases de modelagem com o software selecionado. Os arquivos da modelagem do casco foram salvos com extensão .3dm e .igs, para sua posterior análise no software Ansys Aqwa.

Figura 4. Exemplo ilustrativo das fases de modelagem do casco no software Rhinoceros.



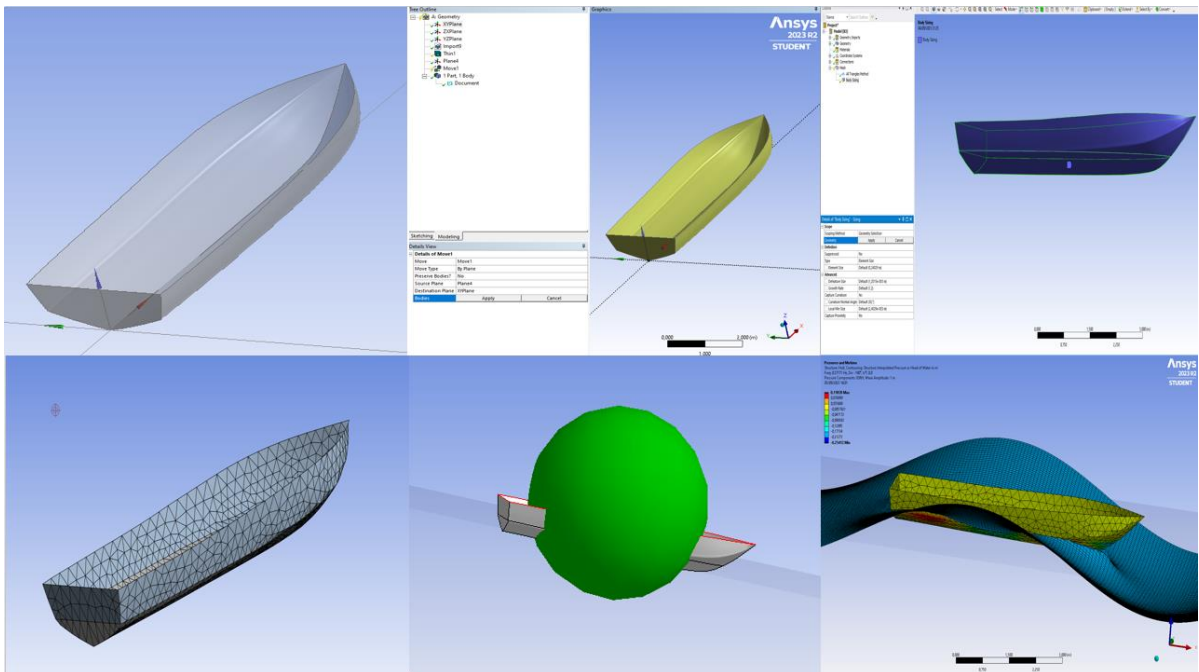
Fonte: Elaboração própria, 2023.

3.3 Etapas 3 e 4: Configuração de software e análise da dinâmica da embarcação

A modelagem prévia no Rhinoceros permitiu a criação da superfície do casco da embarcação, mesma que foi utilizada para a análise subsequente no software ANSYS Aqwa,

especificamente na aplicação chamada *Hydrodynamic Diffraction* (Figura 5). Com essa ferramenta foi possível avaliar o comportamento em ondas regulares da embarcação por meio da análise dos operadores de amplitude de resposta dos movimentos. Foram avaliados os operadores de amplitude com relação à incidência de ondas regulares com diferentes frequências. Foi considerada a embarcação sem velocidade de avanço, em flutuação livre, assumindo uma condição na qual a embarcação pode ficar à deriva em uma condição adversa na região amazônica na qual são geradas ondas. A ferramenta numérica permite simular o comportamento hidrodinâmico utilizando métodos dos painéis baseados na teoria de escoamento potencial de hidrodinâmica (ANSYS, 2013). Como todo escoamento potencial, assume-se a água como incompressível e invíscida, e o escoamento como irrotacional.

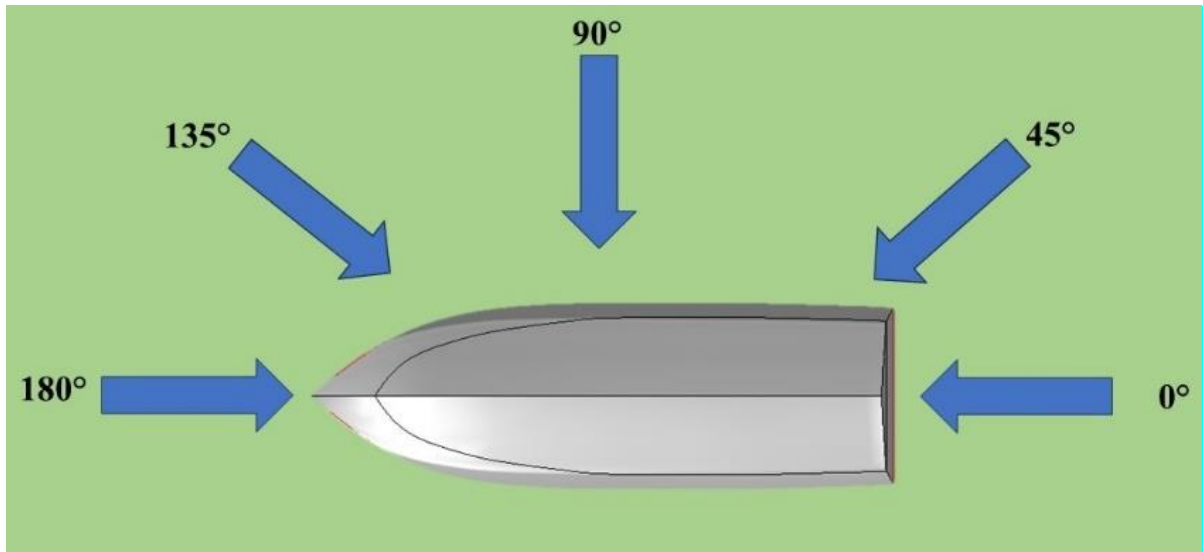
Figura 5. Exemplo das etapas de modelagem no software Ansys Aqwa (*Hydrodynamic Diffraction*).



Fonte: Versão acadêmica do software Ansys, 2023.

Antes de implementar análises paramétricas, foram realizados estudos preliminares, nos quais foram definidos os parâmetros de entrada do software e feitos estudos de efeitos de discretização da malha nos resultados. Os resultados desses pré-testes são apresentados na seção de Resultados. Durante as análises, foram consideradas ondas regulares com frequências diferentes, assim como cinco diferentes ângulos de encontro das ondas com a embarcação (0° , 45° , 90° , 135° e 180°), como o demonstrado na Figura 6.

Figura 6. Ângulos de interação das ondas com a embarcação.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Com essas condições, foram realizadas análises comparativas para avaliar os efeitos nos seis graus de liberdade da embarcação. Cabe mencionar que os parâmetros relacionados com os momentos de inércia foram obtidos através do método de pesquisa descrito por Journée (2001), como disposto no referencial teórico. Os dados obtidos para os raios de inércia foram K_{xx} de 0,48 m, K_{yy} e K_{zz} de 1,57 m, os quais foram dados como entrada no software.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Levantamento de embarcações de pequeno porte regionais

A partir das visitas de campo, feitas nas cidades de Manaus e Itacoatiara, no Estado do Amazonas com o intuito de conhecer as embarcações de alta velocidade mais comuns, foram obtidas algumas informações, incluindo levantamentos fotográficos. A presente seção mostra os resultados do levantamento, incluindo a descrição e algumas imagens representativas das embarcações encontradas na vida real. Cabe ressaltar que no levantamento feito, também foi documentada a embarcação de longo percurso conhecida como “expresso”, por se tratar de uma embarcação de médio porte que pode alcançar altas velocidades. As demais embarcações documentadas têm, na maioria das vezes, comprimento menor a 12 metros, sendo consideradas como embarcações menores.

Embarcação tipo “expresso”: pode ser definida como uma embarcação projetada para transporte rápido longitudinal de passageiros entre diversas cidades da região amazônica. A Figura 7 mostra um exemplo do exterior e interior desse tipo de embarcação. O casco dessas embarcações tem formato alongado, utilizando motores potentes que permitem alcançar altas velocidades de operação. São construídas com materiais leves e resistentes, como fibra de vidro ou alumínio. Conta com motores que têm potência de 90 até 600hp, aproximadamente, podendo ser utilizado mais de um motor para propulsão. A capacidade varia, podendo acomodar até 60 pessoas, como o caso mostrado na figura, ou quantidades muito superiores dependendo do exemplar e design da embarcação. O interior de uma embarcação do tipo expresso é parecido com o interior de um ônibus, com assentos reclináveis, televisores e banheiro. É comum utilizar compartimentos no convés para armazenar as bagagens dos passageiros. Mais informações desta embarcação podem ser encontrados em Fontes et al. (2023) E Maia et al. (2023).

Figura 7. Vista de perfil e do interior da embarcação tipo expresso. Fotografias obtidas na margem do rio em Itacoatiara – AM, 01/07/2023.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Embarcação tipo “voadeira”: A voadeira, também conhecida como "lancha voadeira", é uma embarcação de pequeno porte, similar a uma canoa, que utiliza motor de popa para viagens de transporte rápido. Possui um motor acoplado, para rápidas travessias utilizadas no transporte e em pescarias, sendo um dos meios de transporte fluviais bastante comum na Amazônia. A

Figura 8 mostra um exemplar desta embarcação. Essa embarcação é caracterizada por sua velocidade, formato aerodinâmico e por ser equipada com um ou mais motores de popa potentes, comumente fora de borda. As aplicações dessas embarcações estão voltadas principalmente ao transporte de grupos de pessoas para desenvolver diversas atividades, incluindo transporte, turismo, recreação, pesquisa, entre outras.

Figura 8. Embarcações tipo voadeira. Fotografias obtidas na margem do rio em Itacoatiara – AM, 01/07/2023.

