

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

GABRIEL BARRONCAS LIBÓRIO

**MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO DO TIPO EXPRESSO EM ONDAS
REGULARES INCIDINDO PELA PROA**

Manaus

2024



GABRIEL BARRONCAS LIBÓRIO

**MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO DO TIPO EXPRESSO EM ONDAS
REGULARES INCIDINDO PELA PROA**

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.

L696m

Libório, Gabriel Barroncas

Movimentos de uma embarcação do tipo expresso em ondas regulares incidindo pela proa / Gabriel Barroncas Libório . Manaus : [s.n], 2024.

77 f.: color.; 21,0 cm.

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

Inclui Apêndice.

Orientador: Jassiel Vladimir Hernández Fontes.

1. Embarcação expresso. 2. Embarque de água. 3. Engenharia naval. 4. Movimentos verticais. 5. Região Amazônica. I. Jassiel Vladimir Hernández Fontes (Orient.) II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Título

CDU(1997)629.5



GABRIEL BARRONCAS LIBÓRIO

**MOVIMENTOS DE UMA EMBARCAÇÃO DO TIPO EXPRESSO EM ONDAS
REGULARES INCIDINDO PELA PROA**

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

Aprovado em: 9 de dezembro de 2024

BANCA EXAMINADORA:

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

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

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

Manaus

2024



AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a minha família que sempre me proporcionou todo o suporte desde a Educação Básica até à Universidade. Aos meus pais José Carlos e Juçara que me deram todas as oportunidades possíveis e que me criaram com muito amor e devoção. A minha irmã Natália, que trilhou o caminho do magistério, e sempre me aconselhou sobre assuntos acadêmicos e de produção textual. E a minha companheira de vida, Jhessyca, que conheci antes mesmo de ser aprovado no vestibular, e foi minha maior incentivadora para a conclusão do Ensino Superior.

Agradeço também aos amigos que fiz, companheiros de curso ao longo dos anos na Universidade: Marcelo Cursino, Vinícius Bechman, Carolina Castro, Lucas Mota, Frankye Alencar, dentre muitos outros. Passamos por muitos desafios ao longo do curso, e hoje é gratificante ver que todos persistiram até o fim, podendo levar o tempo que for, em busca de nos tornarmos profissionais competentes e referências para as próximas gerações.

Agradecimentos especiais ao Prof. Dr. Jassiel Fontes, que foi de imensa importância para a conclusão deste material. Um professor sempre muito paciente e empenhado em dar o melhor de si na transmissão de conhecimento, além de toda sua preocupação com o futuro de seus orientandos. Sem a ajuda do Prof. Dr. Jassiel Fontes, muitas das didáticas apresentadas neste e em outros trabalhos não seriam possíveis.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil, CNPq, pelo apoio a esta pesquisa, por meio do projeto intitulado “Identificação dos desafios para prevenir acidentes com embarcações de alta velocidade na região amazônica”, chamada CNPq-FNDCT-MCTI N° 14/2022 – Faixa A (405529/2022-8).

Agradeço o apoio de Kleyphide Pereira da Silva pela modelagem do casco da embarcação.



RESUMO

A navegação nos rios da Amazônia pode ser realizada, comumente, em águas tranquilas. Porém, existem evidências registradas pela mídia regional e por alguns estudos, de que ela também está sujeita à interação com ondas, que tendem a ser geradas durante condições ambientais adversas. A frequência de encontro dessas ondas pode ser significativa para algumas embarcações que navegam na região, podendo influenciar o seu movimento. O presente trabalho propõe um estudo do comportamento em ondas de uma embarcação de transporte longitudinal de passageiros do tipo expresso. É proposta uma análise dos movimentos de *heave* e *pitch* em condições de ondas regulares incidindo pela proa, utilizando as ferramentas disponíveis no software *Ansys Aqwa*. Foram avaliadas condições de flutuação livre e velocidade de avanço de 3 e 12 m/s, sob as restrições da teoria de escoamento potencial de hidrodinâmica. A primeira etapa do estudo foi feita no módulo *Hydrodynamic Diffraction*, analisando os movimentos em ondas regulares entre 1 e 20 segundos de período, dentre as quais foram encontradas as ondas que causam os maiores deslocamentos. Posteriormente, considerando a onda regular que causou o maior deslocamento de *pitch* (período próximo a 5 segundos), foram simulados os movimentos da embarcação no módulo *Hydrodynamic Response*, avaliando o efeito da variação da amplitude da onda (0,25, 0,50, 0,75, e 1,00 m) nos movimentos. Os resultados sugerem que ondas de comprimento próximo ao comprimento da embarcação podem causar os maiores deslocamentos de *heave* e *pitch*. Nas simulações feitas no *Hydrodynamic Response* foram identificadas algumas possibilidades de interações perigosas com as ondas, incluindo *slamming* e embarque de água. O embarque de água na condição avaliada pode acontecer quando a amplitude das ondas supera aproximadamente 0,75 m. O estudo pode ser estendido a outras embarcações regionais, sendo ainda necessário validar os resultados do software com dados experimentais, incluindo medições pontuais das ondas da região.

Palavras-chave: Embarcação expresso, embarque de água, Engenharia Naval, movimentos verticais, região amazônica.



ABSTRACT

Navigation on the Amazon rivers can usually be carried out in calm waters. However, there is evidence recorded by the regional media and by some studies that it is also subject to interaction with waves, which tend to be generated during adverse environmental conditions. The frequency of encountering these waves can be significant for some vessels that navigate in the region, influencing their movement. This work proposes a study of the behavior in waves of a longitudinal transport espresso-type passenger vessel. An analysis of the heave and pitch movements is proposed under conditions of head regular waves, using the tools available in the Ansys Aqwa software. A free floating and forward speed conditions of 3 and 12 m/s were evaluated, under the constraints of the potential flow theory of hydrodynamics. The first stage of the study was carried out in the Hydrodynamic Diffraction module, analyzing the movements in regular waves between 1 and 20 seconds of period, among which the waves that cause the largest displacements were found. Subsequently, considering the regular wave that caused the largest pitch displacement (~5-second period), the vessel movements were simulated in the Hydrodynamic Response module, evaluating the effect of wave amplitude variation (0.25, 0.50, 0.75, and 1.00 m) on the movements. The results suggest that waves of length close to the vessel length can cause the largest heave and pitch displacements. In the simulations performed in Hydrodynamic Response, some possibilities of dangerous interactions with the waves were identified, including slamming and water shipping on the deck. Shipping water in the evaluated condition can occur when the wave amplitude exceeds approximately 0.75 m. The study can be extended to other regional vessels, being still necessary to validate the software results with experimental data, including specific measurements of the waves in the region.

Keywords: Espresso vessel, green water, Naval Engineering, vertical movements, Amazon region.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Embarcação do tipo expreso navegando nos rios da Amazônia.	13
Figura 2. Exemplo de embarcação regional navegando durante um temporal que causou ondas.	14
Figura 3. Exemplo de embarcação regional navegando durante temporal, com risco de ocorrência de eventos de embarque de água no convés.	14
Figura 4. Evidências do problema de <i>slamming</i> na navegação da região amazônica.	15
Figura 5. Definição dos sistemas de eixos utilizados no Ansys Aqwa. (a) Figura do manual de teoria do software. (b) Figura do manual de referência.	24
Figura 6. Transformação de eixo.	25
Figura 7. Movimentos do corpo rígido flutuante.	26
Figura 8. Definição das direções das ondas ou das correntezas.	28
Figura 9. Etapas da metodologia abordada.	37
Figura 10. Vistas da geometria da embarcação modelada no software Rhinoceros.	38
Figura 11. Configuração dos módulos do software ANSYS Aqwa.	39
Figura 12. Lista de configurações no software Ansys Aqwa.	39
Figura 13. Posição do sistema coordenado na embarcação ($x = L_{pp}/2 = -12,5$ m; $y = 0$ m; $z = 0$ m) e dos dois pontos nos quais serão medidos os movimentos (centro de gravidade e ponto P na proa).	40
Figura 14. Domínio computacional considerado na análise.	41
Figura 15. Detalhes da malha da embarcação, definida no software Ansys Aqwa. Calado: 0,5 m.	41
Figura 16. Configuração da resolução da malha da superfície livre da água para o cálculo das ondas.	42
Figura 17. Configuração da simulação dos movimentos da embarcação no domínio do tempo.	44
Figura 18. Comparações de operadores de amplitude de resposta (RAOs) dos movimentos do centro de gravidade (CG), considerando resultados obtidos no software Ansys Aqwa Hydrodynamic Diffraction e Maxsurf Motions, para uma velocidade de avanço nula ($V = 0$). (a) Movimento de heave. (b) Movimento de pitch.	45
Figura 19. Visualização dos contornos de elevação das ondas incidentes, considerando uma amplitude de 0,1 m, para diferentes períodos (T), para o caso sem velocidade de avanço ($V =$	



0). Informações obtidas no módulo Hydrodynamic Diffraction. (a) T = 3 s. (b) T = 4 s. (c) T = 5 s. (d) T = 10 s.....	46
Figura 20. Comparações de operadores de amplitude de resposta dos movimentos do centro de gravidade (CG), considerando resultados obtidos no software Ansys Aqwa Hydrodynamic Diffraction e Maxsurf Motions, para uma velocidade de avanço V = 3m/s. (a) Movimento de heave. (b) Movimento de pitch.....	48
Figura 21. Visualização dos contornos de elevação das ondas incidentes, considerando uma amplitude de 0,1 m, para diferentes períodos (T), para o caso com velocidade de avanço (V = 3 m/s). Informações obtidas no módulo Hydrodynamic Diffraction. (a) T = 3 s. (b) T = 4 s. (c) T = 5 s. (d) T = 10 s.....	49
Figura 22. Comparações de operadores de amplitude de resposta dos movimentos do centro de gravidade (CG), considerando resultados obtidos no software Ansys Aqwa Hydrodynamic Diffraction e Maxsurf Motions, para uma velocidade de avanço V = 12 m/s. (a) Movimento de heave. (b) Movimento de pitch.....	51
Figura 23. Visualização dos contornos de elevação das ondas incidentes, considerando uma amplitude de 0,1 m, para diferentes períodos (T), para o caso com velocidade de avanço (V = 12 m/s). Informações obtidas no módulo Hydrodynamic Diffraction. (a) T = 3 s. (b) T = 4 s. (c) T = 5 s. (d) T = 10 s.	52
Figura 24. Efeito da velocidade de avanço nos deslocamentos de heave do centro de gravidade (CG) e do ponto P na proa. (a) V = 0 m/s. (b) V = 3 m/s. (c) V = 12 m/s	55
Figura 25. Efeito da velocidade de avanço nos deslocamentos de pitch do centro de gravidade (CG) e do ponto P na proa. (a) V = 0 m/s. (b) V = 3 m/s. (c) V = 12 m/s.	56
Figura 26. Efeito da velocidade de avanço nas acelerações de heave do centro de gravidade (CG) e do ponto P na proa. (a) V = 0 m/s. (b) V = 3 m/s. (c) V = 12 m/s	58
Figura 27. Efeito da velocidade de avanço nas acelerações de pitch do centro de gravidade (CG) e do ponto P na proa. (a) V = 0 m/s. (b) V = 3 m/s. (c) V = 12 m/s	59
Figura 28. Simulação com amplitude de onda de 0,25 m, direção 180°, T = 5 s, $\omega = 1,2566$ rad/s, e comprimento de onda (λ) = 39,02 m, considerando uma velocidade de avanço V = 12m/s. Imagem obtida no tempo t = 29 s da simulação.	61
Figura 29. Simulação com amplitude de onda de 0,5 m, direção 180°, T = 5 s, $\omega = 1,2566$ rad/s, e comprimento de onda (λ) = 39,02 m, considerando uma velocidade de avanço V = 12m/s. Imagens obtidas nos tempos t = 28,10 s e t = 29 s e da simulação.....	62



Figura 30. Simulação com amplitude de onda de 0,75 m, direção 180°, T = 5 s, $\omega = 1,2566$ rad/s, e comprimento de onda (λ) = 39,02 m, considerando uma velocidade de avanço V = 12m/s. Imagens obtidas nos tempos t = 20 s e t = 30,8 s e da simulação..... 63

Figura 31. Simulação com amplitude de onda de 1,0 m, direção 180°, T = 5 s, $\omega = 1,2566$ rad/s, e comprimento de onda (λ) = 39,02 m, considerando uma velocidade de avanço V = 12m/s. Imagens obtidas nos tempos t = 8,3 s, 8,5 s, 19 s, 21,4 s, 23,1 s, 24 s, 25,2 s, e 27,4 s. 64

Figura 32. Alguns exemplos de embarcações do tipo expresso encontradas em Manaus - AM. A última imagem ilustra o interior de um expresso..... 71

Figura 33. Outros tipos de embarcações de alta velocidade regionais encontradas em Manaus – AM. (a) Embarcação cabinada. (b) Voadeira. (c) Ambulancha atracada em Unidade básica de Saúde Fluvial. (d) Ambulancha atracada em plataforma no Porto do São Raimundo. (e) Embarcações militares. (f) Lanchas utilizadas como transporte escolar. 72

Figura 34. O porto de Manaus, no Estado do Amazonas. 74

Figura 35. O Porto da CEASA de Manaus – AM..... 75

Figura 36. Porto da Manaus Moderna - AM. (a) Vista do porto. (b) Passageiros aguardando embarque na “Balsa Amarela”..... 75

Figura 37. Região da Marina do Davi em Manaus – AM. (a) Área de embarque das lanchas na Marina do Davi em Manaus – AM. (b) Lanchas do tipo expresso filiadas a ACAMDAF (Cooperativa dos Profissionais de Transporte Fluvial da Marina do Davi). 76

Figura 38. Porto do São Raimundo. (a) Entrada e posto de fiscalização do porto. (b) Área de atracação das embarcações. 77



LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características da embarcação considerada como caso de estudo.....38



SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Contextualização.....	13
1.3 Justificativa	16
1.4 Objetivos.....	17
1.4.1 Objetivo geral	17
1.4.2 Objetivos específicos.....	17
2 ESTADO DA ARTE.....	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
3.1 Descrição geral do software Ansys Aqwa	23
3.2 Convenções de eixos	24
3.2.1 Eixos de referência fixos	24
3.2.2 Eixos de estrutura local	24
3.2.2 Transformação de eixos e rotações de Euler	25
3.3 Direções e convenções de ângulo de fase	28
3.4 Onda linear regular	28
3.5 Correnteza uniforme e perfilada.....	30
3.6 Análise de difração e radiação hidrodinâmica pelo método de distribuição de fontes	30
3.6.1 Forças de radiação e difração das ondas.....	31
3.6.2 Fórmula geral no caso de velocidade de avanço nula	32
3.6.3 Operadores de Amplitude de Resposta (RAO).....	35
3.7 Definição do número de Froude	36
4 METODOLOGIA.....	37
4.1 Etapa 1: Modelagem do casco	37
4.2 Etapa 2: Estudo dos movimentos no domínio da frequência (Hydrodynamic Diffraction).....	39



4.3 Etapa 3: Estudo dos movimentos no domínio do tempo (Hydrodynamic Response).	43
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1 Resultados da análise no domínio da frequência	45
5.1.1 Resultados sem velocidade de avanço	45
5.1.2 Resultados com velocidade de avanço de 3m/s.....	48
5.1.3 Resultados com velocidade de avanço de 12 m/s.....	50
5.2 Resultados da análise no domínio do tempo	53
5.2.1 Efeitos da velocidade do avanço dos deslocamentos e acelerações da embarcação	54
5.2.2 Efeitos da amplitude da onda no movimento da embarcação	60
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
REFERÊNCIAS	68
APÊNDICE A: EXEMPLOS DE EMBARCAÇÕES REGIONAIS DE ALTA VELOCIDADE EM MANAUS – AM.....	71
APÊNDICE B: PORTOS PRINCIPAIS EM MANAUS – AM.....	74



1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Diversos tipos de embarcações de médio e pequeno porte navegam nas águas da região amazônica transportando cargas e pessoas. Embora existam duas áreas de navegação definidas como área de águas calmas e área de ocorrência de ondas, áreas 1 e 2, respectivamente segundo (MARINHA, 2023, p. 204, 2024), a superfície dos rios pode ser perturbada pelo movimento de outras embarcações ou por condições ambientais adversas, como trombas d'água e fortes ventos, que podem causar ondas de pequena amplitude. Esse tipo de situação ainda é um desafio a ser enfrentado por embarcações que realizam transporte de carga e passageiros em longos percursos. Embora as amplitudes das ondas geradas não alcancem vários metros como em condições oceânicas, é importante avaliar os possíveis efeitos de ondas de pouca amplitude e de diferentes períodos no movimento de embarcações regionais que operam em altas velocidades.

A Figura 1, a seguir, mostra um exemplo de embarcação regional tipo expresso, a qual costuma transportar passageiros em alta velocidade. Pode-se observar que o rio onde navega não é completamente calmo, havendo a ocorrência de pequenas ondulações da superfície da água.

Figura 1. Embarcação do tipo expresso navegando nos rios da Amazônia.



Fonte: Adaptado de Perfectcell (2023).



Existem algumas evidências documentadas na mídia, incluindo redes sociais e notícias, da interação de embarcações regionais amazônicas com ondas durante condições ambientais adversas, como as mostradas no exemplo da Figura 2, a seguir. Cabe mencionar que, embora não sejam ondas muito altas, a frequência (ou período) de encontro dessas ondas com as embarcações pode influenciar a sua dinâmica (FALTINSEN, 1993; JOURNÉE; MASSIE, 2001). Isso quer dizer que, por exemplo, uma onda com duração específica pode não causar amplificação dos movimentos de uma embarcação grande, como uma barcaça, mas sim de uma embarcação de menores dimensões (FALTINSEN, 1993).

Figura 2. Exemplo de embarcação regional navegando durante um temporal que causou ondas.



Fonte: Adaptado de Brito (2018).

Quando as embarcações regionais estão em operação, não é necessário que encontrem ondas com amplitudes consideráveis, como no oceano, para que apresentem riscos operacionais, pois uma má distribuição de pesos ou redução de borda livre pode causar instabilidades. A Figura 3, a seguir, mostra a evolução do movimento de uma embarcação operando a uma certa velocidade de avanço na região amazônica, onde nota-se a proa quase submergindo, com riscos de embarque de água no convés, fenômeno muito conhecido na Engenharia Offshore e Oceânica (BUCHNER, 2002; GRECO; FALTINSEN; LANDRINI, 2005; HERNÁNDEZ-FONTES, 2018).

Figura 3. Exemplo de embarcação regional navegando durante temporal, com risco de ocorrência de eventos de embarque de água no convés.

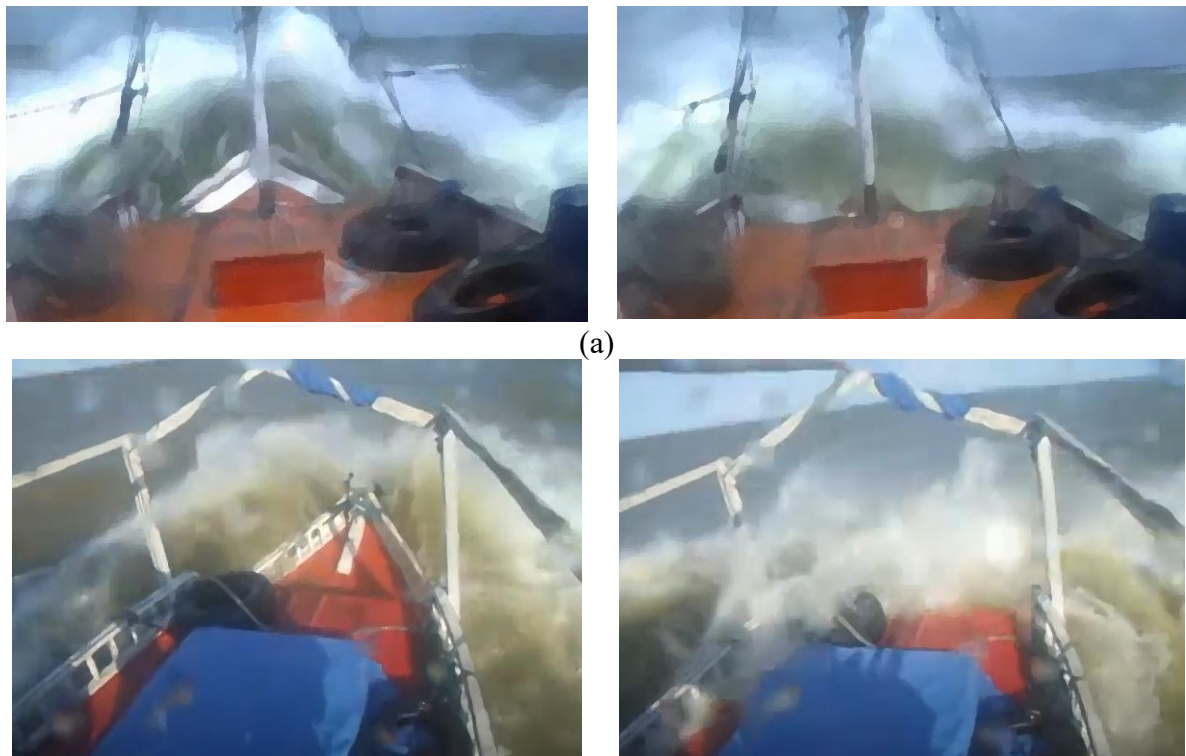




Fonte: Adaptado de Carvalho (2017).

Assim como há a possibilidade de embarque de água no convés, durante a operação também pode ocorrer o impacto do casco com a água, que é um problema amplamente pesquisado na literatura científica e é conhecido como *slamming* (DRUMMEN; HOLTSMANN, 2014; FALTINSEN; LANDRINI; GRECO, 2004). As Figuras 4a e 4b, na sequência, mostram alguns exemplos do problema de *slamming* ocorrendo em duas embarcações operando na região amazônica.

Figura 4. Evidências do problema de *slamming* na navegação da região amazônica.





(b)

Fonte: (a) Adaptado de Embarcacoesdoparaedoamazonas (2024). (b) Adaptado de Amazontube (2021).

As evidências mostradas nas figuras anteriores sugerem que sejam desenvolvidos mais estudos técnicos e científicos que permitam conhecer os riscos de operação de embarcações regionais navegando na região amazônica, e estando submetidas à ocorrência de ondas de diferentes frequências. Nesse contexto, o presente trabalho visa apresentar um estudo preliminar sobre essa problemática, considerando a análise da resposta em ondas regulares de uma embarcação de transporte regional de passageiros do tipo expresso, considerada uma embarcação de alta velocidade (NETO et al., 2024). Pretende-se utilizar um método de simulação de movimentos baseado na teoria do escoamento potencial de hidrodinâmica e na teoria do corpo rígido, utilizando o software Ansys Aqwa. Visa-se avaliar os períodos das ondas que mais podem amplificar o movimento da embarcação com e sem velocidade de avanço, bem como analisar possíveis cenários críticos devido ao aumento na amplitude das ondas.

1.3 Justificativa

Várias atividades navais na região amazônica ainda enfrentam desafios relacionados à falta de estudos técnicos e científicos que permitam prever condições seguras de navegação. Existem vários desafios que precisam ser considerados em estratégias de prevenção de acidentes. Dentre elas podem ser mencionados os impactos da estiagem, a interação com objetos flutuantes e outras embarcações, e as condições ambientais adversas que, eventualmente, podem causar condições de ondas que afetam as embarcações que não foram planejadas para isso. Embora nos rios da Amazônia não aconteçam ondas com alturas consideráveis como as que acontecem no mar, eventualmente a superfície dos rios pode ser perturbada, seja por temporais ou por outras embarcações, causando ondas de baixa amplitude que ainda assim poderiam influenciar o comportamento de embarcações de médio e pequeno porte que operam em alta velocidade. Neste trabalho, é proposto um estudo simplificado da



interação de uma embarcação de alta velocidade de transporte longitudinal de passageiros, conhecida como expresso, com ondas regulares incidindo pela proa. A intenção do estudo é conhecer quais são os períodos característicos das ondas que podem causar os maiores deslocamentos de heave (movimento de translação vertical) e pitch (movimento de rotação com relação ao eixo transversal à embarcação). Visa-se conhecer também, baseado em situações críticas de ondas regulares, os efeitos da variação da amplitude das ondas nos movimentos da embarcação. Propõe-se um estudo baseado na teoria de escoamento potencial de hidrodinâmica, utilizando os módulos disponíveis no software Ansys Aqwa.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

Estudar os movimentos verticais de heave e pitch de uma embarcação tipo expresso durante a sua interação com ondas regulares incidindo pela proa, nos domínios da frequência e do tempo, usando o software Ansys Aqwa.

1.4.2 Objetivos específicos

- Avaliar o comportamento em ondas regulares pela proa de uma embarcação tipo expresso usando o software Ansys Aqwa, incluindo o efeito da variação das amplitudes das ondas nos movimentos.
- Avaliar a resposta da embarcação flutuando livremente e com velocidade de avanço ($V = 0, 3$ e 12 m/s), usando o módulo Hydrodynamic Diffraction e comparar os operadores de amplitude de resposta.
- Estudar os contornos de elevação das ondas incidindo com a embarcação para diferentes velocidades de avanço ($V = 0, 3$ e 12 m/s) utilizando o módulo Hydrodynamic Diffraction.
- Simular a resposta da embarcação para diferentes velocidades de avanço com o módulo Hydrodynamic Response quando submetida à interação de ondas regulares pela proa no período de ressonância de pitch ($T = 5$ s), para diferentes velocidades de avanço ($V = 0, 3$ e 12 m/s).
- Analisar os efeitos da variação da altura de onda ($0,25, 0,50, 0,75$ e $1,0$ m) na resposta da embarcação, identificando possíveis cenários críticos de interação com ondas.



2 ESTADO DA ARTE

Fonseca e Soares (1998) estudaram os movimentos verticais e o carregamento devido às ondas em embarcações com velocidade de avanço no domínio do tempo, considerando efeitos não lineares associados a movimentos de grande amplitude e um formato de casco do tipo *flare*. O método escolhido foi baseado na Teoria das Faixas. Um dos resultados da análise indicou que o uso de coeficientes dependentes da frequência para representar forças hidrodinâmicas associadas a respostas não lineares não é o método correto, pois pode superestimar os movimentos. Enquanto a teoria linear afirma que as respostas aumentam linearmente com a amplitude da onda, os resultados não lineares mostram que a taxa de alteração das respostas diminui com a amplitude da onda.

