

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

MARCELO WILSON DE JESUS CURSINO

**DESCRIÇÃO DE EMBARCAÇÕES REGIONAIS RÁPIDAS COMUNS EM  
PARINTINS (AM) E ESTUDO DA DINÂMICA DE UMA EMBARCAÇÃO DO TIPO  
EXPRESSO USANDO ANSYS AQWA**

Manaus

2024

MARCELO WILSON DE JESUS CURSINO

**DESCRIÇÃO DE EMBARCAÇÕES REGIONAIS RÁPIDAS COMUNS EM  
PARINTINS (AM) E ESTUDO DA DINÂMICA DE UMA EMBARCAÇÃO DO TIPO  
EXPRESSO USANDO ANSYS AQWA**

Trabalho de Conclusão de 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.**

C977dd Cursino, Marcelo Wilson de Jesus

Descrição de embarcações regionais rápidas comuns em Parintins (AM) e estudo da dinâmica de uma embarcação do tipo expreso usando Ansys Aqwa / Marcelo Wilson de Jesus Cursino. Manaus : [s.n], 2024.

81 f.: color.; 30 cm.

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

Inclui bibliografia

Orientador: Fontes, Jassiel Vladimir Hernández

1. Alta velocidade. 2. Ansys Aqwa. 3. Embarcação expreso. 4. Engenharia Naval. 5. Região amazônica. I. Fontes, Jassiel Vladimir Hernández (Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Descrição de embarcações regionais rápidas comuns em Parintins (AM) e estudo da dinâmica de uma embarcação do tipo expreso usando Ansys Aqwa

MARCELO WILSON DE JESUS CURSINO

**DESCRIÇÃO DE EMBARCAÇÕES REGIONAIS RÁPIDAS COMUNS EM  
PARINTINS (AM) E ESTUDO DA DINÂMICA DE UMA EMBARCAÇÃO DO TIPO  
EXPRESSO USANDO ANSYS AQWA**

Trabalho de Conclusão de 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 16 de julho de 2024.

BANCA EXAMINADORA:

---

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

---

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

---

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

Manaus  
2024

## AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a Deus, pela oportunidade de viver.

Aos meus Pais, Zamia e Massilon, meus maiores exemplos de vida, pelo amor único e encorajamento inabalável.

Aos meus irmãos, Felipe e Massilon Júnior, pela companhia nos piores e melhores dias.

Dedico todo o meu empenho e esforço durante todos os anos de faculdade a minha avó e primeira professora, Geny Medeiros, que não está mais neste plano, mas que um dia sonhou junto comigo com esse momento e quis mais do que qualquer pessoa no mundo ver esse dia chegar. Realmente só a educação muda a vida das pessoas, vó.

A todos meus grandes amigos, que me apoiaram e me protegeram durante essa caminhada, desde o dia em que saí de Parintins, aos 17 anos, para morar sozinho em Manaus com o sonho de formar no curso de Engenharia Naval. Sem vocês, isso não seria possível: Gustavo Nogueira, Raíssa Sayuri, Gabriel Liborio, Nilton Santos, Elias Gomes, André Said, José Henrique, Luis Filipe do Nascimento, Matheus Fernandes, David Repolho, Marco Aurélio Medeiros, Marcus Cursino, Nádia Letícia, Vinicius Bechman e Amanda Brelaz.

A todos os professores e colegas que, em algum momento, fizeram parte dessa jornada, em especial, ao meu orientador, professor Jassiel Vladimir Hernández Fontes, um dos maiores incentivadores deste trabalho. Agradeço também a Kleyphide Pereira da Silva pelo suporte na modelagem da embarcação.

Por último, dedico este trabalho a todas as pessoas que tiveram seus sonhos adiados pela falta de acesso à educação, um direito que deveria ser universal, mas ainda é um privilégio para poucos. Apenas a educação muda a vida das pessoas.

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

## RESUMO

Na Amazônia brasileira existem embarcações regionais que costumam se deslocar rapidamente, estando sujeitas a desafios operacionais como instabilidades e interações com ondas que podem acontecer de forma eventual. Porém, para contribuir com o desenvolvimento de embarcações regionais de alta velocidade mais seguras, ainda é necessário conhecer mais com relação às embarcações que existem e estudar o seu comportamento hidrodinâmico e estrutural. Nesse contexto, o presente trabalho visa descrever algumas das embarcações regionais rápidas mais comuns no Estado do Amazonas, considerando a cidade de Parintins como lugar de estudo, e avaliar a dinâmica de uma embarcação regional durante a sua interação com ondas regulares. Para realizar a primeira parte do estudo, foi feito um levantamento de embarcações regionais representativas. Logo, foi considerada uma embarcação rápida de transporte longitudinal de passageiros do tipo expresso, que costuma navegar na rota Manaus – Parintins, com o intuito de avaliar a sua resposta em diversas condições de ondas regulares usando o software Ansys Aqwa<sup>®</sup>. Foram pesquisados os movimentos da embarcação nos domínios da frequência e do tempo, utilizando os módulos *Hydrodynamic Diffraction* e *Hydrodynamic Response*, respectivamente. Análises comparativas foram feitas para avaliar os efeitos de diversos ângulos de incidência das ondas nos deslocamentos resultantes de arfagem, balanço e caturro da embarcação. A análise no domínio da frequência permitiu encontrar as condições de ressonância dos movimentos da embarcação flutuando livremente. Por outro lado, os resultados obtidos no domínio do tempo permitiram demonstrar o uso do software para simular, de maneira simplificada, a evolução temporal dos deslocamentos, velocidades e acelerações da embarcação, para algumas condições de operação com velocidade de avanço. Considerando as simplificações feitas na teoria do escoamento potencial assim como a necessidade de validação da abordagem no domínio do tempo, o presente trabalho pode servir de exemplo para estender o uso do software Ansys Aqwa<sup>®</sup> no estudo de outras embarcações regionais.

**Palavras-chave:** Alta velocidade, Ansys Aqwa, embarcação expresso, Engenharia Naval, região amazônica

## ABSTRACT

In the Brazilian Amazon, there are regional vessels that tend to move fast and are subject to operational challenges such as instabilities and interactions with waves that may occur occasionally. However, in order to contribute to the development of safer high-speed regional vessels, it is still necessary to know more about the existing vessels and study their hydrodynamic behavior. In this context, this work aims to describe some of the most common fast regional vessels in the State of Amazonas, considering the city of Parintins as the study site, and to evaluate the dynamics of a regional vessel during its interaction with regular waves. To carry out the first part of the study, a survey of representative regional vessels was carried out. Therefore, a longitudinal expresso-type passenger transport vessel, which usually sails on the Manaus – Parintins route, was considered in order to evaluate its response under various regular wave conditions using the Ansys Aqwa<sup>®</sup> software. The vessel's movements were researched in the frequency and time domains, using the Hydrodynamic Diffraction and Hydrodynamic Response modules, respectively. Comparative analyses were performed to evaluate the effects of different wave incidence angles on the resulting heave, roll and pitch motions of the vessel. The frequency domain analysis allowed finding the motion resonance conditions of the vessel floating freely. On the other hand, the results obtained in the time domain allowed demonstrating the use of the software to simulate, in a simplified manner, the temporal evolution of the displacements, velocities and accelerations of the vessel, for some operating conditions with forward speed. Considering the simplifications made in the potential flow theory as well as the need to validate the time domain approach, this work can serve as an example to extend the use of the Ansys Aqwa<sup>®</sup> software in the study of other regional vessels..

**Keywords:** High speed, Ansys Aqwa, expresso vessel, Naval Engineering, Amazon region

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa da região hidrográfica amazônica no Brasil.....	14
Figura 2. Ângulo de incidência das ondas com a embarcação. ....	29
Figura 3. Sistemas de eixos coordenados utilizados no software Ansys Aqwa® .....	31
Figura 4. Fases principais do estudo.....	33
Figura 5. Passos importantes realizados na modelagem com os softwares Rhinoceros®, e Ansys Aqwa® ( <i>Hydrodynamic diffraction e Hydrodynamic Response</i> ). ....	33
Figura 6. Definição de parâmetros e casos de estudo considerados no presente trabalho. (a) Configuração inicial. (b) Análise no domínio da frequência com o software <i>Hydrodynamic Diffraction</i> . (c) Análise no domínio do tempo com o software <i>Hydrodynamic Response</i> . ....	34
Figura 7. Mapa da rota Manaus – Parintins, no Estado do Amazonas. Imagem obtida de OpenStreetMap® sob a licença sob a licença Creative Commons CC BY-SA 2.0 ( <a href="https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/">https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/</a> ). ....	36
Figura 8. Plano de linhas simplificado da embarcação tipo expresse considerada como caso de estudo (vistas transversal, longitudinal e topo), incluindo o sistema de coordenadas considerado no estudo.....	37
Figura 9. Velocidade média da embarcação obtida no aplicativo Speedometer.....	38
Figura 10. Domínio computacional no software <i>Hydrodynamic Diffraction</i> , incluindo a embarcação com o calado correspondente. ....	39
Figura 11. Configuração dos módulos <i>Hydrodynamic Diffraction e Hydrodynamic Response</i> no Ansys Aqwa® .....	40
Figura 12. Imagens aéreas obtidas por drone de alguns terminais portuários em Parintins – AM. (a) Terminal portuário principal de Parintins-AM. (b) Detalhe do terminal portuário principal de Parintins – AM. (c) Marina de barcos particular (Pontão Francesa), localizada ao lado do porto principal de Parintins – AM. (d) Vista do topo de diversas embarcações atracadas na beira do rio Amazonas em Parintins – AM. Imagens obtidas no dia 14/12/2023. ....	43
Figura 13. Exemplos de embarcações regionais, capturadas em Parintins – AM, que não operam em alta velocidade. Imagens obtidas pela tarde no dia 18/05/2024. (a) Embarcação do tipo ferry boat. (b) Embarcação do tipo bajara atracada em uma casa ribeirinha. (c) Embarcação do tipo bajara navegando no Rio Amazonas.....	46
Figura 14. Embarcações do tipo rabeta encontradas em Parintins – AM. (a) Embarcação com casco de alumínio localizado na marina particular Morena (imagem obtida no dia 01/02/2024).	

(b) Embarcação do tipo rabeta, com casco de madeira, navegando no Rio Amazonas (imagem obtida no dia 18/05/2024).....	47
Figura 15. Embarcações do tipo voadeira capturadas em Parintins – AM. (a) Embarcação resguardada na Marina Morena (imagem obtida em 01/02/2024). (b) Embarcação navegando no Rio Amazonas (imagem obtida no dia 18/05/2024).....	48
Figura 16. Embarcações cabinadas do tipo ambulancha encontradas em Parintins – AM. (a) Ambulancha encontrada na Marina Morena (imagem obtida em 01/02/2024). (b) Ambulancha navegando no Rio Amazonas (imagem obtida em 18/05/2024).....	49
Figura 17. Embarcação de transporte escolar navegando no rio Amazonas, em Parintins – AM (imagem obtida em 18/05/2024).....	51
Figura 18. Exemplos de embarcações do tipo expresso encontradas em Parintins – AM. (a) Embarcação no Porto de Parintins (imagem obtida em 18/05/2024). (b) Foto tirada de um expresso em um pequeno estaleiro ribeirinho, no rio Amazonas (foto obtida em 18/05/2024). (c) Embarcação docada em carreira para manutenção em um pequeno estaleiro ribeirinho particular, no rio Amazonas (imagem obtida em 18/05/2024). .....	52
Figura 19. Exemplo de uma embarcação do tipo expresso que atua na rota Parintins – Manaus, no Estado do Amazonas. (a) Embarcação no porto de Manaus (Balsa Amarela) no horário noturno (imagem obtida em 10/06/2024). (b) Aspecto do interior de uma embarcação tipo expresso, em viagem no trecho Manaus-Parintins (foto obtida no dia 25/05/2024). .....	53
Figura 20. Vistas do renderizado do casco modelado como superfície no software Rhinoceros3D®.....	54
Figura 21. Comparação das cinco malhas estruturadas que foram avaliadas no presente estudo. As imagens mostram o aspecto das malhas na parte inferior da proa da embarcação. ....	55
Figura 22. Comparação de operadores de amplitude de resposta (RAO's) para diferentes malhas, considerando ondas regulares incidindo pela proa ( $\alpha=180^\circ$ ). (a) Deslocamento de heave. (b) Deslocamento angular de pitch.....	56
Figura 23. Gráfico tridimensional que mostra o operador de amplitude de resposta (RAO) do movimento de heave para diferentes frequências e às direções das ondas com relação à embarcação. ....	58
Figura 24. Gráfico tridimensional que mostra o operador de amplitude de resposta (RAO) do movimento de pitch para diferentes frequências e direções das ondas com relação à embarcação. ....	59

Figura 25. Gráfico tridimensional que mostra o operador de amplitude de resposta (RAO) do movimento de roll para diferentes frequências e direções das ondas com relação à embarcação. ....	60
Figura 26. Exemplo do movimento absoluto da estrutura (ver regiões coloridas) considerando a frequência de onda que causou ressonância durante o movimento de pitch, na direção de 180°. A amplitude da onda foi considerada como 0,1 m para efeitos ilustrativos. ....	61
Figura 27. Força cortante (estática), considerando todas as componentes de pressão na direção vertical Z (heave). ....	62
Figura 28. Momento fletor (estático), considerando todas as componentes de pressão em torno ao eixo Y (pitch). ....	62
Figura 29. Casos de estudo para realizar a análise da resposta da embarcação no domínio do tempo. ....	64
Figura 30. Séries temporais do movimento de heave devido à incidência das ondas regulares (altura = 0,1 m e frequência angular de 1,43 rad/s) pela proa ( $\alpha = 180^\circ$ ), sem e com a correnteza assemelhando a velocidade de avanço da embarcação. (a) Deslocamento de heave. (b) Velocidade de heave. (c) Aceleração de heave. ....	65
Figura 31. Séries temporais do movimento de pitch devido à incidência das ondas regulares (altura = 0,1 m e frequência angular de 1,43 rad/s) pela proa ( $\alpha = 180^\circ$ ), sem e com a correnteza assemelhando a velocidade de avanço da embarcação. (a) Deslocamento angular de pitch. (b) Velocidade angular de pitch. (c) Aceleração angular de pitch. ....	66
Figura 32. Séries temporais do movimento de roll devido à incidência das ondas regulares (altura = 0,1 m e frequência angular de 1,43 rad/s) pela proa ( $\alpha = 180^\circ$ ), sem e com a correnteza assemelhando a velocidade de avanço da embarcação. (a) Deslocamento angular de roll. (b) Velocidade angular de roll. (c) Aceleração angular de roll. ....	68
Figura 33. Comparação de séries temporais de deslocamento, velocidade e aceleração do movimento de heave. (a) Caso 1. (b) Caso 2. ....	69
Figura 34. Comparação de séries temporais de deslocamento, velocidade e aceleração do movimento de pitch. (a) Caso 1. (b) Caso 2. ....	70
Figura 35. Comparação de séries temporais de deslocamento, velocidade e aceleração do movimento de roll. (a) Caso 1. (b) Caso 2. ....	71
Figura 36. Exemplos de situações observadas durante as simulações no domínio do tempo dos Casos 1 e 2. (a) Vista no plano Y-Z durante a simulação do Caso 1 ( $\alpha = 180^\circ$ ). (b) Vista no plano Y-Z durante a simulação do Caso 2 ( $\alpha = 135^\circ$ ). ....	72