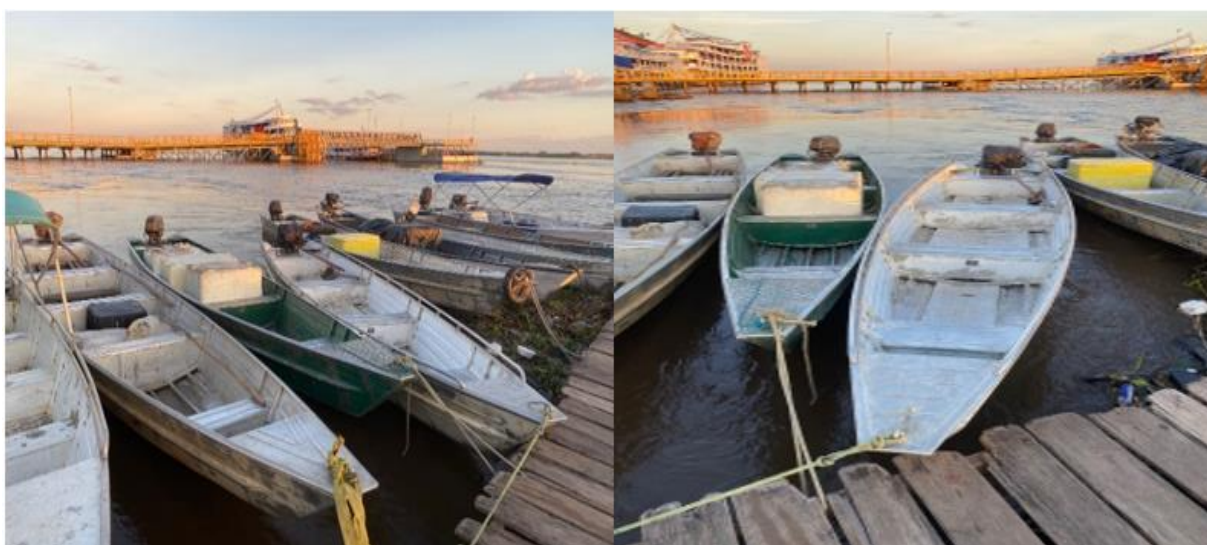


Fonte: Elaboração própria, 2023.

Embarcação tipo “rabeta”: A rabeta é uma embarcação regional miúda, como mostrado na Figura 9. Consiste em uma canoa, construída de madeira ou metal leve, que utiliza um eixo externo ao casco (rabeta), que acopla o motor e o hélice da embarcação. Pode ter capacidade de até 8 pessoas (como no caso dos exemplares observados), entretanto embarcações maiores deste tipo podem ter capacidade superior a 10 pessoas. O eixo é saliente à popa do casco, agindo de maneira inclinada com o plano horizontal, ocupando menos espaço na embarcação. Essa embarcação é especialmente projetada para navegar nos rios de águas rasas, incluindo regiões

onde existe lama ou bancos de areia, características comuns na vasta bacia amazônica, principalmente na época de estiagem. Devido ao tamanho reduzido, esse tipo de embarcações pode acessar regiões de difícil acesso. Também, podem alcançar altas velocidades, sendo ainda necessário planejar recomendações para sua operação segura. Uma pesquisa detalhada que pesquisou a velocidade de avanço e trem de ondas gerado por esse tipo de embarcação pode ser encontrada no trabalho de Bitencourt (2024).

Figura 9. Embarcações tipo rabeta. Fotografias obtidas na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Embarcação tipo “lança rápida”: A lanca rápida é uma embarcação comum em diversas partes do mundo; porém, existem embarcações do tipo adaptadas às aplicações na região amazônica, como mostrado na Figura 10. Como o seu nome indica, são embarcações que podem alcançar altas velocidades e têm capacidade para poucas pessoas, geralmente menos de 6 tripulantes. Algumas vezes, podem possuir um motor interno e ser propulsadas por um sistema eixo-hélice. As lanchas rápidas são utilizadas em aplicações diversas, incluindo lazer, pesca, prática de esportes aquáticos, ou para serviço de navios ou fiscalização. Na região amazônica existem lanchas rápidas importadas de maneira nacional e internacional, bem como lanchas construídas na região.

Figura 10. Embarcação do tipo lancha rápida. Fotografias obtidas na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Embarcação tipo “ambulancha”: O termo "ambulancha" é uma junção de "ambulância" e "lancha". A ambulancha é uma embarcação equipada para prestar serviços médicos em áreas ribeirinhas ou de difícil acesso. Um exemplar de uso comum na região amazônica é mostrado na Figura 11. Essas embarcações são equipadas com instalações médicas básicas, como leitos para pacientes, equipamentos de primeiros socorros, medicamentos e equipamentos para realizar procedimentos médicos simples; a sua capacidade pode ser inferior a 10 pessoas. O tamanho reduzido e o uso de motores fora de borda potentes faz com que possam alcançar altas velocidades. É importante mencionar que muitas comunidades ribeirinhas no Estado do Amazonas não contam com rodovias, sendo esse tipo de embarcações necessárias para prestar serviços de assistência médica e emergencial.

Figura 11. Embarcação tipo ambulancha. Fotografias obtidas na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Embarcação tipo “viatura”: As embarcações do tipo “viatura” são lanchas de pequeno porte, rápidas e motorizadas, frequentemente utilizadas para patrulhamento e fiscalização de diversas atividades regionais. Um exemplo deste tipo de embarcação pode ser demonstrado de acordo com a Figura 12. As embarcações tipo viatura desempenham um papel vital na manutenção da segurança e na aplicação da lei na vasta região amazônica. Algumas das principais funções e importâncias dessas viaturas de patrulha na região amazônica incluem o combate ao tráfico de drogas e contrabando, apoio a comunidades remotas, proteção ambiental, prevenção e resposta a crimes. Embarcações do tipo são utilizadas pela polícia, marinha e exército. Elas podem ser construídas de diversos materiais, incluindo fibra de vidro e alumínio; algumas delas possuem blindagem. A sua capacidade costuma ser reduzida, sendo inferior a 10 pessoas, como no caso mostrado na figura.

Figura 12. Embarcação tipo viatura. Fotografia obtida na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Embarcação tipo “hidro a jato”: Na região amazônica também são encontradas embarcações miúdas que possuem sistemas de propulsão a jato de água. É comum encontrar lanchas rápidas, geralmente importadas, com esse tipo de propulsor. Também, existe uma grande quantidade de *jet-skis* (embarcações de propulsão a jato para uma ou duas pessoas) que operam na região amazônica, como mostrado na Figura 13. Eles são propulsionados por um motor a jato de água e são caracterizados por seu design compacto e ágil, podendo atingir velocidades consideráveis na água. Essas embarcações são frequentemente associadas a atividades de lazer e esportes aquáticos. No entanto, na região amazônica, também desempenham funções como resgate e salvamento, apoio a comunidades ribeirinhas, pesquisa e exploração científica e turismo.

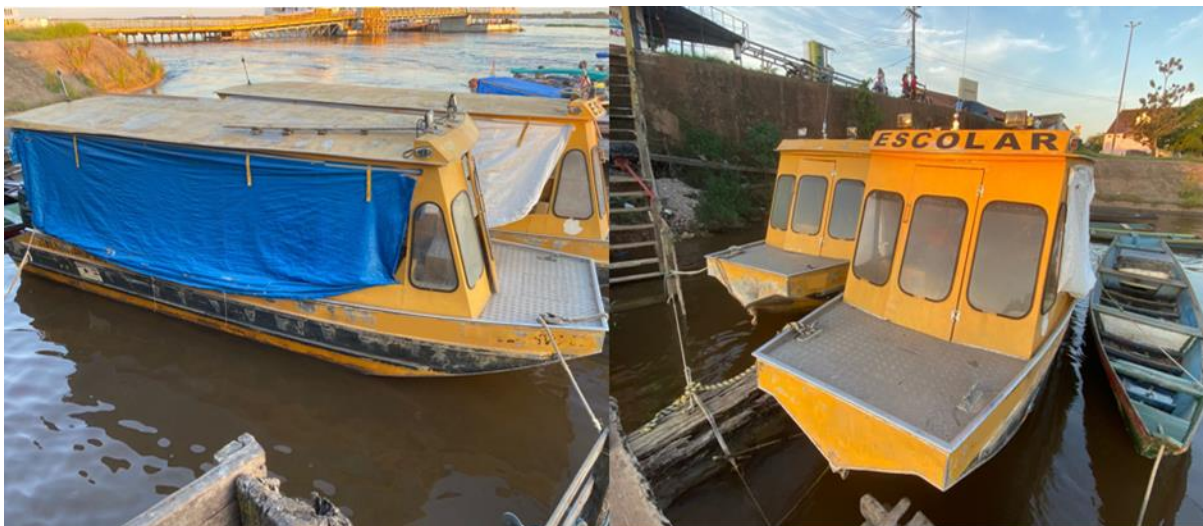
Figura 13. Embarcação tipo “hidro a jato”. Fotografia obtida na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Embarcação tipo “lança escolar”: A lança escolar é uma embarcação utilizada para o transporte de estudantes que vivem em comunidades ribeirinhas (muitas vezes isoladas) ao longo dos rios da região amazônica, até as escolas mais próximas. Dada a complexa rede de rios na Amazônia e a falta de infraestrutura de transporte terrestre em muitas áreas, o acesso à educação pode ser um desafio para muitas crianças que vivem nessas localidades remotas. Um exemplar deste tipo de embarcação é demonstrado na Figura 14. A importância da lança escolar na região amazônica está relacionada com a necessidade de acesso à educação, inclusão social, redução do abandono escolar, estímulo ao desenvolvimento local e fortalecimento da identidade cultural. As embarcações são equipadas com motores fora de borda, que permitem alcançar altas velocidades e podem ter capacidade de até 20 passageiros e de um a dois tripulantes.

Figura 14. Embarcação tipo lancha escolar. Fotografias obtidas na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/06/2023.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Cascos de Corrida: Na região amazônica, é comum encontrar embarcações miúdas de corrida, como mostrado na Figura 15, que são projetadas e otimizadas de maneira empírica para participar de corridas ou competições aquáticas. Geralmente têm capacidade para poucas pessoas, algumas vezes apenas para o piloto. Embora muitas dessas embarcações são construídas de forma artesanal, baseadas na experiência prévia, parece que elas podem atingir regimes de pré-planeio e planeio. Os cascos são longos e estreitos, o que reduz a quantidade de pessoas a bordo, mas em contrapartida pode aumentar a velocidade de avanço deste tipo de embarcação.

Figura 15. Embarcação tipo casco de corrida. Fotografia obtida na margem do rio em Itacoatiara – AM, 02/07/2023.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

4.2 Resultados do caso de estudo da embarcação analisada do tipo “voadeira”

No presente estudo, foi considerado o caso de estudo de uma embarcação tipo “voadeira” para realizar algumas análises de comportamento em ondas. A embarcação que motivou a análise é mostrada na Figura 16, a qual foi considerada como representativa de outras embarcações similares. A voadeira utilizada nesta análise tem 7 metros de comprimento, 0,6 metro de pontal e 1,5 metros de boca.