Haddara e Xu (1998) identificaram os movimentos de heave e pitch acoplados em embarcações utilizando redes neurais. A pesquisa proposta teve por objetivo descrever um procedimento para derivação das equações diferenciais que descrevem a resposta livre de um navio em heave e pitch, a partir de sua resposta estacionária para ondas aleatórias. O movimento acoplado de heave e pitch de um navio em mar irregular foi modelado como um processo multidimensional de Markov. A equação diferencial parcial que descreve a função de densidade de probabilidade de transição, conhecida como equação de Fokker-Planck, para esse processo foi derivada. A equação de Fokker-Planck foi usada para derivar as equações de decaimento aleatório para o movimento acoplado de elevação-inclinação. Os parâmetros nessas equações foram então identificados usando uma abordagem de rede neural. Foi mostrado que o método produz bons resultados quando o sistema é levemente amortecido, sendo sugerido para identificar esses movimentos em mares de condições normais.

Fonseca e Soares (2004) analisaram experimentalmente os efeitos não lineares sobre os movimentos verticais e as cargas de um navio porta-contêineres em ondas regulares. A pesquisa apresentou os resultados de um experimento realizado em tanque de provas utilizando um modelo de pequena escala de um navio porta-contêineres em ondas regulares incidindo pela proa. Para isso, todas as faixas de frequência de onda de interesse foram testadas, utilizando inúmeras amplitudes de onda e anotando-se a influência gerada nas características não lineares das respostas. Como resultado foram detectados fortes efeitos não lineares, especialmente no carregamento induzido, que podem ser identificados pela variação da função de transferência com a amplitude da onda.

Greco e Lugni (2012) estudaram os movimentos de embarcações com relevância na análise de navegação com água no convés e slamming. A pesquisa buscou analisar, através de



uma solução numérica, os efeitos gerados pela presença de água acima do convés pelo impacto de slamming no casco, relacionando os movimentos de uma embarcação rígida com o escoamento da água ao longo do convés e com os eventos de slamming. O problema foi estudado por uma solução de escoamento potencial tridimensional não-linear. As cargas induzidas de *green-water* locais e globais foram analisadas assumindo condições de águas rasas para o convés. O problema de slamming foi estudado através de uma análise de impacto de cunha do tipo Wagner. Como resultado, a solução numérica permitiu estudar eficientemente a interação da embarcação com estados de mar regulares ou irregulares e o movimento de avanço a uma velocidade limitada.

Rajendran et al. (2015) pesquisaram os efeitos do movimento de *surge* na resposta vertical de embarcações em ondas. A pesquisa buscou investigar os efeitos das forças hidrodinâmicas e o modo de movimento de *surge* na resposta vertical em ondas de navios do tipo tanque e porta-contêineres. Calculando-se as forças hidrostáticas e de Froude-Krylov para a área exata de superfície molhada do casco em cada instante de tempo e, utilizando-se de certas técnicas práticas de engenharia visando superar limitações bidimensionais impostas pela teoria das faixas para incluir o movimento de *surge* nas análises, observou-se que as forças longitudinais reduzem o momento fletor vertical sobre o eixo transversal no convés para o intervalo de frequência de ondas de interesse.

Rajendran et al. (2016) pesquisaram a predição de respostas verticais de um navio porta-contêineres sob ondas anormais. A pesquisa proposta comparou os resultados numéricos e experimentais das respostas verticais de um navio porta-contêineres sob influência de condições extremas do mar. Para isso, utilizou-se um procedimento não linear no domínio do tempo, baseado na Teoria das Faixas. O procedimento numérico considerou a não linearidade na força de radiação/difração juntamente com a não linearidade da força de Froude-Krylov e forças hidrostáticas. Os resultados foram comparados aos do modelo de testes experimentais. Como conclusão, observou-se que as forças de radiação/difração não lineares do corpo melhoram significativamente a previsão das respostas do navio em ondas extremas.

Temarel et al. (2016) discutiram os avanços e desafios na predição de cargas induzidas por ondas em embarcações. O artigo publicado teve por objetivo avaliar criticamente os métodos utilizados para a avaliação do carregamento por ondas induzido em navios, examinando abordagens analíticas, numéricas e experimentais. Os autores analisaram diversos parâmetros de carregamento originados de estados estacionários e de excitações transitórias (*slamming*, *sloshing*, *green-water*), incluindo condições de ondas extremas e irregulares. Também, foram comparadas as vantagens e desvantagens dos métodos relativamente mais



simples frente aos métodos que utilizam CFD com relação a alguns fatores como precisão, facilidade de modelagem e acoplamento com procedimentos de avaliação estrutural, adequação para precisão de resposta a longo prazo, tomada de decisão, entre outros fatores. Além disso, o trabalho também avaliou as incertezas envolvidas na previsão do carregamento induzido por ondas, as abordagens probabilísticas e análise de fadiga.

Dai et al. (2019) pesquisaram a identificação de coeficientes hidrodinâmicos de pitch e heave usando algoritmo evolutivo multiobjetivo. A pesquisa trouxe uma discussão sobre os modelos matemáticos para movimentos acoplados de heave e pitch, onde os parâmetros desconhecidos dessas equações são identificados usando abordagens de certos algoritmos computacionais. Os filtros foram modelados para as características das ondas, para simular as forças de heave e os momentos de pitch. Então, projetam-se as condições restritas e as funções multiobjetivos para que auxiliem na tomada de decisão para selecionar os parâmetros hidrodinâmicos corretos.

Siddiqui et al. (2019) realizaram estudos experimentais da seção danificada de uma embarcação em movimento forçado de heave. A pesquisa documentou uma série detalhada de experimentos realizados em uma sequência de ondas em um casco de formato prismático de pequena espessura. Utilizando-se um modelo em pequena escala sob ações de ondas em um tanque de provas, avaliaram-se os resultados obtidos ensaiando-se uma embarcação com seção danificada por onde entrou água. Os resultados identificados no compartimento danificado foram examinados e notou-se a presença de sloshing e ressonância do modo pistão. Além disso, os resultados dos testes de heave forçado demonstraram que a quantidade de água que adentrou o compartimento pode fazer com que as frequências de ressonância variem e os sistemas de ondas associados com os níveis de enchimentos podem ser bastante diferentes.

Coslovich et al. (2021) pesquisaram os movimentos de heave e pitch para o navio-tanque KVLCC2 usando um método teoria de escoamento potencial não linear. Utilizou-se de um método de escoamento potencial instável totalmente não linear para prever a resistência ao avanço, bem como os movimentos de heave e pitch para o casco de um navio-tanque, em ondas regulares e a uma certa velocidade de projeto. Para isso, empregaram-se alguns algoritmos específicos que, utilizando a decomposição não linear do potencial de velocidade, um campo de ondas e uma malha de refinamento adaptativa, obtiveram-se resultados compatíveis com os dados experimentais.

Huang et al. (2021) realizaram predições em CFD do comportamento da navegação sob ondas cruzadas bidirecionais comparadas com ondas regulares unidirecionais. A pesquisa teve como objetivo obter um melhor entendimento da influência do direcionamento de ondas na



performance de navegabilidade de uma embarcação. Foram utilizados métodos de CFD para simular os movimentos da embarcação tanto em ondas regulares, uni quanto bilaterais, geradas pelo método do limite de velocidade. Ao comparar os resultados, o estudo indicou que a resposta de movimento da embarcação em ondas bidirecionais é, geralmente, maior do que a das ondas unidirecionais, alertando para uma maior atenção aos efeitos da bidirecionalidade durante o projeto.

Kim et al. (2022) estudaram sobre os movimentos não lineares de heave e pitch de cascos convencionais e de cascos inclinados em ondas incidentes de proa. Analisaram os movimentos à medida que o calado foi aumentado, comparando as diferenças com os cascos usuais (que inclinam para fora). Realizaram-se experimentos com modelos em várias inclinações de onda para validar as respostas de movimento não linear em condições de ondas pela proa. Como abordagem numérica, foram adotados o método de painel Rankine 3D no domínio do tempo e de fluidodinâmica computacional (CFD). No caso do casco convencional, as magnitudes das funções de transferência de movimento de heave e pitch diminuíram à medida que a inclinação da onda aumentou. No caso do casco com inclinação para dentro não convencional, observou-se uma tendência oposta nos resultados experimentais e numéricos: as magnitudes das funções de transferência aumentaram ao passo que a inclinação da onda aumentou.

Chen et al. (2023) realizaram predições numéricas de navegação e dos comportamentos de slamming de um trimarã em ondas cruzadas, com cristas pequenas, comparadas com ondas regulares de grandes cristas. Eles fizeram uma análise de navegação e efeitos de slamming adotando um trimarã como modelo, uma vez que se percebe a importância de ter uma melhor compreensão no que se diz respeito aos efeitos tridimensionais das ondas nos movimentos da embarcação. Para isso, simulações em CFD foram realizadas, analisando-se diferentes calados do casco, e em diversos intervalos de tempo. Como conclusão, observou-se que mudando o comprimento de onda afeta-se não somente o calado da embarcação, mas também a duração de movimento. A ocorrência do impacto do casco em ondas cruzadas é definida pelo calado e pelo intervalo das ondas.

Sadeghi e Zeraatgar (2023) estudaram o efeito de barbatanas (estruturas) anti-pitch para reduzir o movimento e a aceleração de embarcações usando CFD. A pesquisa analisou os efeitos de uma estrutura no casco utilizada para reduzir o movimento e a aceleração de uma embarcação. Para tal estudo, utilizou-se do método CFD em um software computacional, aplicado a um modelo de embarcação porta-contêiner KRISO. Após verificação dos resultados, notou-se que os movimentos de pitch, da aceleração da proa e de resistência adicionada foram



consideravelmente reduzidos aos se adicionar as “barbatanas anti-pitch” em ondas irregulares equivalentes ao estado de mar 8. Já o movimento de heave e de aceleração do centro de gravidade são pouco afetados para esta situação, tanto em ondas regulares quanto em irregulares.

Qin et al. (2024) realizaram uma pesquisa da performance de navegação de uma plataforma semissubmersível, focando nos seus movimentos não lineares de heave e pitch utilizando uma combinação de métodos numéricos e experimentais. A performance de navegação da plataforma foi analisada numa série de condições de velocidade, comprimento e inclinação de ondas através dos métodos de CFD e dos painéis de Rankine no domínio do tempo. Como resultado, foi obtido que o método CFD é o que melhor prevê o escoamento complexo e a resposta não linear dos movimentos durante a navegação, enquanto o método dos painéis de Rankine é limitado a plataformas com movimentos lineares, particularmente quando a inclinação das ondas é baixa.

Shi et al. (2024) simularam a resposta de movimento de uma embarcação em ondas que incidem pela proa usando um método de escoamento potencial totalmente não linear. Segundo os autores, foi desenvolvida uma nova abordagem de escoamento potencial totalmente não linear para prever o desempenho da navegação de um navio porta-contêiner tipo KRISO. Para isso, utilizou-se um método espectral de elementos de contorno acoplados para aumentar a eficiência numérica e uma técnica baseada no potencial de aceleração para o cálculo de seis graus de liberdade do movimento. As simulações de heave e pitch em ondas que incidem pela proa resultaram bem de acordo com os resultados experimentais e o método CFD. Foram demonstrados os efeitos não lineares de grandes ondas incidentes no movimento da embarcação. Além disso, o método empregado simulou com precisão o balanço paramétrico e revelou o efeito de acoplamento entre o movimento de *roll* e outros graus de liberdade.

Li et al. (2024) pesquisaram o controle anti-pitch de um casco múltiplo de alta velocidade com base na estimativa da velocidade de heave e da velocidade angular de pitch. Segundo os autores, foi proposto um novo algoritmo de controle anti-pitching baseado no controle de predição de modelo algébrico (AMPC) para embarcações multicasco de alta velocidade, onde não se pode medir diretamente as velocidades de heave e pitch. Por meio de simulações detalhadas, foi demonstrado que o algoritmo proposto para o controle de multicascos de alta velocidade leva a uma redução de cerca de 40% no heave e de 60% no pitch.



3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Descrição geral do software Ansys Aqwa

As informações a seguir, nesta e nas próximas subseções, foram obtidas (traduzidas e parcialmente adaptadas) dos manuais do software Ansys Aqwa (ANSYS, 2024a, 2024b). O software Ansys Aqwa pode simular carregamentos em estruturas devido à interação com ondas, considerando teorias de escoamento hidrodinâmico linearizado e corpos rígidos fixos ou flutuantes. Isso é feito por meio da teoria da radiação/difração tridimensional e/ou a Equação de Morison em ondas regulares no domínio da frequência. Também podem ser avaliadas as forças de deriva de segunda ordem unidirecionais ou em múltiplas direções pelas soluções de campo distante ou campo próximo, ou pela matriz de função de transferência quadrática (QTF – Quadratic Transfer Function). O software também permite realizar análises hidrostáticas e hidrodinâmicas de flutuação livre no domínio da frequência.

Dentre as análises que podem ser realizadas com o software Ansys Aqwa podem ser mencionadas as seguintes:

- Estimativa das características de equilíbrio e de estabilidade estática e dinâmica em corpos acoplados (por amarras e/ou conectores) sob carregamentos em estado estacionário (como por exemplo: vento, ondas e correntezas).
- Análises estatísticas, no domínio da frequência, da resposta de corpos flutuantes acoplados ou desacoplados enquanto operam em mar irregular. O arrasto linear devido aos elementos de Morison (tubo, disco), vento e cabos dinâmicos também podem ser simulados.
- Simulação do movimento em tempo real de um ou mais corpos flutuantes enquanto operam sob condições de ondas regulares ou mar irregular, no qual as forças não-lineares de Froude-Krylov e as forças hidrostáticas são estimadas sob superfícies de ondas incidentes instantâneas.
- Simulação do movimento em tempo real, de um ou mais corpos flutuantes, durante a influência de ondas irregulares multidirecionais ou unidirecionais, sob condições de excitações de onda de primeira e segunda ordem. Forças de ação do vento e de correnteza também podem ser aplicadas aos corpos, assim como outras forças externas definidas pelo usuário.
- Se mais de um corpo estiver sendo estudado, os efeitos do acoplamento entre os corpos podem ser simulados. A abordagem de convolução é usada para explicar o efeito memória da força de radiação.



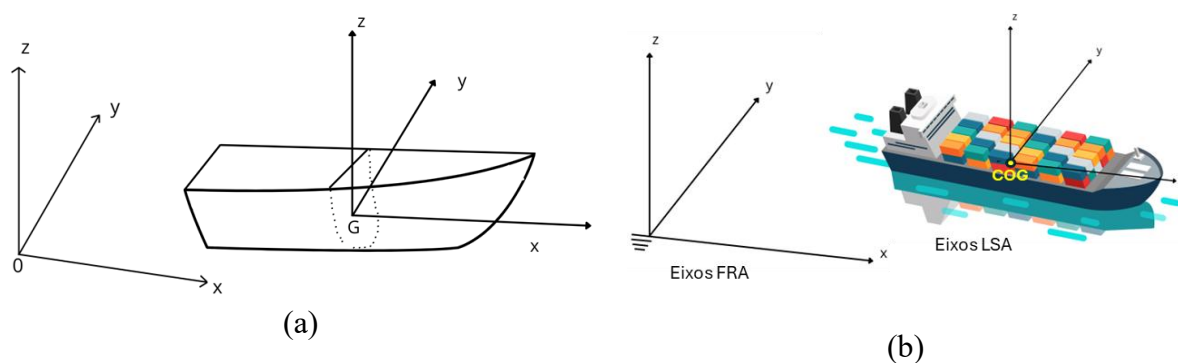
3.2 Convenções de eixos

Para representar movimentos, carregamento, entre outros valores vetoriais, vários sistemas de coordenadas são empregados no software Ansys Aqwa. Os principais são os eixos de referência fixos (FRA – Fixed Reference Axis), eixos de estrutura local (LSA – Local Set of Axes) e eixos de articulação local. Outras estruturas de eixos utilizadas, como sistemas de eixos locais para elementos de amarração e elementos tubulares, podem ser encontradas nos manuais de uso do software.

3.2.1 Eixos de referência fixos

Em problemas de hidrodinâmica que incluem um limite definido pela superfície livre de fluido, como no presente estudo, é uma prática comum definir um sistema de eixos com a origem situada na superfície livre média do fluido, como mostrado nas Figuras 5a e 5b. No Ansys Aqwa isso é chamado de eixos de referência fixos (FRA), eixos globais ou OXYZ, que é um sistema de eixo fixo orientado para a direita com a origem situada na superfície livre média e com o eixo Z apontando verticalmente para cima.

Figura 5. Definição dos sistemas de eixos utilizados no Ansys Aqwa. (a) Figura do manual de teoria do software. (b) Figura do manual de referência.



Fonte: (a) Adaptado de Ansys (2024a). (b) Adaptado de Ansys (2024b).

3.2.2 Eixos de estrutura local

Para a descrição de movimentos de corpos rígidos, é mais conveniente usar o centro de gravidade do corpo (CG), ou centro de gravidade (CG) combinado da massa da estrutura e do líquido nos tanques internos, como um ponto de referência dinâmico. O eixo de estrutura local (LSA), eixos de corpo fixo, ou Gxyz, é definido para cada estrutura individual. Como mostrado

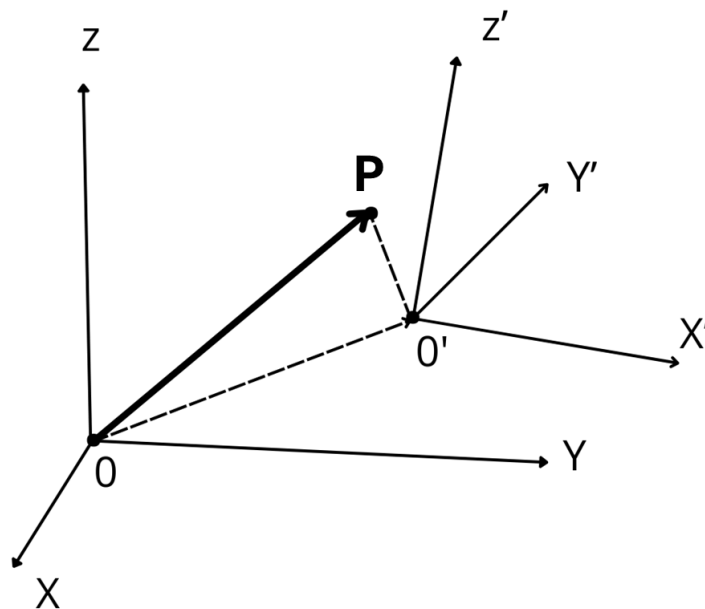


na Figura 5, a origem do eixo de estrutura local está neste ponto de referência dinâmico. O eixo de estrutura local pela origem será inicialmente paralelo aos eixos de referência fixa.

3.2.2 Transformação de eixos e rotações de Euler

No software Ansys Aqwa, são considerados vetores com magnitude e direção para representar as variáveis de posição, velocidade, aceleração e força. Esses vetores podem ser descritos em sistemas de coordenadas diferentes por meio de uma transformação de eixo (Figura 6).

Figura 6. Transformação de eixo.



Fonte: Adaptado de Ansys (2024a).

A Figura 6 mostra dois sistemas de coordenadas, a origem do sistema O'X'Y'Z' está em $[X_0, Y_0, Z_0]^T$ no sistema OXYZ, onde o expoente T denota uma transposição de matriz. Os cossenos direcionais dos eixos de O'X'Y'Z' relativos aos eixos de OXYZ são escritos como:

$$\mathbf{e}_j = \begin{bmatrix} e_{1j} \\ e_{2j} \\ e_{3j} \end{bmatrix} \quad (j = 1, 3) \quad (1)$$

Se a coordenada de um ponto é representada por $[X, Y, Z]^T$ em OXYZ e $[x, y, z]^T$ em O'X'Y'Z', então temos:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \mathbf{E} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2)$$



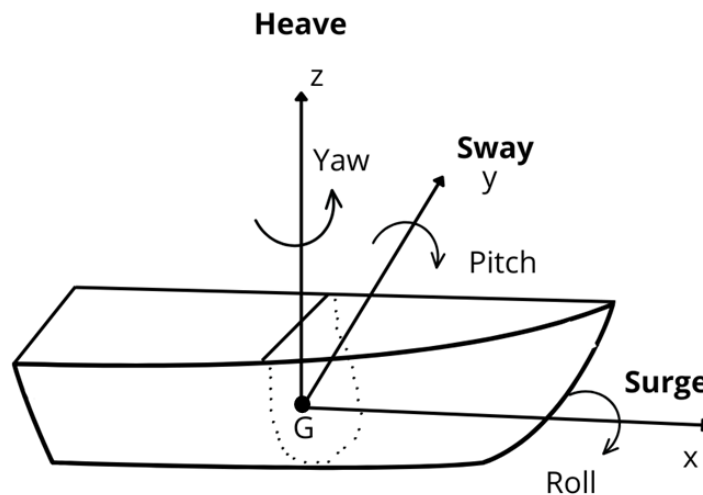
sendo \mathbf{E} a matriz de transformação.

Para transferir $[X, Y, Z]^T$ em OXYZ em uma coordenada no sistema O'X'Y'Z', nós temos

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{E}^T \left\{ \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \right\} \quad (3)$$

Empregando a notação convencional de navegação de um corpo rígido flutuante, os seus movimentos são definidos como os movimentos translacionais do centro de gravidade (surge, sway e heave) e rotações em torno de um conjunto de eixos ortogonais através da origem de GXYZ (roll, pitch, yaw), como ilustrado na Figura 7. Esse sistema de coordenadas intermediárias move-se com a velocidade média de avanço da embarcação, mas seus eixos X, Y e Z permanecem constantemente paralelos aos eixos X, Y e Z correspondentes dos eixos de referência fixos.

Figura 7. Movimentos do corpo rígido flutuante.



Fonte: Adaptado de Ansys (2024a).

Os movimentos de translação são: $u_1 = \text{surge}$ (ao longo de X); $u_2 = \text{sway}$ (ao longo de Y); $u_3 = \text{heave}$ (ao longo de Z). Por outro lado, os movimentos de rotação são: $\theta_1 = \text{roll}$ (em torno de X); $\theta_2 = \text{pitch}$ (em torno de Y); $\theta_3 = \text{yaw}$ (em torno de Z).

Para análise de movimentos rotacionais de grande amplitude, a determinação dos ângulos de Euler é uma etapa necessária na análise cinemática e na apresentação gráfica. No software Ansys Aqwa a orientação de uma estrutura é definida usando ângulos de Euler. Esses são os ângulos de rotação em torno dos três eixos de GXYZ:



Rotação de θ_1 sobre o eixo X:

$$\mathbf{E}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ 0 & \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Rotação de θ_2 sobre o eixo Y:

$$\mathbf{E}_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & 0 & \sin \theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & 0 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Rotação de θ_3 sobre o eixo Z:

$$\mathbf{E}_z = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

A matriz de rotação de Euler é definida como uma sequência de três rotações, na ordem de rotação primeiro em torno do eixo X de GXYZ, depois do eixo Y, e finalmente do eixo Z. Isto pode ser representado como o produto de matrizes:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \mathbf{E}_z \mathbf{E}_y \mathbf{E}_x \\ &= \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \theta_3 & \sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 - \cos \theta_1 \sin \theta_3 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 \cos \theta_3 + \sin \theta_1 \sin \theta_3 \\ \cos \theta_2 \sin \theta_3 & \sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 + \cos \theta_1 \cos \theta_3 & \cos \theta_1 \sin \theta_2 \sin \theta_3 - \sin \theta_1 \cos \theta_3 \\ -\sin \theta_2 & \sin \theta_1 \cos \theta_2 & \cos \theta_1 \cos \theta_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

Com esta matriz de rotação de Euler, a posição do ponto nos eixos de referência fixos pode ser expressa por:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_g \\ Y_g \\ Z_g \end{bmatrix} + \mathbf{E} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde $(X_g, Y_g, Z_g)^T$ é a coordenada do centro de gravidade nos eixos de referência fixos e $(x, y, z)^T$ é a coordenada deste ponto nos eixos de estrutura locais (LSA).

Em casos especiais quando todos os ângulos de rotação são pequenos, como por exemplo $\theta_j = O(\varepsilon)$ ($j = 1, 3$), a matriz de rotação de Euler pode ser simplificada para:

$$\mathbf{E} = \mathbf{I} + \mathbf{\Xi} \quad (9)$$

onde

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

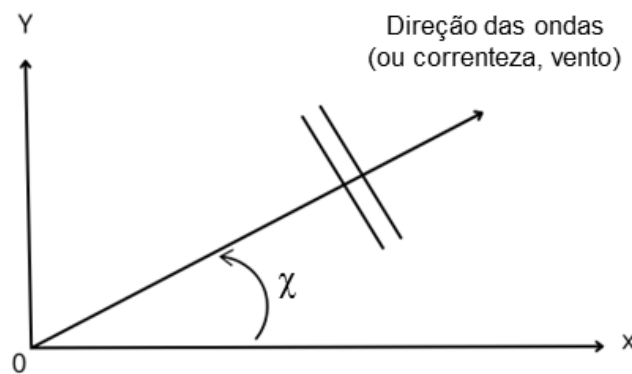


$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & -\theta_3 & \theta_2 \\ \theta_3 & 0 & -\theta_1 \\ -\theta_2 & \theta_1 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.3 Direções e convenções de ângulo de fase

As direções de onda, correnteza e do vento são definidas no plano OXY do eixo de referência fixa (FRA). A direção é definida como o ângulo entre a direção de propagação da onda, correnteza ou do vento e o eixo X positivo, medido no sentido anti-horário, como mostrado na Figura 8.

Figura 8. Definição das direções das ondas ou das correntezas.



Fonte: Adaptado de Ansys (2024a).

3.4 Onda linear regular

Uma onda linear regular é considerada a onda oceânica mais simples, e é baseada na suposição de fluido homogêneo, incompressível, sem viscosidade e de escoamento irrotacional. Além disso, a amplitude da onda é assumida como pequena em comparação ao comprimento da onda e à profundidade da água; portanto, a condição de superfície livre linear é usada nos eixos de referência fixos (FRA). A elevação da superfície da água nas posições X e Y pode ser expressa em forma de valor complexo como:

$$\zeta = a_w e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + \alpha]} \quad (12)$$

onde a_w é a amplitude da onda, ω é a frequência de onda (em rad/s), k é o número de onda, χ é a direção de propagação da onda, e α é a fase de onda.



Assumindo um fluido ideal e irrotacional, o escoamento pode ser representado por um potencial de velocidade que satisfaz a equação de Laplace em todo o domínio do fluido, a condição de superfície livre linear e a condição de fundo impermeável horizontal.

Em uma profundidade finita de água, o potencial de velocidade de $\vec{X} = (X, Y, Z)$ é

$$\Phi_I(\vec{X}, t) = \varphi_I(\vec{X})e^{-i\omega t} = -\frac{iga_w \cos h[k(Z + d)]}{\omega \cos h(kd)} e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + \alpha]} \quad (13)$$

onde d é a profundidade e g é a aceleração da gravidade.