Figura 37. Condição de flutuação para o caso de estudo cujos movimentos em ondas foram avaliados. ....	79
Figura 38. Inclinações consideradas durante a análise de estabilidade intacta. ....	79
Figura 39. Relatório de análise hidrostática feito no software Orca3D <sup>®</sup> , na condição de calado avaliada. O gráfico corresponde ao ângulo endiretador (righting arm) e ângulo de trim (trim angle) para diferentes ângulos de heel (inclinação transversal). ....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características principais da embarcação consideradas no presente estudo.....	37
Tabela 2. Características das cinco malhas consideradas.....	54
Tabela 3. Relatório de análise hidrostática feito no software Orca3D <sup>®</sup> , na condição de calado avaliada.....	80

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>1.1 Problemática .....</b>	<b>14</b>
<b>1.2 Estado da arte .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 Justificativa .....</b>	<b>18</b>
<b>1.4 Objetivos.....</b>	<b>19</b>
1.4.1 Objetivo geral .....	19
1.4.2 Objetivos específicos.....	19
<b>1.5 Estrutura do trabalho .....</b>	<b>19</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>21</b>
<b>2.1 Teoria do escoamento potencial.....</b>	<b>21</b>
2.1.1 Teoria de escoamento potencial (conceitos básicos) .....	22
2.1.2 Decomposição da função potencial .....	23
2.1.3 Forças hidrodinâmicas .....	26
2.1.4 Equação de movimento da estrutura flutuante .....	27
<b>2.2 Frequência de encontro.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3 Sistemas coordenados no software Ansys Aqwa® .....</b>	<b>30</b>
<b>2.4 Direção de incidência de ondas e correnteza.....</b>	<b>31</b>
<b>2.5 Número de Froude.....</b>	<b>32</b>
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Fase 1: Levantamento de embarcações.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2 Fase 2: Seleção e modelagem 3D do caso de estudo.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3 Fase 3: Análise da dinâmica da embarcação no domínio da frequência .....</b>	<b>38</b>
<b>3.4 Fase 4: Dinâmica da embarcação no domínio do tempo.....</b>	<b>40</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1 Resultados do levantamento de embarcações regionais rápidas em Parintins – AM .....</b>	<b>42</b>
4.1.1 Embarcações nos terminais portuários (levantamento feito com drone).....	42
4.1.2 Algumas embarcações que não operam em alta velocidade.....	45
4.1.3 Embarcações do tipo rabeta.....	46

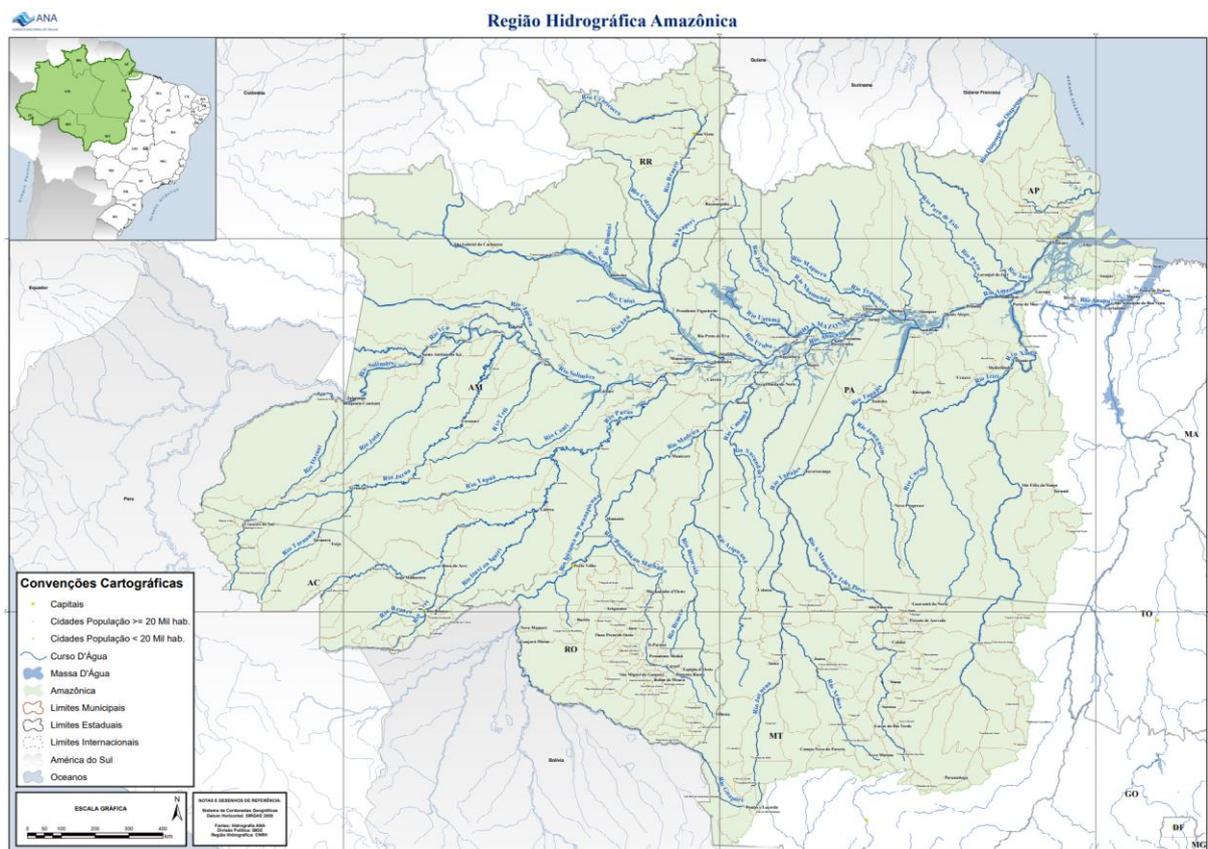
4.1.4 Embarcações do tipo voadeira.....	47
4.1.5 Embarcações cabinadas (ambulancha).....	48
4.1.6 Embarcações cabinadas (lancha de transporte escolar).....	50
4.1.7 Embarcações do tipo expresso.....	51
<b>4.2 Resultados da modelagem tridimensional do caso de estudo selecionado.....</b>	<b>53</b>
<b>4.3 Resultados do teste de convergência de malha .....</b>	<b>54</b>
<b>4.4 Resultados da análise da resposta da embarcação no domínio da frequência.....</b>	<b>57</b>
<b>4.5 Resultados da análise da resposta da embarcação no domínio do tempo .....</b>	<b>63</b>
4.5.1 Efeitos da correnteza nos movimentos .....	65
4.5.2 Efeitos da direção das ondas nos movimentos da embarcação .....	68
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>79</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Problemática

O Brasil possui a maior parte da floresta amazônica, na qual existe uma grande quantidade de rios em sete estados, como mostrado na Figura 1, a qual mostra um mapa da região hidrográfica segundo a Agência Nacional de Águas.

Figura 1. Mapa da região hidrográfica amazônica no Brasil.



Fonte: Catálogo de metadados da Agência Nacional de Águas; ANA (2024).

Muitas das cidades que se encontram dentro da Amazônia brasileira carecem de acesso a rodovias, sendo os rios os principais meios de locomoção utilizando embarcações de diversos portes (FONTES et al., 2023b). A peculiaridade geográfica da Amazônia, definida pela vastidão de seu território e a escassez de infraestrutura rodoviária, e aérea, em muitas de suas localidades, torna o transporte fluvial uma atividade muito relevante na mobilidade da região. Devido à escassez de vias terrestres e terminais aéreos interconectados, as águas dos rios da Amazônia emergem como as principais rotas de transporte, desempenhando um papel essencial no

deslocamento de pessoas e mercadorias entre as principais cidades e comunidades ribeirinhas. De fato, é bem possível que esta região possua uma das maiores concentrações de embarcações, registradas e não registradas, do Brasil (HERNÁNDEZ-FONTES et al., 2021).

A influência da navegação nos rios da Amazônia é profundamente perceptível na vida cotidiana dos residentes, exercendo um papel central em diversos aspectos fundamentais, como conectividade social, cultura, economia e infraestrutura. O transporte fluvial pode ser considerado como o uma das atividades que mais contribui na economia da Amazônia, pois é o meio predominante para o transporte de pessoas e de uma variada gama de itens, incluindo alimentos, eletrodomésticos, peças de máquinas, automóveis, medicamentos e mercadorias diversas. No seu trabalho, de Souza et al. (2023) apresentaram a relevância que tem o transporte de cargas na região amazônica, considerando o transporte aquaviário no Rio Madeira como tópico de discussão, salientando os desafios sociais, técnicos e ambientais que enfrentam as embarcações regionais.

A presença constante de embarcações, de diversos tamanhos e formas, que cruzam os rios da Amazônia, tornou-se uma característica marcante e essencial da vida na região, refletindo não apenas a necessidade prática de movimentação, mas também a conexão entre as comunidades ribeirinhas e o uso dos recursos que sustentam suas vidas diárias.

Segundo as características das embarcações, estas podem realizar transporte de longo ou curto percurso (FONTES et al., 2023b; MAIA et al., 2023). Embarcações regionais de pequeno porte, como rabetas, ambulanchas, lanchas escolares, entre outras, geralmente atendem rotas curtas, como apresentado por Almeida (2024). Por outro lado, dentre as embarcações regionais mais utilizadas para longo percurso podem ser mencionadas as gaiolas/recreios, ferryboats, e expressos, sendo estas últimas caracterizadas por se deslocar em alcançar altas velocidades (BECHMAN, 2024; SOARES et al., 2023).

Cabe mencionar que as embarcações tipo expresso são muito utilizadas no Estado do Amazonas para realizar transporte de passageiros entre as principais cidades. Esse tipo de embarcação costuma ser interessante para os passageiros que precisam se locomover rapidamente entre as cidades principais do Estado, pagando um custo mais acessível do que uma passagem de avião. Cabe mencionar, que nem todas as cidades principais da região amazônica possuem aeroportos, sendo o transporte fluvial o meio mais importante de locomoção. O conceito das embarcações tipo expresso surgiu na região amazônica, como sugerido por David (2010), que descreveu um pouco de história e características dessas embarcações.

As embarcações do tipo expresso costumam navegar em águas consideradas tranquilas nos rios da Amazônia; porém, muitas vezes acontecem condições ambientais adversas que podem causar ondas na superfície da água, como temporais eventuais, sendo necessário conhecer o seu comportamento em ondas. Embora alguns trabalhos acadêmicos recentes têm apresentado estudos acadêmicos relacionados com esse tipo de embarcação (BECHMAN, 2024; SOARES et al., 2023); ainda é necessário avaliar mais alternativas que permitam estudar seu comportamento em ondas, incluindo metodologias para pesquisar a evolução temporal dos movimentos. No presente trabalho é apresentado um breve levantamento de embarcações rápidas regionais, considerando o caso de estudo de Parintins – AM, e um estudo técnico envolvendo o uso do software Ansys Aqwa<sup>®</sup> para avaliar a resposta em ondas de uma embarcação regional do tipo expresso.

## 1.2 Estado da arte

O estudo da dinâmica de embarcações pode ser feito por meio de métodos analíticos, experimentais e numéricos. Estudos experimentais têm sido feitos em embarcações com velocidade de avanço, embarcações de exploração de petróleo (GRECO; LUGNI; FALTINSEN, 2014; SILVA; COUTINHO; ESPERANÇA, 2017), boias (QIN et al., 2021), plataformas de conversão de energia eólica (AMARAL et al., 2021), entre outros sistemas navais. Por outro lado, os métodos numéricos têm ganhado popularidade devido aos avanços nas tecnologias de computação, que permitem maiores velocidades de processamento de dados. Dentre os métodos numéricos utilizados na Engenharia Naval e Oceânica, pode ser mencionada a fluidodinâmica computacional (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) que considera os efeitos da viscosidade da água nas análises (CHEN et al., 2019; CRESPO et al., 2015; FERZIGER; PERIĆ, 1996), e os métodos baseados na teoria potencial de hidrodinâmica (PENALBA; KELLY; RINGWOOD, 2017; XU; NENG; YANG, 2019), que desprezam os efeitos da viscosidade da água e assumem o escoamento como irrotacional (FALTINSEN, 1993; NEWMAN, 2018).

Na Engenharia Naval, os métodos de dinâmica de embarcações baseado na teoria potencial têm sido, e ainda são, amplamente usados em aplicações práticas de engenharia, incluindo aplicações relacionadas com a indústria offshore (CHANDRASEKARAN, 2020; CHU; WANG; ZHANG, 2022; HSU et al., 2015; REN; VENUGOPAL; SHI, 2022).

Existem várias abordagens dos métodos teoria potencial conhecidas, incluindo a teoria das faixas moderna (*strip theory*) proposta por Salvesen et al. (1970), e os métodos dos painéis, como os descritos em por Newman (1992), Newman (2018) e Lee et al. (1995).

Os métodos de teoria das faixas permitem o cálculo de movimentos de embarcações, com formas alongadas, incluindo velocidade de avanço. Dentre os softwares de Engenharia Naval conhecidos que incluem o método da teoria das faixas pode se mencionar o *Maxsurf Motions*<sup>®</sup> (BECHMAN, 2024; MAXSURF, 2024).

Por outro lado, aplicações com métodos dos painéis baseados na teoria potencial têm ganhado relevância na Engenharia Naval e Oceânica, principalmente em estudos de sistemas flutuantes. Alguns softwares que incluem este tipo de método são: Wamit<sup>®</sup> (LEE, 1995; WAMIT, 2023), Nemoh<sup>®</sup> (PENALBA; KELLY; RINGWOOD, 2017), Ansys Aqwa<sup>®</sup> (ANSYS, 2024a), entre outros. Dentre eles, Wamit<sup>®</sup> e Ansys Aqwa<sup>®</sup> são comerciais, enquanto o Nemoh<sup>®</sup> é de livre acesso. No presente trabalho, será utilizado o software Ansys Aqwa<sup>®</sup> para avaliar a dinâmica de uma embarcação regional amazônica.

Sheng et al. (2022) realizaram comparações entre os softwares Wamit<sup>®</sup> e Nemoh<sup>®</sup> considerando estruturas flutuantes com geometrias simplificadas. Nesse trabalho, além de proporcionar uma revisão detalhada da teoria potencial, foi demonstrada a capacidade de ambos os métodos para calcular as forças e coeficientes hidrodinâmicos.

Lian et al. (2023) pesquisaram o efeito de uma placa amortecedora na resposta em ondas de uma embarcação usando o Ansys Aqwa<sup>®</sup>. Diversas configurações da placa, localizada no fundo do casco, foram testadas, verificando os resultados com experimentos. Os autores analisaram as mudanças nos movimentos de avanço, balanço, e deriva.