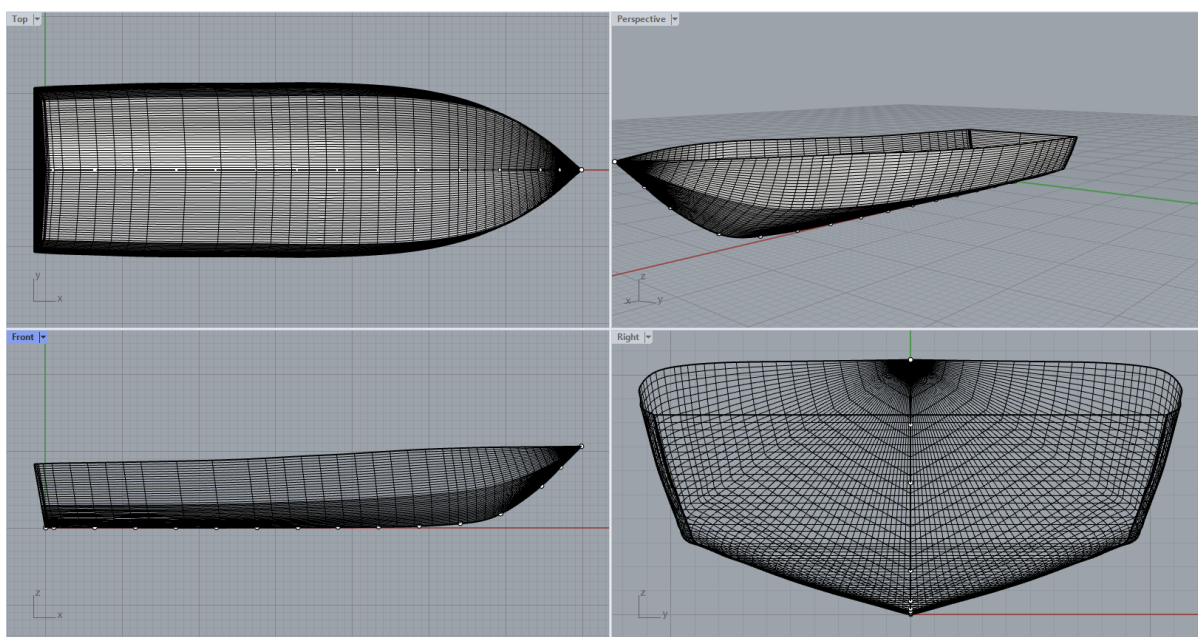
Figura 16. Exemplar de voadeira. Fotografia obtida na margem do rio em Itacoatiara – AM, 01/07/2023.



Fonte: Elaboração própria, 2023.

No processo da análise da embarcação voadeira, foram utilizados os softwares Rhinoceros e Ansys (*Hydrodynamic Diffraction*) para modelagem tridimensional e análise hidrodinâmica, respectivamente. O resultado desta modelagem do casco utilizando o Rhinoceros é mostrada na Figura 17, onde podem ser observadas diferentes vistas do casco. É importante mencionar a necessidade de fazer coincidir a orientação do sistema coordenado do software Rhinoceros para a análise no Ansys Aqwa. Neste caso, o eixo x deve ser longitudinal à embarcação, enquanto o eixo y deve ser transversal à mesma (ver Figura 17).

Figura 17. Versão final da modelagem do casco da embarcação "voadeira" utilizando o software Rhinoceros.



Fonte: Elaboração própria utilizando a versão acadêmica do software Rhinoceros.

4.3 Resultados da análise da dinâmica da embarcação

4.3.1 Estudo preliminar da malha

Antes de implementar o software de análise de movimentos foram configurados os dados da simulação e foi feito um estudo preliminar dos possíveis efeitos que pode ter a discretização da malha do casco nos resultados. Para os parâmetros de análise da voadeira a profundidade da água é de 20 metros, a densidade da água é 1025 kg/m^3 , a gravidade é $9,80665 \text{ m/s}^2$. O tamanho do domínio em X é 40 metros, e o tamanho do domínio em Y é 10 metros.

O teste de convergência de malha tem como objetivo principal determinar a influência do tamanho da malha na precisão dos resultados da simulação, sendo um pré-requisito na atualidade para realizar estudos numéricos (EÇA; HOEKSTRA, 2014). Cabe mencionar que no presente estudo foi utilizada a versão acadêmica do software Ansys, pelo que houve limitações para definir o tamanho das malhas. O menor valor da malha escolhido foi de 11,25 para o tamanho de cada elemento (Malha A, Tabela 2), resultando em 1999 iterações, valor máximo para que possa ser realizada a o desenvolvimento desta análise, de acordo com a margem limite estipulada pela licença acadêmica (~2000 iterações). Foram consideradas duas malhas adicionais, cujo incremento foi considerado como $(2)^{1/2}$, segundo recomendações propostas por Stern (2006), como mostrado na Tabela 1.

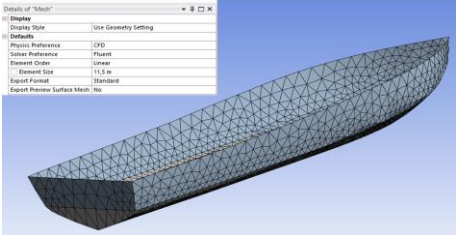
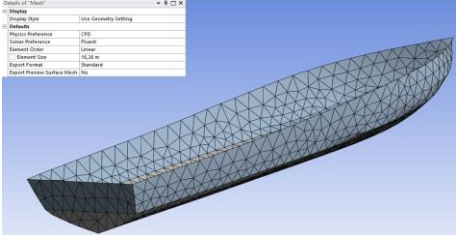
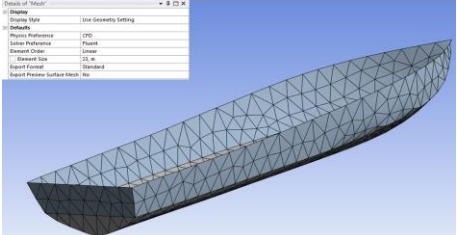
Tabela 1. Características das malhas avaliadas.

	Espaçamento de malha	Direção	Tamanho da célula
Malha A	1	X	11,50
		Y	11,50
Malha B	$\sqrt{2}$	X	16,26
		Y	16,26
Malha C	2	X	23,00
		Y	23,00

Fonte: Elaboração própria, 2023.

Na Tabela 2 é possível observar as mudanças quanto ao grau de detalhamento proveniente do refino da malha, na qual a Malha A apresenta o maior grau de refino possível, seguido da Malha B com um refino médio, e a Malha C com o menor grau de refinamento se comparado as anteriores.

Tabela 2. Disposição das Malhas A, B e C para análise.

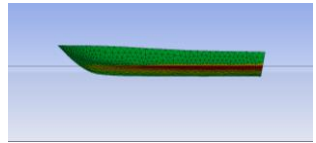
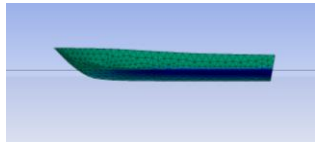
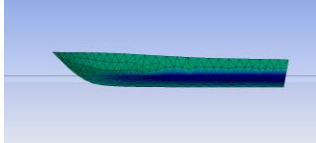
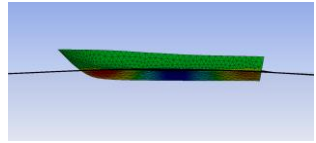
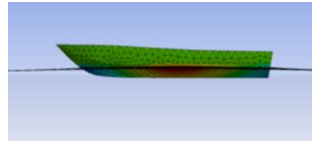
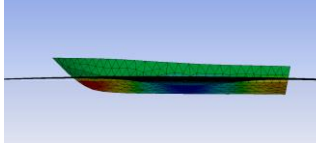
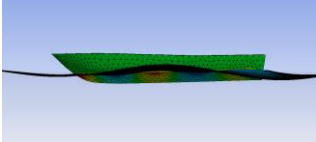
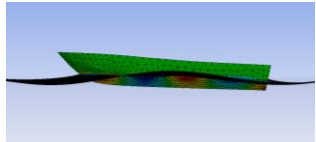
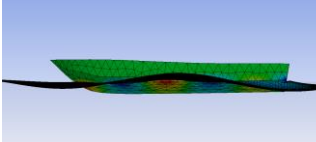
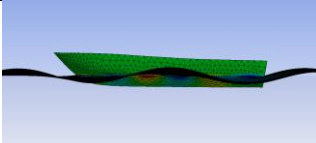
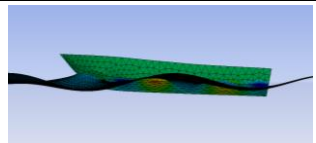
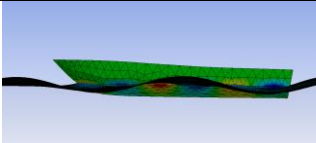
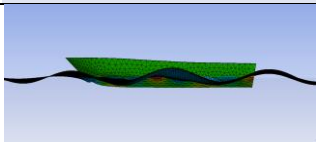
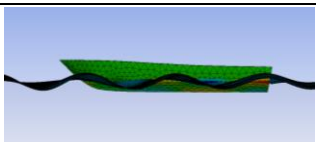
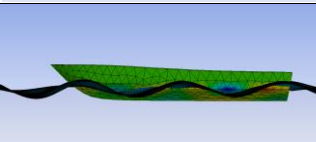
Nome da malha	Disposição da malha
Malha A	
Malha B	
Malha C	

Fonte: Elaboração própria utilizando a versão acadêmica do software Ansys Aqwa.

A Tabela 3 mostra imagens comparativas do campo de pressão no casco para seis diferentes frequências de ondas regulares, considerando as três malhas definidas. Foi considerada uma amplitude de onda de 0,2 m com ângulo de incidência da onda de 0°. Percebe-se, de maneira qualitativa, que o refinamento da malha tem efeito na resolução do campo de pressão no casco, sendo que uma malha mais refinada permite uma melhor representação do campo. Devido à limitação de refinamento do software utilizado, torna-se fora do escopo do

presente estudo realizar uma análise quantitativa das incertezas numéricas associadas. Assim, a malha mais refinada foi selecionada para desenvolver as análises dos movimentos da embarcação escolhida.