Considerando a condição de superfície livre linear, a relação entre a frequência de onda e o número de onda (relação de dispersão linear) é representada por:

$$v = \frac{\omega^2}{g} = k \tan h(kd) \quad (14)$$

O comprimento e o período de onda são definidos pelas equações 15 e 16, respectivamente:

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (15)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (16)$$

Usando a equação de Bernoulli e levando em conta apenas o termo linear, a pressão do fluido pode ser calculada pela equação 17:

$$p(\vec{X}, t) = \frac{\rho ga_w \cos h[k(Z + d)]}{\cos h(kd)} e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + \alpha]} - \rho gZ \quad (17)$$

sendo ρ a densidade da água.

A velocidade da onda, C , é definida como segue:

$$C = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tan h\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \quad (18)$$

Em uma profundidade (d) infinita ($d \rightarrow \infty$), a elevação da onda mantém a forma da equação (12). No entanto, o potencial de velocidade pode ser mais simplificado para

$$\Phi_I(\vec{X}, t) = \varphi_I(\vec{X})e^{-i\omega t} = -\frac{iga_w}{\omega} e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + \alpha] + kZ} \quad (19)$$

e a relação de dispersão linear pode ser expressa por:

$$\omega^2 = gk \quad (20)$$



A pressão do fluido é:

$$p(\vec{X}, t) = -\rho g a_w e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + \alpha] + kZ} - \rho g Z \quad (21)$$

A velocidade da onda (C) e a velocidade da partícula do fluido (\vec{v}) são expressas pelas equações 22 e 23, respectivamente:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \quad (22)$$

$$\vec{v} = a_w \omega e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + \alpha] + kZ} (\cos \chi, \sin \chi, -i) \quad (23)$$

3.5 Correnteza uniforme e perfilada

As correntezas podem causar carregamentos significativos em estruturas marítimas, particularmente em embarcações atracadas e estruturas offshore. Assume-se, geralmente, que a correnteza se move em uma direção horizontal, mas depende muito da profundidade do corpo de água. Existem vários tipos de correntezas, como a corrente oceânica, correntes termoalinas, correntezas de maré e correntezas devido às ondas internas na fronteira entre duas camadas de água de densidades diferentes.

O software Ansys Aqwa permite definir uma velocidade de correnteza uniforme e/ou um perfil de correnteza com profundidade. No presente estudo foi utilizada uma correnteza uniforme no módulo Hydrodynamic Response para representar a velocidade de avanço da embarcação, mantendo o movimento de avanço como restrito (ver Capítulo 4).

A correnteza uniforme é definida por uma quantidade escalar positiva U_0 e uma direção de ângulo θ_0 (em graus) no eixo de referência fixo (FRA). A correnteza uniforme é constante do fundo do corpo de água até a sua superfície livre. A velocidade de correnteza total $\vec{U}_c(z)$ a uma posição Z especificada na água é a soma da velocidade uniforme de correnteza e a velocidade perfilada de correnteza, desta forma

$$\vec{U}_c(z) = (U_0 \cos \theta_0, U_0 \sin \theta_0, 0) + (U_z \cos \theta_z, U_z \sin \theta_z, 0) \quad (24)$$

3.6 Análise de difração e radiação hidrodinâmica pelo método de distribuição de fontes

A cinemática das partículas de água nas ondas, os movimentos da estrutura e as interações entre as ondas e a estrutura são os principais fatores que contribuem no carregamento



hidrodinâmico em uma estrutura naval e oceânica. Podem ser mencionadas três categorias relevantes de carregamento hidrodinâmico em estruturas marítimas: de arrasto, de excitação de ondas e de inércia.

O carregamento por arrasto é induzido pela viscosidade da água e é proporcional ao quadrado da velocidade relativa entre a partícula do fluido e a superfície da estrutura. Ele é relevante quando os membros estruturais são delgados e a amplitude da onda é grande.

Em ondas de pequena amplitude, o carregamento excitante da onda consiste na força de onda incidente de primeira ordem (ou seja, força de Froude-Krylov) e na força de difração que é induzida pela onda perturbada devido à existência de um corpo. Tanto as forças de primeira ordem quanto as de segunda ordem são relevantes em estados de mar maiores. Em mares severos, forças transitórias de impacto de fundo e proa ganham relevância na dinâmica da estrutura e podem ser consideradas.

O carregamento de inércia de onda ou carregamento de radiação é causada por ondas induzidas pelos movimentos do corpo. Teorias de escoamento potencial são comumente usadas para resolver o carregamento de inércia de onda e o carregamento de excitação de onda.

Os métodos dos painéis tridimensionais são as ferramentas numéricas mais comuns para analisar o comportamento hidrodinâmico de uma estrutura de grande volume em ondas. Esses métodos são baseados na teoria do escoamento potencial e representam a superfície da estrutura por uma série de painéis de difração. Por outro lado, a abordagem da equação de Morison é amplamente usada para componentes de corpo delgados. O software Ansys Aqwa emprega um método híbrido para modelar os componentes de grande volume de uma estrutura por painéis de difração, enquanto pequenos componentes transversais são modelados por elementos de Morison.

3.6.1 Forças de radiação e difração das ondas

As principais suposições teóricas e limitações da teoria potencial linear empregada pelo Ansys Aqwa são: o corpo ou corpos têm velocidade de avanço nula ou muito pequena; o fluido é considerado sem viscosidade e incompressível, e o escoamento do fluido é irrotacional; as ondas regulares incidentes são de pequena amplitude em comparação com seu comprimento (pequena inclinação); os movimentos são de primeira ordem e, portanto, devem ser de pequena amplitude. Todos os movimentos do corpo são harmônicos.



3.6.2 Fórmula geral no caso de velocidade de avanço nula

Esta seção trata do carregamento hidrodinâmico de um corpo em ondas harmônicas regulares. A teoria de escoamento potencial pode ser usada para calcular a excitação da onda em um corpo fixo ou as forças de excitação da onda e as forças de radiação em um corpo flutuante. A teoria do potencial de difração de primeira ordem e ondas de radiação é usada para análise a de radiação e difração. Então, o teorema da superposição linear pode ser usado para formular o potencial de velocidade dentro do domínio do fluido.

Na teoria potencial, o campo de escoamento que envolve um corpo flutuante por um potencial de velocidade é definido por

$$\Phi(\vec{X}, t) = a_w \varphi(\vec{X}) e^{-i\omega t} \quad (25)$$

onde a_w é a amplitude da onda incidente e ω é a frequência de onda.

O termo dependente do espaço isolado pode ser separado em contribuições das ondas de radiação (devido aos seis modos básicos de movimento do corpo), a onda incidente e a onda difratada ou espalhada. Cabe mencionar que as funções potenciais são complexas (parte real e imaginária), mas as quantidades físicas resultantes, como pressão do fluido e movimentos do corpo na análise do domínio do tempo, costumam ser obtidas considerando apenas a parte real.

Adotando a notação convencional dos seis movimentos do corpo rígido na teoria da navegação, conforme demonstrado na Figura 7, três movimentos translacionais e três rotacionais do centro de gravidade do corpo são excitados por uma onda regular incidente com amplitude unitária:

$$x_j = u_j, (j = 1,3) \quad (26)$$

$$x_j = \theta_{j-3}, (j = 4,6) \quad (27)$$

O potencial devido às ondas incidentes, de difração e de radiação pode, portanto, ser escrito como segue:

$$\varphi(\vec{X}) e^{-i\omega t} = \left[(\varphi_1 + \varphi_d) + \sum_6^{j=1} \varphi_{rj} x_j \right] e^{-i\omega t} \quad (28)$$

onde φ_1 corresponde ao potencial de onda incidente de primeira ordem com amplitude de onda unitária, φ_d é o potencial de onda de difração correspondente, φ_{rj} é o potencial de onda de radiação devido ao j -ésimo movimento com amplitude de movimento unitária.



Quando os potenciais de velocidade das ondas são conhecidos, a distribuição de pressão hidrodinâmica de primeira ordem pode ser calculada usando a equação linear de Bernoulli:

$$p^{(1)} = -\rho \frac{\partial \Phi(\vec{X}, t)}{\partial t} = i\omega\rho\varphi(\vec{X})e^{-i\omega t} \quad (29)$$

Uma vez que é conhecida a distribuição de pressão, as várias forças do fluido podem ser calculadas integrando a pressão sobre a superfície molhada do corpo, nas direções desejadas. Para ter uma forma geral para as forças e momentos atuando no corpo, considera-se a notação do vetor normal unitário da superfície do casco em 6 componentes correspondentes aos seis movimentos básicos do corpo rígido, como

$$(n_1, n_2, n_3) = \vec{n} \quad (30)$$

$$(n_4, n_5, n_6) = \vec{r} \times \vec{n} \quad (31)$$

onde $\vec{r} = \vec{X} - \vec{X}_g$ é o vetor de posição de um ponto na superfície do casco em relação ao centro de gravidade nos eixos de referência fixos (FRA). Empregando essa notação, as componentes de força e momento hidrodinâmicos de primeira ordem podem ser expressas em uma forma generalizada como segue:

$$F_j e^{-i\omega t} = - \int_{S_o} p^{(1)} n_j dS = \left[-i\omega\rho \int_{S_o} \varphi(\vec{X}) n_j dS \right] e^{-i\omega t} \quad (32)$$

onde S_o é a superfície molhada média do corpo.

A partir da equação anterior, a força hidrodinâmica total de primeira ordem pode ser escrita como

$$F_j = [(F_{Ij} + F_{dj}) + \sum_{k=1}^6 F_{rjk} X_k] \quad \text{onde } j = 1,6 \quad (33)$$

da qual a j -ésima força de Froude-Krylov devido à onda incidente é

$$F_{Ij} = -i\omega\rho \int_{S_o} \varphi_I(\vec{X}) n_j dS \quad (34)$$

a j -ésima força de difração devido à onda de difração é

$$F_{dj} = -i\omega\rho \int_{S_o} \varphi_d(\vec{X}) n_j dS \quad (35)$$



a j -ésima força de radiação devido à onda de radiação induzida pelo movimento do corpo rígido, de amplitude k -ésima unidade é

$$F_{rjk} = -i\omega\rho \int_{S_o} \varphi_{rk}(\vec{X}) n_j dS \quad (36)$$

As forças fluidas podem ser descritas em termos de componentes reativos e ativos. A força ativa, ou a força de excitação da onda, é composta pela força de Froude-Krylov e pela força de difração. A força reativa é a força de radiação devido às ondas de radiação induzidas pelos movimentos do corpo.

O potencial da onda de radiação, φ_{rk} , pode ser expresso em partes reais e imaginárias para definir os coeficientes de amortecimento e massa adicionada:

$$\begin{aligned} F_{rjk} &= -i\omega\rho \int_{S_o} \{ \text{Re}[\varphi_{rk}(\vec{X})] + i\text{Im}[\varphi_{rk}(\vec{X})] \} n_j dS \\ &= \omega\rho \int_{S_o} \text{Im}[\varphi_{rk}(\vec{X})] n_j dS - \int_{S_o} \text{Re}[\varphi_{rk}(\vec{X})] n_j dS = \omega^2 A_{jk} + i\omega B_{jk} \end{aligned} \quad (37)$$

onde a massa adicionada e o amortecimento são descritos pelas equações 38 e 39, respectivamente:

$$A_{jk} = \frac{\rho}{\omega} \int_{S_o} \text{Im}[\varphi_{rk}(\vec{X})] n_j dS \quad (38)$$

$$B_{jk} = -\rho \int_{S_o} \text{Re}[\varphi_{rk}(\vec{X})] n_j dS \quad (39)$$

Se um problema requer apenas o carregamento da onda em um corpo fixo, então somente as forças de onda ativas são de interesse. Quando o corpo está flutuando, tanto as forças de fluido ativas quanto as reativas devem ser consideradas. Também vale a pena notar que todas as forças de fluido calculadas acima são uma função somente da geometria da superfície do corpo molhado, sendo independentes das características de massa estrutural do corpo.



3.6.3 Operadores de Amplitude de Resposta (RAO)

Para obter a resposta harmônica de um corpo rígido em ondas regulares, o software Ansys Aqwa soluciona um conjunto de equações algébricas lineares. Os resultados obtidos são comumente chamados de operadores de amplitude de resposta (RAOs) e são proporcionais à amplitude de onda.

O conjunto de equações de movimentos lineares de M estruturas de interação hidrodinâmica, com coeficientes dependentes da frequência, pode ser resumido como segue:

$$[-\omega_e^2(M_s + M_a) - i\omega_e C + K_{hys}][X_{jm}] = [F_{jm}] \quad (40)$$

onde M_s é uma matriz de massa estrutural ($6M \times 6M$). $M_a = [A_{jm,kn}]$ e $C = [B_{jm,kn}]$ são, respectivamente, as matrizes hidrodinâmicas de massa adicionada e de amortecimento ($6M \times 6M$), incluindo os termos hidrodinâmicos de interação de acoplamento entre duas estruturas diferentes. K_{hys} é a matriz de rigidez hidrostática, da qual cada submatriz de rigidez hidrostática diagonal (6×6) corresponde à estrutura individual, e todas as matrizes 6×6 fora da diagonal são nulas, pois não há interação hidrostática entre estruturas diferentes.

A equação anterior pode ser alternativamente expressada por:

$$[X_{jm}] = H[F_{jm}] \quad (41)$$

onde

$$H = \{-\omega_e^2(M_s + M_a) - i\omega_e C + K_{hys}\}^{-1} \quad (42)$$

é chamado de função de transferência ou recepção modal, que relaciona as forças de entrada com a resposta de saída.

Além disso, podem ser calculados os RAOs em qualquer ponto da estrutura, dados os RAOs no centro de gravidade da estrutura e o vetor do centro de gravidade até a posição desejada. Os RAOs de um ponto P de $(X_{pm}, Y_{pm}, Z_{pm})^T$ na estrutura m -th podem ser obtidos usando a seguinte relação:

$$(x_{pm}, y_{pm}, z_{pm})^T = T[X_{jm}] \quad (43)$$

onde a matriz de translação entre o centro de gravidade $(X_{gm}, Y_{gm}, Z_{gm})^T$ e o ponto P é dada como segue:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & (Z_{pm} - Z_{gm}) & -(Y_{pm} - Y_{gm}) \\ 0 & 1 & 0 & -(Z_{pm} - Z_{gm}) & 0 & (X_{pm} - X_{gm}) \\ 0 & 0 & 1 & (Y_{pm} - Y_{gm}) & -(X_{pm} - X_{gm}) & 0 \end{bmatrix} \quad (44)$$



3.7 Definição do número de Froude

Em Engenharia Naval, o movimento de uma embarcação na superfície livre da água pode ser caracterizado segundo o número adimensional de Froude (F_n). O número de Froude permite avaliar os efeitos das forças inerciais com relação às forças causadas pelo campo gravitacional, sendo útil para avaliar a dinâmica de corpos se movimentando na superfície livre da água. Costuma-se definir o regime de operação de uma embarcação segundo o número de Froude: deslocamento ($0 < F_n < 0,5$), semi-deslocamento ou, segundo alguns autores semi-planeio ($0,4 < F_n < 1,0$), e planeio ($F_n > 1,0$). A equação utilizada é a seguinte:

$$F_n = \frac{V_s}{\sqrt{gL}} \quad (41)$$

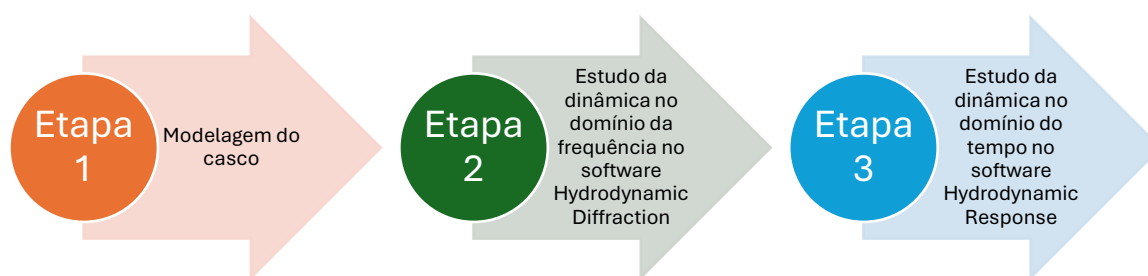
sendo g a aceleração causada pela gravidade (em m/s^2), V_s a velocidade de avanço da embarcação (em m/s), e L (em m) o seu comprimento característico (podendo alguma outra dimensão do corpo em estudo, dependendo da aplicação).



4 METODOLOGIA

A metodologia seguida no estudo consta das seguintes partes principais: a modelagem tridimensional da embarcação tipo expresso (Etapa 1), a análise dos movimentos no domínio da frequência usando Ansys Hydrodynamic Diffraction (Etapa 2), e as simulações no domínio do tempo usando Ansys Hydrodynamic Response (Etapa 3), como mostrado na Figura 9.

Figura 9. Etapas da metodologia abordada.



Fonte: Elaboração própria.

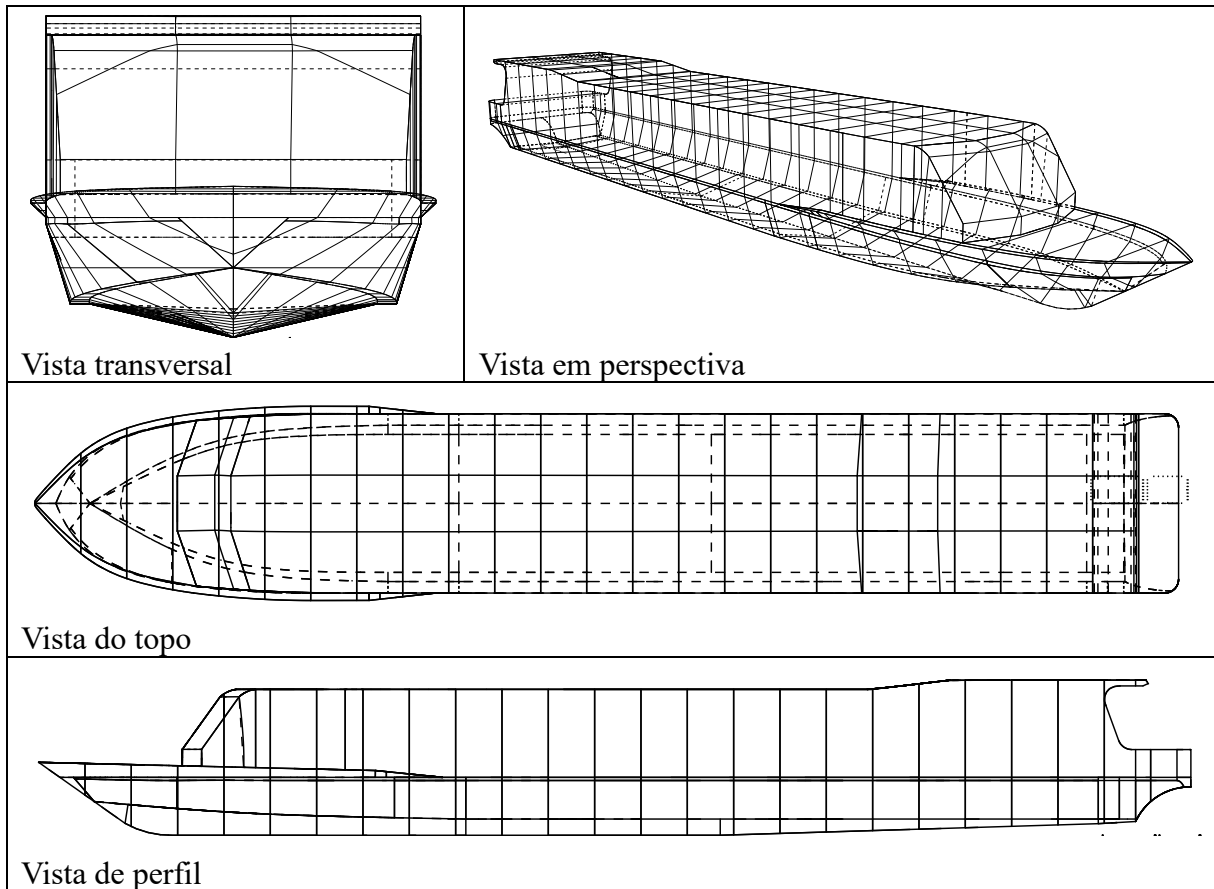
4.1 Etapa 1: Modelagem do casco

No presente estudo, foi considerada uma embarcação de passageiros do tipo expresso, que opera na rota Manaus Parintins. O Apêndice A mostra alguns exemplos de embarcações do tipo expresso utilizadas na cidade de Manaus, Amazonas, para fins ilustrativos. Por outro lado, o Apêndice B descreve os principais portos da cidade onde podem ser encontradas embarcações tipo expresso.

A geometria da embarcação foi modelada utilizando o software Rhinoceros 3D versão 8, considerando o caso de estudo, e estendendo a geometria, previamente descrito em Cursino (2024) e Da Silva (2024). Neste trabalho, a geometria do expresso é apresentada considerando a superestrutura, com a finalidade de melhorar a sua visualização durante as simulações de interação com as ondas. A Figura 10 mostra várias vistas da embarcação que foi considerada no estudo, enquanto a Tabela 1 apresenta as características principais da embarcação, cujos detalhes podem ser encontrados em Cursino (2024) e Da Silva (2024).



Figura 10. Vistas da geometria da embarcação modelada no software Rhinoceros.



Fonte: Geometria elaborada por Kleyphide Pereira da Silva, 2024.

Tabela 1. Características da embarcação considerada como caso de estudo.

Comprimento total, L	25,0 m
Comprimento entre perpendiculares, L_{pp}	22,6 m
Boca máxima, B	3,9 m
Pontal do casco na proa	1,5 m
Calado (considerado neste estudo como condição do casco carregado), D	0,5 m
Velocidade média de operação [medida em Cursino (2024)], V_s	12 – 12,5 m/s
Posição longitudinal do centro de gravidade, LCG	No centro da embarcação ($x = L_{pp}/2$)

Fonte: Adaptado de Cursino (2024) e Da Silva (2024).

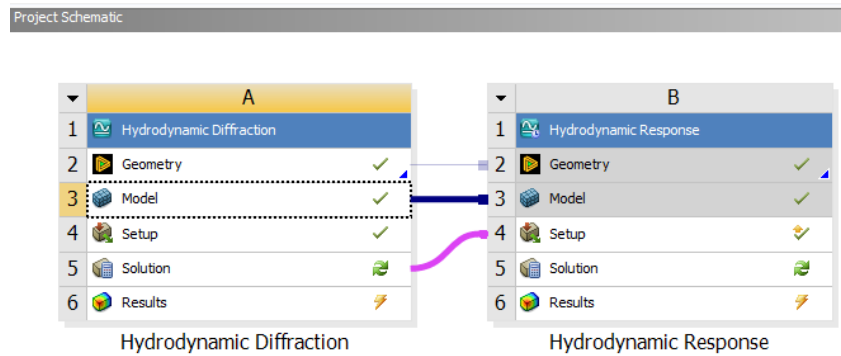


4.2 Etapa 2: Estudo dos movimentos no domínio da frequência (Hydrodynamic Diffraction)

Para avaliar os movimentos da embarcação, foi utilizado o software Ansys Aqwa (licença Ansys Academic Research: CFD and Mechanical 2024 R1), incluindo os módulos Design Modeler, Hydrodynamic Diffraction e Hydrodynamic Response.

A Figura 11 mostra a configuração dos módulos do software ANSYS Aqwa, correspondendo ao Hydrodynamic Diffraction e Hydrodynamic Response, para implementar as análises de movimento nos domínios da frequência e do tempo, respectivamente.

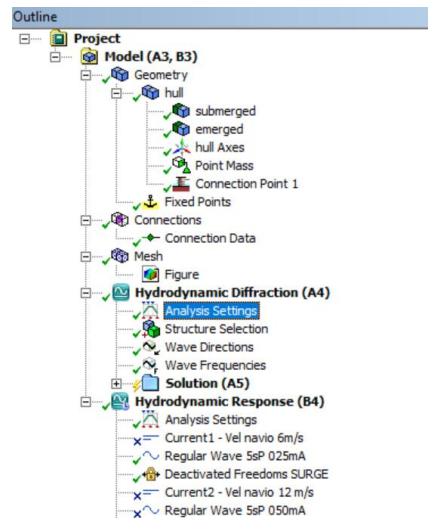
Figura 11. Configuração dos módulos do software ANSYS Aqwa.



Fonte: ANSYS Aqwa 2024 R1.

O primeiro módulo a ser configurado é o Hydrodynamic Diffraction, seguindo a ordem das configurações mostradas na Figura 12.

Figura 12. Lista de configurações no software Ansys Aqwa.

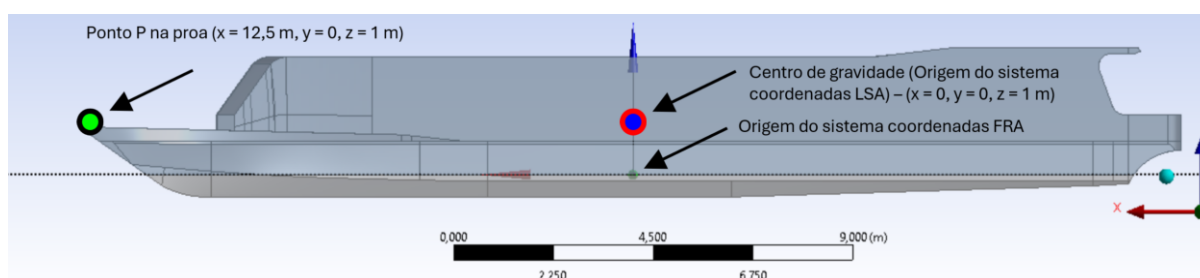


Fonte: Ansys Aqwa 2024 R1.



Uma vez importada a geometria no software Ansys Aqwa, foi utilizado o módulo Design Modeler para definir a posição do sistema coordenado e o calado de operação, que foi de 0,5 m. Posteriormente, a geometria foi aberta no módulo Hydrodynamic Diffraction para definir a posição do centro de gravidade. O sistema coordenado a partir do qual foram medidos os movimentos foi posicionado no centro da embarcação, na linha de água ($L_{pp}/2$), como mostrado na Figura 13. A Figura também mostra as posições do centro de gravidade e de um ponto P na proa, nas quais foram medidos os movimentos da embarcação. A posição do centro de massa (centro de gravidade) foi calculada segundo o controle do software com relação ao sistema definido no centro da embarcação, definindo apenas a posição na vertical. As coordenadas do centro de gravidade foram $x = -0,57$ m, $y = 0$ m, e $z = 1$ m. Por outro lado, as coordenadas do ponto P na proa foram $x = 12,5$ m, $y = 0$ m, e $z = 1$ m. Os momentos de inércia foram colocados considerando o raio de giração, sendo: $k_{xx} = 1,2$ m; $k_{yy} = 5,5$ m; $k_{zz} = 5,5$ m. Assim, o software calculou os momentos de inércia I_{xx} , I_{yy} , e I_{zz} como sendo 26747, 561881, e 561881 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$, respectivamente. A posição do CG e as propriedades de inércia foram consideradas constantes e assumidas empiricamente. Salienta-se ainda a necessidade de realizar estimativas mais técnicas destes parâmetros considerando a distribuição de carga da embarcação em trabalhos futuros.