Xu et al. (2019) avaliaram a resposta de uma embarcação de mineração utilizando Ansys Aqwa<sup>®</sup>, considerando efeitos da direção da onda, vento e correnteza nos movimentos da embarcação.

Bernal-Camacho et al. (2022) demonstraram o uso do Ansys Aqwa<sup>®</sup> para o caso de uma turbina flutuante para aproveitamento da energia do vento. Os resultados foram comparados com experimentos de outros autores, demonstrando o potencial do software utilizado.

Poucos estudos têm sido feitos utilizando o Ansys Aqwa<sup>®</sup> para avaliar a dinâmica de embarcações na região amazônica. Recentemente, Marques (2023) utilizou esse software para avaliar o movimento de uma monocoluna flutuante. Os resultados foram comparados com resultados experimentais, verificando o efeito da variação do calado nos movimentos resultantes.

No presente ano, Almeida (2024) utilizou o Ansys Aqwa<sup>®</sup> para estudar os movimentos de uma embarcação regional do tipo voadeira, considerada sem propulsão, flutuando livremente. Além de propor um levantamento de embarcações regionais, o autor avaliou a resposta no domínio da frequência dos seis graus de liberdade da embarcação, utilizando o módulo *Hydrodynamic Diffraction*.

Para dar continuidade na caracterização do comportamento hidrodinâmico de embarcações regionais, o presente trabalho visa utilizar o Ansys Aqwa<sup>®</sup> para avaliar a resposta em ondas regulares (movimentos de arfagem, caturro e balanço) de uma embarcação regional do tipo expresso. Será feita a análise convencional no domínio da frequência no módulo *Hydrodynamic Diffraction*, considerando a embarcação flutuando livremente. Logo, será usado o módulo *Hydrodynamic Response* para avaliar a sua resposta no tempo, assumindo a velocidade de uma correnteza como a sua velocidade de avanço, mantendo o movimento de avanço da embarcação como restrito. A análise neste último módulo será de caráter avaliativo, para demonstrar a aplicabilidade do software. Além disso, serão apresentados diversos tipos de embarcações regionais rápidas por meio de um levantamento feito na cidade de Parintins, no Estado do Amazonas.

### **1.3 Justificativa**

Embora existam alguns estudos preliminares do comportamento hidrodinâmico de embarcações regionais amazônicas, ainda é necessário contribuir com a documentação de embarcações regionais de alta velocidade, assim como mais metodologias que possibilitem o seu estudo usando métodos de simulação computacional. No presente estudo, serão descritas algumas embarcações com características de alta velocidade, capturadas em levantamentos de campo feitos na cidade de Parintins – AM. Adicionalmente, visa-se demonstrar o uso do software Ansys Aqwa<sup>®</sup> para avaliar o comportamento em ondas de uma embarcação do tipo expresso, nos domínios da frequência e do tempo. Essa embarcação, que transporta várias dezenas de passageiros, tem relevância no estudo devido a que costuma desenvolver longos percursos de várias horas. Nessas viagens, pode existir a eventual incidência de ondas da superfície dos rios na embarcação, seja devido ao movimento de embarcações maiores, ou bem, por causa da ocorrência de condições ambientais adversas, como trombas de água e temporais.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo geral

Realizar um levantamento de embarcações regionais rápidas em Parintins – AM e demonstrar o uso do software Ansys Aqwa<sup>®</sup> para avaliar a resposta em ondas regulares de uma embarcação regional do tipo expresso, nos domínios da frequência e do tempo,.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento fotográfico de embarcações que podem alcançar altas velocidades na região amazônica, considerando a cidade de Parintins – AM como local de estudo.
- Selecionar um caso de estudo de embarcação regional do tipo expresso, que navegue na rota Manaus – Parintins, para modelar o seu casco de maneira tridimensional usando software de desenho assistido por computador, definindo uma condição típica de operação.
- Obter medições da velocidade de operação da embarcação considerada como caso de estudo.
- Com a geometria do casco gerada, avaliar a resposta da embarcação (movimentos de arfagem, caturro e balanço), no domínio da frequência, usando o módulo *Hydrodynamic Diffraction* do software Ansys Aqwa<sup>®</sup> e considerando ondas regulares incidindo em várias direções.
- Demonstrar o uso do módulo *Hydrodynamic Response* do software Ansys Aqwa<sup>®</sup> para simular os movimentos da embarcação com velocidade de avanço no domínio do tempo (movimentos de arfagem, caturro e balanço), considerando a incidência de ondas regulares com diferente ângulo de incidência.

## 1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado como segue: o Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, onde são mostrados alguns conceitos importantes da teoria potencial de hidrodinâmica, frequência de encontro com ondas e sistemas coordenados. O Capítulo 3 mostra a metodologia utilizada, a qual inclui a descrição do caso de estudo e dos procedimentos para utilizar o software Ansys Aqwa<sup>®</sup>, com seus módulos *Hydrodynamic Diffraction* e *Hydrodynamic*

*Response.* Neste capítulo são descritos os casos de estudo que serão avaliados nos resultados e a configuração do software utilizado. Depois, no Capítulo 4, são apresentados os resultados do estudo, iniciando com as descrições das embarcações regionais que foram documentadas. Logo, é mostrado um estudo de convergência da malha utilizada, continuando com as comparações dos principais resultados obtidos nos módulos do Ansys Aqwa<sup>®</sup>. Finalmente, o Capítulo 5 inclui as principais conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Teoria do escoamento potencial

Neste trabalho foi utilizado o software Ansys Aqwa<sup>®</sup> (ANSYS, 2013) para avaliar os movimentos de uma embarcação regional do tipo expresso. O software está baseado na teoria do escoamento potencial de hidrodinâmica, na qual é assumido o fluido como invíscido e o escoamento como incompressível e irrotacional. Desta maneira, é possível determinar os campos de velocidades e de pressão em um volume de controle desprezando os efeitos de atrito, por meio da solução da equação de Laplace. Em outras palavras, em um escoamento potencial não pode ser considerado o efeito da camada limite no corpo (NEWMAN, 2018).

Existem alguns métodos bem conhecidos para modelar o movimento de embarcações utilizando a teoria potencial, sendo bem populares o Método da Teoria das Faixas (*strip theory*) e os Métodos dos Painéis. A teoria das faixas permite avaliar o movimento de embarcações de maneira simplificada, considerando “faixas” da parte submersa do casco para calcular os coeficientes hidrodinâmicos. Alguns softwares de Engenharia Naval para calcular movimentos de embarcações contém esse método, como exemplo, o software *Maxsurf Motions*<sup>®</sup> (MAXSURF, 2024). A teoria das faixas moderna é baseada, principalmente, na modelagem de escoamento potencial proposta por Salvesen et al. (1970).

Por outro lado, os métodos dos painéis são geralmente métodos tridimensionais baseados na teoria potencial, que consideram a superfície do corpo submerso e o volume de controle dividido por meio de painéis, utilizando combinações de escoamentos potenciais conhecidos para resolver a equação de Laplace, ou seja, fazendo uso do princípio de superposição. Esses métodos estão disponíveis em softwares como Wamit<sup>®</sup> (LEE, 1995), Nemoh<sup>®</sup> (PENALBA; KELLY; RINGWOOD, 2017), Ansys Aqwa<sup>®</sup> (ANSYS, 2013; SHENG et al., 2022), entre outros. Os autores Sheng et al. (2022) oferecem uma breve introdução à teoria do escoamento potencial que é usada nos métodos dos painéis, que aplica para esse tipo de softwares, os quais são de uso comum na Engenharia Naval e Oceânica.

Cabe mencionar que a fundamentação teórica apresentada neste capítulo trata, principalmente, da análise que é feita no domínio da frequência. A análise no domínio do tempo apresentada neste estudo tem fins avaliativos do uso do software, pelo que a teoria relacionada com a análise no domínio do tempo pode ser consultada nos próprios manuais do software (ANSYS, 2024b, 2024a).

A continuação, são apresentados os conceitos mais importantes da teoria do escoamento potencial considerada nos softwares que se baseiam no método dos painéis. As informações foram resumidas a partir do trabalho de Sheng et al. (2022).

### 2.1.1 Teoria de escoamento potencial (conceitos básicos)

A teoria do escoamento potencial envolve as seguintes suposições:

O escoamento é irrotacional: por tanto, o escoamento é considerado potencial, isto é, não se considera a camada limite na superfície do corpo. O escoamento é invíscido: esta suposição pode ser considerada óbvia, pois supor a irrotacionalidade do escoamento também exige que o ele seja invíscido. O fluido é incompressível.

A função potencial de velocidade pode ser expressa como segue:

$$\Phi(X, t) = \text{Re}[\varphi(X)e^{i\omega t}] \quad (1)$$

onde  $\Phi$  é a função potencial de velocidade real, enquanto  $\varphi$  é a amplitude complexa da função potencial de velocidade, ou também conhecida como a função potencial no domínio da frequência. O parâmetro  $X = (x, y, z)$  corresponde ao vetor espacial que indica que a função potencial e sua amplitude complexa são dependentes do espaço,  $\omega$  é a frequência do sistema dinâmico, e  $t$  corresponde ao tempo.

Tanto  $\Phi$  quanto  $\varphi$  devem satisfazer a equação de Laplace para o escoamento potencial incompressível:

$$\nabla^2 \Phi = 0; \nabla^2 \varphi = 0 \quad (2)$$

Em aplicações práticas que utilizam cálculos rápidos, como por exemplo em interações de ondas com estruturas, apenas é resolvida a função potencial no domínio da frequência  $\varphi$ . A função potencial no domínio da frequência, para uma determinada estrutura flutuante, é dependente apenas das frequências da onda incidente, caso exista linearidade na equação governante e as condições do problema.

A equação de Laplace, governante de um problema de escoamento potencial, é uma equação diferencial parcial linear, que pode ter soluções únicas devido à sua linearidade (ausência do produto de incógnitas). Para resolver a equação de Laplace, para a função potencial no domínio da frequência  $\varphi$ , as condições de contorno para a interação onda-estrutura devem ser aplicadas. A seguir, são mencionadas as mais relevantes:

- *Condição de contorno de não penetração na superfície do corpo:*

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} - \vec{V} \cdot \vec{n} = 0, \text{ na superfície do corpo } S_b \quad (3)$$

onde  $\vec{V}$  corresponde ao vetor velocidade do movimento do corpo,  $\vec{n}$  o vetor unitário normal à superfície do corpo, o qual aponta para longe do fluido. Em outras palavras, esta condição de contorno na superfície do corpo significa, simplesmente, que a velocidade normal da estrutura é igual à velocidade normal do fluido adjacente.

- *Condição no fundo do volume de água (sem penetração no fundo do volume de água):*

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \text{ no fundo do volume de água, } z = -H \quad (4)$$

sendo H a profundidade da água.

- *Condição de contorno da superfície livre linearizada*

$$\frac{\partial \varphi}{\partial z} - \frac{\omega^2}{g} \varphi = 0, \text{ em } z = 0 \quad (5)$$

onde g é a aceleração gravitacional.

Assim pode-se observar que a equação que governa a dinâmica do problema (equação de Laplace) e as condições de contorno correspondentes são todas lineares. Desta maneira, a função potencial pode ser resolvida empregando o método de superposição. Assim, a função potencial no domínio da frequência (ou simplesmente definida como função potencial) pode ser resolvida, sem necessidade de considerar o fator tempo.

### 2.1.2 Decomposição da função potencial

Considerando o princípio da superposição, a função potencial para as interações de ondas com uma estrutura pode ser decomposta em duas funções potenciais: função potencial de radiação

de onda  $\varphi_R$ , e função potencial de difração de onda  $\varphi_D$ . A função potencial total é dada como (WAMIT, 2023):

$$\varphi = \varphi_R + \varphi_D \quad (6)$$

- *Problema de radiação*

O problema de radiação pode ser entendido da seguinte maneira: o movimento forçado da estrutura ou o movimento da estrutura devido à excitação das ondas pode gerar ondas, as quais irradiariam para longe da estrutura. Considerando o movimento em seis graus de liberdade de um corpo rígido, as funções do potencial de radiação incluem todos os modos de movimento da estrutura na superfície da água. Assim, a função do potencial de radiação pode ser expressa como uma soma de seis potenciais individuais  $\varphi_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 6$ ), como segue:

$$\varphi_R = i\omega \sum_{j=1}^6 \xi_j \varphi_j \quad (7)$$

A equação anterior segue o princípio da superposição, pois as funções do potencial de radiação são todas proporcionais à amplitude do movimento,  $\xi_j$ . O potencial de velocidade de radiação individual ( $\varphi_j$ ) pode ser entendido como a função potencial de um movimento de amplitude unitária do  $j$ -ésimo modo. Por outro lado, o fator  $i\omega$ , na expressão da função do potencial de radiação, é incluído para simplificar a condição de contorno da superfície, como segue:

$$\frac{\partial \varphi_j}{\partial n} = n_j, \text{ na superfície do corpo } S_b \quad (8)$$

onde  $n_j$  é o vetor unitário correspondente ao movimento estrutural do  $j$ -ésimo modo de movimento. Considerando o princípio da superposição, a função potencial individual  $\varphi_j$  satisfaria a equação de Laplace, a condição de contorno no fundo e a condição da superfície livre.

- *Problema de difração*

O problema de difração pode ser entendido como segue: quando a estrutura está estacionária e devido à existência da estrutura na água, a onda que chega seria difratada pela estrutura. Portanto, a função potencial total para o problema de difração,  $\varphi_D$ , pode ser expressa como:

$$\varphi_D = \varphi_0 + \varphi_7 \quad (9)$$

onde  $\varphi_0$  é a função do potencial de velocidade da onda que incide com a estrutura, que é dada se a amplitude e a frequência da onda forem conhecidas, e  $\varphi_7$  é a função potencial da onda difratada.

Com base no princípio da superposição, a função potencial de velocidade de difração  $\varphi_D$  satisfaria a equação de Laplace, a condição de contorno no fundo, e a condição de contorno na superfície livre como segue:

$$\frac{\partial \varphi_D}{\partial n} = 0, \text{ na superfície do corpo } S_b \quad (10)$$

ou

$$\frac{\partial \varphi_7}{\partial n} = -\frac{\partial \varphi_0}{\partial n}, \text{ na superfície do corpo } S_b \quad (11)$$

- *Função potencial da onda incidente*

A função do potencial de velocidade da onda que incide com o corpo é especificada pela amplitude da onda ( $A$ ) e pela sua frequência ( $\omega$ ). Em águas profundas, o potencial de velocidade da onda incidente é dado como segue:

$$\varphi_0 = \frac{igA}{\omega} e^{Kz} e^{-iKx \cos \beta - iKy \sin \beta} \quad (12)$$

onde  $K = \omega^2/g$  é o número da onda em águas profundas e  $\beta$  é o ângulo da onda incidente.