Tabela 3. Resultados do campo de pressão gerado no casco para diferentes períodos de ondas regulares (ângulo de incidência de 0° e amplitude de onda de 0,2 m), para as três malhas consideradas (Malha A, Malha B e Malha C).

Período da onda (T)	Malha A	Malha B	Malha C
51,23 s			
3,54 s			
2,17 s			
1,82 s			
1,57 s			

Fonte: Elaboração própria, 2023.

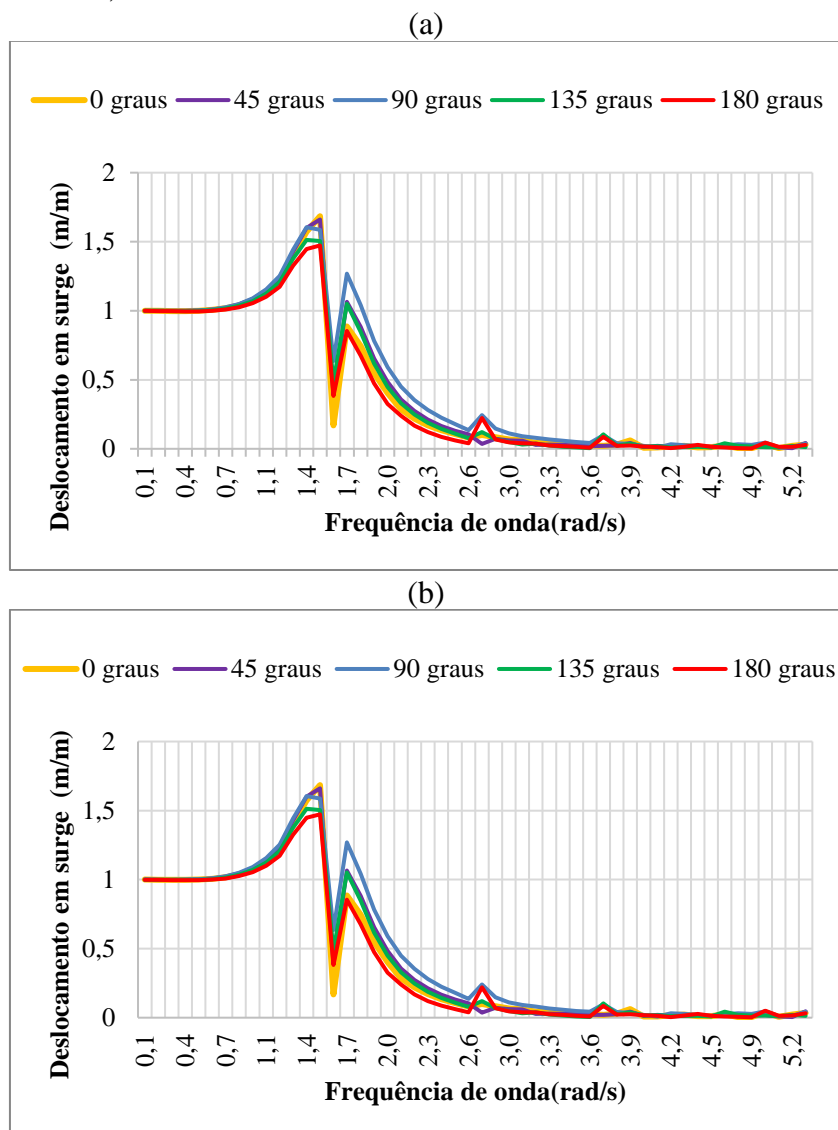
4.3.2 Análise do movimento de avanço (*surge*)

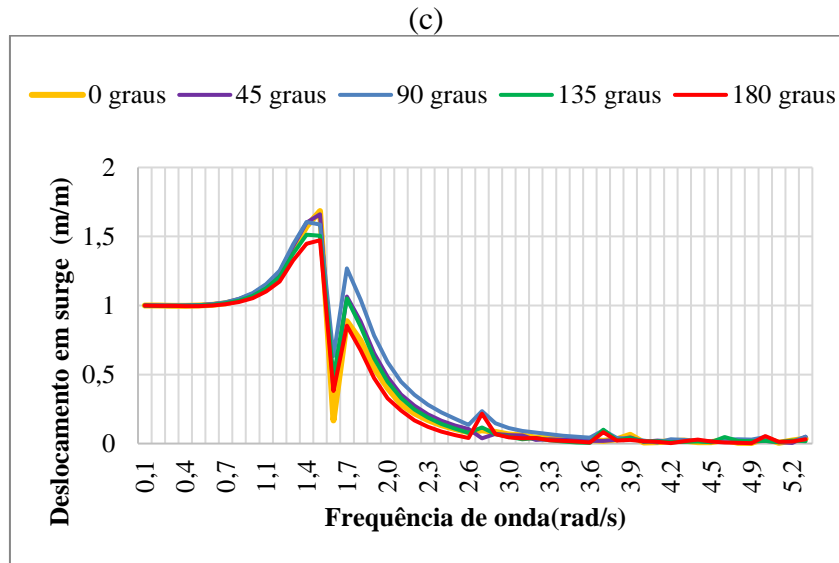
A primeira análise comparativa de resultados da dinâmica da embarcação está relacionada com o movimento de avanço (*surge*: translação ao longo do eixo x), como apresentado na Figura 19. Para esse e os demais graus de liberdade da embarcação (ver subseções seguintes), os dados foram analisados e plotados em forma de gráficos de deslocamento por amplitude unitária da onda (eixo vertical) para diferentes frequências de onda (eixo horizontal). Para cada grau de liberdade, foram comparados os efeitos de três posições do centro de gravidade vertical (VCG) no movimento, como mostrado nos gráficos (a), (b) e (c) de cada figura. Em cada gráfico foram comparados os resultados de diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação. As Figuras 19a-c mostram esses resultados para o movimento de *surge*.

De maneira complementar, na análise de cada grau de liberdade, foi feito um gráfico comparativo, considerando o ângulo de incidência das ondas que causou a maior amplitude, para diferentes posições de VCG. O gráfico correspondente para o movimento de *surge* é mostrado na Figura 19.

Ao comparar os resultados para três diferentes VCGs, 0 metros, 0,25 metros e 0,5 metros para o movimento de *surge*, como mostrado nas Figuras 18 e 19, destacou-se uma mudança na amplitude do movimento da embarcação quando diminuído o ângulo de incidência das ondas e aumentado o valor do VCG. Para este último, o maior deslocamento aconteceu em uma frequência de onda de 1,47 rad/s. A diferença das variações do VCG nesse grau de liberdade não foi tão significativa.

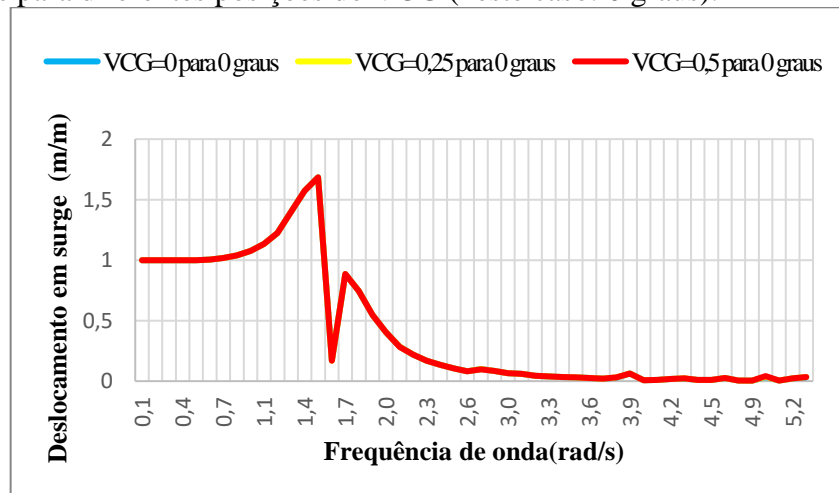
Figura 18. Comparação dos operadores de amplitude de resposta do movimento de avanço (*surge*) para diferentes frequências de onda. As curvas dos gráficos mostram os resultados de diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação. (a) VCG em 0 m. (b) VCG em 0,25 m. (c) VCG em 0,5 m.





Fonte: Elaboração própria, 2023.

Figura 19. Comparação dos operadores de amplitude de resposta de *surge* para diferentes frequências de onda, considerando o ângulo de incidência das ondas que causaram os maiores deslocamentos para diferentes posições do VCG (neste caso: 0 graus).



Fonte: Elaboração própria, 2023.

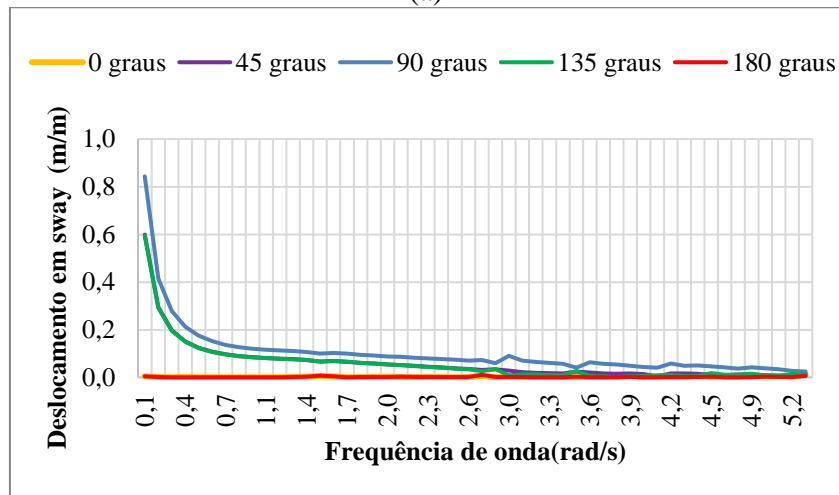
4.3.3 Análise do movimento de deriva (*sway*)

A segunda análise comparativa de resultados da dinâmica da embarcação está relacionada com o movimento de deriva (*sway*: translação ao longo do eixo y), como mostrado nas Figuras 20a-c e 21, de maneira similar ao movimento de *surge* (ver descrição das figuras na subseção anterior). Com relação ao efeito do ângulo de incidência das ondas (Figuras 20a-c), verifica-se que os maiores deslocamentos acontecem com um ângulo de incidência de 90° (mar de través). Não existem diferenças significativas com relação à variação do VCG.