Figura 13. Posição do sistema coordenado na embarcação ($x = L_{pp}/2 = -12,5$ m; $y = 0$ m; $z = 0$ m) e dos dois pontos nos quais serão medidos os movimentos (centro de gravidade e ponto P na proa).

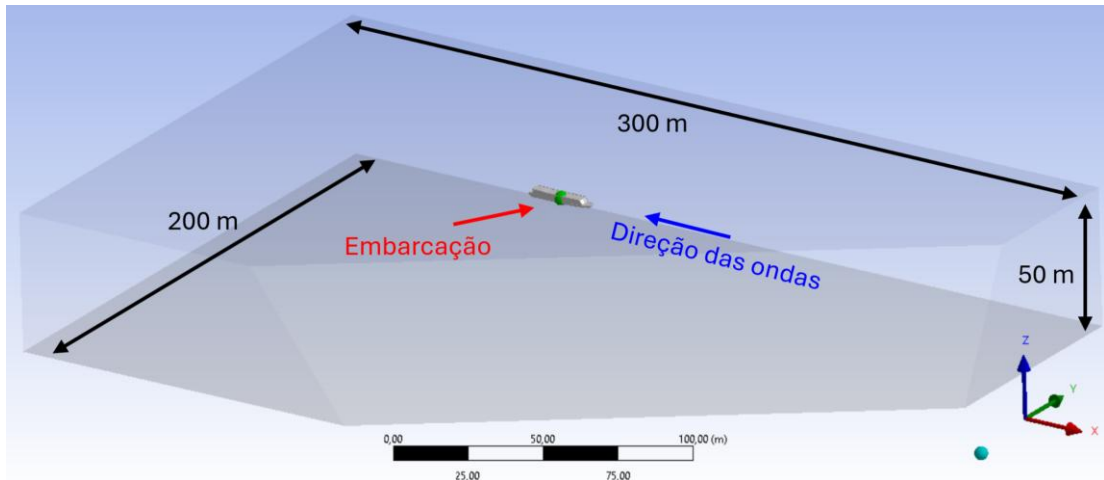


Fonte: Elaboração própria – Ansys Aqwa 2024 R1.

A Figura 14 mostra o domínio computacional que foi definido no módulo Hydrodynamic Diffraction para as análises. Foi considerado um domínio de 200 m de largura, 300 m de comprimento e 50 m de profundidade, considerando a massa específica da água como 1000 kg/m^3 .



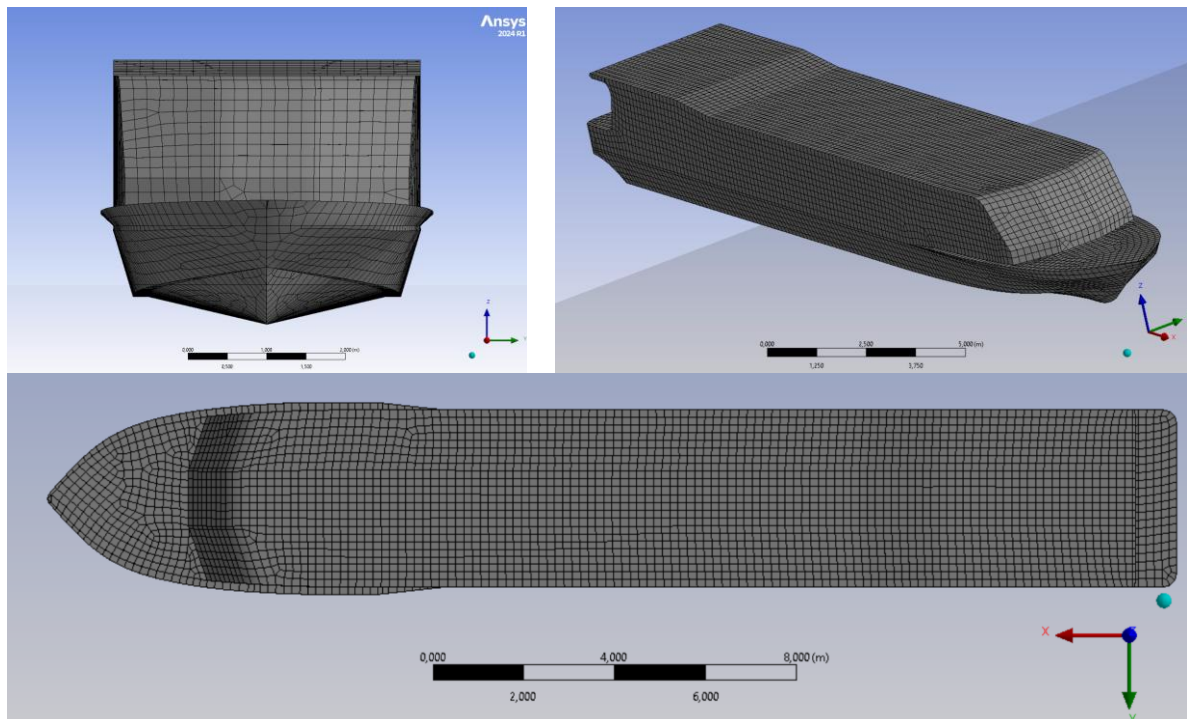
Figura 14. Domínio computacional considerado na análise.

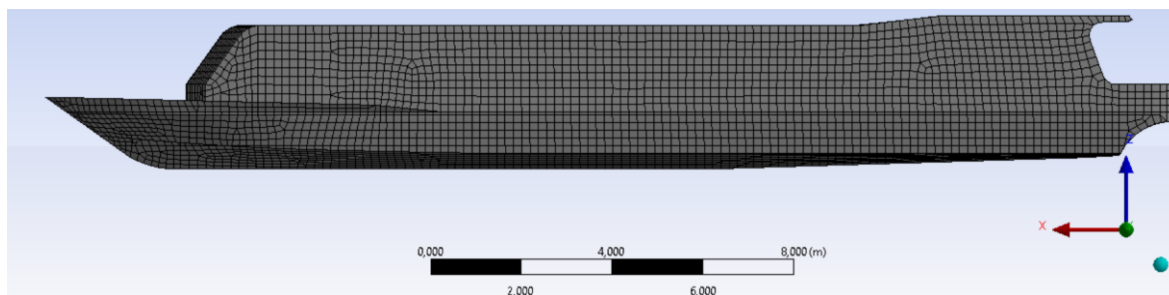


Fonte: Elaboração própria – Ansys Aqwa 2024 R1.

O seguinte passo consistiu em definir a malha da embarcação, como mostrado na Figura 15. Para escolher a malha foi selecionado o valor padrão recomendado pelo software, tentando aproveitar um número adequado de elementos disponível, pois embora seja uma licença acadêmica de pesquisa, o software possui limitação do número de elementos e nós a serem usados. O tamanho do elemento foi de 0,183 m, que permitiu uma frequência máxima de análise de 6,6 rad/s. Foram considerados 10676 nós e 10707 elementos nas análises.

Figura 15. Detalhes da malha da embarcação, definida no software Ansys Aqwa. Calado: 0,5 m.

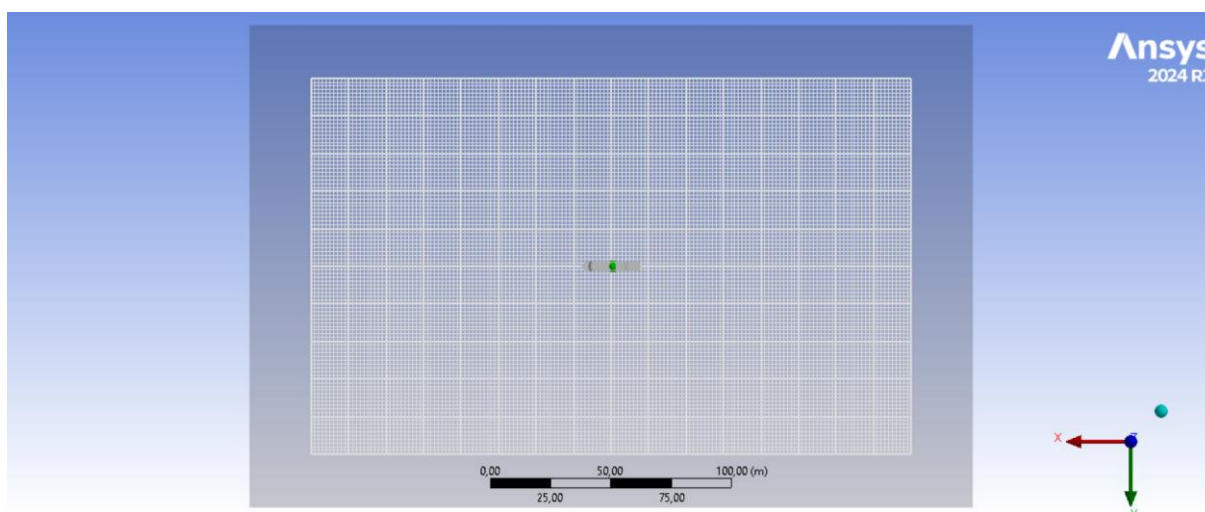




Fonte: Elaboração própria – Ansys Aqwa 2024 R1.

Também foi configurada a resolução da malha com a qual foi calculado o movimento da superfície livre da água (*wave grid resolution*), Figura 16, escolhendo uma malha fina (161 x 101), e fator de tamanho da malha de 10 (definido pelo software).

Figura 16. Configuração da resolução da malha da superfície livre da água para o cálculo das ondas.



Fonte: Elaboração própria – Ansys Aqwa 2024 R1.

Com relação à direção das ondas, apenas foi considerada a incidência das ondas pela proa nas análises (ângulo de incidência de 180°).

O períodos das ondas selecionados para avaliar os movimentos da embarcação foram definidos de maneira manual de 1 segundo até 30 segundos, com intervalos de 1 segundo. Esses períodos mínimo e máximo correspondem a frequências angulares de 6,28 rad/s e 0,21 rad/s, respectivamente.

Foram avaliados os movimentos, no domínio da frequência (operadores de amplitude de resposta), para velocidades de avanço de 0 m/s, 3 m/s e 12 m/s. Cabe mencionar que essa última velocidade é próxima à velocidade de operação típica, que foi previamente medida com a embarcação em operação por Cursino (2024), mas vale ressaltar que corresponde a uma velocidade no regime de semiplaneio. Segundo o manual do software Ansys Aqwa, as análises



no Ansys Hydrodynamic Diffraction podem ser feitas com velocidade de avanço no modo de deslocamento, sugerindo um número de Froude $< 0,3$. Embora o software calcule os resultados para velocidades maiores, é importante considerar a limitação nos resultados obtidos, sendo necessária a validação ou a consideração dos resultados apenas para fins ilustrativos como feito neste trabalho.

Os resultados nesta etapa de análise foram comparados com alguns resultados obtidos no software Maxsurf Motions, seguindo o método da Teoria das Faixas, visando ter um ponto de comparação com outro método.

4.3 Etapa 3: Estudo dos movimentos no domínio do tempo (Hydrodynamic Response)

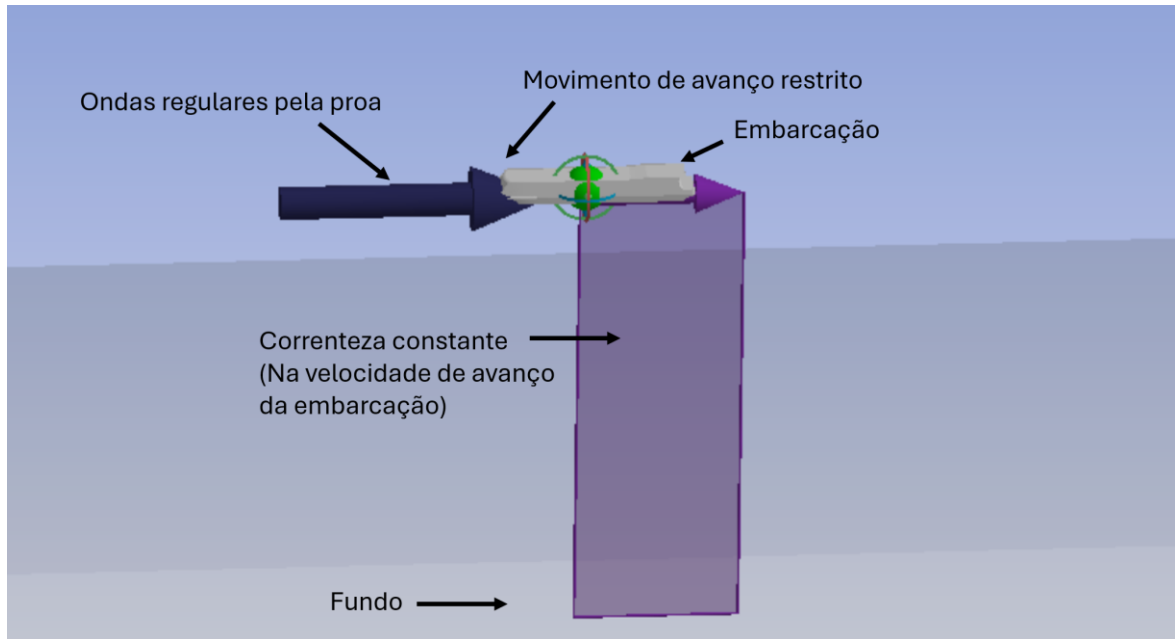
Para realizar as análises no domínio do tempo no módulo Hydrodynamic Response, foi necessário ter implementado as análises no Hydrodynamic Diffraction. Já que a intenção do presente estudo foi simular o movimento da embarcação em ondas regulares, foram configuradas as simulações com duração de 60 segundos, time step de 0,1 segundos, com um número total de 601 steps. A configuração das simulações foi definida como a padrão proporcionada pelo software para análises da resposta no tempo (Time Response Analysis).

Seguindo uma abordagem similar à proposta por Cursino (2024), para simular os efeitos da interação de ondas regulares com uma embarcação avançando em um rio, foi assumida a embarcação restrita no movimento de avanço, mas com uma correnteza constante incidindo pela proa, similar a um experimento em canal hidrodinâmico recirculante, como ilustrado na Figura 17.

Nas análises no domínio do tempo foram simuladas condições de ondas regulares considerando o período de ressonância do movimento de pitch, encontrado na análise do domínio da frequência. Foram avaliadas velocidades de avanço de 0 m/s, 3 m/s e 12 m/s, e os efeitos de amplitudes de onda de 0,25 m, 0,5 m, 0,75 m, e 1,0 m, para a velocidade de 12 m/s. É importante considerar as hipóteses simplificadoras das simulações devido ao método usado no software, pois não são considerados os efeitos viscosos da água (por ser um método potencial), e ao desconsiderar os efeitos de trim da embarcação.



Figura 17. Configuração da simulação dos movimentos da embarcação no domínio do tempo.



Fonte: Elaboração própria no software Ansys Aqwa.



5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

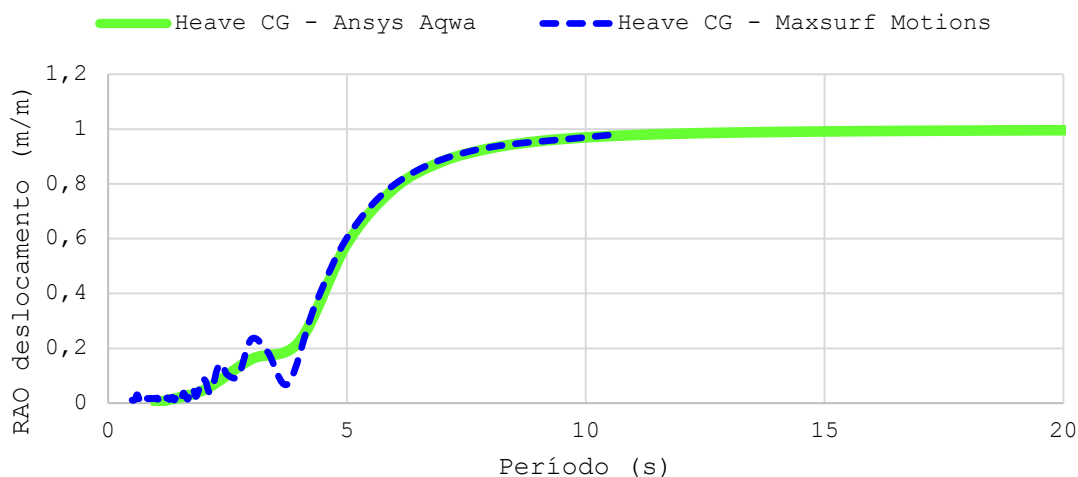
5.1 Resultados da análise no domínio da frequência

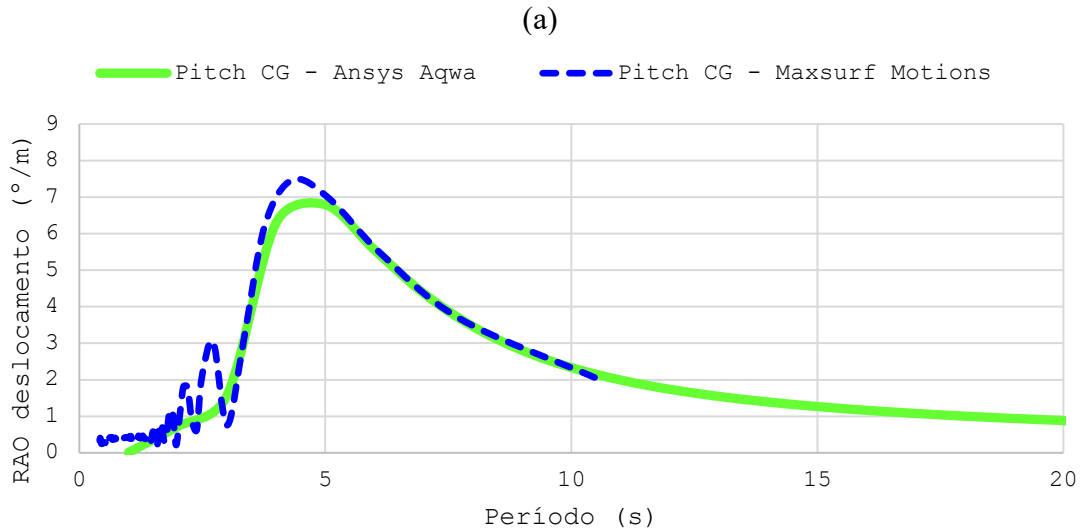
A seguir, são apresentados os resultados do movimento da embarcação. Os resultados são apresentados como operadores de amplitude de resposta, ou seja, os deslocamentos por amplitude unitária de onda com relação aos períodos das ondas. São apresentados os casos para a velocidade nula ($V = 0$), e as velocidades de avanço de $V = 3$ m/s e $V = 12$ m/s, obtidos com o módulo Hydrodynamic Diffraction. Foram avaliados os movimentos de heave e pitch da embarcação. As comparações dos movimentos no centro de gravidade incluem os resultados obtidos no software Maxsurf Motions, com a finalidade de verificar a ordem de grandeza dos resultados obtidos (sugere-se ainda a validação dos presentes resultados com dados experimentais).

5.1.1 Resultados sem velocidade de avanço

A Figura 18 mostra as comparações de operadores de amplitude de resposta para o caso sem velocidade de avanço, considerando os movimentos de heave (Figura 18a) e pitch (Figura 18b). Pode-se verificar que os resultados obtidos com o Maxsurf Motions ficaram bastante próximos dos obtidos com o Ansys Aqwa. Os máximos deslocamentos obtidos no Ansys Aqwa aconteceram com ondas regulares de entre 4 e 5 segundos.

Figura 18. Comparações de operadores de amplitude de resposta (RAOs) dos movimentos do centro de gravidade (CG), considerando resultados obtidos no software Ansys Aqwa Hydrodynamic Diffraction e Maxsurf Motions, para uma velocidade de avanço nula ($V = 0$). (a) Movimento de heave. (b) Movimento de pitch.

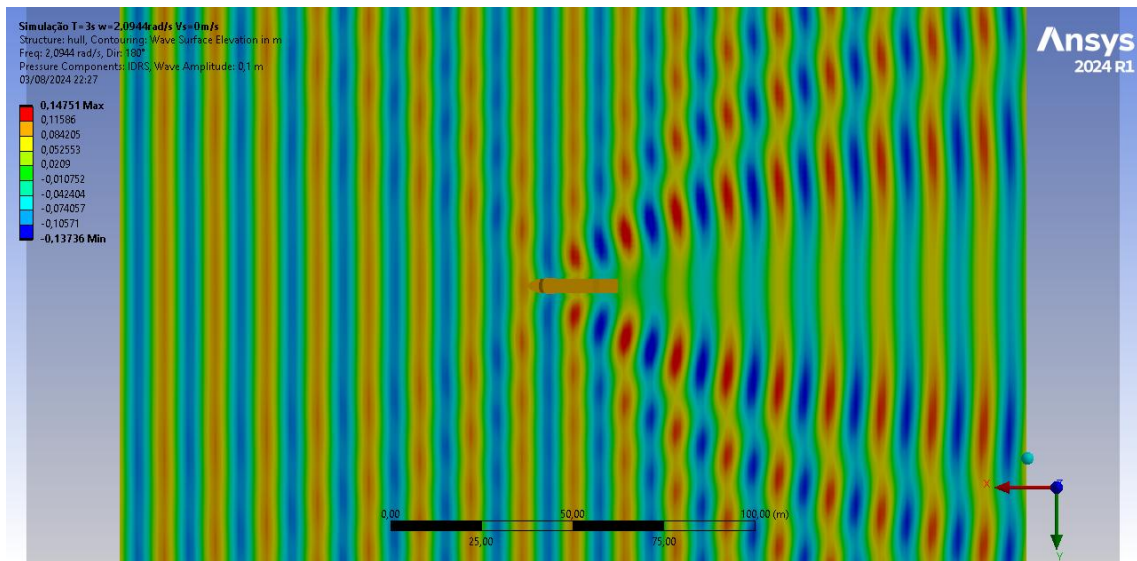




(b)
Fonte: Elaboração própria.

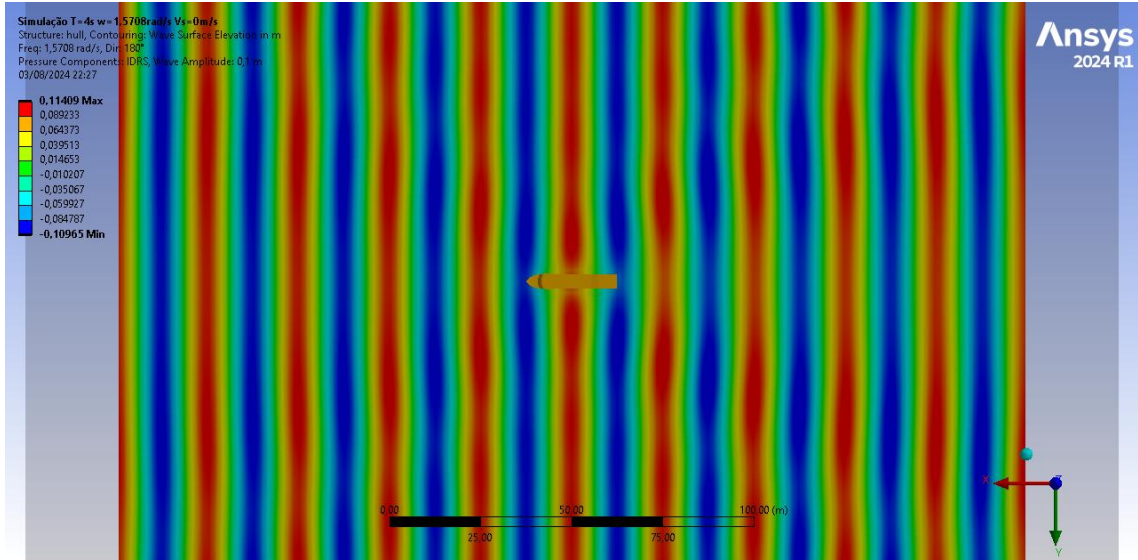
A Figura 19 mostra algumas imagens de como seria a interação das ondas regulares com diferente período (duração) incidindo pela proa da embarcação. As imagens mostram os contornos de elevação da superfície livre com a estrutura sem velocidade de avanço, para diferentes períodos de onda: $T = 3$ s (Figura 19a), $T = 4$ s (Figura 19b), $T = 5$ s (Figura 19c), e $T = 10$ s (Figura 19d). Verifica-se como as ondas difratam da estrutura e como é o comprimento das ondas com relação à embarcação para diferentes períodos. Nas ondas mais longas (maiores períodos) a difração é menor pois a embarcação tende a se deslocar com a amplitude das ondas.

Figura 19. Visualização dos contornos de elevação das ondas incidentes, considerando uma amplitude de 0,1 m, para diferentes períodos (T), para o caso sem velocidade de avanço ($V = 0$). Informações obtidas no módulo Hydrodynamic Diffraction. (a) $T = 3$ s. (b) $T = 4$ s. (c) $T = 5$ s. (d) $T = 10$ s.