Em profundidades de água finitas, o potencial de velocidade da onda que se aproxima é expresso como segue:

$$\varphi_0 = \frac{igA \cosh k(z + H)}{\omega \cosh kH} e^{-iKx \cos \beta - iKy \sin \beta} \quad (13)$$

onde  $H$  é a profundidade da água, e o número de onda correspondente na profundidade finita da água ( $k$ ) pode ser obtido usando o método de iteração, como a raiz real da relação de dispersão (SHENG et al., 2022):

$$\frac{\omega^2}{g} = k \tanh(kH) \quad (14)$$

Os métodos dos painéis baseados na teoria do escoamento potencial utilizam técnicas de equações integrais de contorno para as funções do potencial de radiação, para resolver os problemas hidrodinâmicos do movimento de estruturas. Detalhes destas equações podem ser encontradas na seção 2.3 do trabalho de Sheng et al. (2022) e no manual de Wamit (2023).

### 2.1.3 Forças hidrodinâmicas

Considerando a equação integral de contorno para as funções do potencial de radiação,  $\varphi_j$  ( $j = 1, 2, \dots, 6$ ) e a função do potencial de difração,  $\varphi_j$ , as forças hidrodinâmicas correspondentes podem ser calculadas. Seguindo Wamit (2023), as forças de radiação podem ser expressas em termos de massa adicional,  $A_{jk}$  ( $j, k = 1, 2, \dots, 6$ ), e o coeficientes de amortecimento,  $B_{jk}$  ( $j, k = 1, 2, \dots, 6$ ). Esses termos também podem são chamados coeficientes hidromecânicos (JOURNÉE; MASSIE, 2001) e podem ser calculados como segue:

$$A_{jk} = -\frac{i}{\omega} B_{jk} = \rho \iint_{S_b} n_j \varphi_k dS \quad (15)$$

A massa adicional corresponde a parte real da integral mostrada na equação anterior, enquanto o coeficiente de amortecimento de radiação corresponde à parte imaginária. As forças de excitação causadas pelas ondas podem ser calculadas diretamente a partir da função potencial de difração,  $\varphi_D$ , como segue:

$$F_j = -i\omega\rho \iint_{S_b} n_j \varphi_D dS \quad (16)$$

De maneira alternativa, a equação anterior pode ser rescrita considerando a relação Haskind, que é explicada em Wamit (2023) e Newman (2018):

$$F_j = -i\omega\rho \iint_{S_b} \left( n_j \varphi_0 - \varphi_j \frac{\partial \varphi_0}{\partial n} \right) dS \quad (17)$$

#### 2.1.4 Equação de movimento da estrutura flutuante

O movimento da estrutura devido à excitação causada pelas ondas é modelado pela segunda lei de movimento de Newton. Considerando as hipóteses simplificadoras de um sistema dinâmico linear, o movimento da estrutura pode ser determinado no domínio da frequência por meio dos métodos dos painéis. Seguindo Wamit (2023), a equação dinâmica, no domínio da frequência, dos movimentos dos 6 graus de liberdade (DOFs) de uma estrutura rígida, é dada na forma de um sistema massa-mola-amortecedor, como representado pela seguinte equação:

$$\sum_{k=1}^6 \left\{ -\omega^2 [M_{jk} + A_{jk}(\omega)] + i\omega B_{jk}(\omega) + C_{jk} \right\} \xi_k(\omega) = F_j(\omega) \quad (18)$$

onde  $M_{jk}$  e  $C_{jk}$  representam a matriz da massa-inércia, e a matriz dos coeficientes de restauração da estrutura, respectivamente. Os cálculos detalhados destes parâmetros podem ser encontrados em Wamit (2023) e nos manuais do Ansys Aqwa<sup>®</sup> (ANSYS, 2013). Por outro lado,  $A_{jk}(\omega)$  e  $B_{jk}(\omega)$ , com  $j, k = 1, 2, \dots, 6$ , representam as matrizes dos coeficientes de massa adicional e de amortecimento de radiação, respectivamente. A variável  $F_j(\omega)$ , para  $j = 1, 2, \dots, 6$ , corresponde à amplitude complexa da força (ou momento), dependente da frequência da excitação da onda. Todos estes parâmetros podem ser calculados utilizando os métodos dos painéis.

Finalmente,  $\xi_k(\omega)$ , para  $k = 1, 2, \dots, 6$ , representa os movimentos dos seis graus de liberdade (6-DOF) da estrutura: avanço (*surge*), deriva (*sway*), arfagem (*heave*), balanço (*roll*), caturro (*pitch*), e guinada (*yaw*), respectivamente. Estas são as amplitudes complexas de movimentos dependentes da frequência, que são resolvidas a partir da equação dinâmica no

domínio da frequência (equação anterior). Em diversas aplicações de engenharia, como no presente trabalho, o operador de amplitude de resposta (*RAO – Response Amplitude Operator*) é a expressão que mais costuma ser usada. O RAO é definido como segue:

$$X_k = \frac{\xi_k}{A} \quad (19)$$

ou seja, a amplitude do movimento é expressa por amplitude unitária de onda. Para uma onda de amplitude unitária, o próprio deslocamento ( $\xi_k$ ) dependente da frequência é o próprio RAO. Nas análises e plotagens convencionais, o módulo do RAO é utilizado para avaliar a resposta real do movimento estrutural em ondas, a qual é calculada como segue:

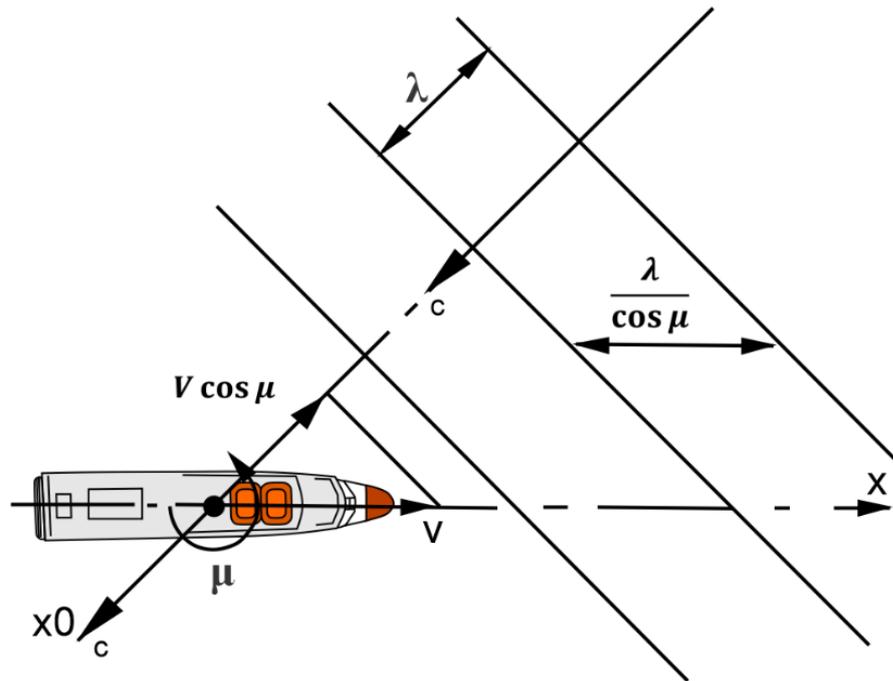
$$|X_k| = \frac{|\xi_k|}{A} \quad (20)$$

## 2.2 Frequência de encontro

Quando uma embarcação se movimenta em ondas, é importante conhecer o período ou a frequência de encontro com elas, pois é essa frequência com a qual a embarcação tenderá a oscilar, no sistema referencial considerado na análise. Journée e Massie (2001) descrevem os detalhes desse conteúdo, o qual é resumido a seguir.

A Figura 2 ilustra uma embarcação se movimentando com velocidade de avanço ( $V$ ), mantendo um ângulo ( $\mu$ ) com relação às linhas contínuas que definem o comprimento de ondas regulares incidentes. O parâmetro  $\lambda$  define o comprimento de cada onda regular. Nota-se que o ângulo ( $\mu$ ) é medido a partir da popa, correspondendo a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ , e  $180^\circ$  se as ondas incidem pela popa, través, e proa, respectivamente.

Figura 2. Ângulo de incidência das ondas com a embarcação.



Fonte: Adaptado de Journée e Massie (2001).

O período de encontro, ou a duração da oscilação que a embarcação vai apresentar,  $T_e$ , pode ser determinado como segue.

$$T_e = \frac{\lambda}{c + V \cos(\mu - \pi)} = \frac{\lambda}{c - V \cos \mu} \quad (21)$$

sendo  $c$  a celeridade do trem de ondas, expresso como:

$$c = \frac{\omega}{k} \quad (22)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular da onda (em rad/s) e  $k$  é o número de onda:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (23)$$

De maneira alternativa, a frequência de encontro  $\omega_e$  pode ser expressa como segue:

$$\omega_e = \frac{2\pi}{T_e} = \frac{2\pi(c - V \cos \mu)}{\lambda} = k(c - V \cos \mu) \quad (24)$$

Substituindo  $c = \omega/k$ , podemos obter a relação entre a frequência angular de encontro ( $\omega_e$ ) e a frequência angular da onda ( $\omega$ ) como segue:

$$\omega_e = \omega - kV \cos \mu \quad (25)$$

A equação anterior aplica quando a embarcação possui velocidade de avanço. Sem velocidade de avanço ( $V = 0$ ), ou em mar de través ( $\mu = 90^\circ$  ou  $\mu = 270^\circ$ ), ambas as frequências são iguais:

$$\omega_e = \omega \quad (26)$$

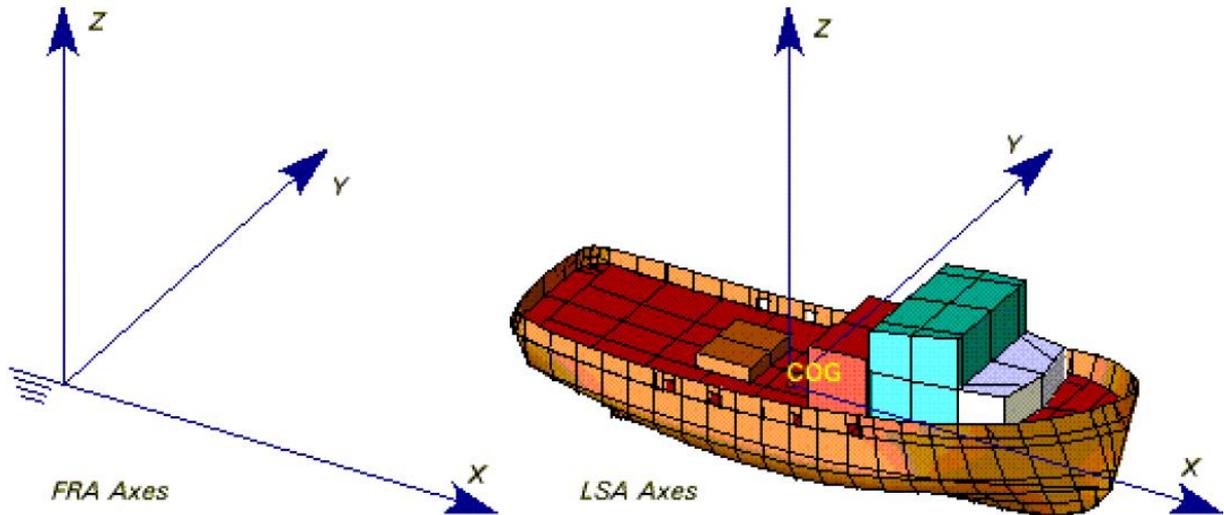
### 2.3 Sistemas coordenados no software Ansys Aqwa®

No uso do software Ansys Aqwa®, deverá ser considerada a posição da geometria da embarcação, seguindo o sistema de eixos requerido pelo software. Esse sistema será considerado na indicação dos dados de entrada e na interpretação dos resultados (ANSYS, 2024a). Dois conjuntos de eixos são usados no software Ansys Aqwa®, como mostrado na Figura 3, sendo o FRA (eixos de referência fixos – *fixed reference axes*) e o LSA (eixos do sistema local – *local system axes*).

Os eixos de referência fixos (FRA) são descritos por X, Y, e Z na superfície livre, com Z apontando verticalmente. Isso também é conhecido como o sistema de eixos global (*global axis system*). Este sistema tem sua origem na superfície média da água com o eixo Z apontando para cima, X e Y na superfície média da água. A superfície média da água está em  $Z = 0$ . Este sistema de eixos não se moverá em nenhuma fase da análise no software.

Por outro lado, os eixos do sistema local (LSA) são descritos por x, y, e z, tendo a sua origem no centro de gravidade do corpo. Os eixos do sistema local (LSA) tem sua origem no CoG (centro de gravidade) da embarcação, com os eixos X, Y e Z paralelos ao sistema de eixos FRA quando a embarcação está em sua posição de definição inicial. Em uma modelagem convencional, o X aponta ao longo do comprimento do navio, Y ao longo da boca para bombordo e Z na direção do produto vetorial de X e Y. O sistema de eixos LSA se move com a embarcação.

Figura 3. Sistemas de eixos coordenados utilizados no software Ansys Aqwa®.



Fonte: Ansys Aqwa® Reference Manual (ANSYS, 2024a).

## 2.4 Direção de incidência de ondas e correnteza

O software Ansys Aqwa® considera uma única convenção de sinais com os eixos descritos na subseção anterior. A direção da onda é definida como o ângulo do eixo X global positivo até a direção na qual a onda se propaga, medido no sentido anti-horário quando visto de cima. Portanto, as ondas que viajam ao longo do eixo X (de -X a +X) têm uma direção de onda de 0 graus, e as ondas que viajam ao longo do eixo Y (de -Y a +Y) têm uma direção de onda de 90 graus. Essa convenção de ângulos também é seguida para a propagação de correntezas com relação à orientação inicial da embarcação.

As forças e os momentos são positivos na mesma direção dos movimentos correspondentes. Por outro lado, a elevação da onda incidente  $h$  é medida positiva para cima:

$$h = a \cos(-\omega t + kx \cos(\theta) + ky \sin(\theta)) \quad (27)$$

onde  $a$  é a amplitude da onda,  $\omega$  a frequência angular da onda,  $t$  o tempo,  $k$  o número de onda,  $(x, y)$  a posição no sistema coordenado FRA no qual a altura da onda é dada, e  $\theta$  a direção de propagação da onda.

A fase  $\varepsilon$  de uma quantidade  $Q$  com amplitude  $Q_0$  é definida pela seguinte equação:

$$Q = Q_0 \cos(-\omega t + \varepsilon) \quad (28)$$

onde  $t$  é o tempo decorrido desde que a crista da onda passou sobre a origem do sistema FRA, e  $Q$  pode representar forças, momentos, RAOs, posições, velocidades ou acelerações.