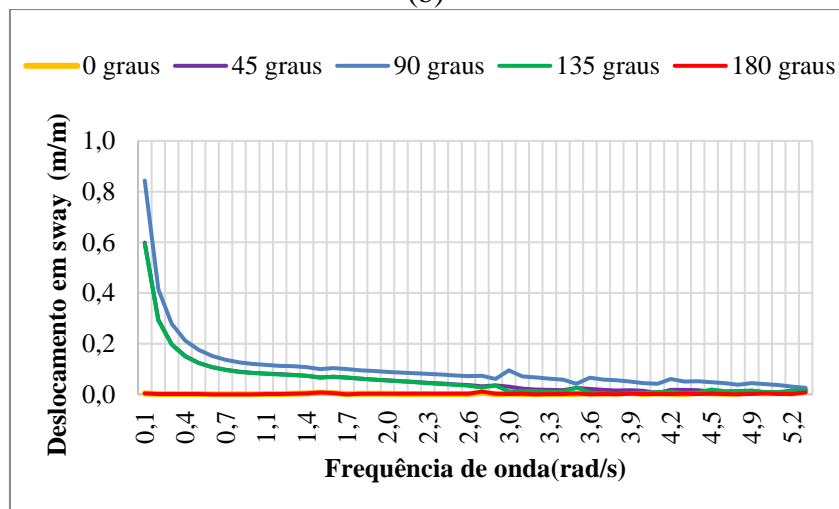
Figura 20. Comparação dos operadores de amplitude de resposta do movimento de deriva (*sway*) para diferentes frequências de onda. As curvas dos gráficos mostram os resultados de

diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação. (a) VCG em 0 m. (b) VCG em 0,25 m. (c) VCG em 0,5 m.

(a)



(b)



(c)

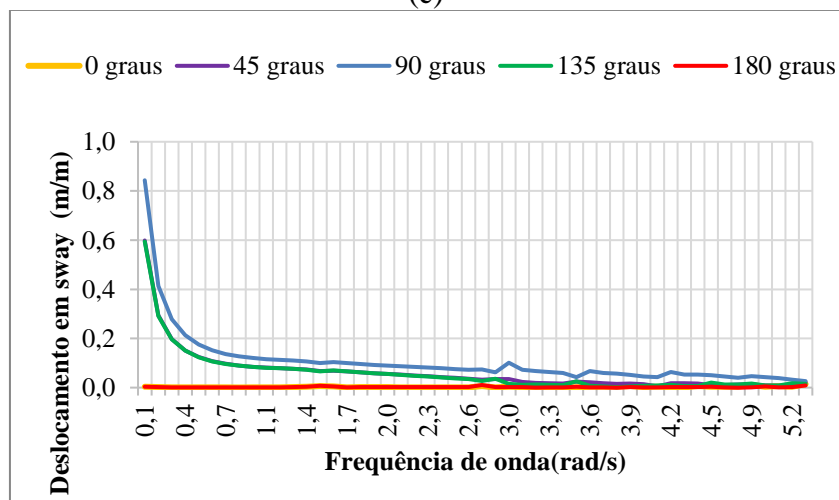
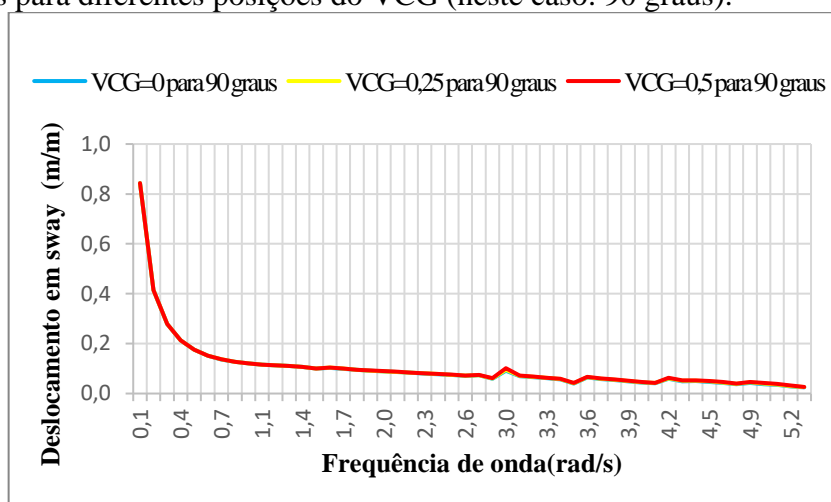


Figura 21. Comparação dos operadores de amplitude de resposta de *sway* para diferentes frequências de onda, considerando o ângulo de incidência das ondas que causaram os maiores deslocamentos para diferentes posições do VCG (neste caso: 90 graus).



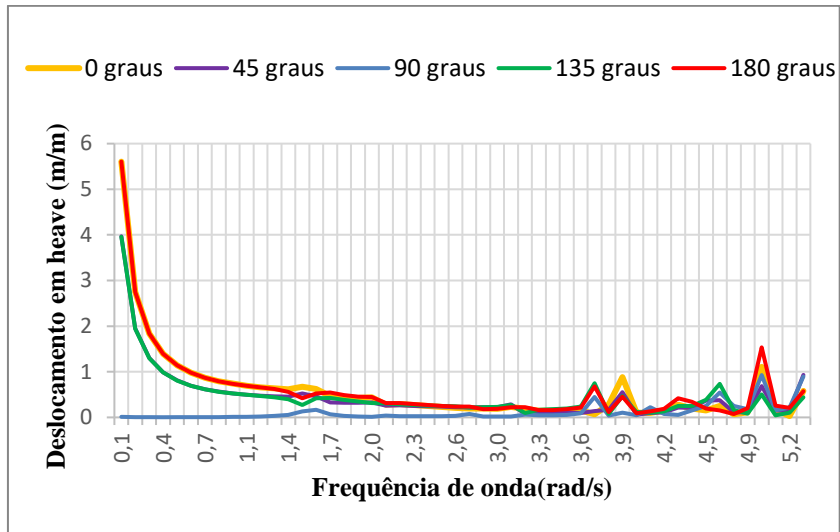
Fonte: Elaboração própria, 2023.

4.3.4 Análise do movimento de arfagem (*heave*)

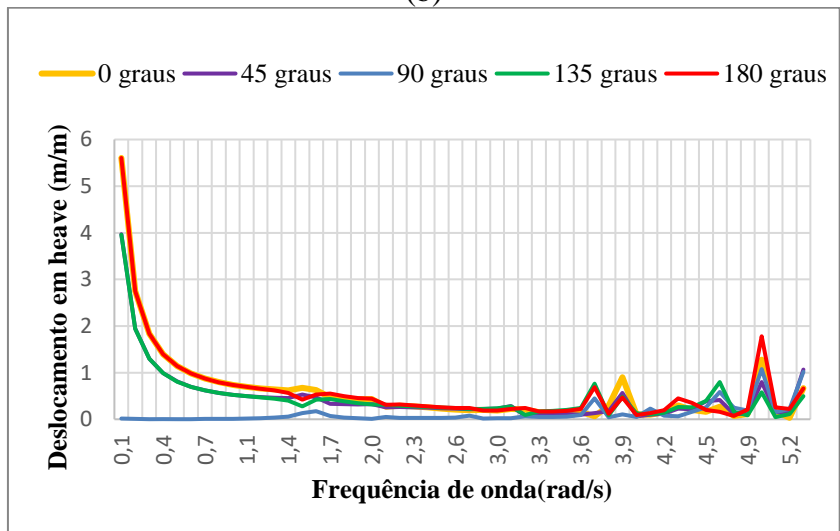
A terceira análise comparativa de resultados da dinâmica da embarcação está relacionada com o movimento de arfagem (*heave*: translação ao longo do eixo z), cujos resultados são mostrados nas Figuras 22a-c e 23. Observou-se que o VCG de 0,5 metros (Figura 22c) apresentou uma amplitude maior em relação aos menores VCGs de 0 e 0,25 metros. O maior deslocamento aconteceu na frequência de 0,1 rad/s. Nas Figuras 22a-c pode ser notado que os maiores deslocamentos aconteceram com ondas incidindo pela proa e pela popa (180° e 0°), enquanto os menores deslocamentos foram causados por mar de través (90°). A Figura 23 mostra que não houve influência significativa da variação do VCG para o ângulo de incidência das ondas de 180° .

Figura 22. Comparação dos operadores de amplitude de resposta do movimento de arfagem (*heave*) para diferentes frequências de onda. As curvas dos gráficos mostram os resultados de diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação. (a) VCG em 0 m. (b) VCG em 0,25 m. (c) VCG em 0,5 m.

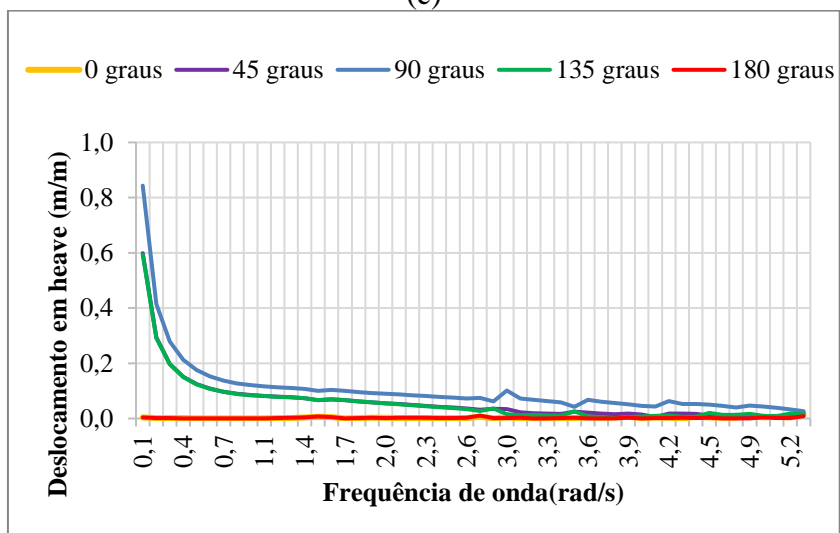
(a)



(b)

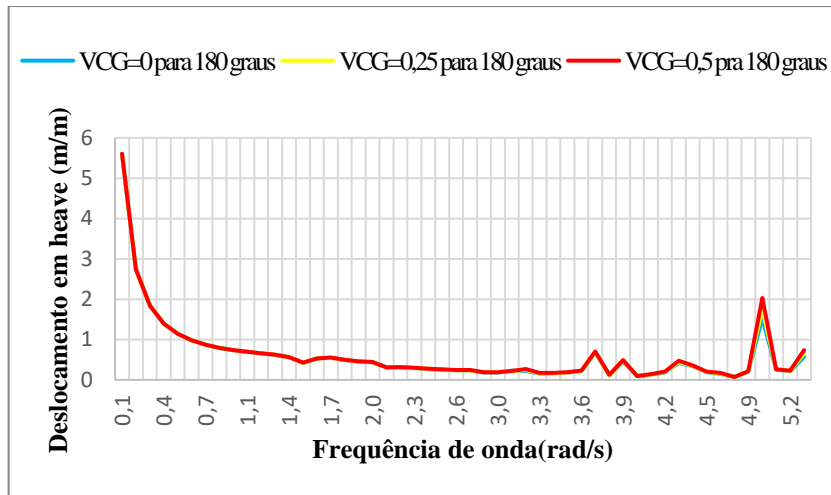


(c)



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Figura 23. Comparação dos operadores de amplitude de resposta de *heave* para diferentes frequências de onda, considerando o ângulo de incidência das ondas que causaram os maiores deslocamentos para diferentes posições do VCG (neste caso: 180 graus).