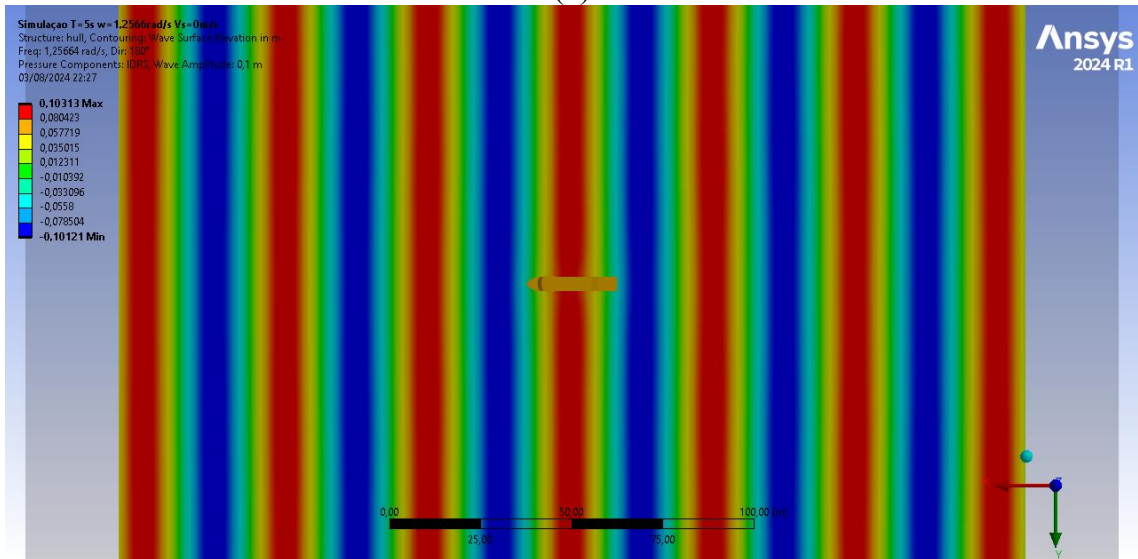


(a)

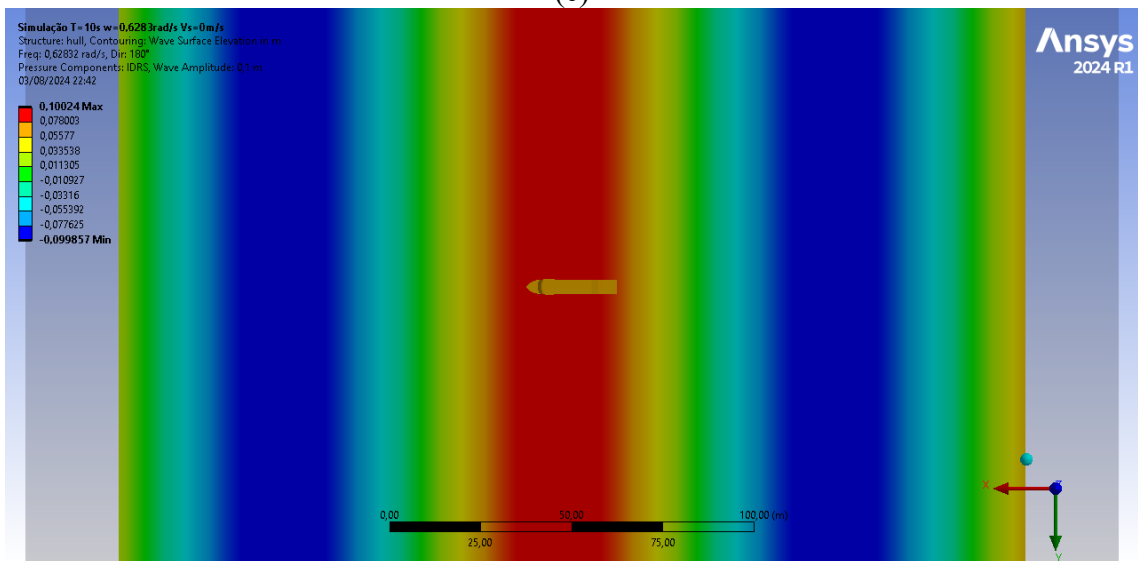




(b)



(c)



(d)

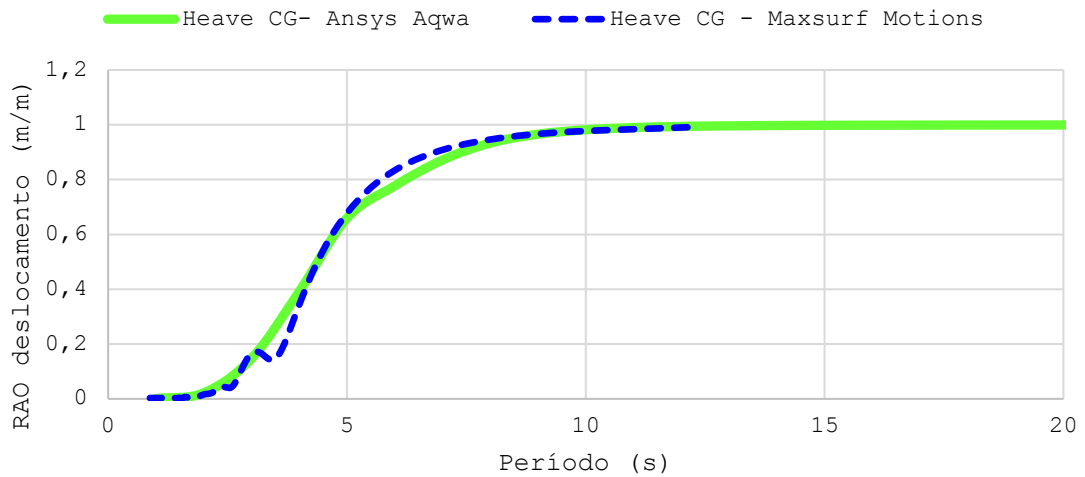
Fonte: Elaboração própria no software Ansys Aqwa 2024 R1.



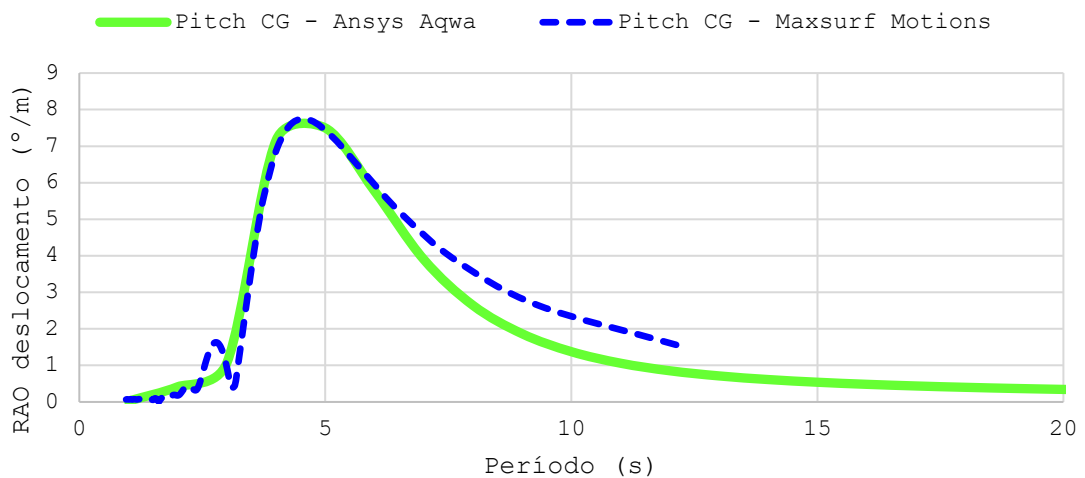
5.1.2 Resultados com velocidade de avanço de 3m/s

De maneira similar à subseção anterior, aqui são apresentados os resultados dos operadores de amplitude de resposta para o caso da embarcação se movimentando com velocidade de avanço de 3 m/s em ondas pela proa. Neste caso, o Número de Froude corresponde a 0,19. As Figuras 20a e 20b mostram as comparações dos movimentos de heave e pitch, respectivamente. Nesse caso, verifica-se uma concordância dos resultados de heave para o CG com os resultados obtidos no Maxsurf Motions. No caso do pitch, observa-se que depois de $T = 6$ s, os resultados do Ansys começam divergir um pouco com os do Maxsurf.

Figura 20. Comparações de operadores de amplitude de resposta dos movimentos do centro de gravidade (CG), considerando resultados obtidos no software Ansys Aqwa Hydrodynamic Diffraction e Maxsurf Motions, para uma velocidade de avanço $V = 3$ m/s. (a) Movimento de heave. (b) Movimento de pitch.



(a)



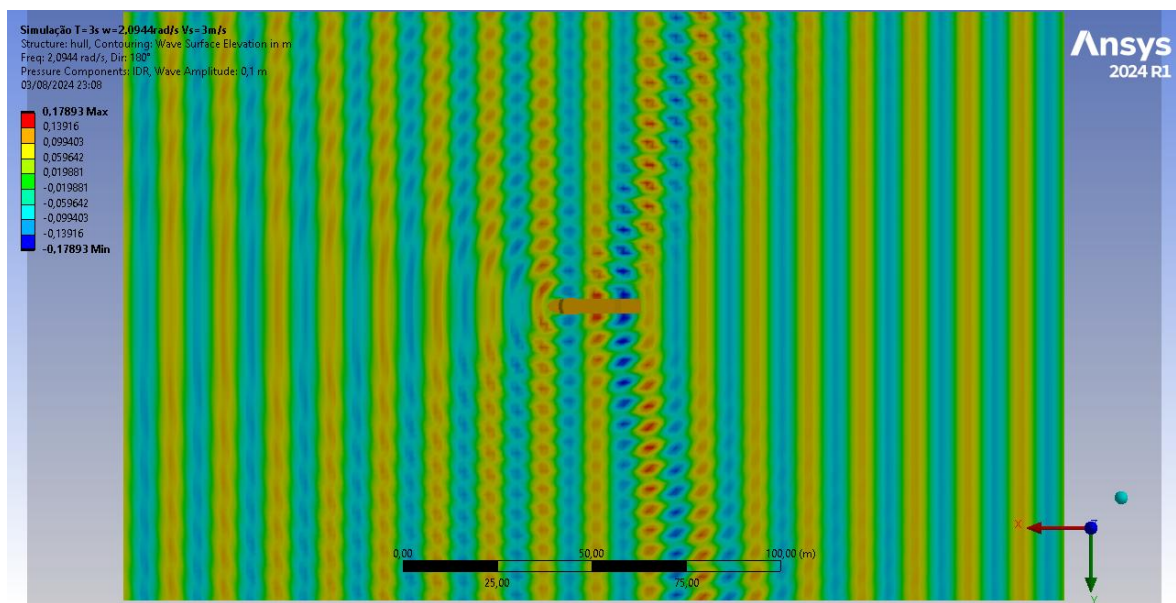
(b)

Fonte: Elaboração própria.

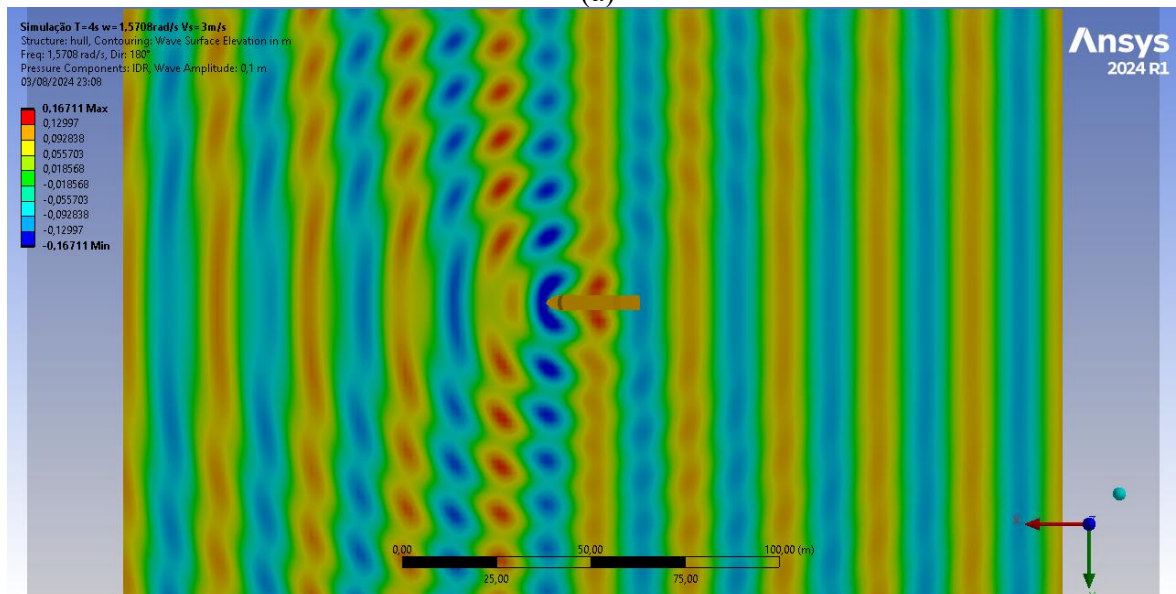


A Figura 21 mostra os contornos de elevação da superfície livre das ondas incidindo com a embarcação se deslocando em uma velocidade de avanço de 3 m/s. Pode se observar o comprimento da embarcação com relação ao das ondas bem como algumas perturbações na superfície livre devido aos efeitos de difração. As Figuras 21a, 21b, 21c, e 21d mostram os resultados para $T = 3, 4, 5$ e 10 segundos. No caso de $T = 10$ s, a onda ainda é suficientemente longa para se deslocar junto à embarcação.

Figura 21. Visualização dos contornos de elevação das ondas incidentes, considerando uma amplitude de 0,1 m, para diferentes períodos (T), para o caso com velocidade de avanço ($V = 3$ m/s). Informações obtidas no módulo Hydrodynamic Diffraction. (a) $T = 3$ s. (b) $T = 4$ s. (c) $T = 5$ s. (d) $T = 10$ s.

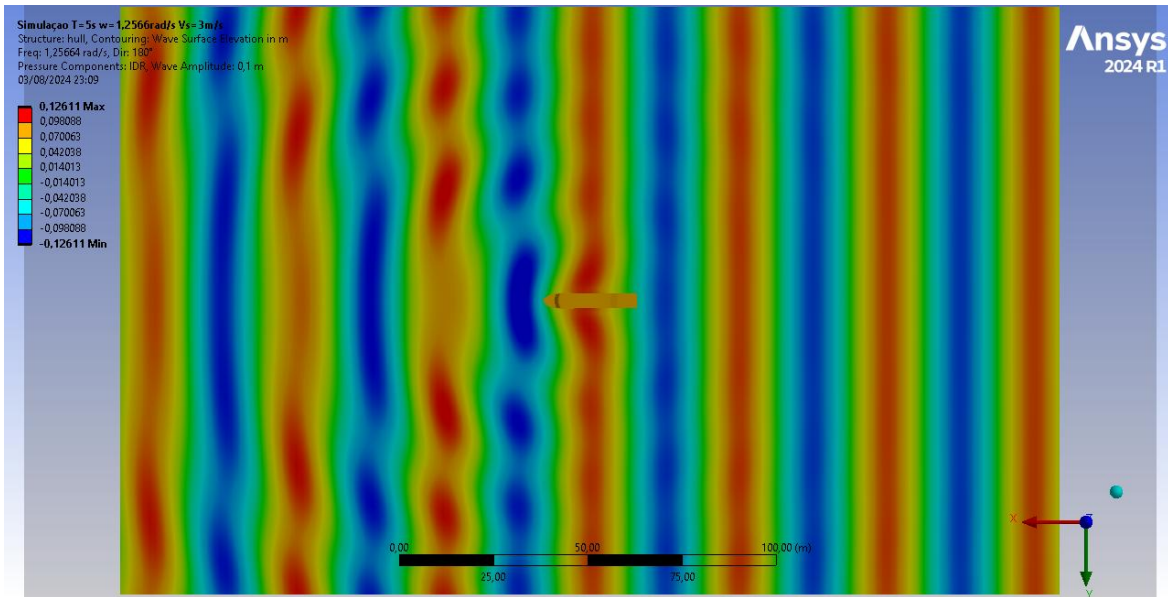


(a)

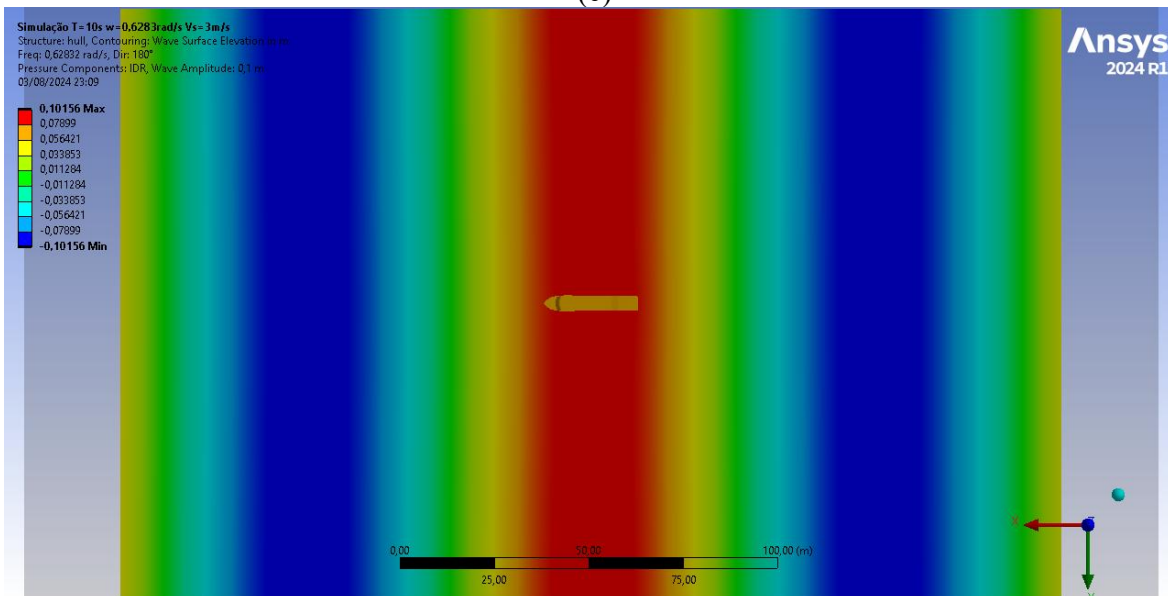


(b)





(c)



(d)

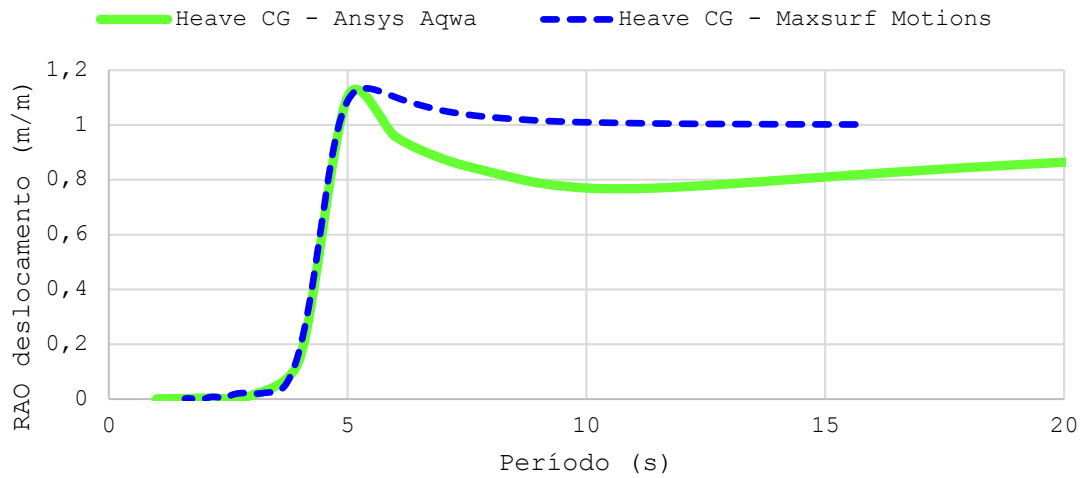
Fonte: Elaboração própria no software Ansys Aqwa 2024 R1.

5.1.3 Resultados com velocidade de avanço de 12 m/s

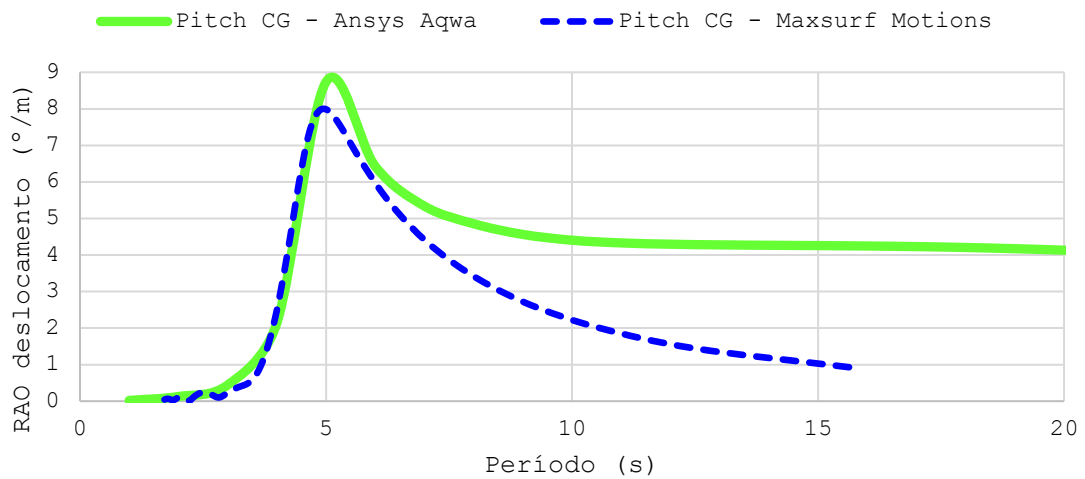
A Figura 22 mostra os resultados obtidos para uma velocidade de avanço de 12 m/s. Para o movimento do heave (Figura 22a), os resultados obtidos com Maxsurf Motions começam divergir com os obtidos com o Ansys depois do período de ressonância ($T = 5$ s). Para o pitch (Figura 22b), de maneira similar para o caso de $V = 3$ m/s, os resultados do Maxsurf Motions começam a divergir para períodos aproximadamente maiores do que 6 segundos; porém, os resultados ficam bastantes próximos para a condição de ressonância.



Figura 22. Comparações de operadores de amplitude de resposta dos movimentos do centro de gravidade (CG), considerando resultados obtidos no software Ansys Aqwa Hydrodynamic Diffraction e Maxsurf Motions, para uma velocidade de avanço $V = 12$ m/s. (a) Movimento de heave. (b) Movimento de pitch.



(a)



(b)

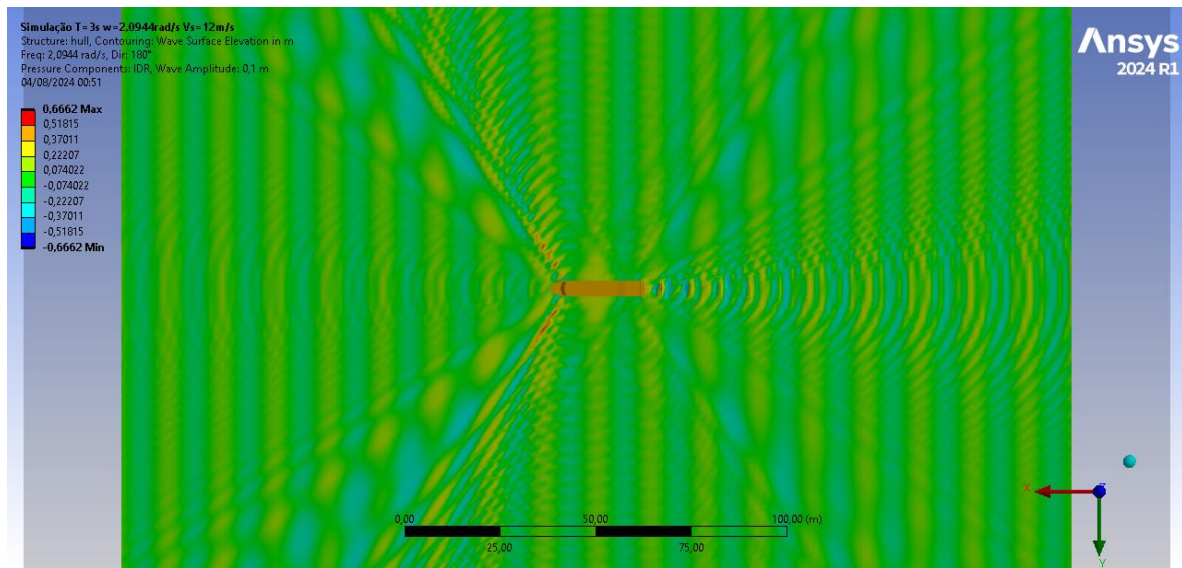
Fonte: Elaboração própria.

As Figuras 23a – 23d mostram os contornos de elevação das ondas incidindo pela proa, considerando a embarcação em movimento ($V = 12$ m/s), para $T = 3, 4, 5$ e 10 s, respectivamente. Neste caso, podem ser notados alguns padrões de elevação provavelmente com pouca relação com a física esperada. Vale lembrar que o software ANSYS Aqwa Hydrodynamic Diffraction recomenda avaliar corpos em movimento com velocidades de avanço no regime de deslocamento, com números de Froude inferiores a $0,3$, que não aplica para a presente velocidade (Número de Froude = $0,76$). Embora os operadores de amplitude de resposta mostraram valores próximos quando comparados com os obtidos com outro software, até o período de ressonância, a representação dos efeitos de difração das ondas pode não

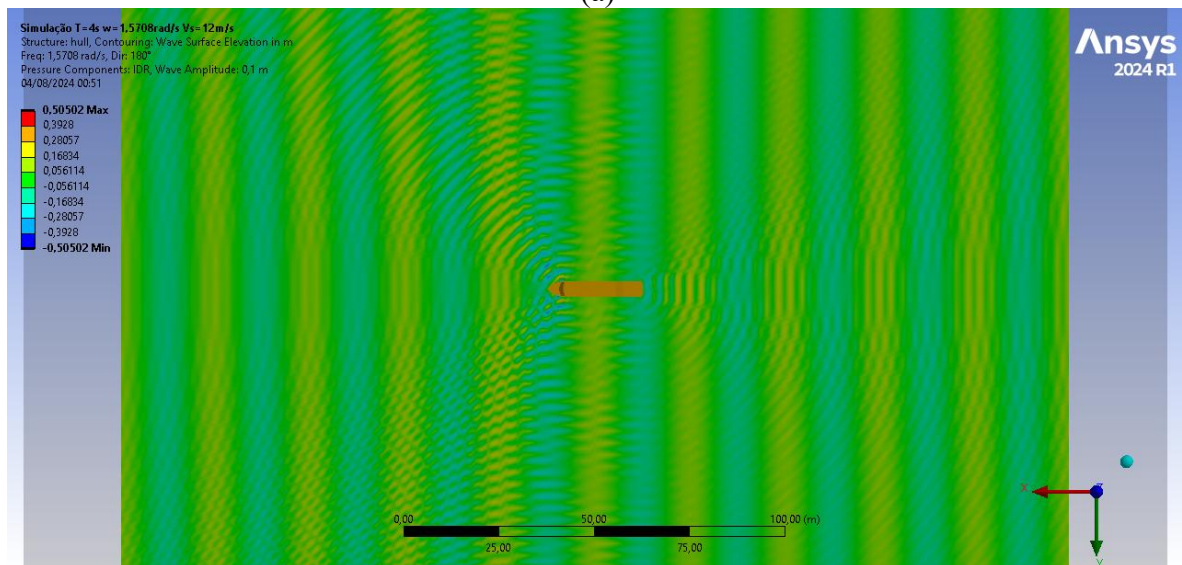


representar a física real do problema. Então, os resultados obtidos no Hydrodynamic Diffraction para $V = 12$ m/s devem ser considerados apenas como dados ilustrativos do que pode proporcionar o software para esta faixa de velocidade, sendo necessária a sua verificação com outras abordagens numéricas e/ou experimentais.

Figura 23. Visualização dos contornos de elevação das ondas incidentes, considerando uma amplitude de 0,1 m, para diferentes períodos (T), para o caso com velocidade de avanço ($V = 12$ m/s). Informações obtidas no módulo Hydrodynamic Diffraction. (a) $T = 3$ s. (b) $T = 4$ s. (c) $T = 5$ s. (d) $T = 10$ s.