## 2.5 Número de Froude

O número de Froude pode ser considerado como um número adimensional que relaciona os efeitos das forças inerciais de um corpo em movimento com relação às forças gravitacionais na terra. Na Engenharia Naval, esse número tem aplicabilidade em análises que envolvem o movimento de embarcações na superfície livre da água, como análises de resistência ao avanço e movimentos, incluindo movimentos devido à excitação por ondas. O número de Froude, considerando o comprimento da embarcação,  $L$ , como parâmetro representativo, é expresso como segue (FALTINSEN, 2005; MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017):

$$F_n = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (29)$$

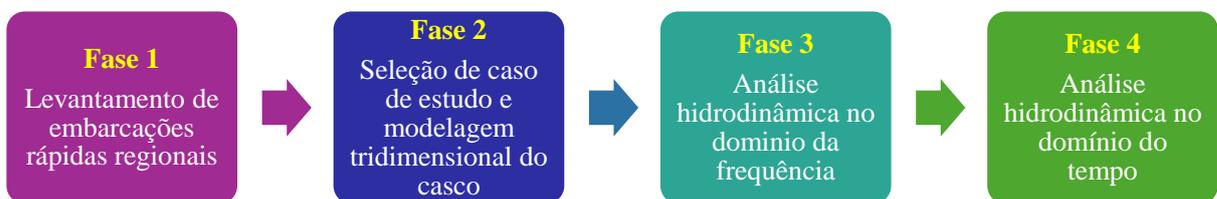
sendo  $V$  a velocidade de avanço da embarcação (em m/s) e  $g$  a aceleração devida à gravidade (em  $m/s^2$ ). Cabe mencionar que, em aplicações onde os efeitos do fundo podem influenciar o movimento da embarcação, é necessário avaliar o número de Froude de profundidade, substituindo a variável  $L$  pela profundidade característica.

Segundo a literatura de Hidrodinâmica (FALTINSEN, 2005; MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017), o número de Froude permite ter uma ideia do regime de operação de uma embarcação. Os regimes mais conhecidos são definidos por faixas aproximadas de  $F_n$  como: deslocamento ( $0 < F_n < 0,5$ ); semi-deslocamento (muitas vezes chamado semi-planeio,  $0,5 < F_n < 1,0$ ); e planeio ( $F_n > 1,0$ ). Segundo Faltinsen (2005), uma embarcação pode ser considerada rápida se  $F_n > 0,4$ .

### 3 METODOLOGIA

A metodologia seguida pode ser definida por quatro fases principais, como mostrado na Figura 4. Essas fases incluem o levantamento de embarcações rápidas regionais (Fase 1); a seleção de uma dessas embarcações para ser considerada como caso de estudo, sendo modelada tridimensionalmente (Fase 2); o estudo do seu comportamento dinâmico no domínio da frequência (Fase 3); e a análise no domínio do tempo (Fase 4). Cada uma das fases é descrita nas seguintes subseções.

Figura 4. Fases principais do estudo.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 5 resume algumas das atividades feitas nos softwares utilizados nas Fases 2, 3 e 4, as quais serão detalhadas nas subseções 3.2, 3.3 e 3.4, respectivamente. Basicamente, será utilizado o software Rhinoceros3D®, para realizar a modelagem da embarcação, a qual posteriormente será importada para uso no software Ansys Aqwa (módulos *Hydrodynamic Diffraction* e *Response*).

Figura 5. Passos importantes realizados na modelagem com os softwares Rhinoceros®, e Ansys Aqwa® (*Hydrodynamic diffraction* e *Hydrodynamic Response*).

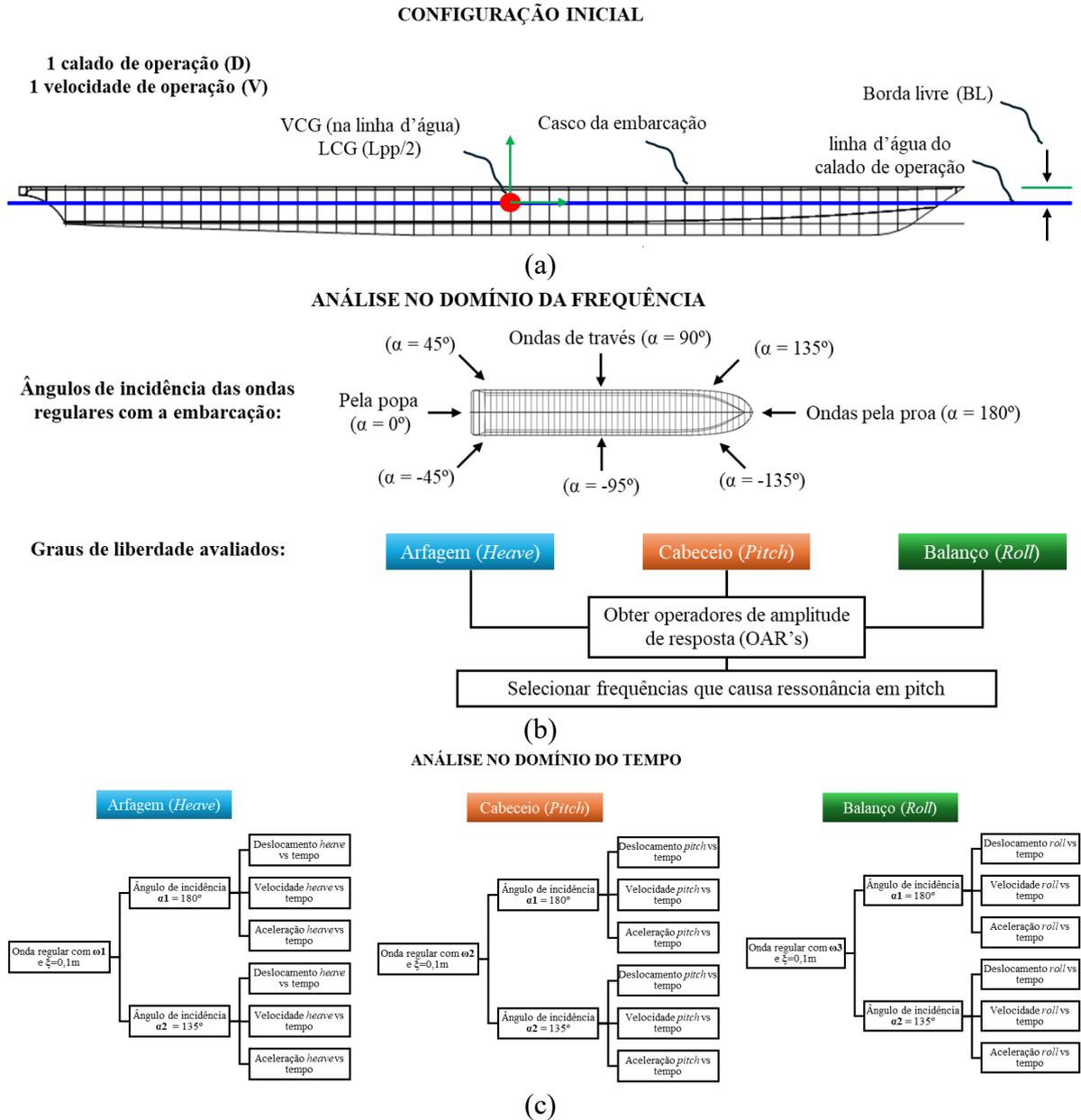


Fonte: O autor.

A Figura 6 mostra detalhes da configuração inicial da análise (Figura 6a), das informações relevantes consideradas no estudo no domínio da frequência (Figura 6b) e dos

casos avaliados no domínio do tempo (Figura 6c). Os dados mostrados serão descritos nas seguintes subsecções.

**Figura 6. Definição de parâmetros e casos de estudo considerados no presente trabalho. (a) Configuração inicial. (b) Análise no domínio da frequência com o software *Hydrodynamic Diffraction*. (c) Análise no domínio do tempo com o software *Hydrodynamic Response*.**



Fonte: Elaboração própria.

### 3.1 Fase 1: Levantamento de embarcações

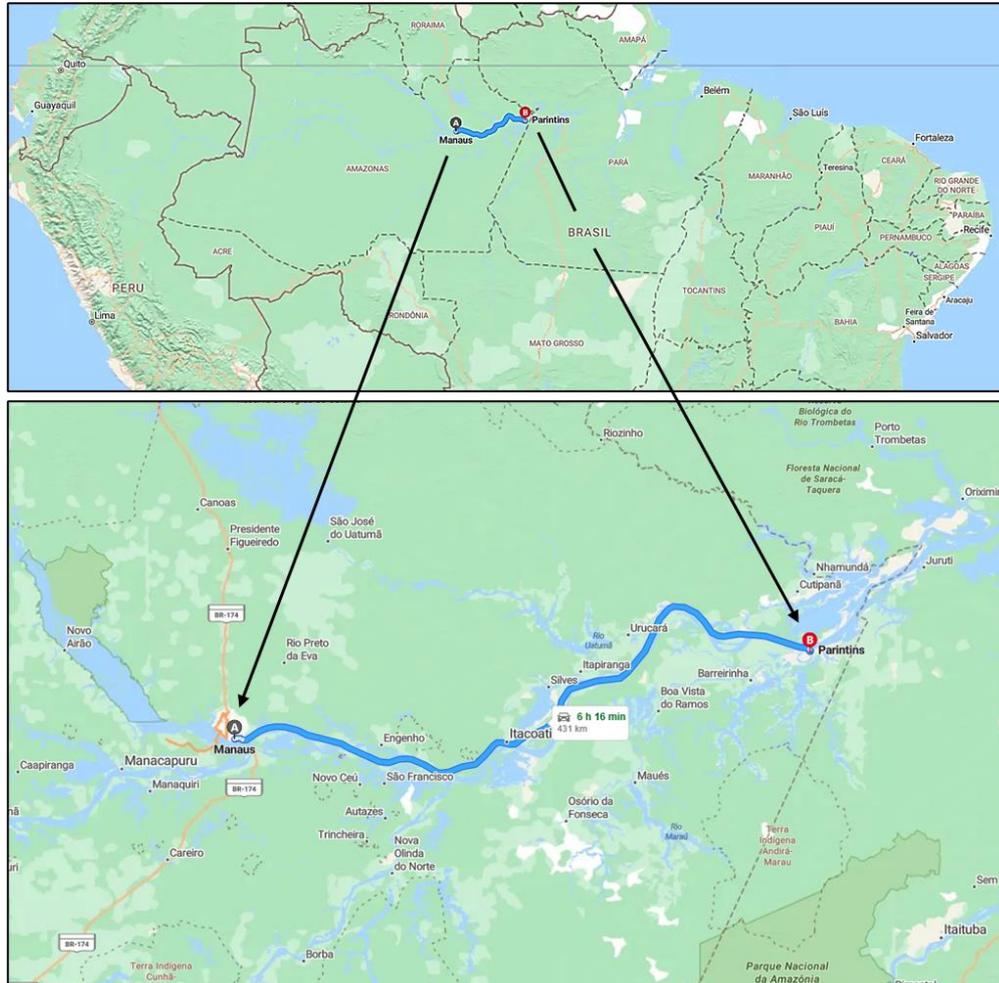
Na Fase 1, será realizado um levantamento fotográfico de embarcações regionais que tenham características de rapidez, por meio de visitas de campo. O levantamento será feito utilizando um drone e uma câmera fotográfica. O local de estudo será a cidade de Parintins, no Estado do

Amazonas, por meio de visitas de campo feitas na beira dos rios e alguns portos da cidade. Esta fase tem como objetivo documentar, qualitativamente, os tipos de embarcações mais comuns que podem ser encontradas nessa cidade, fazendo um levantamento apenas fotográfico. Foram feitas algumas visitas à cidade para fazer o levantamento. Em uma delas, foram capturadas imagens com o drone em locais próximos aos principais portos da cidade. Em outra ocasião, foram feitos percursos em uma lancha tipo voadeira para obter imagens das embarcações utilizando uma câmera. Os trabalhos de campo foram feitos durante a tarde, nos dias 14/12/2023, 01/02/2024, e 18/05/2024.

### **3.2 Fase 2: Seleção e modelagem 3D do caso de estudo**

A Fase 2 consiste em selecionar uma embarcação de alta velocidade que navegue no local de estudo (Parintins – AM) para realizar o estudo do seu comportamento hidrodinâmico. Cabe mencionar que Parintins é a segunda cidade mais populosa do Estado do Amazonas com uma população residente de 96.372 habitantes, segundo dados atuais disponíveis no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024). Parintins tem os seus limites com os municípios de Barreirinha, Nhamundá, Boa Vista do Ramos e o Estado do Pará, possuindo uma área territorial de 5.956,047 km<sup>2</sup> e um índice de desenvolvimento humano municipal de 0,658 (IBGE, 2024). A distância entre Parintins e a capital do Estado do Amazonas, Manaus, é de aproximadamente 431 km conforme o mapa da Figura 7.

**Figura 7. Mapa da rota Manaus – Parintins, no Estado do Amazonas. Imagem obtida de OpenStreetMap® sob a licença sob a licença Creative Commons CC BY-SA 2.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>).**

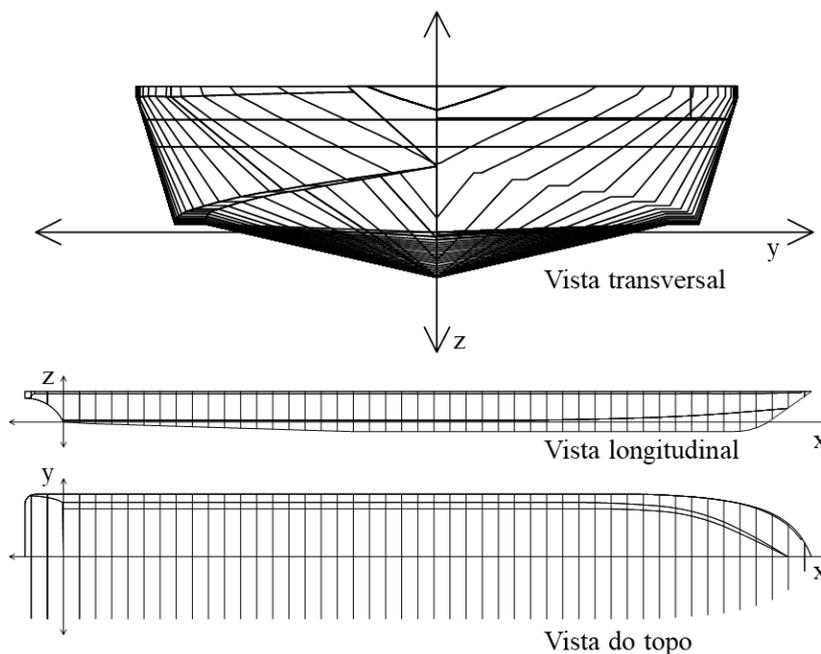


Fonte: OpenStreetMap, 2024.

Foi selecionada uma embarcação do tipo expresso que tem como rotas principais a cidade de Manaus – Parintins e Parintins – Manaus (Figura 7), por meio da navegação pelo Rio Amazonas. A embarcação é a mesma considerada no trabalho de da Silva (2024), que descreve as características principais e apresentou a modelagem completa da embarcação. No presente estudo, a embarcação considerada possui algumas simplificações com relação ao casco original, devido à necessidade de utilizar superfícies simplificadas no software e de respeitar possíveis direitos do projeto da embarcação.

Na fase da modelagem do casco foi gerada uma superfície do casco de maneira tridimensional. Para isto, foi utilizado desenho assistido por computador para obter a superfície do casco da embarcação como uma superfície unida, utilizando o software Rhinoceros3D® versão 8. Uma representação simplificada dos planos de linha obtidos para gerar a superfície 3D é mostrada na Figura 8.