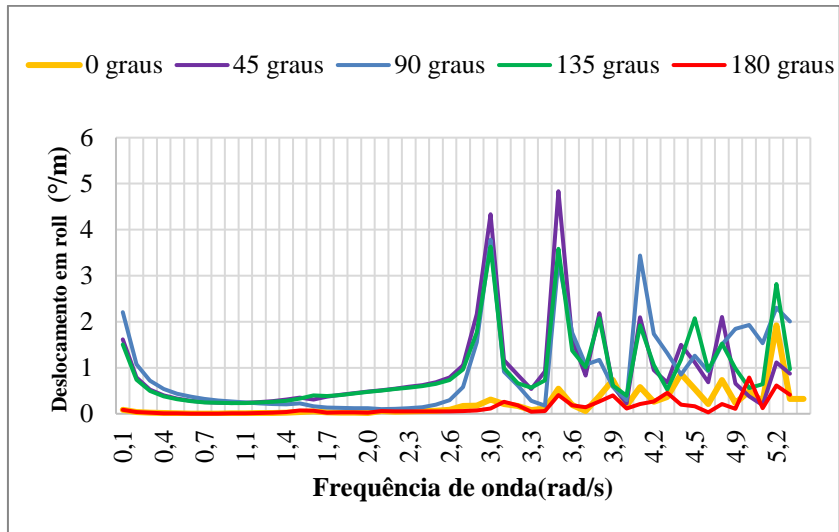
Fonte: Elaboração própria, 2023.

4.3.5 Análise do movimento de balanço (*roll*)

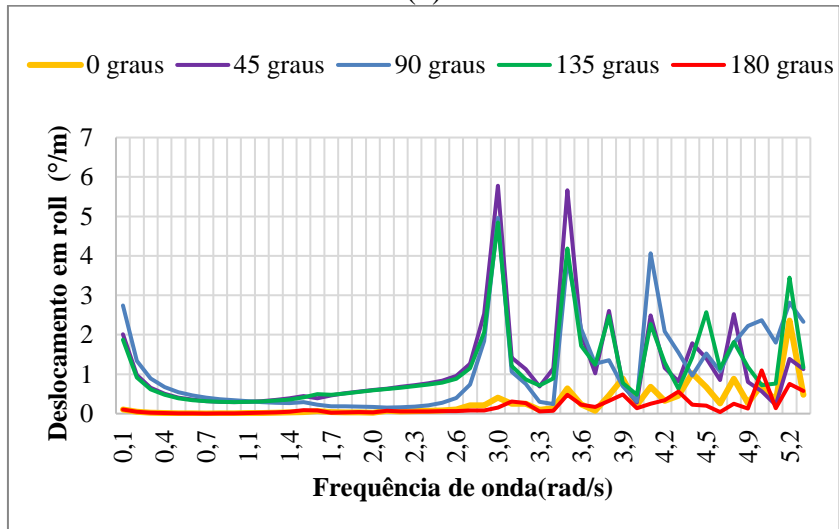
A quarta análise comparativa de resultados da dinâmica da embarcação está relacionada com o movimento de balanço (*roll*: rotação ao redor do eixo x), cujos resultados são apresentados nas Figuras 24a-c e 25. Observou-se que o VCG de 0,5 metros apresentou os maiores deslocamentos (Figura 24c) com relação às demais posições de VCG (Figuras a-b). A maior amplitude aconteceu em uma frequência de onda de 2,9 rad/s. Considerando o ângulo de incidência das ondas de 45°, que causou os maiores deslocamentos (Figura 25), verifica-se que o aumento do centro de gravidade para 0,5 metros quando comparado com o menor VCG (0 metros), aumentou a resposta cerca de 1,7 vezes.

Figura 24. Comparação dos operadores de amplitude de resposta do movimento de balanço (*roll*) para diferentes frequências de onda. As curvas dos gráficos mostram os resultados de diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação. (a) VCG em 0 m. (b) VCG em 0,25 m. (c) VCG em 0,5 m.

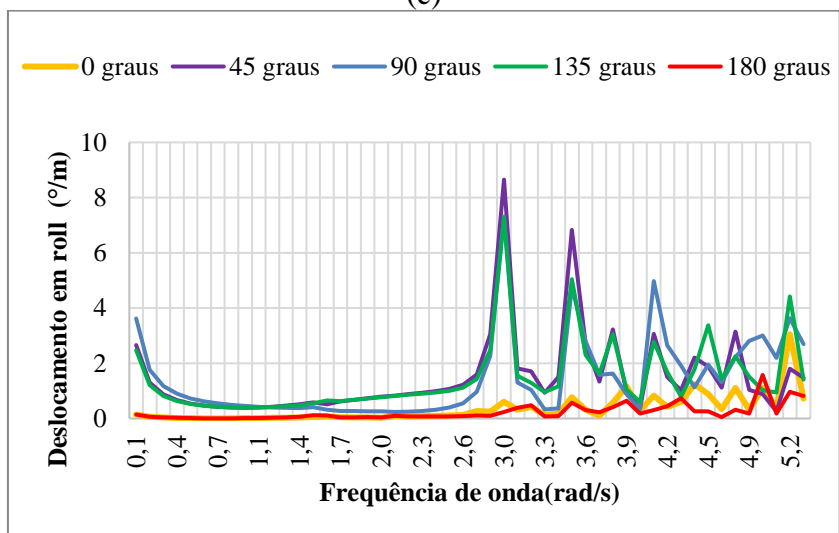
(a)



(b)

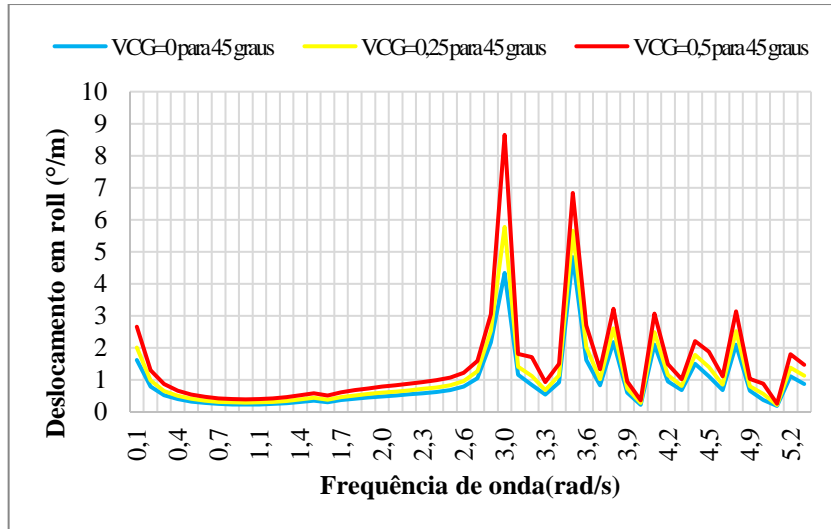


(c)



Fonte: Elaboração própria, 2023.

Figura 25. Comparação dos operadores de amplitude de resposta de *roll* para diferentes frequências de onda, considerando o ângulo de incidência das ondas que causaram os maiores deslocamentos para diferentes posições do vcg (neste caso: 45 graus).