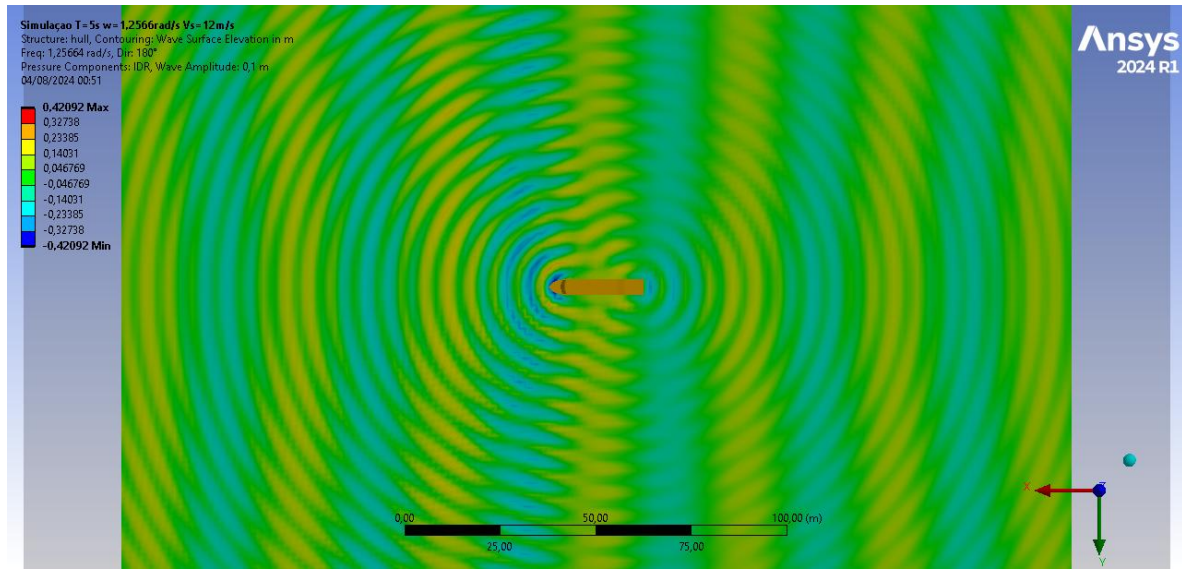


(a)

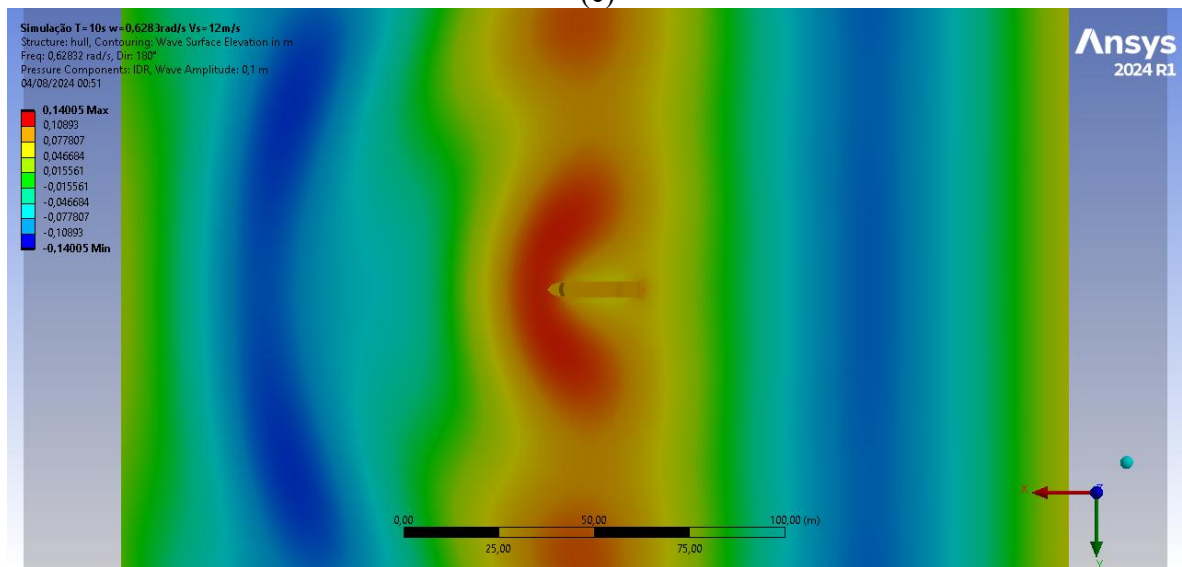


(b)





(c)



(d)

Fonte: Ansys Aqwa 2024 R1.

5.2 Resultados da análise no domínio do tempo

Os resultados seguintes mostram as comparações dos movimentos da embarcação obtidos no domínio do tempo, utilizando o software Hydrodynamic Response do Ansys Aqwa. Especificamente, foi considerada uma série de ondas regulares com período (duração) de 5 segundos, que corresponde ao período que causou os maiores deslocamentos de pitch nos operadores de amplitude de resposta mostrados na seção anterior. O ângulo de incidência das ondas com a embarcação é de 180° , a frequência angular das ondas é de $1,256 \text{ rad/s}$, e considerando a teoria linear de ondas em água profundas, o comprimento das ondas é de $30,02 \text{ m}$ (valores calculados pelo software).



Para fins demonstrativos na análise da presente seção, foi considerada uma amplitude de onda regular de 0,25 m para realizar as simulações no domínio do tempo. Foram testados 3 casos com a interação da onda e mantendo o movimento de avanço (surge) como restrito:

- i) considerando a embarcação sem velocidade de avanço ($V = 0$ m/s; $F_n = 0$);
- ii) considerando uma velocidade de avanço no regime de deslocamento ($V = 3$ m/s; $F_n = 0,19$); e
- iii) considerando uma velocidade no semi-deslocamento ($V = 12$ m/s; $F_n = 0,76$).

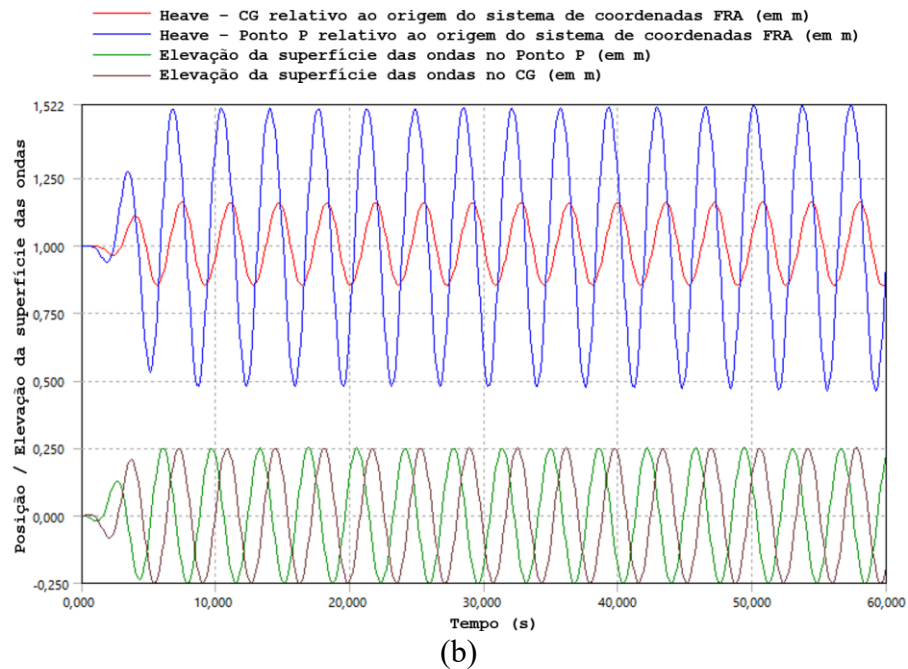
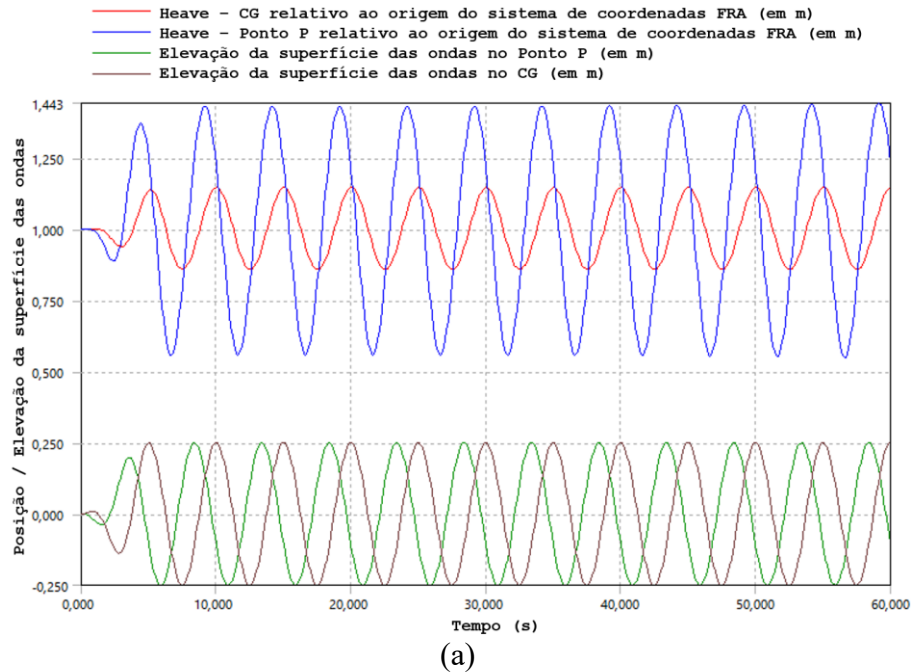
Cabe mencionar que, no Hydrodynamic Response, foi assumido o efeito da velocidade de avanço da embarcação como o efeito causado por uma correnteza de na mesma velocidade, de maneira constante, incidindo pela proa e mantendo o movimento de avanço restrito, como feito em Cursino (2024).

5.2.1 Efeitos da velocidade do avanço dos deslocamentos e acelerações da embarcação

As Figuras 24a, 24b e 24c mostram a influência das velocidades de avanço nas comparações dos deslocamentos de heave, para as velocidades de avanço $V = 0$, 3 e 12 m/s, respectivamente. Em cada gráfico são comparados os movimentos do centro de gravidade e do ponto P definido na proa da embarcação. São incluídas, também, as elevações dos trens de ondas regulares agindo na localização do centro de gravidade e o ponto P na proa, para fins demonstrativos da fase das ondas com relação aos movimentos. Enquanto a velocidade aumenta, o período de encontro se reduz, devido à que a embarcação encontra mais rápido as cristas das ondas. Os movimentos de heave no ponto P são mais significantes do que no CG, sendo bem similares em amplitude para $V = 0$ e 12 m/s.

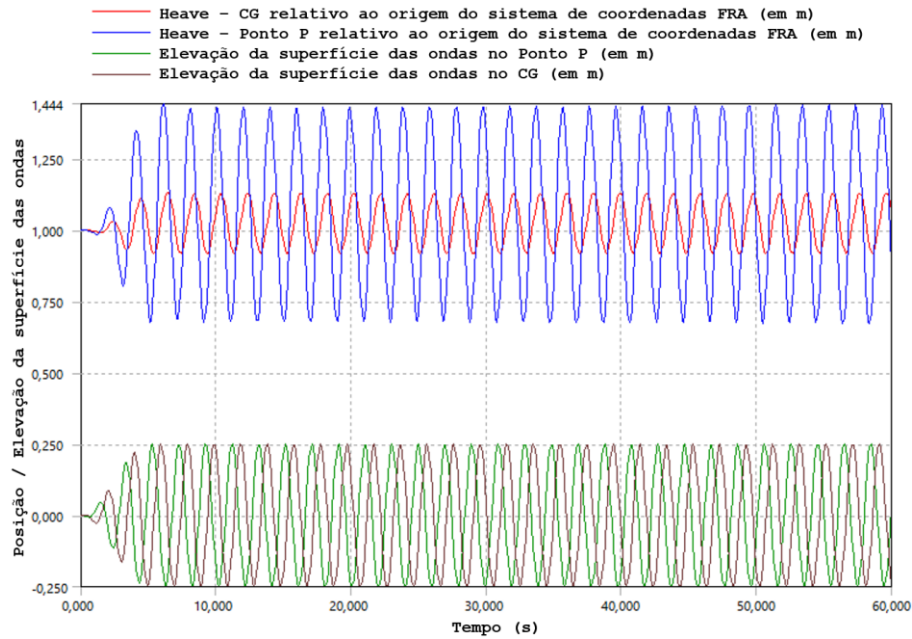


Figura 24. Efeito da velocidade de avanço nos deslocamentos de heave do centro de gravidade (CG) e do ponto P na proa. (a) $V = 0$ m/s. (b) $V = 3$ m/s. (c) $V = 12$ m/s



(a figura continua na página seguinte)



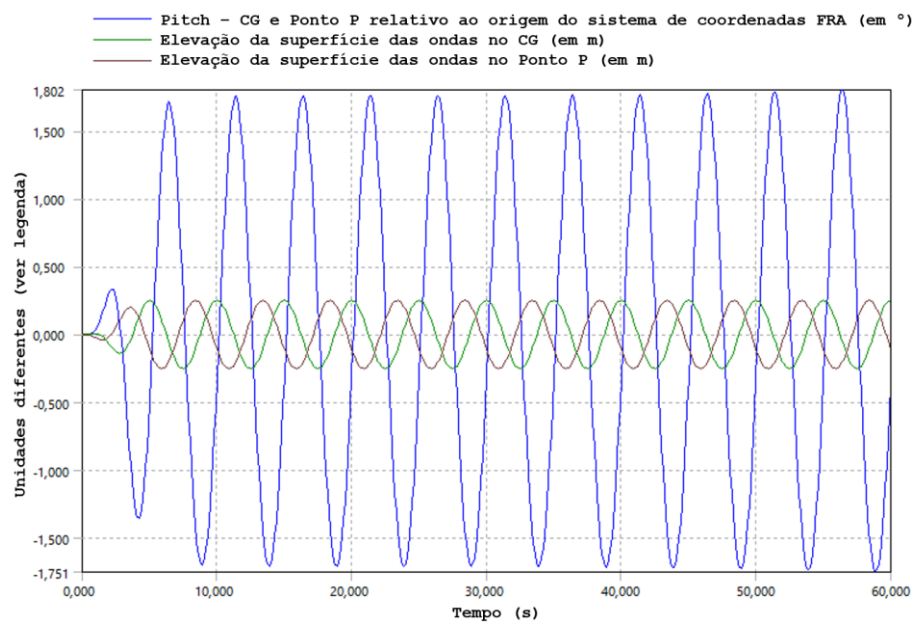


(c)

Fonte: Ansys Aqwa 2024 R1.

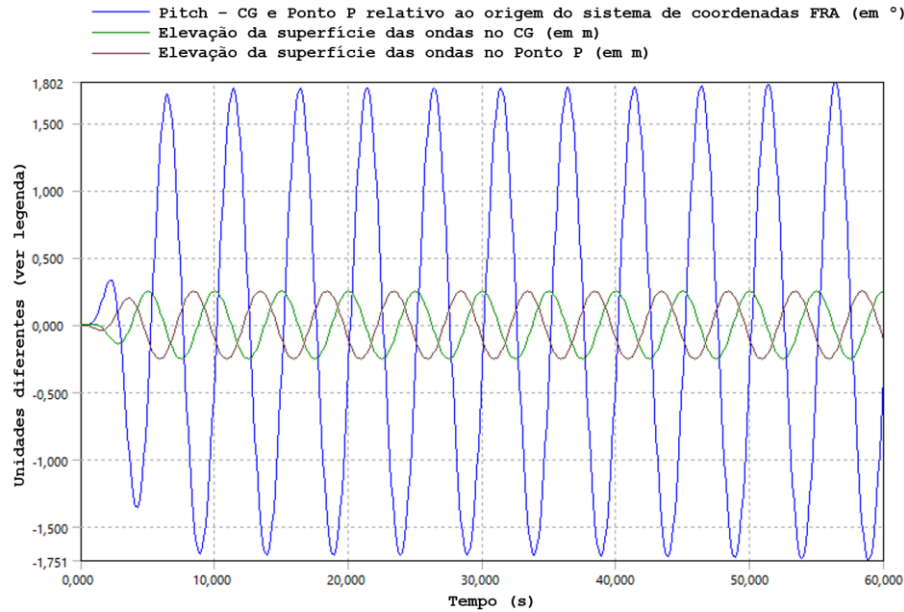
De maneira similar à figura anterior, a Figura 25 mostra as comparações das séries temporais dos resultados, mas para o movimento angular de pitch. As Figuras 25a, 25b e 25c mostram as comparações dos resultados obtidos para velocidades de 0, 3 e 12 m/s, respectivamente. Nesse caso, os deslocamentos angulares de pitch do CG e do ponto P são iguais. Os maiores deslocamentos angulares são encontrados para $V = 3$ m/s.

Figura 25. Efeito da velocidade de avanço nos deslocamentos de pitch do centro de gravidade (CG) e do ponto P na proa. (a) $V = 0$ m/s. (b) $V = 3$ m/s. (c) $V = 12$ m/s.

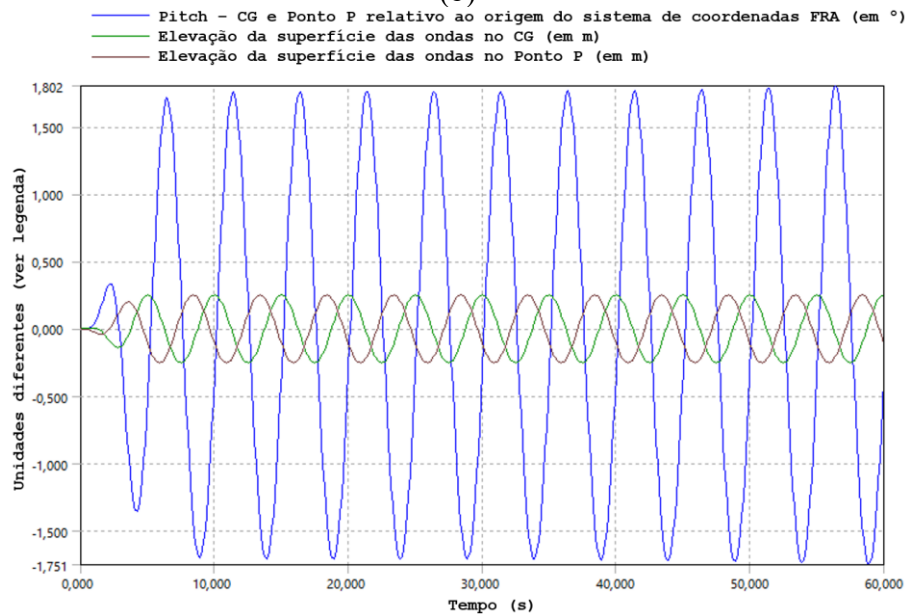


(a)





(b)



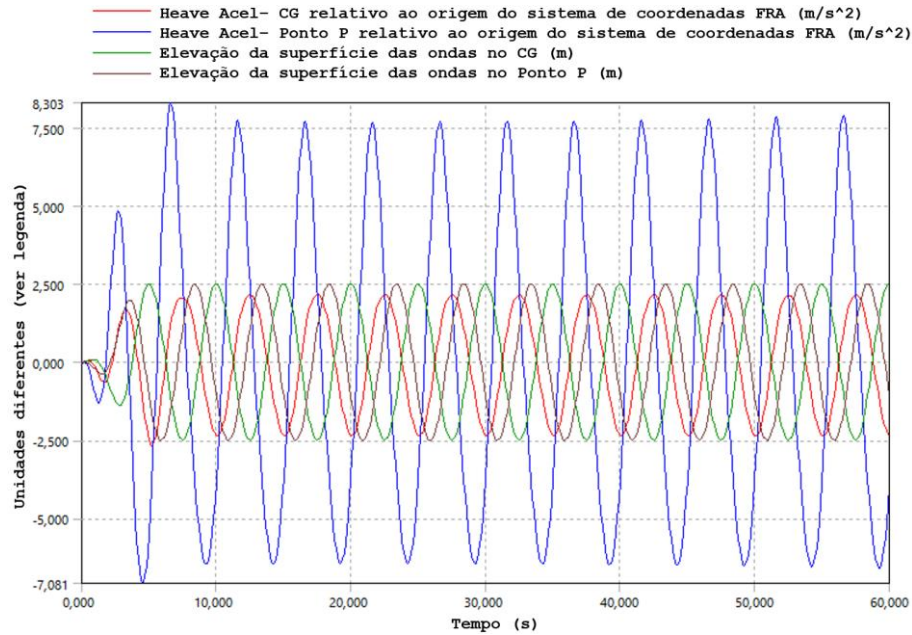
(c)

Fonte: Ansys Aqwa 2024 R1.

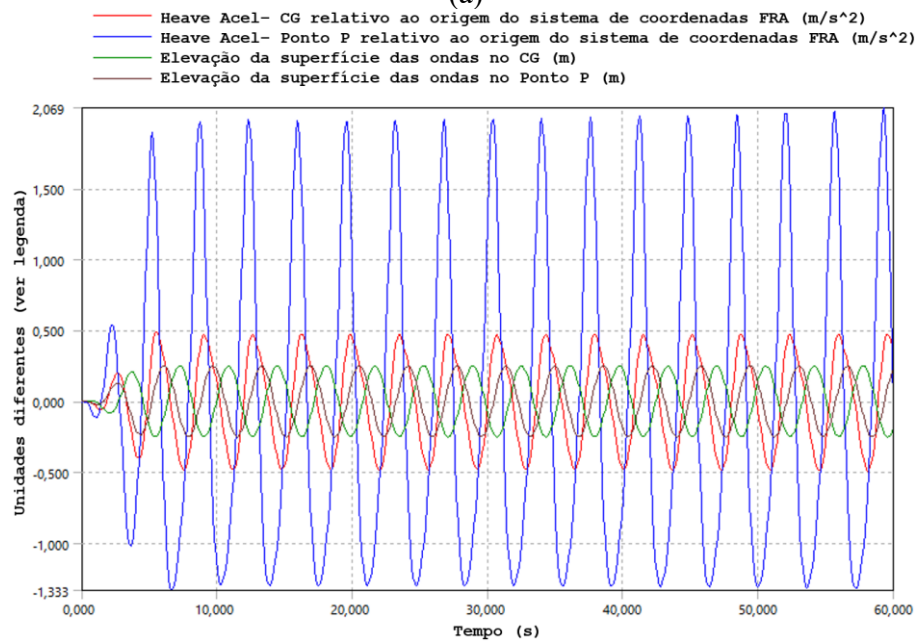
A seguir, são mostradas as comparações das séries temporais da aceleração da embarcação para os movimentos de heave (Figuras 26a – 26c) e pitch (Figuras 26a – 26c). As subfiguras (a), (b) e (c) mostram os resultados para velocidades de 0, 3 e 12 m/s. Com relação ao movimento de heave, verifica-se que as amplitudes das acelerações são maiores no ponto P do que no centro de gravidade, sendo maiores para $V = 0$. Nota-se, também, que o período de encontro tende a reduzir enquanto a velocidade de avanço também aumenta.



Figura 26. Efeito da velocidade de avanço nas acelerações de heave do centro de gravidade (CG) e do ponto P na proa. (a) $V = 0$ m/s. (b) $V = 3$ m/s. (c) $V = 12$ m/s



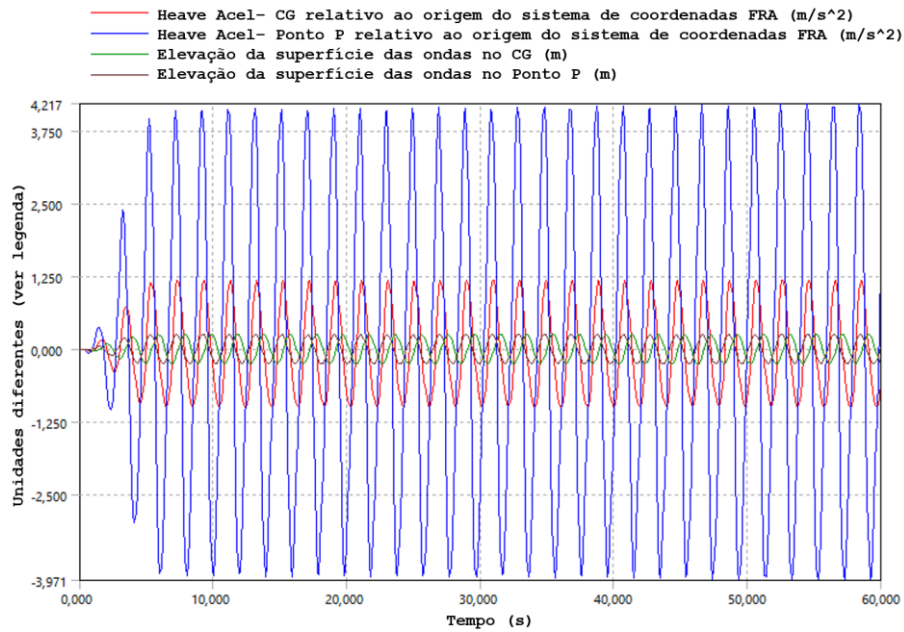
(a)



(b)

(a figura continua na página seguinte)



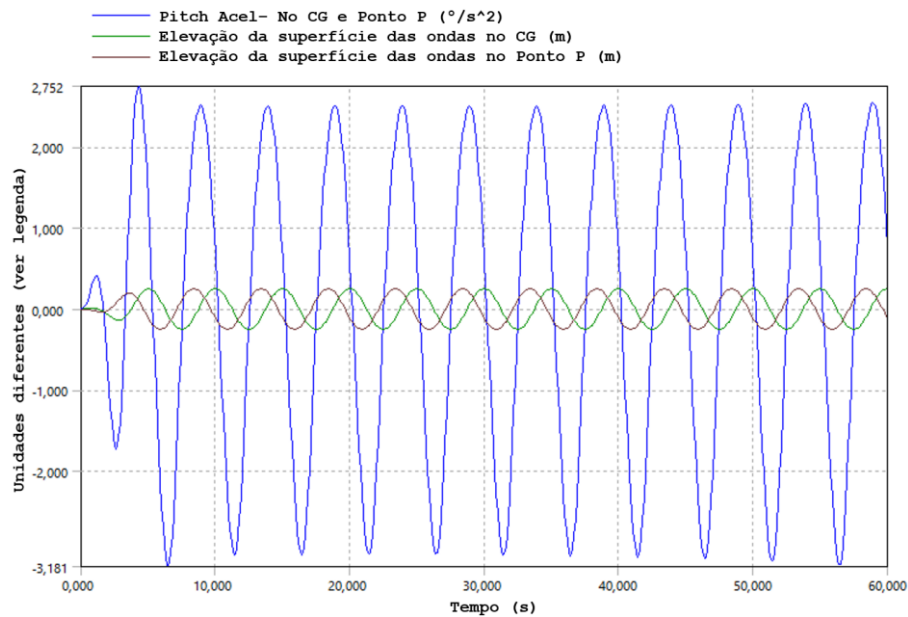


(c)

Fonte: Ansys Aqwa 2024 R1.