**Figura 8. Plano de linhas simplificado da embarcação tipo expresso considerada como caso de estudo (vistas transversal, longitudinal e topo), incluindo o sistema de coordenadas considerado no estudo.**



Fonte: Elaboração própria.

Para fins do presente estudo foi considerada uma condição de carregamento, ou seja, um calado de operação de 0,4 m. As características da embarcação consideradas são listadas na Tabela 1. Uma análise simplificada de parâmetros hidrostáticos, para a condição de calado considerada, é incluída no Apêndice A.

**Tabela 1. Características principais da embarcação consideradas no presente estudo.**

<b>Característica</b>	<b>Valor</b>
Comprimento total (L)	24,40 m
Comprimento entre perpendiculares (Lpp)	22,00 m
Boca máxima (B)	3,90 m
Altura da quilha na proa	0,75 m
Pontal do casco na proa	1,50 m
Altura do convês	1,25 m
Calado (considerado neste estudo como condição intermediária entre casco leve e carregado)	0,40 m
Velocidade média (medida neste estudo com aplicativo GPS a bordo da embarcação)	12,50 m/s
Posição vertical do centro de gravidade (assumido para fins do estudo)	Na linha d'água (z = 0,40 m)
Posição longitudinal do centro de gravidade (no Ansys)	(x = Lpp/2)

Fonte: Elaboração própria.

Para obter a velocidade de operação da embarcação, foi considerada a velocidade média obtida durante uma viagem que foi realizada na embarcação considerada como caso de estudo.

A velocidade foi medida por meio de um aplicativo de celular chamado Speedometer, que se baseia no uso de sistemas de posicionamento global (GPS) para medir dados de movimento. Esse aplicativo mostrou proporcionar medições adequadas de velocidade de uma embarcação do tipo rabeta no trabalho de Bitencourt (2024), pois nesse estudo, os resultados foram comparados com medições obtidas através da análise de imagens obtidas com drone, proporcionando valores bastante próximos.

A Figura 9 mostra uma imagem do aplicativo no qual é descrita a velocidade média durante o percurso, que foi de 46 km/h, que equivale a 12,77 m/s ou 24,83 nós. Para fins práticos, foi considerada uma velocidade de 12,5 m/s (Tabela 1), para realizar os estudos de análise no domínio do tempo do presente trabalho.

**Figura 9. Velocidade média da embarcação obtida no aplicativo Speedometer.**



Fonte: Elaboração própria.

### 3.3 Fase 3: Análise da dinâmica da embarcação no domínio da frequência

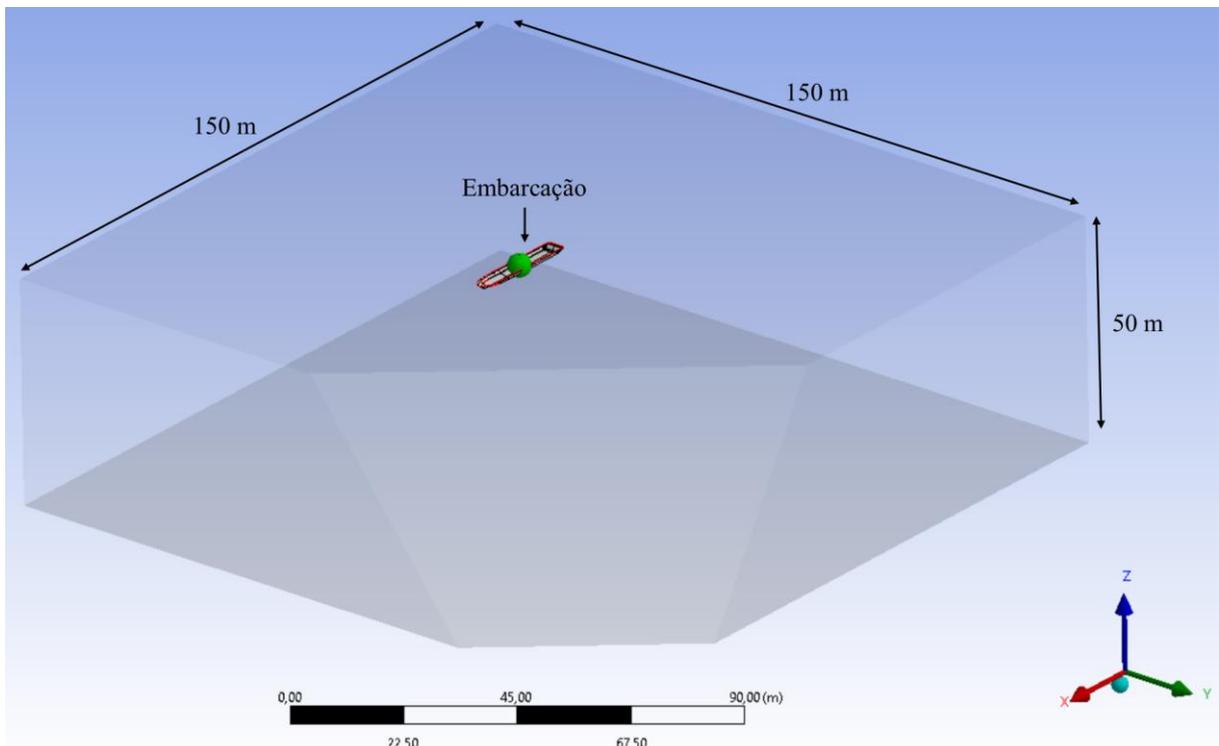
Depois de ser modelada a superfície do casco da embarcação (Fase 2), foi utilizado o software Ansys Aqwa<sup>®</sup> para avaliar a sua resposta nos domínios da frequência (Fase 3) e do tempo (Fase 4), seguindo o procedimento descrito na Figura 5. O Ansys Aqwa<sup>®</sup> possui dois módulos para avaliar movimentos de embarcações no domínio da frequência e do tempo: Hydrodynamic Diffraction e Hydrodynamic Response, respectivamente.

No Hydrodynamic Diffraction foi pesquisada a resposta (movimento) da embarcação quando submetido à interação de ondas regulares, incidindo por diferentes direções, considerando a situação de flutuação livre (sem velocidade de avanço). O calado utilizado foi de 0,4 m, correspondente a um calado intermediário entre a condição de peso leve e carga máxima permissível. O centro de gravidade foi considerado na metade da embarcação (LCG) e na posição da linha d'água (VCG). Os movimentos da embarcação avaliados foram o movimento de arfagem (*heave*), caturro (*pitch*) e balanço (*roll*). Os momentos de inércia

principais  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$ , e  $I_{zz}$ , necessários para os cálculos dos movimentos angulares foram aproximados de maneira empírica, respectivamente, considerando os raios de giração como  $k_{xx} = 0,3B$ ,  $k_{yy} = 0,22L$ , e  $k_{zz} = 0,22L$  (sendo  $B$  a boca e  $L$  o comprimento da embarcação), seguindo recomendações da literatura (JOURNÉE; MASSIE, 2001). Para considerar o centro de gravidade, foi aplicado um “ponto de massa” na embarcação usando as ferramentas do software Hydrodynamic Diffraction, considerando os valores descritos.

A configuração do domínio de análise considerou uma profundidade de 50 m. Esse dado foi selecionado com base na profundidade do Rio Amazonas reportada na literatura (BNCAMAZONAS, 2021), onde se descreve uma profundidade média de 50 m, podendo ter regiões, no oeste do Estado do Pará, maiores a 100 m de profundidade. A largura do Rio Amazonas pode se estender a vários quilômetros (PORTALAMAZONIA, 2021), porém, na presente abordagem, foram desconsiderados os efeitos de águas restritas. Em outras palavras, a boca e profundidade do domínio computacional não afetam o escoamento. A configuração do domínio computacional é mostrada na Figura 10.

**Figura 10. Domínio computacional no software *Hydrodynamic Diffraction*, incluindo a embarcação com o calado correspondente.**



Fonte: Ansys R1 2024.

Uma vez definidos os parâmetros de massa e inércia e a configuração do domínio computacional, o passo seguinte consistiu em selecionar a malha para a análise hidrodinâmica.

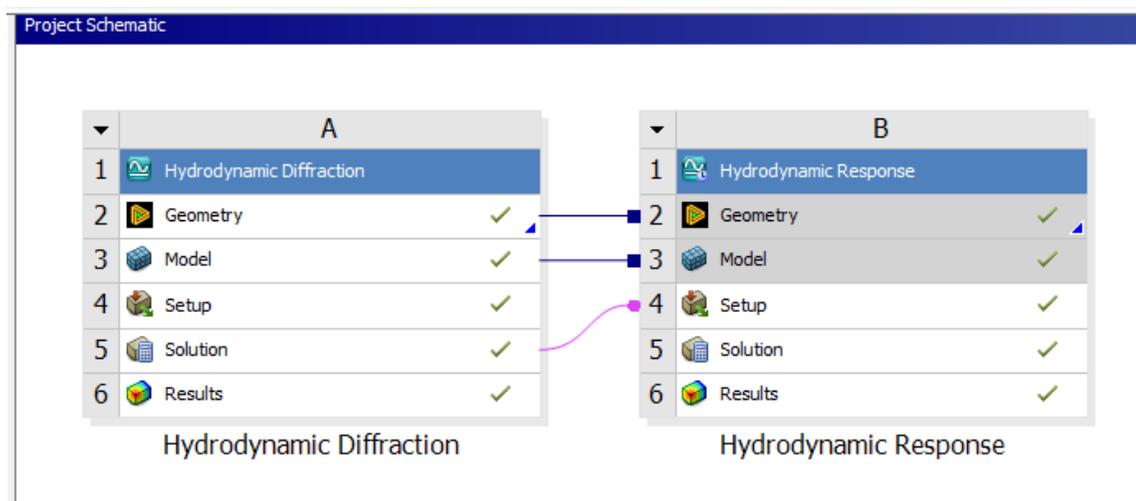
Foi considerada uma malha uniforme, criada automaticamente pelo software. Para selecionar um tamanho de malha adequado, foi feita uma análise comparativa com diferentes tamanhos. Os resultados da análise são mostrados na subseção 4.3.

Com todos os parâmetros configurados, o solucionador do software foi iniciado, visando a obtenção dos operadores de amplitude de resposta (RAO) para diferentes frequências de encontro das ondas, e para os ângulos de incidência definidos anteriormente (Figura 6). Os operadores de amplitude de resposta avaliados no domínio da frequência correspondem aos de *heave*, *pitch* e *roll*.

### 3.4 Fase 4: Dinâmica da embarcação no domínio do tempo

Nesta fase foi avaliada a resposta da embarcação (deslocamento, velocidade e aceleração) no domínio do tempo, quando submetida à interação de uma onda regular com alguns ângulos de encontro. A resposta no tempo se baseia operadores de amplitude de resposta obtidos na Fase 3. Ou seja, para implementar o módulo *Hydrodynamic Response*, é necessário ter completado as análises no *Hydrodynamic Diffraction*, como mostrado na Figura 11.

Figura 11. Configuração dos módulos *Hydrodynamic Diffraction* e *Hydrodynamic Response* no Ansys Aqwa®.



Fonte: Ansys 2024 R1.

É importante esclarecer que os métodos dos painéis são aplicáveis para embarcações ou estruturas navais sem velocidades consideráveis de avanço. A análise feita no *Hydrodynamic Response* tem o propósito de avaliar o seu uso para estudar a resposta da embarcação tipo expresso no domínio do tempo. Para isto, tentou-se verificar se é possível assumir o efeito da velocidade de avanço assumindo a embarcação restrita, aplicando uma correnteza incidindo

com a mesma velocidade que teria a embarcação na realidade (12,5 m/s; Tabela 1). Dito de outra maneira, para assemelhar a velocidade de avanço da embarcação, foi restrito o movimento de avanço da embarcação na direção longitudinal (movimento de surge), considerando uma correnteza com velocidade constante de 12,5 m/s incidindo pela proa. Na análise, foi considerada uma onda regular com amplitude pequena (0,1 m), na frequência que causou o maior deslocamento em *pitch* (ou seja: a frequência de ressonância em *pitch*). Tendo em vista a falta de dados com relação à amplitude das ondas nos rios da Amazônia, a intenção foi avaliar o efeito da frequência das ondas nos movimentos. Foram avaliadas duas condições de incidência da onda com a embarcação (135° e 180°), como descrito na subseção 4.5. As respostas no tempo foram comparadas com relação ao deslocamento, velocidade e aceleração da embarcação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Resultados do levantamento de embarcações regionais rápidas em Parintins – AM

O levantamento fotográfico de embarcações regionais foi realizado através de visitas de campo a marinas e terminais portuários no município de Parintins – AM. Foram obtidas fotografias de embarcações representativas utilizando um drone e uma câmera abordo de uma embarcação tipo voadeira, como descrito na Metodologia. O levantamento feito com o drone foi realizado na época da estiagem do Rio Amazonas no dia 14/12/2023, enquanto o levantamento feito com a câmera foi feito nos dias 01/02/2024 (ainda na época de seca) e 18/05/2024 (na época da cheia do rio). Todos os levantamentos foram feitos na parte da tarde (entre 12:00 e 18:00 horas). As imagens obtidas pelo drone foram adquiridas perto da beira do rio Amazonas, próximo de alguns portos da cidade. Na aquisição de imagens com a câmera, foram feitas visitas a marinas e portos próximos, usando a embarcação para visitar algumas comunidades ribeirinhas.

As seguintes subseções apresentam algumas imagens representativas das embarcações que foram avistadas durante as visitas de campo. Em algumas imagens, pode-se visualizar a movimentação de embarcações em viagens comerciais e transporte diário de moradores que usam os rios como estradas naturais na região. Dentre as embarcações que foram avistadas e capturadas em imagens, são mostradas embarcações regionais que não operam em alta velocidade para transporte de cargas e passageiros; rabetas para transporte local de moradores e ribeirinhos; voadeiras para esporte e lazer; ambulanchas para tráfego de pessoas em situações emergenciais de saúde, das comunidades rurais para municípios com estruturas mais adequadas para atendimento; e lanchas expresso para transporte intermunicipal de passageiros.