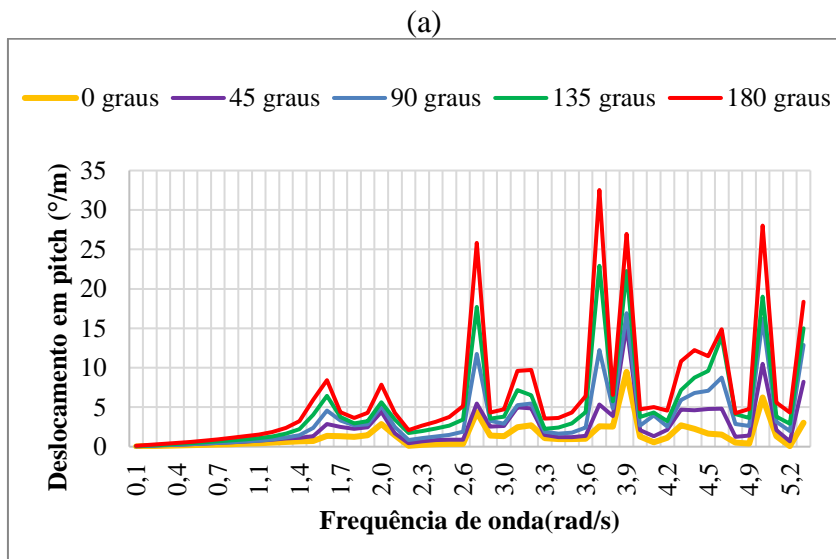


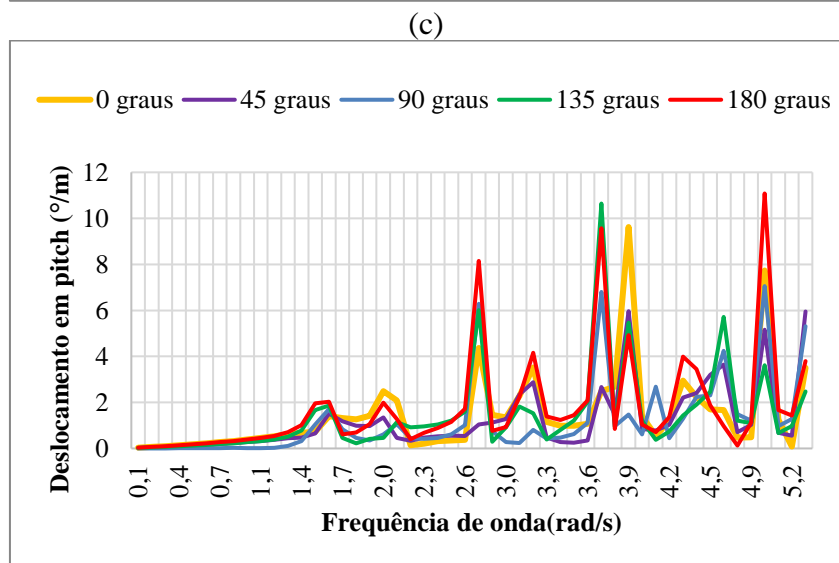
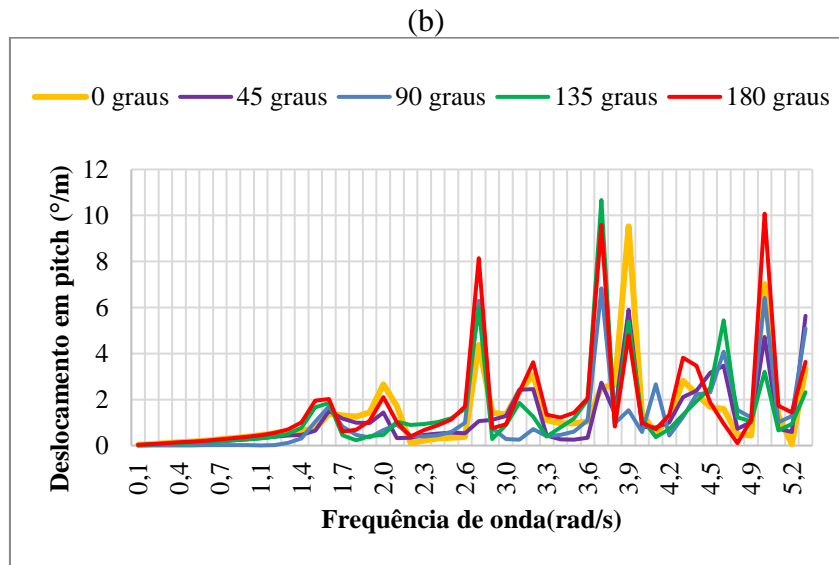
Fonte: Elaboração própria, 2023.

4.3.6 Análise do movimento de cabeceio (*pitch*)

A quinta análise comparativa de resultados da dinâmica da embarcação está relacionada com o movimento de cabeceio (*pitch*: rotação ao redor do eixo y), como mostrado nas Figuras 26a-c e 27. Na maioria dos casos, para diferentes VCGs, as maiores amplitudes de movimento aconteceram para ângulos de incidência das ondas de 135° e 180° . Na Figura 27 pode ser observado que existe pouca influência do VCG para o ângulo de incidência das ondas de 135° .

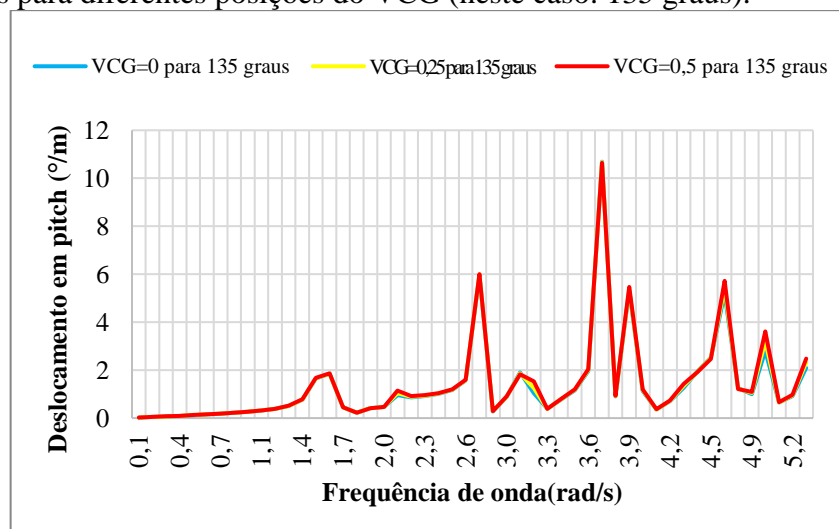
Figura 26. Comparação dos operadores de amplitude de resposta do movimento de cabeceio (*pitch*) para diferentes frequências de onda. As curvas dos gráficos mostram os resultados de diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação. (a) VCG em 0 m. (b) VCG em 0,25 m. (c) VCG em 0,5 m.





Fonte: Elaboração própria, 2023.

Figura 27. Comparação dos operadores de amplitude de resposta de *pitch* para diferentes frequências de onda, considerando o ângulo de incidência das ondas que causaram os maiores deslocamentos para diferentes posições do VCG (neste caso: 135 graus).

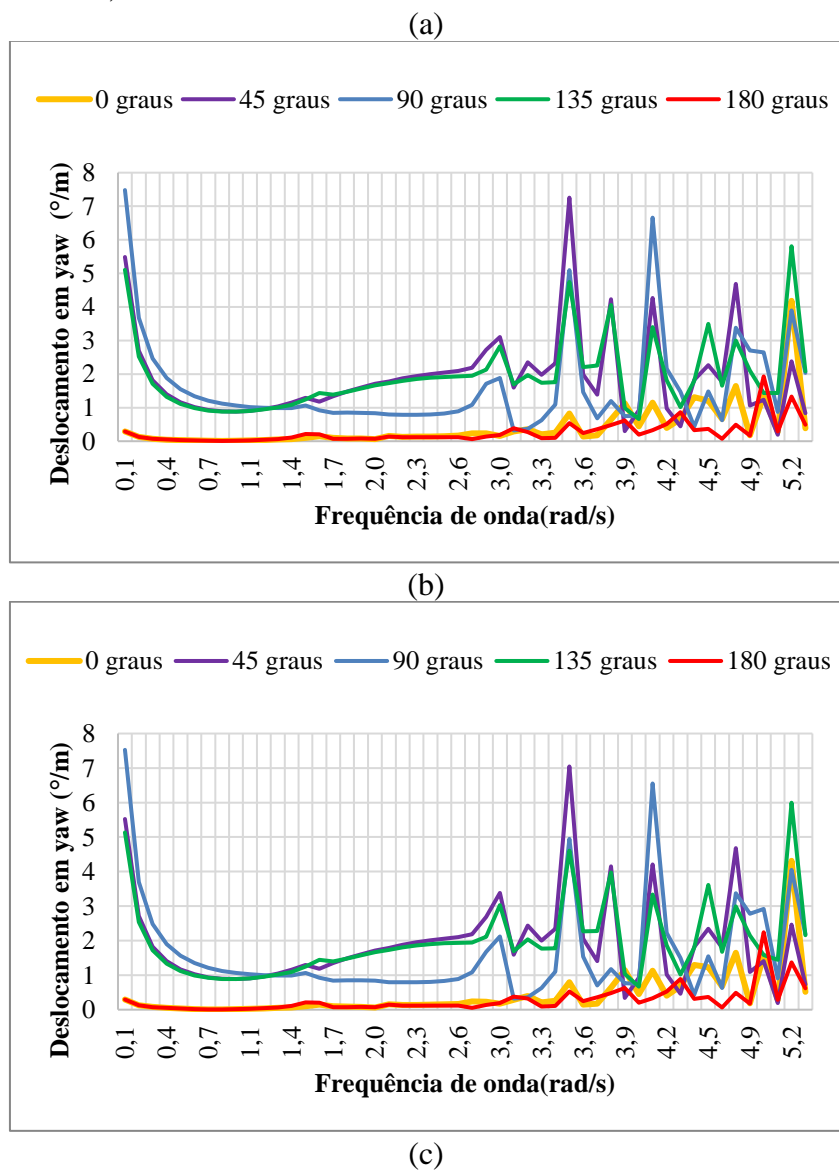


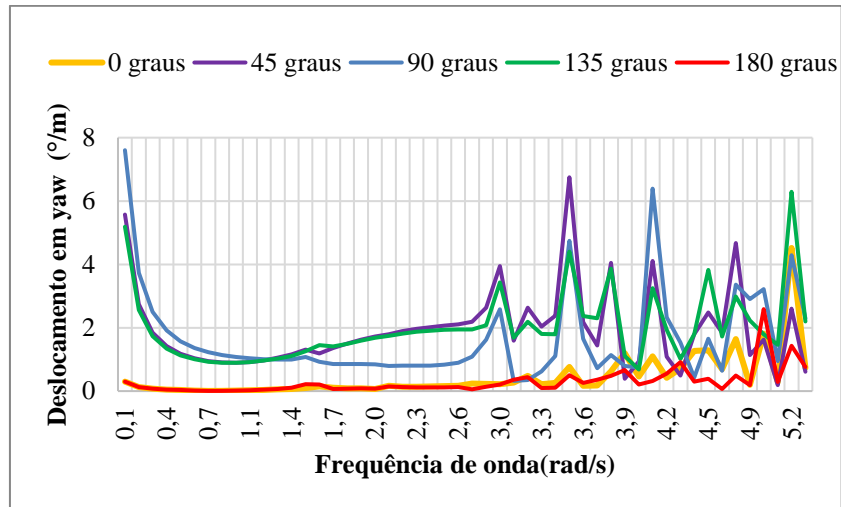
Fonte: Elaboração própria, 2023.

4.3.7 Análise do movimento de guinada (*yaw*).

A sexta análise comparativa de resultados da dinâmica da embarcação está relacionada com o movimento de guinada (*yaw*: rotação ao redor do eixo z), cujos resultados são apresentados nas Figuras 28a-c e 29. Percebe-se, a partir dos gráficos das Figuras 28a-c, que o ângulo de incidência das ondas de 45° foi o que causou os maiores deslocamentos para cada VCG. Sem considerar as respostas em frequências de onda próximas a zero, a maior resposta de *yaw* ocorreu para uma frequência de onda de 3,5 rad/s, para todos os VCGs. Com relação à Figura 29, pode ser observado que existiu pouca influência da variação do VCG na resposta da embarcação, considerando o ângulo de incidência das ondas de 45°.