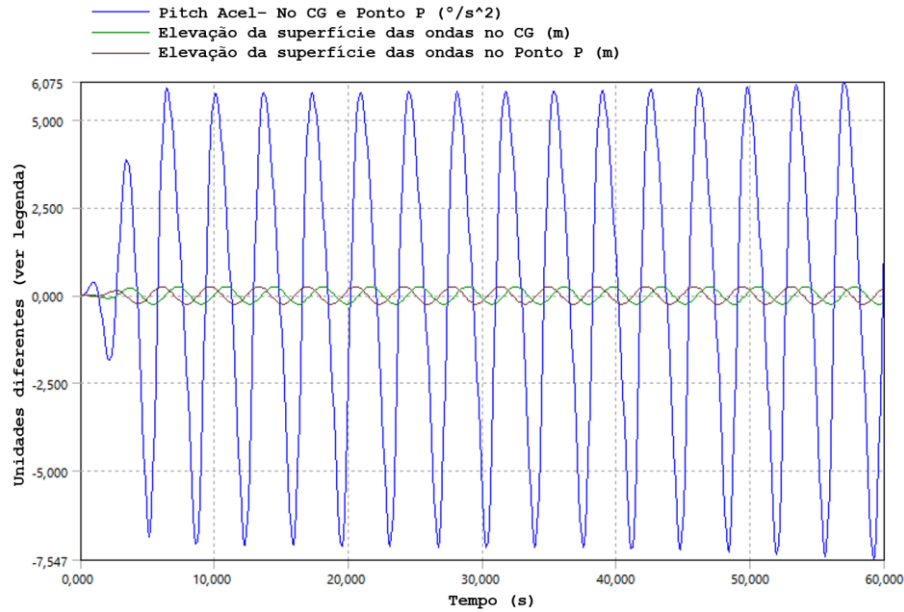
Com relação às acelerações de pitch (Figuras 27a – 27c), as acelerações angulares são iguais no centro de gravidade do que na proa. As acelerações tendem a aumentar enquanto a velocidade de avanço também aumenta. Para $V = 12$ m/s, a aceleração angular de pitch aumentou quase cinco vezes com relação a $V = 0$.

Figura 27. Efeito da velocidade de avanço nas acelerações de pitch do centro de gravidade (CG) e do ponto P na proa. (a) $V = 0$ m/s. (b) $V = 3$ m/s. (c) $V = 12$ m/s

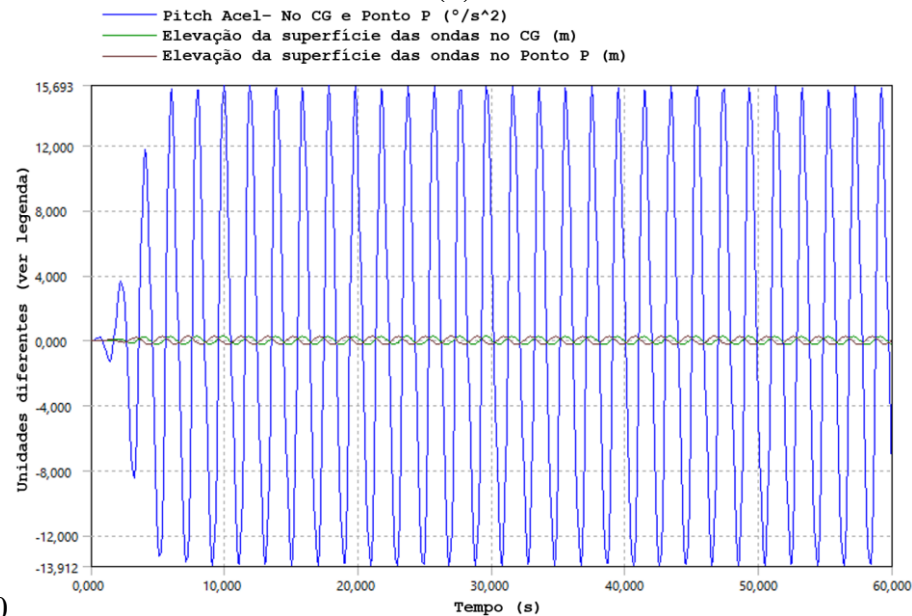


(a)





(b)



(c)

Fonte: Ansys Aqwa 2024 R1.

5.2.2 Efeitos da amplitude da onda no movimento da embarcação

As figuras seguintes mostram os resultados das simulações realizadas para avaliar os efeitos da amplitude das ondas nos movimentos que pode apresentar a embarcação. Foi considerada uma situação crítica, considerando a embarcação numa velocidade de avanço próxima à sua velocidade de operação (12 m/s) e interagindo com ondas regulares incidindo pela proa. As ondas têm um período de 5 s, que corresponde ao período em que os movimentos de pitch demonstraram as maiores amplificações na análise no domínio da frequência. Devido

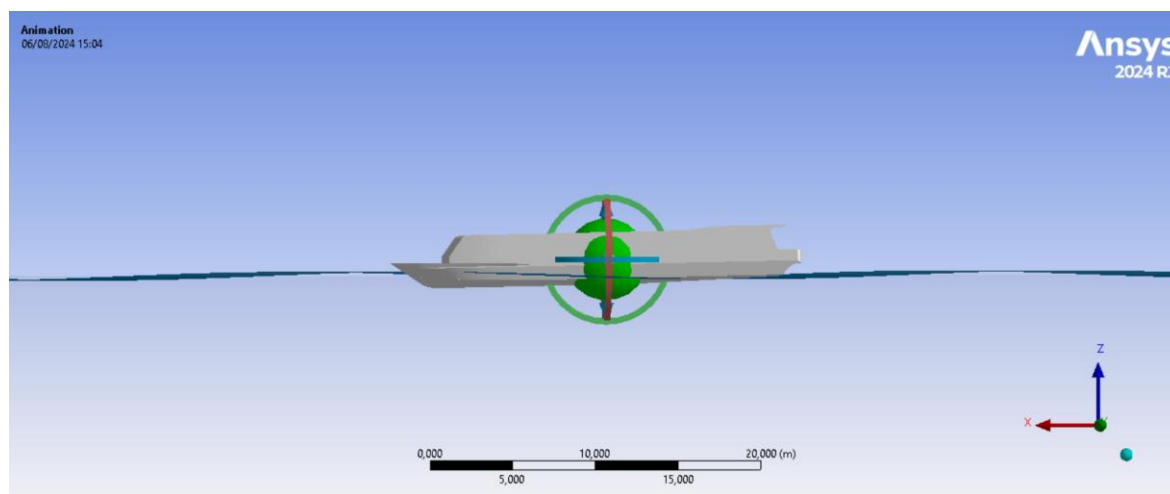


a que na região amazônica não ocorrem ondas com amplitudes muito grandes, foram testadas amplitudes de onda menores do que 1 m. Cada simulação teve duração de 60 segundos, seguindo a configuração descrita na metodologia.

As Figuras 28, 29, 30 e 31 mostram algumas figuras representativas do comportamento usual em cada simulação, considerando as amplitudes de onda de 0,25, 0,50, 0,75 e 1,0 m, respectivamente, e incluindo descrições qualitativas do que foi observado nas simulações.

Na simulação com amplitude de onda de 0,25 m (Figura 28), foi observado um comportamento estável, com subidas e descidas da proa com considerável amplitude, como esperado devido ao período de onda considerado. Foram observados movimentos periódicos, com pouca excitação do movimento de balanço, com o casco quase sempre submerso na água. Não houve ocorrência de impacto do casco com a água (slamming), embarque de água no convés, nem instabilidade do movimento de balanço.

Figura 28. Simulação com amplitude de onda de 0,25 m, direção 180°, $T = 5$ s, $\omega = 1,2566$ rad/s, e comprimento de onda (λ) = 39,02 m, considerando uma velocidade de avanço $V = 12$ m/s. Imagem obtida no tempo $t = 29$ s da simulação.



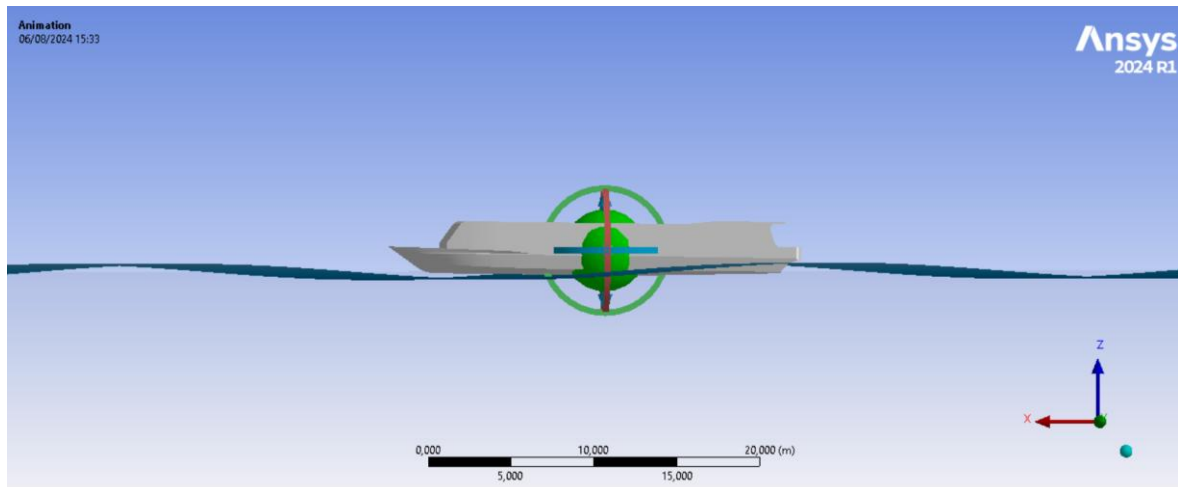
$t = 29$ s.

Fonte: Ansys Aqwa 2024 R1.

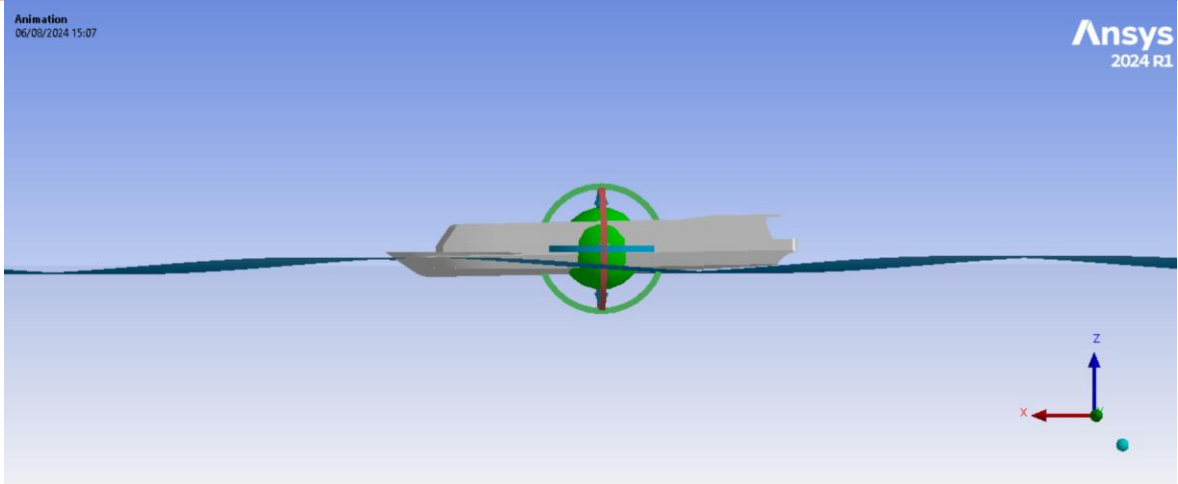
A Figura 29 mostra alguns cenários interessantes durante a simulação com amplitude de onda de 0,5 m. Houve movimentos periódicos com pouca excitação do movimento de balanço e pouco risco de slamming significativo pois a proa apenas saiu parcialmente da superfície da água. Não houve visualização de embarque de água no convés nem instabilidade do movimento de balanço durante a simulação.



Figura 29. Simulação com amplitude de onda de 0,5 m, direção 180°, $T = 5$ s, $\omega = 1,2566$ rad/s, e comprimento de onda (λ) = 39,02 m, considerando uma velocidade de avanço $V = 12$ m/s. Imagens obtidas nos tempos $t = 28,10$ s e $t = 29$ s e da simulação.



t = 28,10 s – Aparente possibilidade de ocorrência de slamming.



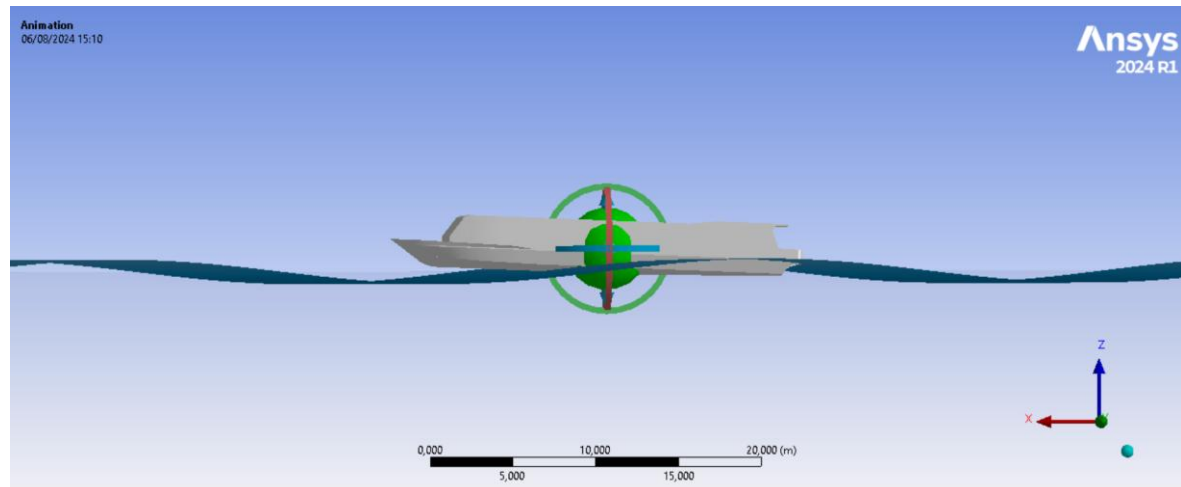
t = 29 s – Aparente possibilidade de embarque de água.

Fonte: Ansys Aqwa 2024 R1.

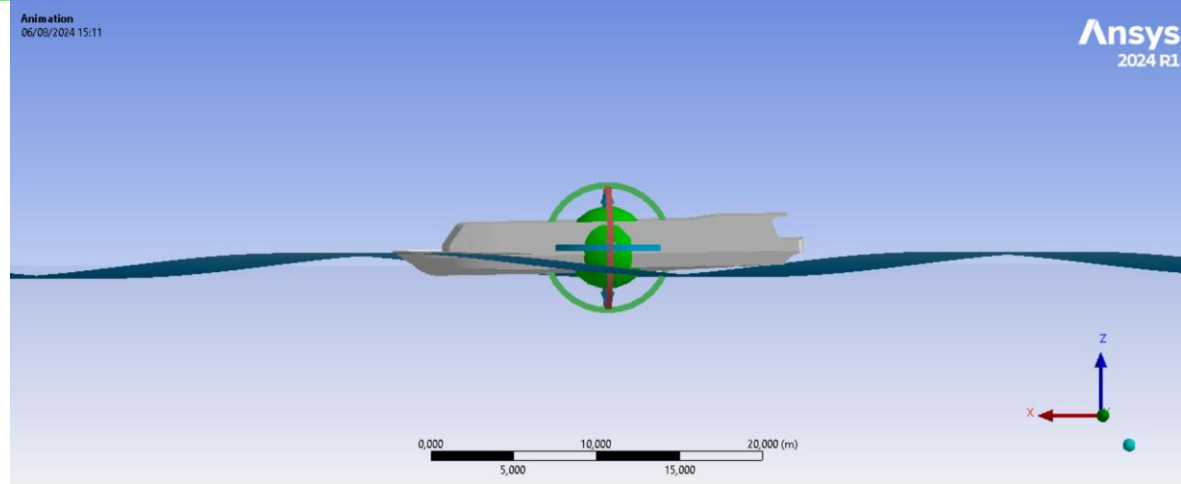
A Figura 30 mostra alguns eventos relevantes na simulação feita com ondas regulares de amplitude 0,75 m. Foram observados movimentos periódicos com pouca excitação do movimento de balanço, assim como um significativo risco de o casco impactar com a superfície da água (slamming), pois a proa saiu consideravelmente da água ($t = 20$ s). Foi verificado, também, o risco de iniciar embarque de água pelo convés de proa ($t = 30,8$ s).



Figura 30. Simulação com amplitude de onda de 0,75 m, direção 180°, $T = 5$ s, $\omega = 1,2566$ rad/s, e comprimento de onda (λ) = 39,02 m, considerando uma velocidade de avanço $V = 12$ m/s. Imagens obtidas nos tempos $t = 20$ s e $t = 30,8$ s e da simulação.



t = 20 s – Possível ocorrência de slamming.



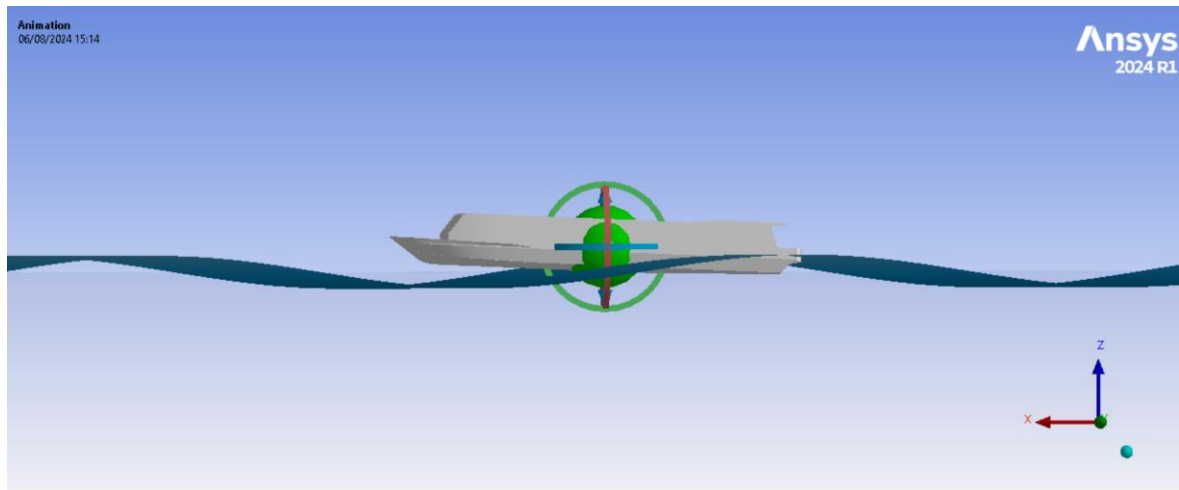
t = 30,8 s – Possível ocorrência de embarque de água no convés.

Fonte: Ansys Aqwa 2024 R1.

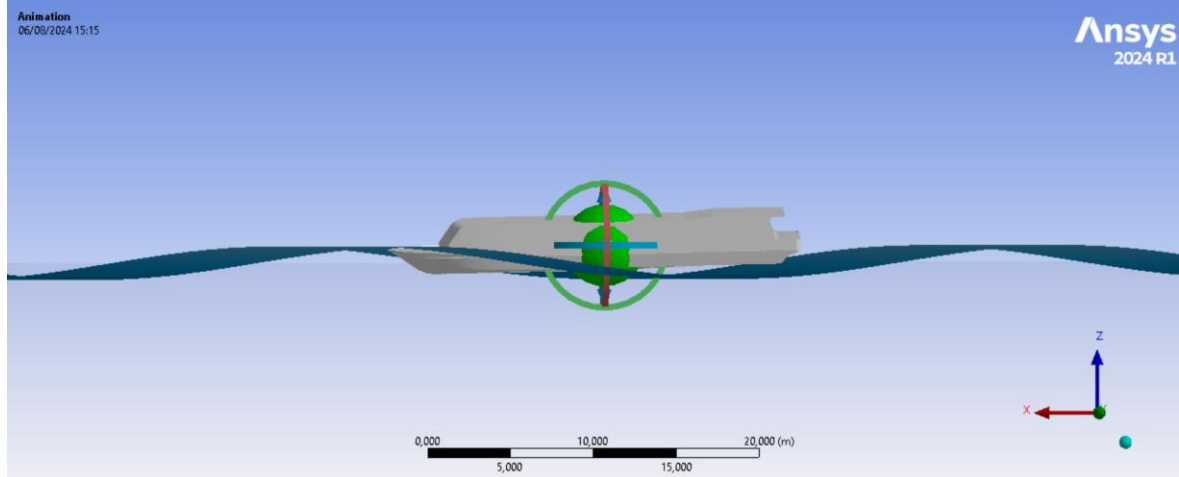
Finalmente, a Figura 31 mostra estágios importantes durante a simulação feita com amplitude de onda de 1 m. Nesta condição, os movimentos da embarcação foram amplificados consideravelmente, havendo uma significativa excitação do movimento de balanço. Também foi percebido um risco iminente de slamming pois a proa saiu consideravelmente da água. O embarque de água foi verificado várias vezes acontecendo pelo convés à proa. Nesta simulação foram verificadas instabilidades transversais e possibilidade de emborcamento.



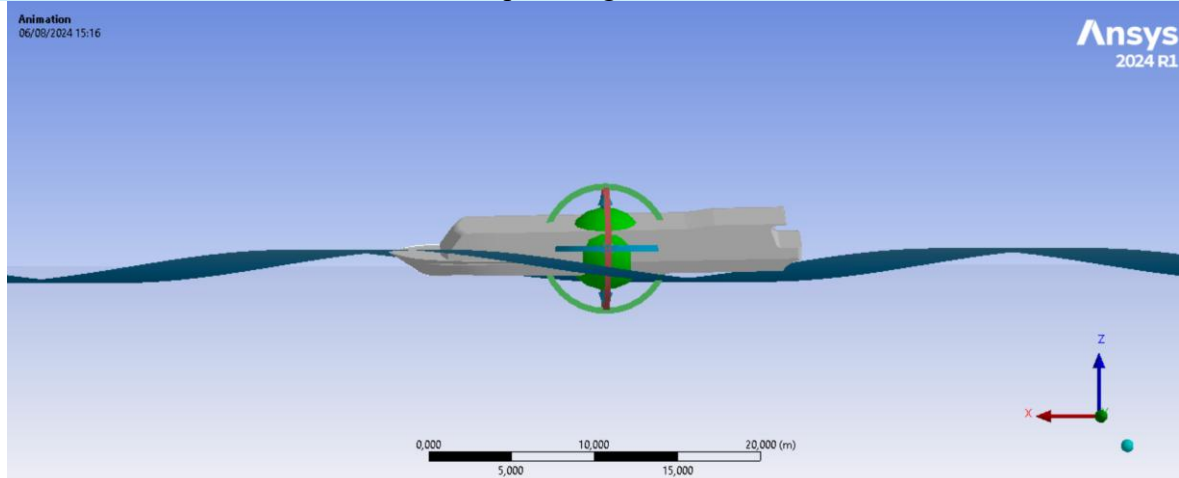
Figura 31. Simulação com amplitude de onda de 1,0 m, direção 180°, $T = 5$ s, $\omega = 1,2566$ rad/s, e comprimento de onda (λ) = 39,02 m, considerando uma velocidade de avanço $V = 12$ m/s. Imagens obtidas nos tempos $t = 8,3$ s, 8,5 s, 19 s, 21,4 s, 23,1 s, 24 s, 25,2 s, e 27,4 s.



$t = 8,3$ s – Possível ocorrência de slamming.

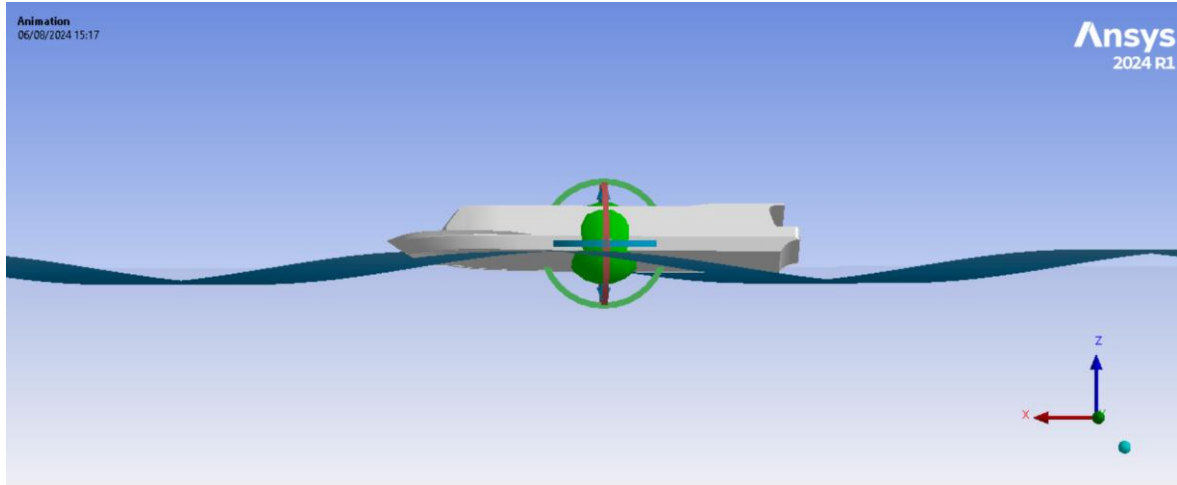


$t = 8,5$ s – Possível ocorrência de embarque de água no convés.