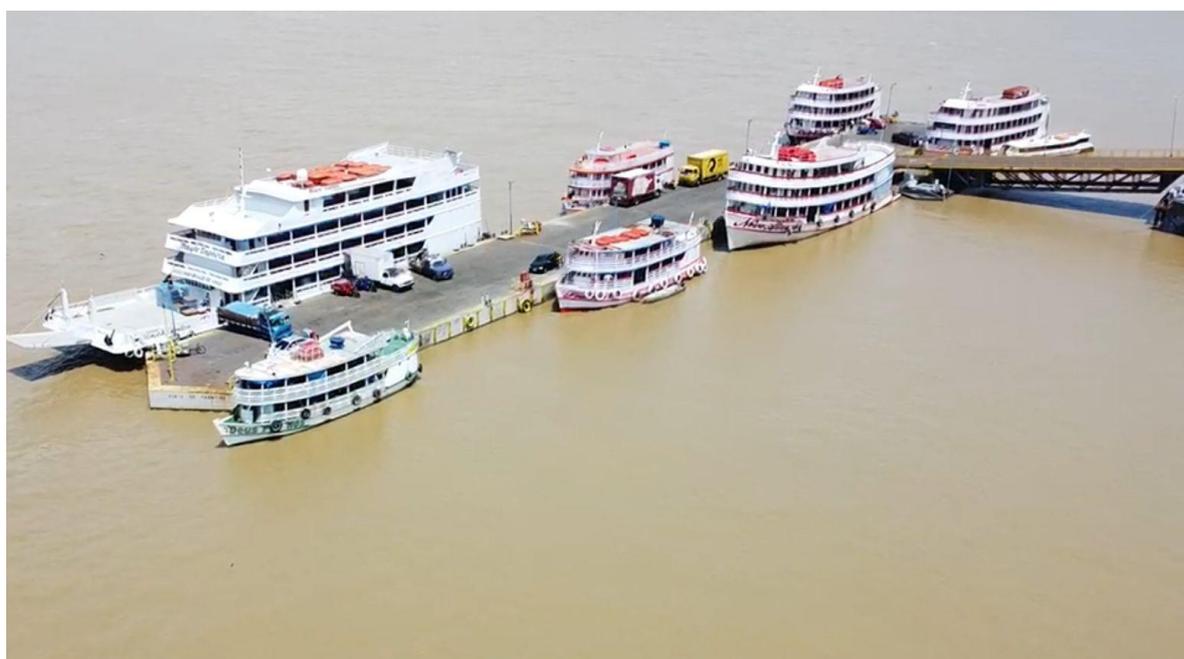
#### 4.1.1 Embarcações nos terminais portuários (levantamento feito com drone)

Assim como outras cidades do interior do Estado do Amazonas, a cidade de Parintins possui um porto principal onde as embarcações de grande porte realizam as atividades de carga e descarga de mercadorias, incluindo a abordagem de passageiros. O porto de Parintins é flutuante e articulado para permitir as atividades durante as épocas de cheia e estiagem do rio Amazonas. As Figuras 12a e 12b mostram algumas imagens obtidas pelo drone do porto principal de Parintins, onde podem ser identificadas algumas embarcações de grande porte do tipo recreio e ferryboat. Também podem ser observados alguns caminhões realizando atividades de carga e descarga de produtos comerciais. Em horários determinados, as embarcações de passageiros de

menor porte, como os expressos, se aproximam ao porto para realizar a abordagem e desembarque de passageiros. Na parte superior direita da Figura 12b pode ser visto um expresso ao lado de uma embarcação tipo recreio.

Por outro lado, a Figura 12c mostra embarcações de menor porte atracadas em um porto menor, próximo ao porto principal da cidade. Nessa imagem podem ser identificadas algumas embarcações regionais destinadas ao transporte de pessoas e cargas entre comunidade próximas à cidade, assim como à pescaria e às atividades de lazer. Detalhes de algumas embarcações nessa região são mostrados por meio de uma vista de topo obtida pelo drone (Figura 12d), onde podem ser vistas embarcações tipo recreio (direita e esquerda), três expressos de diferentes tamanhos (parte central) e algumas lanchas com motor de popa. As embarcações estão atracadas na beira do rio, onde pode ser visto o desafio que enfrentam durante a variação do nível de água em diferentes épocas do ano, enfrentando problemas de acessibilidade. As embarcações e as maneiras de atracação mostradas nas fotografias da Figura 12 podem ser representativas de outras cidades da região amazônica.

**Figura 12. Imagens aéreas obtidas por drone de alguns terminais portuários em Parintins – AM. (a) Terminal portuário principal de Parintins-AM. (b) Detalhe do terminal portuário principal de Parintins – AM. (c) Marina de barcos particular (Pontão Francesa), localizada ao lado do porto principal de Parintins – AM. (d) Vista do topo de diversas embarcações atracadas na beira do rio Amazonas em Parintins – AM. Imagens obtidas no dia 14/12/2023.**



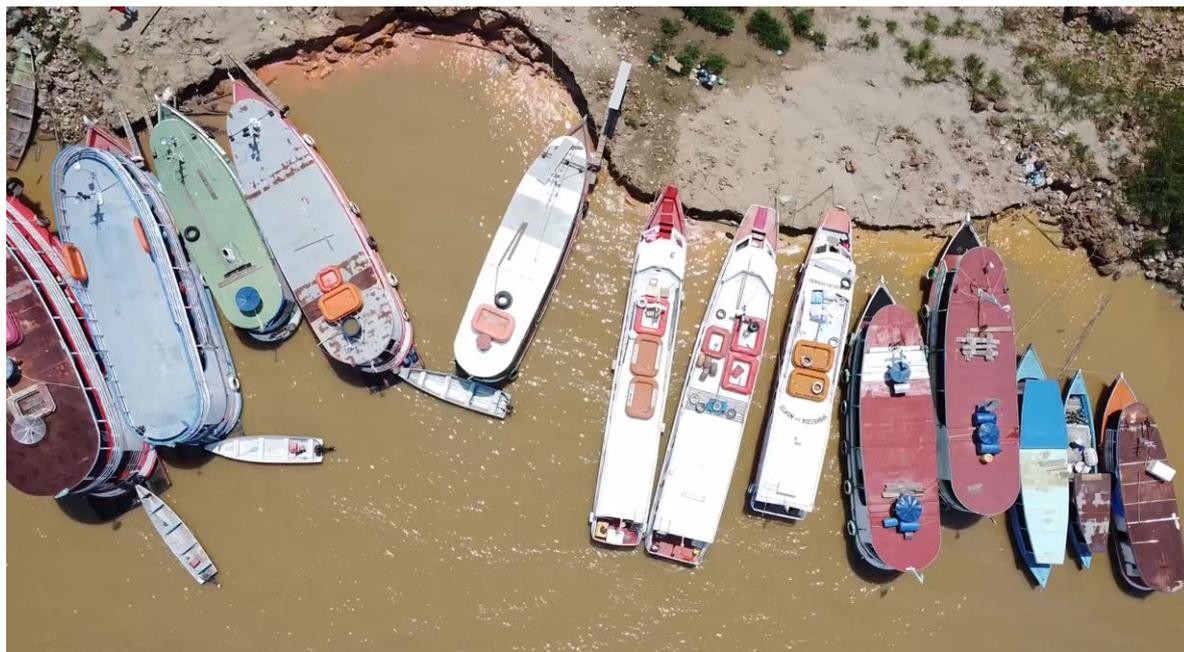
(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Imagens capturadas pelo autor.

#### 4.1.2 Algumas embarcações que não operam em alta velocidade

Antes de descrever as embarcações de alta velocidade comuns em Parintins – AM, vale ressaltar a existência de embarcações que operam em velocidades mais baixas, provavelmente no regime hidrodinâmico de deslocamento ( $0 < F_n < 0,5$ ). Tais embarcações são comuns na região amazônica pois permitem o transporte de muitas pessoas e cargas, como descrito por Fontes et al. (2023a), assim como a realização de atividades de recreação e pescaria. A Figura 13 ilustra algumas destas embarcações operando em Parintins. A Figura 13a mostra uma embarcação tipo *ferry boat* navegando no rio Amazonas. Esse tipo de embarcação costuma transportar uma grande quantidade de passageiros, cargas, e até veículos no convés principal, fazendo rotas entre os principais municípios da Amazônia brasileira. O seu casco é de aço e a sua propulsão costuma ser feita com o uso de motores internos, geralmente utilizando diesel como combustível.

A Figura 13b mostra uma embarcação de menor porte, do tipo *bajara*, atracada em uma casa ribeirinha. Esse tipo de embarcação, cujo casco costuma ser de madeira, tem como finalidade o transporte de pessoas que moram em casas ribeirinhas, transporte de cargas, e atividades de pescaria. Também são utilizadas com fins turísticos e recreacionais. Finalmente, a Figura 13c mostra outra embarcação similar à da Figura 13b, navegando no Rio Amazonas.

**Figura 13. Exemplos de embarcações regionais, capturadas em Parintins – AM, que não operam em alta velocidade. Imagens obtidas pela tarde no dia 18/05/2024. (a) Embarcação do tipo ferry boat. (b) Embarcação do tipo bajara atracada em uma casa ribeirinha. (c) Embarcação do tipo bajara navegando no Rio Amazonas**



(a)



(b)



(c)

Fonte: Imagens obtidas pelo autor.

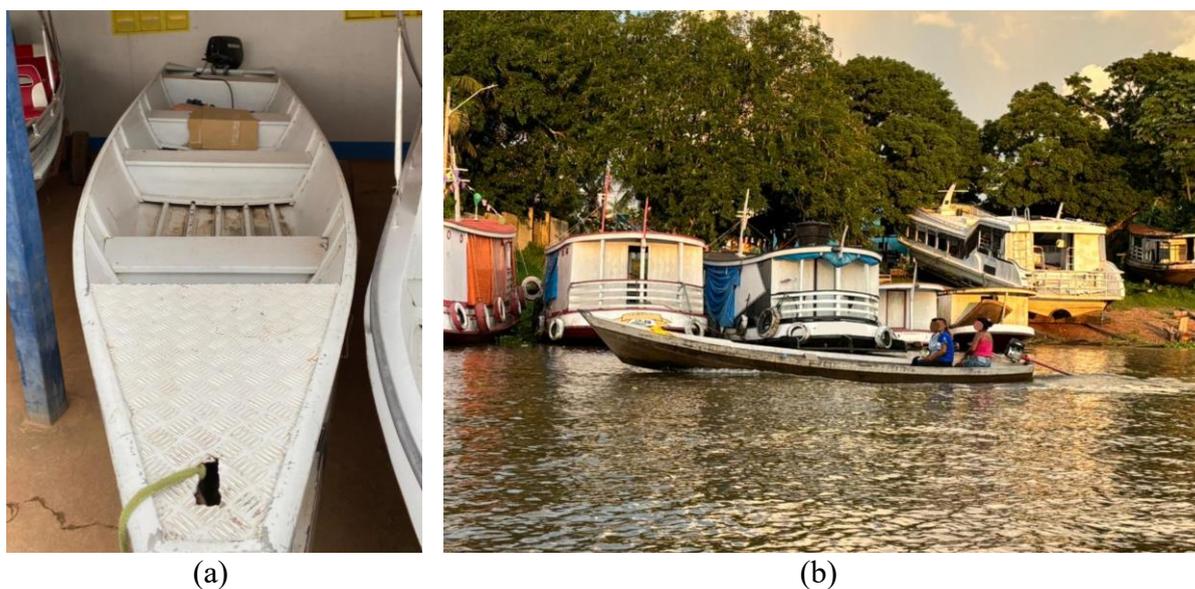
#### 4.1.3 Embarcações do tipo rabeta

O tipo de embarcação regional motorizada mais econômico em termos de aquisição, que pode se deslocar rapidamente, corresponde ao tipo rabeta (Figura 14). As rabetas são cascos leves com motor de popa, que se diferenciam de outras embarcações menores por causa do eixo saliente ao casco, o qual está acoplado ao motor de um lado e ao hélice do outro lado. Geralmente, os cascos destas embarcações são construídos de madeira ou alumínio (Figura 14a), e o acoplamento entre o motor, eixo e hélice costuma ser feito de forma empírica, utilizando hélices que podem ser adquiridas de forma acessível. É um dos tipos de transporte mais utilizados pelas comunidades ribeirinhas, sendo bastante comum encontrar desafios de segurança devido à falta de equipamentos de segurança e salvatagem nelas. A Figura 14b mostra

o exemplo de uma rabeta em operação navegando no rio Amazonas, em frente a um pequeno estaleiro regional.

No trabalho de Bitencourt (2024) foi demonstrado que essas embarcações podem alcançar regimes de operação de semi-deslocamento ( $F_n > 0,5$ ), sendo consideradas como embarcações rápidas segundo a literatura (FALTINSEN, 2005):  $F_n > 0,4$ .

**Figura 14. Embarcações do tipo rabeta encontradas em Parintins – AM. (a) Embarcação com casco de alumínio localizado na marina particular Morena (imagem obtida no dia 01/02/2024). (b) Embarcação do tipo rabeta, com casco de madeira, navegando no Rio Amazonas (imagem obtida no dia 18/05/2024).**



Fonte: Imagens obtidas pelo autor.

#### 4.1.4 Embarcações do tipo voadeira

As embarcações do tipo “lancha voadeira” podem ser definidas como embarcações que possuem cascos leves com motor fora de borda. Os cascos dessas embarcações costumam ser de alumínio, podendo ser encontrados alguns exemplares de madeira ou fibra de vidro. Devido ao seu peso leve e a sua lotação, comumente, de até dez pessoas, as voadeiras costumam alcançar altas velocidades. As voadeiras são bastante comuns na região amazônica, sendo utilizadas para atividades turísticas, pesquisa, recreio, pescaria, transporte de pessoas, entre outras atividades. É comum que as voadeiras sejam identificadas na região com outros nomes: canoa (feita de madeira ou alumínio), bote (feito de alumínio), ou lancha (feita de alumínio). A Figura 15 mostra alguns exemplares de voadeiras em Parintins – AM. A Figura 15a mostra uma voadeira com casco de alumínio resguardada na Marina Morena, que é uma marina particular em Parintins. Por outro lado, a Figura 15b mostra uma voadeira em operação no rio Amazonas, em frente ao Porto de Parintins, cujo casco também é construído de alumínio. Qualitativamente,

pode se inferir, na Figura 15b, que a proa sai da água, sugerindo um modo de operação de semi-deslocamento ou semi-plano (Fn > 0,5), segundo a literatura (MOLLAND; TURNOCK; HUDSON, 2017).

**Figura 15. Embarcações do tipo voadeira capturadas em Parintins – AM. (a) Embarcação resguardada na Marina Morena (imagem obtida em 01/02/2024). (b) Embarcação navegando no Rio Amazonas (imagem obtida no dia 18/05/2024).**



(a)



(b)

Fonte: Imagens obtidas pelo autor.

#### 4.1.5 Embarcações cabinadas (ambulancha)

Na região amazônica também são comuns as embarcações “cabinadas”, as quais são lanchas leves, geralmente construídas de alumínio ou fibra de vidro, possuindo uma superestrutura que

protege os passageiros, assim como motores fora de borda potentes. Essas embarcações são comumente utilizadas pelo Governo do Estado do Amazonas para oferecer diversos serviços, como atendimento médico e emergencial, transporte escolar, atividades de monitoramento ambiental, entre outras. Também, são utilizadas para atividades de lazer e comércio.

No Estado do Amazonas é comum utilizar embarcações cabinadas para serviço ambulatorial, o qual é bastante necessário para atender comunidades ribeirinhas sem acesso a rodovias. Essas embarcações são ambulâncias que operam nos rios, sendo regionalmente conhecidas como “ambulanchas”. Almeida (2024) descreveu as suas características mais importantes, mostrando ambulanchas típicas do município de Itacoatiara – AM. Com relação às ambulanchas que operam no município de Parintins, a Figura 16 mostra alguns exemplares obtidos durante o levantamento. A Figura 16a mostra uma ambulancha com casco de alumínio, a qual pertence à secretaria municipal de saúde do município de Barreirinha – AM. Por outro lado, a Figura 16b mostra uma ambulancha da Secretaria Municipal de Saúde de Parintins em operação, navegando no rio Amazonas, em frente ao Hospital Jofre Cohen, que possui um próprio porto para ambulanchas de atendimento regional.