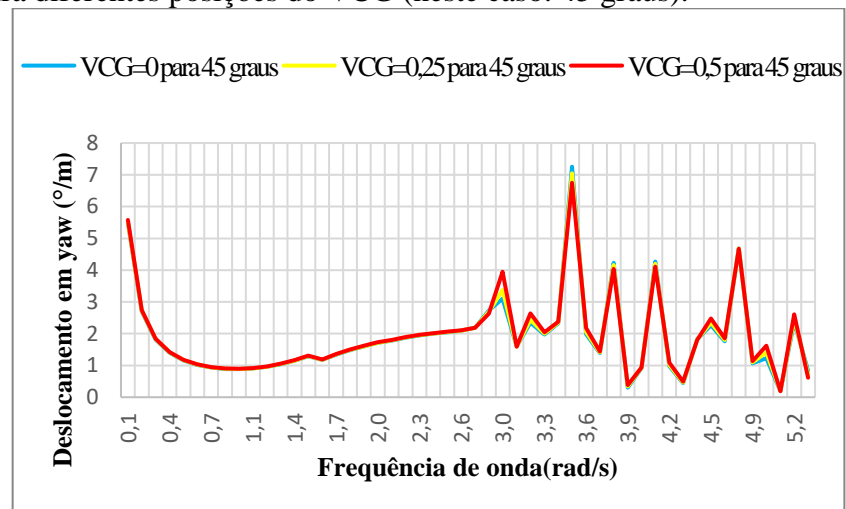
Figura 28. Comparação dos operadores de amplitude de resposta do movimento de guinada (*yaw*) para diferentes frequências de onda. As curvas dos gráficos mostram os resultados de diferentes ângulos de incidência das ondas com a embarcação. (a) VCG em 0 m. (b) VCG em 0,25 m. (c) VCG em 0,5 m.





Fonte: Elaboração própria, 2023.

Figura 29. Comparação dos operadores de amplitude de resposta de *yaw* para diferentes frequências de onda, considerando o ângulo de incidência das ondas que causaram os maiores deslocamentos para diferentes posições do VCG (neste caso: 45 graus).



Fonte: Elaboração própria, 2023.

4.3.8 Discussão dos maiores deslocamentos

A Tabela 4 resume os movimentos que apresentaram as máximas amplitudes, incluindo as características das ondas regulares que causaram tais deslocamentos. Os movimentos rotacionais de *roll*, *pitch* e *yaw* se destacam com as maiores magnitudes. Em particular, o *pitch* alcançou uma amplitude notável de $10,6^\circ/\text{m}$, evidenciando uma oscilação significativa. Na tabela, são incluídos o período da onda ($T=2\pi/\omega$) e o comprimento da onda, os quais foram calculados assumindo a equação de dispersão para águas profundas utilizada na teoria linear de ondas (JOURNÉE; MASSIE, 2001). O comprimento da onda foi calculado como $1,56T^2$ (sendo T o período da onda).

Tabela 4. Resumo dos deslocamentos angulares que alcançaram as máximas amplitudes nas análises.

Graus de liberdade	Ângulo de incidência das ondas com a embarcação (°)	Amplitude (°/m)	Frequência de onda (rad/s)	Período da onda (s)	Comprimento da onda (m)
Roll	45	8,7	3,0	2,1	7,1
Pitch	135	10,6	3,7	1,7	4,5
Yaw	45	7,3	3,5	1,8	5,1

Fonte: Elaboração própria, 2023.

No resultado para *roll* o comprimento da onda é próximo do comprimento da embarcação, 7 metros, enquanto nos movimentos de *pitch* e *yaw*, os comprimentos das ondas que causaram a maior ressonância são menores que o comprimento da embarcação. Esses movimentos podem ser desconfortáveis para os passageiros e podem desafiar a estabilidade da embarcação. Assim, concluímos que a compreensão das características das ondas que podem causar os movimentos máximos de uma embarcação que fica sem propulsão, é necessária para o projeto de embarcações.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo aprofundar os estudos relacionados com o comportamento de embarcações típicas da região amazônica. Primeiro, foi feito um levantamento de campo com o propósito de investigar as embarcações de pequeno porte motorizadas que são comuns no Estado do Amazonas. A coleta de dados incluiu levantamentos fotográficos, considerando embarcações representativas localizadas na cidade de Itacoatiara. Foi obtida uma visão abrangente das embarcações menores motorizadas da região amazônica, evidenciando sua importância para a mobilidade, segurança, saúde e educação. A partir desse levantamento, foi selecionado um caso de estudo de embarcação regional, do tipo voadeira, para implementar uma metodologia de análise de movimentos em condições de ondas regulares. A compreensão do comportamento dinâmico dessas embarcações contribui não apenas para conhecer mais da possível capacidade de resposta de uma embarcação do tipo em condições adversas de clima, mas também para demonstrar procedimentos de análise que possam ser estendidos para embarcações regionais.

No trabalho, foram investigados os movimentos de translação de avanço (*surge*), deriva (*sway*) e arfagem (*heave*), bem como os movimentos rotacionais de balanço (*roll*), cabeceio (*pitch*) e guinada (*yaw*). Por meio de análises comparativas, foi possível avaliar a influência da variação de diversos ângulos de encontro das ondas com a embarcação e da posição vertical do centro de gravidade (VCG) nos movimentos resultantes.

Em resumo, a análise dos movimentos da embarcação considerando variações no VCG revelou relevância para os movimentos angulares. Cabe ressaltar que os momentos de inércia foram calculados de forma empírica, pelo que se sugere que estudos posteriores considerem a variação dos momentos de inércia de forma mais realista nas análises. Com relação aos ângulos de incidência das ondas com a embarcação, percebeu-se que alguns graus de liberdade são mais susceptíveis aos efeitos do ângulo de incidência. Por exemplo, no caso do movimento de *roll*, os ângulos de 45° e 90° apresentaram as maiores amplificações de movimento para diversos VCGs. Os resultados sugerem a necessidade de considerar a variação do VCG no projeto da embarcação para garantir estabilidade e operabilidade em diversas condições de ondas.

O procedimento implementado pode ser estendido para avaliar a dinâmica de diversas embarcações regionais cujo comportamento dinâmico ainda não esteja bem caracterizado. Análises futuras podem ser implementadas sob condições mais realistas para determinar a distribuição da massa das embarcações, incluindo a validação com resultados experimentais.

REFERÊNCIAS

- ANSYS, A. AQWA theory manual. **AQWA: Canonsburg, PA, USA**, 2013.
- 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.
- BITENCOURTT, D. S. **Estudo experimental da velocidade de avanço e das ondas geradas por uma embarcação regional do tipo rabeta**. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2024.
- CAMPANA, E. F. et al. Shape optimization in ship hydrodynamics using computational fluid dynamics. **Computer methods in applied mechanics and engineering**, v. 196, n. 1–3, p. 634–651, 2006.
- DE ALMEIDA, P. R. R. **Estudo da estabilidade transversal e do movimento de balanço de uma embarcação regional**. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2023.
- DE OLIVEIRA CUNHA, E. F.; ISPER JR, A. S. O desafio na regulação do transporte hidroviário intermunicipal no Amazonas. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 3, p. 15736–15752, 2020.
- EÇA, L.; HOEKSTRA, M. A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies. **Journal of Computational Physics**, v. 262, p. 104–130, 2014.
- EDITION, F.; JOURNÉE, J.; MASSIE, W. Offshore hydromechanics. **Delft University of Technology**, 2001.
- FALTINSEN, O. **Sea loads on ships and offshore structures**. [s.l.] Cambridge university press, 1993. v. 1
- FALTINSEN, O. M. **Hydrodynamics of high-speed marine vehicles**. [s.l.] Cambridge university press, 2005.
- 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, 2022.
- 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.
- IMO, S. C. E. **IMO**. London, , 2018.

- JOURNÉE, J. M.; MASSIE, W. W. Offshore hydromechanics. **TU Delft, Lecture Notes**, 2001.
- JUNIOR, J. et al. Estudo preliminar da resistência ao avanço e dos movimentos de uma barça regional: algumas considerações para o uso de software em fases de anteprojeto. **Terra do mar doce: contribuições da academia para a navegação na amazônia**, v. 2, n. 1, p. 97–115, 2023.
- LIMA, H. A. M. Regulação do transporte aquaviário: o caso da hidrovía Solimões-Amazonas. 2017.
- LUZ, H. H.; OTHERS. Análise quantitativa dos acidentes de navegação em águas brasileiras entre 2006 e 2015. 2017.
- MAIA, H. W. et al. COVID Pandemics and Inland Transportation in the Brazilian Amazon: A Note on the Risks of Infection in Typical Passenger Vessels. **COVID**, v. 3, n. 8, p. 1052–1062, 2023.
- MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship resistance and propulsion**. [s.l.] Cambridge university press, 2017.
- MORAES, R. DE C. M. DE; OTHERS. Ferramenta de avaliação do transporte hidroviário de passageiros da região amazônica. 2013.
- NAKANISHI, H. DE C. **Modelo computacional para avaliação do desempenho hidrodinâmico de embarcações de planeio em águas calmas**. PhD Thesis—[s.l.] Universidade de São Paulo, 2015.
- NEWMAN, J. N. The theory of ship motions. **Advances in applied mechanics**, v. 18, p. 221–283, 1979.
- PEREIRA, N. N.; LAURINDO, F. J. B. A importância da Tecnologia da Informação na indústria de construção naval: um estudo de caso. **Production**, v. 17, p. 354–367, 2007.
- ROSE, K. 3D solid modeling and the naval architecture of Vasa. **Journal of Archaeological Science: Reports**, v. 2, p. 596–611, 2015.
- SAMAEI, S. R.; AZARSINA, F.; GHAFEROKHI, M. A. Numerical simulation of floating pontoon breakwater with ANSYS AQWA software and validation of the results with laboratory data. **Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège**, v. 85, p. 1487–1499, 2016.
- SILVA, K. S. DA; OTHERS. Logística brasileira: um estudo teórico do modal aquaviário (cabotagem). 2015.
- SIMÕES, A. et al. **Manual de GMDSS**. Manual de GMDSS Escola Náutica Infante D. Henrique, , 1995.
- VORUS, W. S.; PAULLING, J. R. **The Principles of Naval Architecture Series**. , 2010.
- XU, H.; NENG, P.; YANG, F. **Motion response analysis of mining vessel based on ANSYS/AQWA**. Journal of physics: Conference series. **Anais...IOP Publishing**, 2019.