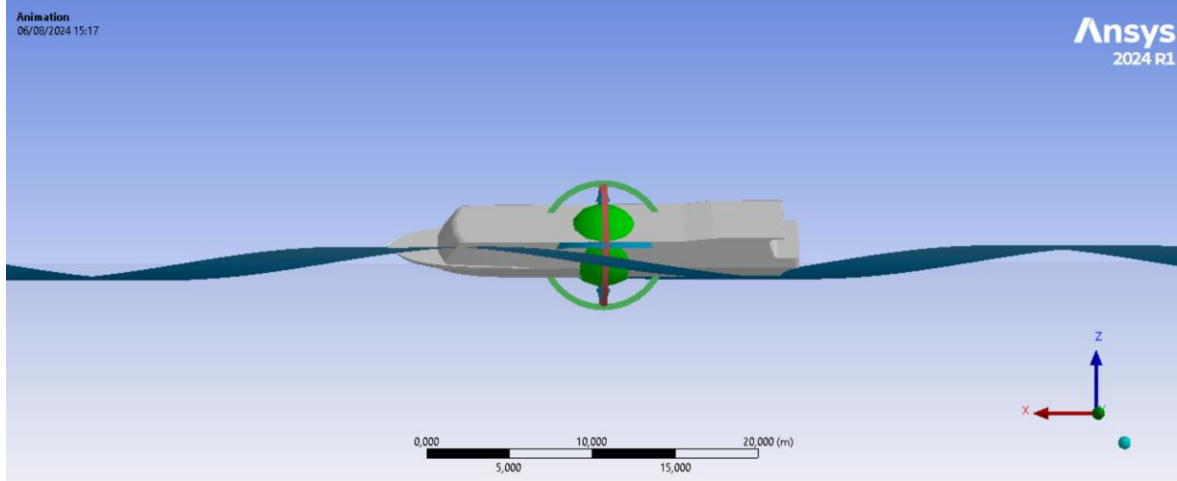


$t = 19$ s – Amplificação do movimento de balanço.

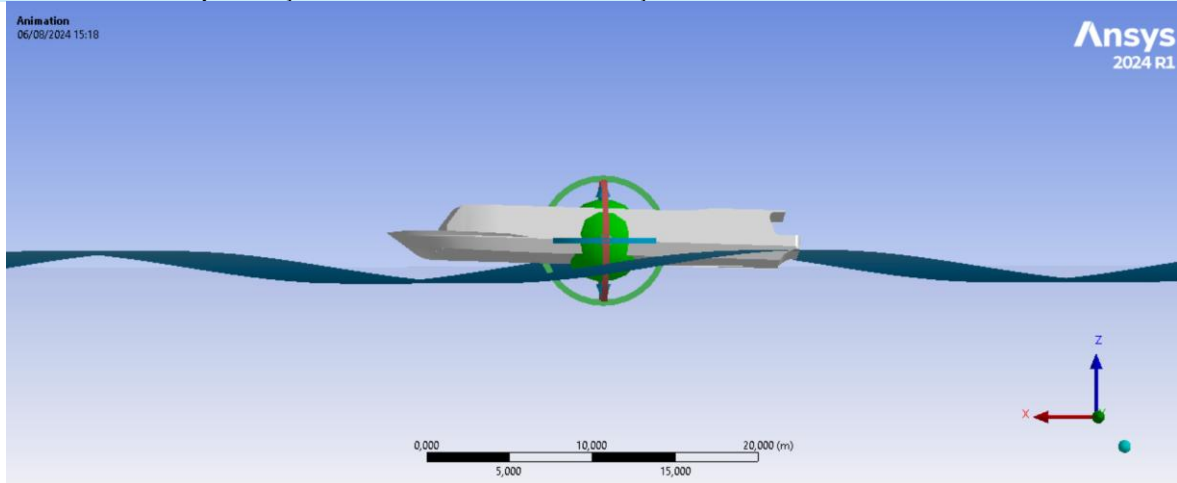




t = 21,4 s – Amplificação do movimento de balanço.

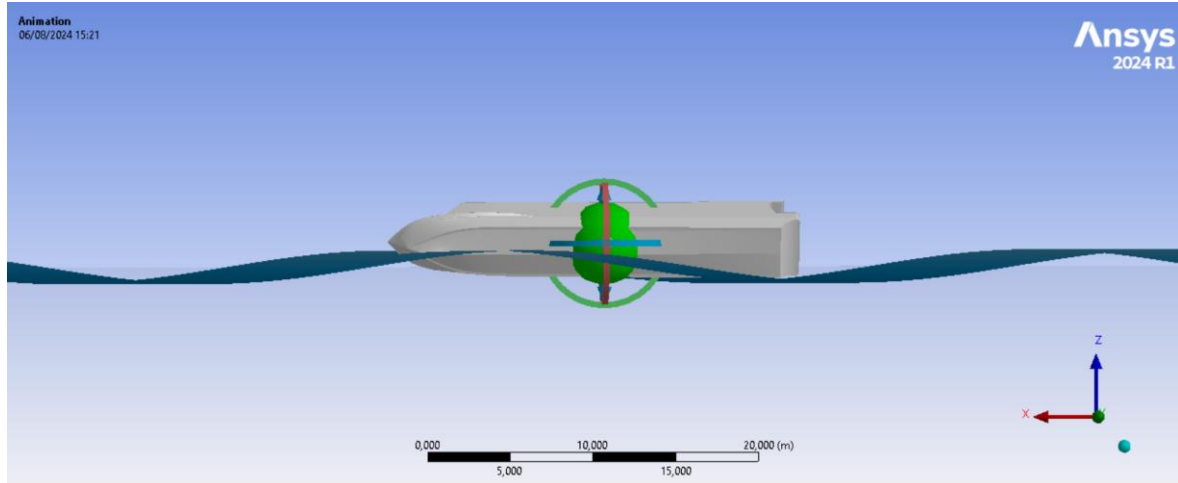


t = 23,1 s – Amplificação do movimento de balanço.

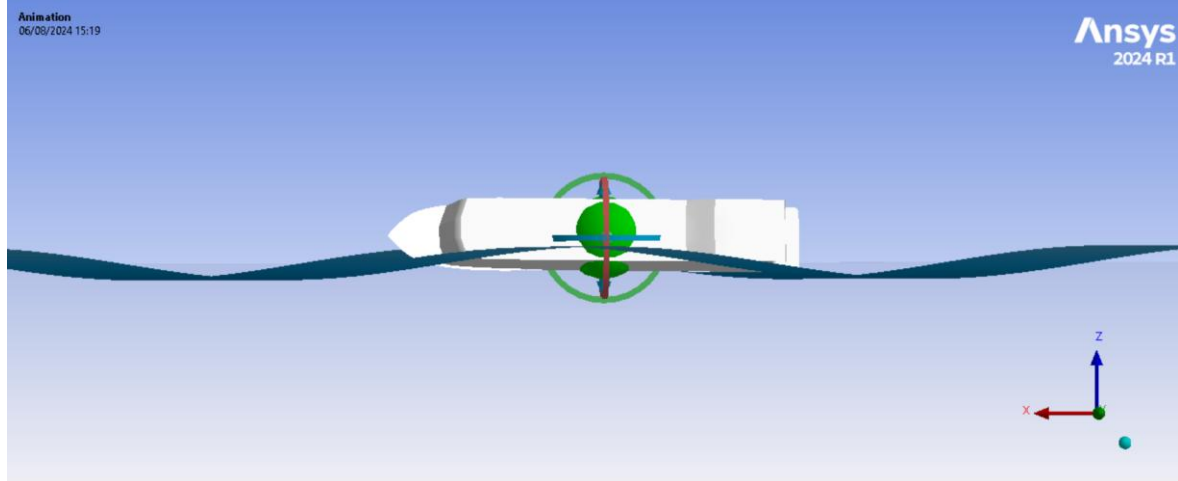


t = 24 s – Amplificação do movimento de balanço com possibilidade de slamming.





$t = 25,2 \text{ s}$ - Amplificação de movimento de balanço com possibilidade de emborcamento.



$t = 27,4 \text{ s}$ - Amplificação do movimento de balanço com possibilidade de emborcamento.

Fonte: Ansys Aqwa 2024 R1.



5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo foram estudados os movimentos de heave e pitch de uma embarcação regional amazônica de alta velocidade do tipo expresso, considerando ondas regulares incidindo pela proa. A embarcação considerada como caso de estudo realiza transporte longitudinal de passageiros na rota Manaus – Parintins, no Estado do Amazonas. Foi utilizado o software Ansys Aqwa para avaliar os movimentos da embarcação com velocidade nula ($V = 0$), velocidade no modo de deslocamento ($V = 3$ m/s), e velocidade próxima à de operação ($V = 12$ m/s), sob as hipóteses simplificadoras da teoria de escoamento potencial de hidrodinâmica. Para calcular os movimentos no domínio da frequência e do tempo da embarcação foram usados os módulos Hydrodynamic Diffraction e Hydrodynamic Response, respectivamente. O Hydrodynamic Diffraction apresenta limitação para altas velocidades da estrutura, enquanto os resultados obtidos no Hydrodynamic Response são sugestivos e ainda precisam de validação.

As análises no domínio da frequência permitiram conhecer os operadores de amplitude de resposta dos movimentos, podendo ser verificado que existe bastante similitude dos resultados obtidos com o Ansys Aqwa com relação aos obtidos com o software Maxsurf Motions (Teoria das Faixas), pelo menos até o período de ressonância dos movimentos.

A maior amplificação dos movimentos de heave e pitch (condição de ressonância) pode ser encontrada com ondas com período próximo a 5 segundos. Assumindo a teoria linear de ondas em águas profundas, o comprimento da onda seria de aproximadamente 39 m.

A análise no domínio do tempo mostrou que os movimentos da proa sofrem maiores deslocamentos e acelerações do que os movimentos do centro de gravidade. Ao aumentar a velocidade de avanço o período de encontro com as ondas é reduzido, acontecendo mais interações com as ondas. As simulações no domínio do tempo, feitas sob a desconsideração dos efeitos viscosos da água, com a velocidade de operação da embarcação de 12 m/s, e ondas regulares com período de 5 s, mostraram que a altura das ondas pode ter efeitos significantes no comportamento da embarcação. Nessa situação, foram testadas amplitudes de 0,25, 0,5, 0,75 e 1,0 metros. Para as amplitudes maiores, foi observada a possibilidade de slamming, embarque de água no convés e de amplificação do movimento de balanço, podendo contribuir ao emborcamento da embarcação. Espera-se que trabalhos futuros estendam o presente estudo para avaliar diversas condições de carregamento e outras embarcações regionais, visando entender melhor o seu comportamento para prever condições de risco de acidentes. Recomenda-se, também, a comparação dos resultados obtidos com métodos experimentais e métodos numéricos que incluam os efeitos da viscosidade da água.



REFERÊNCIAS

AMAZONTUBE. **Travessia dá Baía do Marajó-PA Muita Maresia (Vídeo de Youtube)**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=C1DtHn9D9k8>>. Acesso em: 20 out. 2024.

ANSYS. Aqwa Theory Manual - Release 2024 R1. **Ansys 2024 R1**, 2024a.

ANSYS. Aqwa Reference Manual - Release 2024 R1. **Ansys 2024 R1**, 2024b.

ARSEPAM. Fluxo de passageiros cresce 8,63% no transporte hidroviário intermunicipal do Amazonas em 2023. 4 jan. 2024.

BRITO, N. **Youtube Video: Maresia em Belém - Risco de acidentes**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=CWS0Aagz0sc>>. Acesso em: 17 jun. 2024.

BUCHNER, B. **Green water on ship-type offshore structures. PhD Thesis. Delft University of Technology Delft, The Netherlands**. PhD Thesis—[s.l.] Delft University of Technology Delft, The Netherlands, 2002.

CARVALHO, J. **Ondas no Rio Amazonas (Vídeo de Youtube)**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=9gknBp0QRdo>>. Acesso em: 23 ago. 2024.

CHEN, Z. et al. Numerical prediction of seakeeping and slamming behaviors of a trimaran in short-crest cross waves compared with long-crest regular waves. **Ocean Engineering**, v. 285, p. 115314, 2023.

COSLOVICH, F. et al. Added resistance, heave and pitch for the KVLCC2 tanker using a fully nonlinear unsteady potential flow boundary element method. **Ocean Engineering**, v. 229, p. 108935, 2021.

CURSINO, M. W. DE J. **Descrição de embarcações regionais rápidas comuns em Parintins (AM) e estudo da dinâmica de uma embarcação tipo expresso usando Ansys Aqwa**. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2024.

DA SILVA, K. P. **Efeito da variação da forma do casco na resistência ao avanço e na geração de ondas de uma embarcação regional do tipo expresso**. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2024.

DAI, Y. et al. Hydrodynamic coefficients identification of pitch and heave using multi-objective evolutionary algorithm. **Ocean Engineering**, v. 171, p. 33–48, 2019.

DRUMMEN, I.; HOLTMANN, M. Benchmark study of slamming and whipping. **Ocean Engineering**, v. 86, p. 3–10, 2014.

EMBARCACOESDOPARAEDOAMAZONAS. **Baía do Marajó agitada (Vídeo de Youtube)**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/shorts/1ldPHRFFgb0>>. Acesso em: 3 out. 2024.

FALTINSEN, O. **Sea loads on ships and offshore structures**. [s.l.] Cambridge university press, 1993. v. 1



FALTINSEN, O. M.; LANDRINI, M.; GRECO, M. Slamming in marine applications. **Journal of Engineering Mathematics**, v. 48, n. 3–4, p. 187–217, 2004.

FATOAMAZONICO. **MP Federal cobra esclarecimentos sobre travessia do Porto da Ceasa até Careiro da Várzea**. Disponível em: <<https://fatoamazonico.com.br/mp-federal-cobra-esclarecimentos-sobre-travessia-do-porto-da-ceasa-ate-careiro-da-varzea/>>. Acesso em: 11 nov. 2024.

FONSECA, N.; SOARES, C. G. Time-domain analysis of large-amplitude vertical ship motions and wave loads. **Journal of Ship Research**, v. 42, n. 02, p. 139–153, 1998.

FONSECA, N.; SOARES, C. G. Experimental investigation of the nonlinear effects on the vertical motions and loads of a containership in regular waves. **Journal of Ship Research**, v. 48, n. 02, p. 118–147, 2004.

GASPAR, Á. F. D. S. et al. OFERTA TURÍSTICA NO TRANSPORTE FLUVIAL DE PASSAGEIROS: AMOSTRA DAS EMBARCAÇÕES DE GRANDE E MÉDIO PORTE EM MANAUS, AMAZONAS, BRASIL. p. 22, 2021.

GRECO, M.; FALTINSEN, O.; LANDRINI, M. Shipping of water on a two-dimensional structure. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 525, p. 309, 2005.

GRECO, M.; LUGNI, C. 3-D seakeeping analysis with water on deck and slamming. Part 1: numerical solver. **Journal of fluids and structures**, v. 33, p. 127–147, 2012.

HADDARA, M. R.; XU, J. On the identification of ship coupled heave–pitch motions using neural networks. **Ocean Engineering**, v. 26, n. 5, p. 381–400, 1998.

HERNÁNDEZ-FONTES, J. **An analytical and experimental study of shipping water evolution and related vertical loading**. PhD Thesis—[s.l.] Ph. D. Thesis, COPPE, Federal University of Rio de Janeiro, Janeiro, Brazil, 2018.

HUANG, S.; JIAO, J.; CHEN, C. CFD prediction of ship seakeeping behavior in bi-directional cross wave compared with in uni-directional regular wave. **Applied Ocean Research**, v. 107, p. 102426, 2021.

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

KIM, B.-S.; PARK, D.-M.; KIM, Y. Study on nonlinear heave and pitch motions of conventional and tumblehome hulls in head seas. **Ocean Engineering**, v. 247, p. 110671, 2022.

LI, W.; ZHANG, J.; XU, W. High-speed multihull anti-pitching control based on heave velocity and pitch angular velocity estimation. **ISA transactions**, v. 146, p. 380–391, 2024.

MARINHA. **NORMAM-204: Normas da Autoridade Marítima para Tráfego e Permanência de Embarcações em Águas Jurisdicionais Brasileiras**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dpc/content/normam-204>>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MARINHA. **NORMAM-202: Normas da Autoridade Marítima para Embarcações Empregadas na Navegação Interior (In Portuguese)**. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dpc/content/normam-202>>. Acesso em: 25 set. 2024.



NETO, P. F. DE S. et al. Rumo à classificação de embarcações regionais de alta velocidade comuns na Amazônia brasileira. **Revista Foco (Interdisciplinary Studies Journal)**, 2024.

PERFECTCELL. **Expresso Golfinho 1! (Vídeo de Youtube)**. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=EMSUqkIFMPI>>. Acesso em: 12 set. 2024.

QIN, R. et al. Experimental and numerical investigation on seakeeping performance of a semi-submersible platform navigating in head waves. **Ocean Engineering**, v. 310, p. 118795, 2024.

RAJENDRAN, S.; FONSECA, N.; SOARES, C. G. Effect of surge motion on the vertical responses of ships in waves. **Ocean Engineering**, v. 96, p. 125–138, 2015.

RAJENDRAN, S.; FONSECA, N.; SOARES, C. G. Prediction of vertical responses of a container ship in abnormal waves. **Ocean Engineering**, v. 119, p. 165–180, 2016.

SADEGHI, M.; ZERAATGAR, H. Investigation on the effect of anti-pitch fins for reducing the motion and acceleration of ships using computational fluid dynamics. **Ocean Engineering**, v. 267, p. 112965, 2023.

SHI, K. et al. Simulation of ship motion response in head seas using a fully nonlinear potential flow method. **Ocean Engineering**, v. 309, p. 118309, 2024.

SIDDIQUI, M. A. et al. Experimental studies of a damaged ship section in forced heave motion. **Applied Ocean Research**, v. 88, p. 254–274, 2019.

TEMAREL, P. et al. Prediction of wave-induced loads on ships: Progress and challenges. **Ocean Engineering**, v. 119, p. 274–308, 2016.

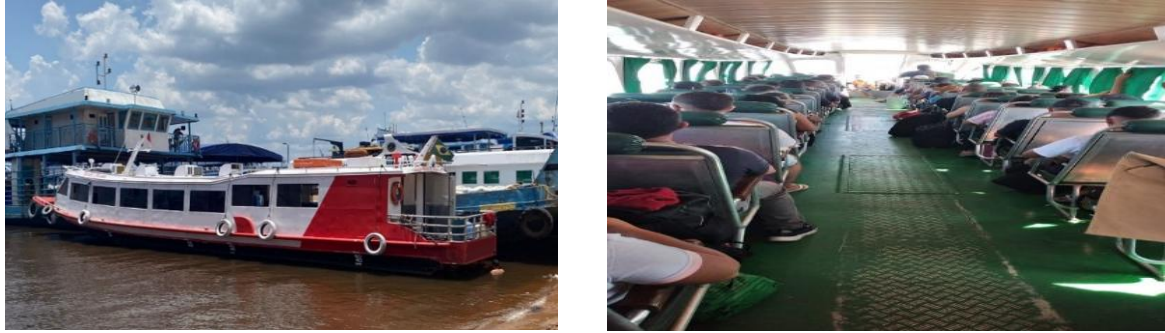


APÊNDICE A: EXEMPLOS DE EMBARCAÇÕES REGIONAIS DE ALTA VELOCIDADE EM MANAUS – AM

Seguindo o tema do presente trabalho, foram realizados registros de diversas embarcações de alta velocidade que operam no transporte de passageiros da cidade de Manaus para outras localidades. Essas embarcações são alternativas para usuários que procuram maior rapidez ao enfrentar longos percursos nos trechos entre os municípios da região, por atingirem maiores velocidades. A Figura 32 mostra alguns exemplos de embarcações tipo expresso. Pode-se observar que existem diversos formatos desse tipo de embarcação, tendo como característica principal o transporte de pessoas em rotas de longo percurso.

Figura 32. Alguns exemplos de embarcações do tipo expresso encontradas em Manaus - AM. A última imagem ilustra o interior de um expresso.





Fonte: Imagens capturadas pelo autor.

A Figura 33 mostra outros tipos de embarcações de alta velocidade encontradas em Manaus – AM. Uma definição das embarcações regionais de alta velocidade pode ser encontrada em Neto et al. (2024). Dentre este tipo de embarcações, podem ser encontradas embarcações cabinadas (Figura 33a), voadeiras (Figura 33b), lanchas ambulância ou “ambulanchas” (Figuras 33c e 33d), embarcações militares (Figura 33e), lanchas de transporte escolar (Figura 33f), entre outras.

Figura 33. Outros tipos de embarcações de alta velocidade regionais encontradas em Manaus – AM. (a) Embarcação cabinada. (b) Voadeira. (c) Ambulancha atracada em Unidade básica de Saúde Fluvial. (d) Ambulancha atracada em plataforma no Porto do São Raimundo. (e) Embarcações militares. (f) Lanchas utilizadas como transporte escolar.



(a)



(b)



(c)



(d)





(e)



(f)

Fonte: Imagens capturadas pelo autor.



APÊNDICE B: PORTOS PRINCIPAIS EM MANAUS – AM

Na cidade de Manaus, visando atender a constante demanda de chegada de passageiros, existem vários portos e terminais de acesso para que embarcações dos mais diferentes tipos possam atracar. A demanda de transporte fluvial está em constante crescimento, pelo que existem importantes pontos de embarque e desembarque de passageiros.

O Porto de Manaus (Figura 34) é o principal terminal da região, responsável pelo maior número de acesso de passageiros. Com início de sua implementação no ano de 1900, o local situado no centro do município passou por diversas administrações que influenciaram em sua infraestrutura. Têm sido feitas diversas obras para o desenvolvimento da capacidade portuária, visando atender às crescentes demandas. Com possibilidade de acesso por meio rodoviário, fluvial e marítimo, o Porto de Manaus, que é responsável por quase metade da movimentação de usuários do sistema hidroviário, movimentou cerca de 380.000 passageiros somente no ano de 2023, com destaque para o deslocamento por *Ferry boats*, representando aproximadamente 31% do modal (ARSEPAM, 2024) .

Figura 34. O porto de Manaus, no Estado do Amazonas.

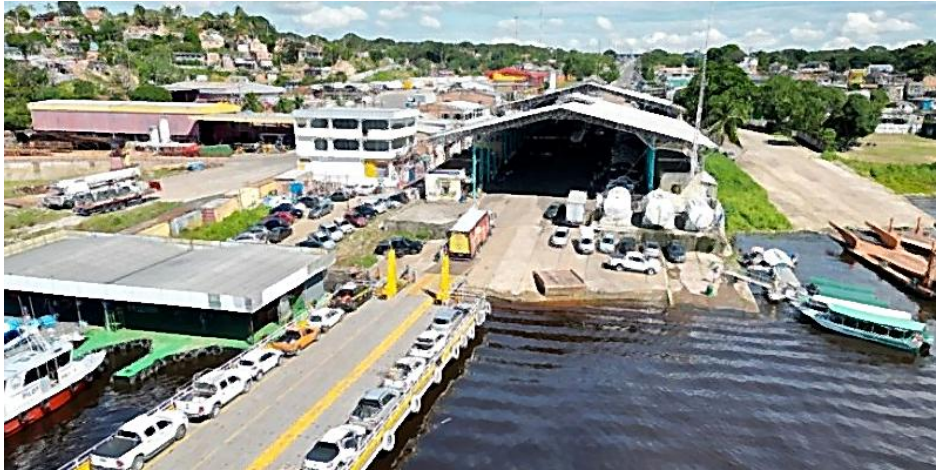


Fonte: imagem obtida pelo autor.

O Porto da CEASA (Figura 2) localizado na zona Sul da capital amazonense é outro importante ponto de atracação de embarcações transportando carga e passageiros. A sua localização é estratégica, próxima ao Distrito Industrial, que faz com que tenha grande importância no escoamento de produção da Zona Franca de Manaus. Além disso, serve como terminal de passageiros que rumam a municípios como Careiro, Maués, Parintins, entre outros. Pode ser considerado como o segundo maior em movimentação de passageiros na cidade.



Figura 35. O Porto da CEASA de Manaus – AM.



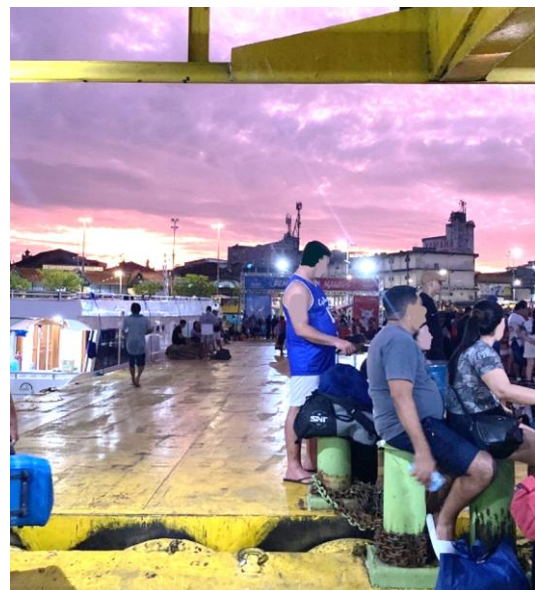
Fonte: Modificado de Fatoamazonico (2024).

Outro terminal de acesso importante é o constituído pelas balsas da Manaus Moderna (Figura 36a), situado na zona sul da cidade. As conhecidas Balsas “Amarela” (Figura 36b) e “Vermelha”, dentre outras estruturas semelhantes, podem ser consideradas como o terceiro terminal hidroviário com maior fluxo de passageiros da região metropolitana. Possuindo menos infraestrutura que os outros dois principais portos, o Porto da Manaus Moderna, ainda assim, é de extrema importância por ser uma das principais escolhas de produtores do interior do Estado que trazem suas mercadorias para suprir o “Mercadão” e as inúmeras feiras próximas de sua localização.

Figura 36. Porto da Manaus Moderna - AM. (a) Vista do porto. (b) Passageiros aguardando embarque na “Balsa Amarela”.



(a)



(b)

Fonte: Imagens capturadas pelo autor.



Outras infraestruturas de extrema relevância no âmbito das embarcações menores, incluindo as que operam em altas velocidades, são marinas e o Porto do São Raimundo. A Marina do Davi (Figuras 37a e 37b), situada na zona oeste da cidade de Manaus, conta com diversas embarcações rápidas que atuam no transporte de passageiros tanto para destinos turísticos como a Praia do Tupé, Praia da Lua e o Museu do Seringal, quanto no deslocamento de moradores das regiões ribeirinhas ao longo do Rio Tarumã-Açu, à margem esquerda do Rio Negro (GASPAR et al., 2021). O Porto do São Raimundo (Figuras 38a e 38b), também localizado na zona Sul, já foi mais utilizado anteriormente à construção da Ponte do Rio Negro, principalmente para a travessia de balsas que carregavam passageiros e veículos de grande, médio e pequeno porte. Atualmente ainda apresenta considerável fluxo de passageiros e potencial para desenvolvimento do turismo na região.

Figura 37. Região da Marina do Davi em Manaus – AM. (a) Área de embarque das lanchas na Marina do Davi em Manaus – AM. (b) Lanchas do tipo expresso filiadas a ACAMDAF (Cooperativa dos Profissionais de Transporte Fluvial da Marina do Davi).



Fonte: Imagens capturadas pelo autor.



Figura 38. Porto do São Raimundo. (a) Entrada e posto de fiscalização do porto. (b) Área de atracação das embarcações.



(a)



(b)

Fonte: Imagens capturadas pelo autor.