**Figura 16. Embarcações cabinadas do tipo ambulancha encontradas em Parintins – AM. (a) Ambulancha encontrada na Marina Morena (imagem obtida em 01/02/2024). (b) Ambulancha navegando no Rio Amazonas (imagem obtida em 18/05/2024).**



(a)



(b)

Fonte: Imagens obtidas pelo autor.

#### 4.1.6 Embarcações cabinadas (lança de transporte escolar)

De maneira similar às ambulanchas apresentadas na subseção anterior, também existem lanchas cabinadas dedicadas ao transporte de estudantes na região amazônica, conhecidas como “lanchas escolares”. Este tipo de embarcação possui uma grande relevância social devido à necessidade de deslocamento dos alunos que moram em comunidades ribeirinhas até as escolas da região amazônica. Algumas pesquisas recentes têm discutido aspectos hidrodinâmicos e sociais neste tipo de embarcação, com ênfase na região amazônica. Neste contexto, podem ser citados os trabalhos de Hernández-Fontes et al. (2021), Maia e Said (2019), e Maia et al. (2021). Embora existam embarcações oficiais do Governo do Estado do Amazonas destinadas a este tipo de atividades, como descrito por Almeida (2024), também é comum subcontratar embarcações cabinadas para realizar atividades de transporte escolar. A Figura 17 mostra um exemplo de embarcação cabinada, com casco de alumínio, exercendo atividades de transporte escolar no rio Amazonas, em Parintins – AM.

**Figura 17. Embarcação de transporte escolar navegando no rio Amazonas, em Parintins – AM (imagem obtida em 18/05/2024).**



Fonte: Imagem obtida pelo autor.

#### 4.1.7 Embarcações do tipo expresso

Como descrito na introdução do presente trabalho, as embarcações tipo expresso são embarcações de médio porte, destinadas ao deslocamento longitudinal de passageiros entre as principais cidades do Estado do Amazonas. Geralmente, este tipo de embarcações tem formato alongado, casco reforçado de alumínio (ou combinações de outros materiais), e motores internos potentes que permitem o seu deslocamento em regimes de semi-planeio, podendo transportar dezenas de pessoas. Devido às suas características de alta velocidade, visa-se necessário acrescentar estudos que permitam avaliar o seu comportamento e aumentar a sua segurança. Esses motivos motivaram o desenvolvimento da análise da dinâmica de um expresso no presente trabalho. Detalhes adicionais das embarcações tipo expresso podem ser consultados nos trabalhos de: David (2010), Soares et al. (2023), Soares (2023), Bechman (2024), Maia et al. (2023), Fontes et al. (2023a), Almeida (2024), entre outros, onde podem ser encontradas imagens e informações relevantes com relação às suas características.

A Figura 18 mostra alguns exemplos de embarcações tipo expresso em Parintins – AM. As Figuras 18a, 18b, e 18c mostram uma embarcação expresso atracada no Porto de Parintins, um expresso em um pequeno estaleiro ribeirinho no rio Amazonas, e um expresso docado em carreira para manutenção em um estaleiro particular, respectivamente.

**Figura 18. Exemplos de embarcações do tipo expresso encontradas em Parintins – AM. (a) Embarcação no Porto de Parintins (imagem obtida em 18/05/2024). (b) Foto tirada de um expresso em um pequeno estaleiro ribeirinho, no rio Amazonas (foto obtida em 18/05/2024). (c) Embarcação docada em carreira para manutenção em um pequeno estaleiro ribeirinho particular, no rio Amazonas (imagem obtida em 18/05/2024).**



(a)



(b)



(c)

Fonte: Imagens obtidas pelo autor.

Cabe ressaltar que as embarcações do tipo expresso também costumam realizar transporte noturno, precisando estar equipadas segundo as recomendações das Normas da Autoridade Marítima do Brasil. Tais normas incluem requerimentos das convenções

internacionais para navegação segura, como SOLAS (IMO, 1974), RIPEAM (DPC, 1972) e MARPOL (PEET, 1992). A Figura 19a mostra um exemplo de uma embarcação que realiza a rota Parintins – Manaus, a qual foi capturada no porto de Manaus conhecido como Balsa Amarela. De maneira complementar, a Figura 19b mostra o aspecto do interior de um expresso, onde pode ser visto que ele assemelha muito o interior de um ônibus de passageiros. No interior de um expresso é comum ter espaço para bagagens pessoais, equipamentos de salvatagem (visíveis na imagem), banheiro, cozinha, saída de emergência, entre outros requerimentos das normas aplicáveis (MARINHA-DO-BRASIL, 2020).

**Figura 19. Exemplo de uma embarcação do tipo expresso que atua na rota Parintins – Manaus, no Estado do Amazonas. (a) Embarcação no porto de Manaus (Balsa Amarela) no horário noturno (imagem obtida em 10/06/2024). (b) Aspecto do interior de uma embarcação tipo expresso, em viagem no trecho Manaus-Parintins (foto obtida no dia 25/05/2024).**

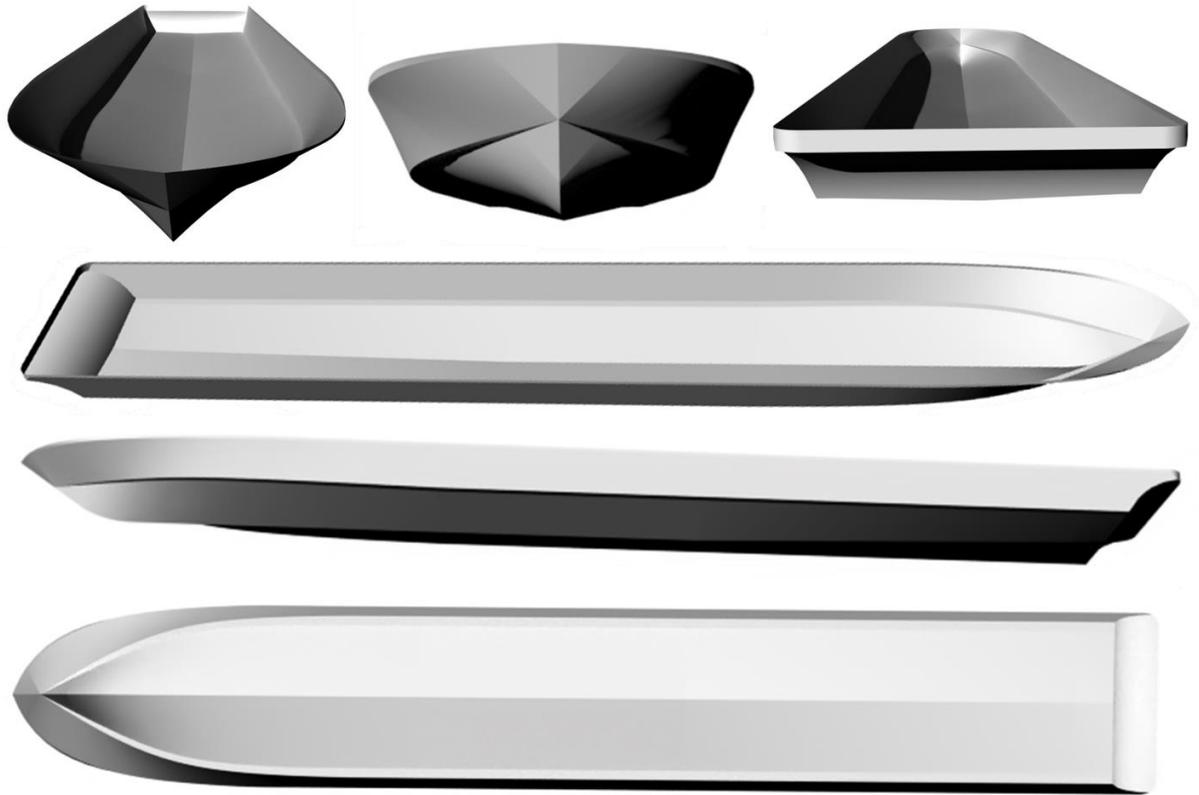


Fonte: Imagens obtidas pelo autor.

#### 4.2 Resultados da modelagem tridimensional do caso de estudo selecionado

A Figura 20 mostra várias vistas do casco da embarcação do tipo expresso, que foi considerada como caso de estudo. A superfície do casco foi modelada utilizando o software Rhinoceros3D<sup>®</sup>. Para uso no Ansys Aqwa<sup>®</sup>, a superfície precisa ser lida como uma parte única. Então, a geometria foi salva com formato \*.3dm, podendo ser lida com o módulo *Design Modeler* do Ansys<sup>®</sup>. Nesse software foram configurados o sistema de eixos coordenados e o calado considerado no presente estudo (0,4 m). É importante dizer que a orientação do sistema coordenado utilizado no Rhinoceros3D<sup>®</sup> deve coincidir com a orientação do sistema coordenado do Ansys Aqwa<sup>®</sup>. Ou seja, os eixos X, Y e Z deverão apontar nas direções longitudinal, transversal e vertical da embarcação, respectivamente, como descrito na Fundamentação Teórica.

**Figura 20. Vistas do renderizado do casco modelado como superfície no software Rhinoceros3D®.**



Fonte: Elaboração própria.

### 4.3 Resultados do teste de convergência de malha

Em toda análise numérica, utilizando software de simulação computacional, é sugerido realizar um teste preliminar para verificar se o tamanho dos elementos da malha é o adequado. Então, foram testadas cinco opções diferentes de malha estruturada, que foram geradas automaticamente pelo software, considerando diferentes tamanhos de elementos, como mostrado na Tabela 2. A opção padrão (*default*) proporcionada pelo software corresponde à Malha 4 mostrada na Tabela 2. Tentou-se testar malhas maiores, porém houve alertas de erro devido à falta de resolução. Os tamanhos de elementos menores foram selecionados baseado na quantidade de elementos do software Ansys Aqwa®, pois embora foi utilizada uma licença de pesquisa acadêmica, o software possui limitações na quantidade de elementos da malha (até 40000 elementos e 60000 nós).

**Tabela 2. Características das cinco malhas consideradas.**

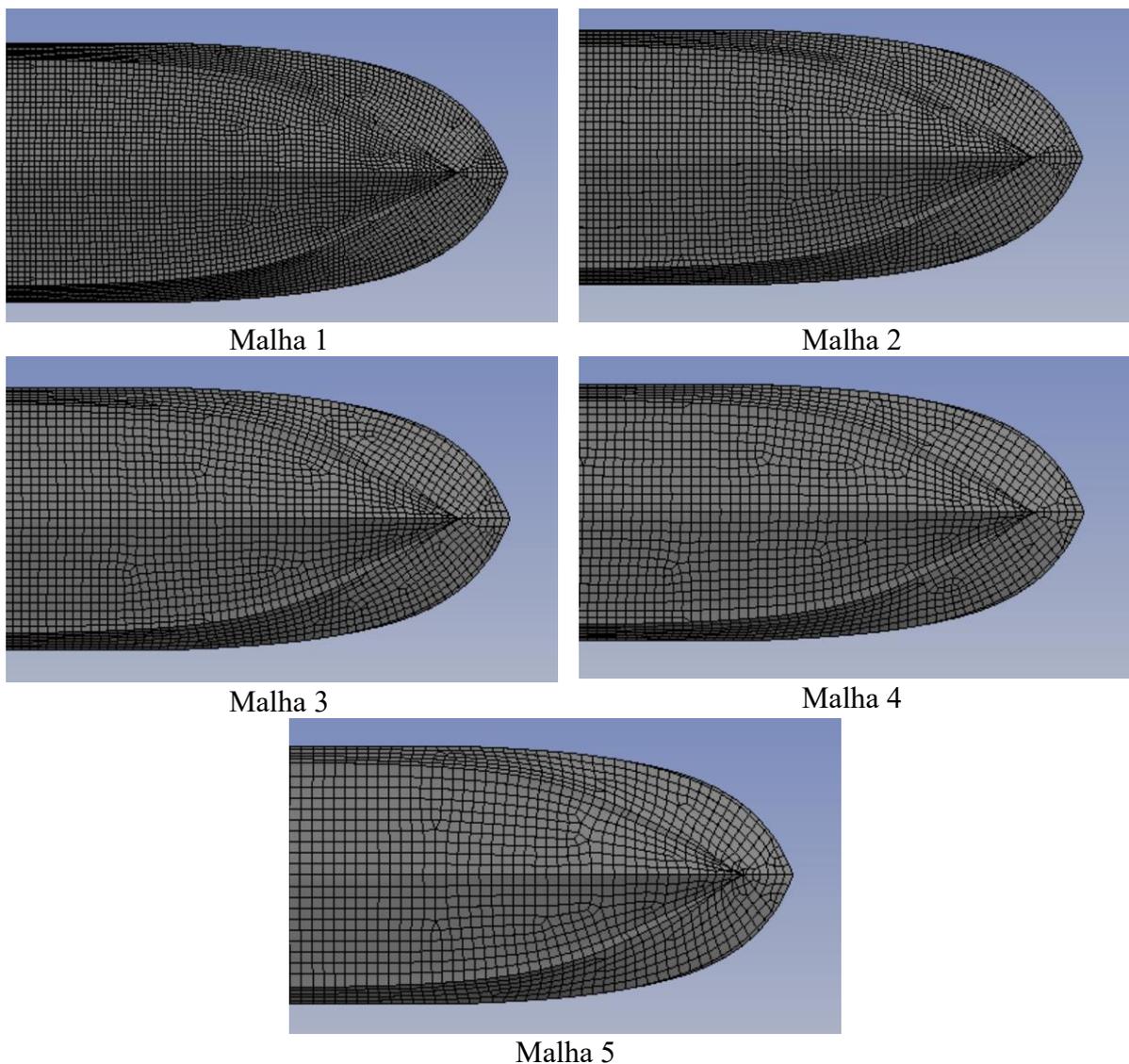
	<b>Malha 1</b>	<b>Malha 2</b>	<b>Malha 3</b>	<b>Malha 4*</b>	<b>Malha 5</b>
<b>Tamanho do elemento</b>	0,090 m	0,110 m	0,130 m	0,150 m	0,170 m
<b>Total de nós</b>	16346	11351	8318	6729	4835

<b>Total de elementos</b>	16063	11124	8121	6562	4687
<b>Máxima frequência permitida</b>	9,39 rad/s	8,76 rad/s	8,10 rad/s	7,53 rad/s	6,64 rad/s
*Predefinida como padrão ( <i>default</i> ) no software.					

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 21 mostra um comparativo das cinco malhas que foram avaliadas. As imagens da figura apenas mostram o detalhe da parte inferior da proa do casco, para diferentes tamanhos de elementos.

**Figura 21. Comparação das cinco malhas estruturadas que foram avaliadas no presente estudo. As imagens mostram o aspecto das malhas na parte inferior da proa da embarcação.**

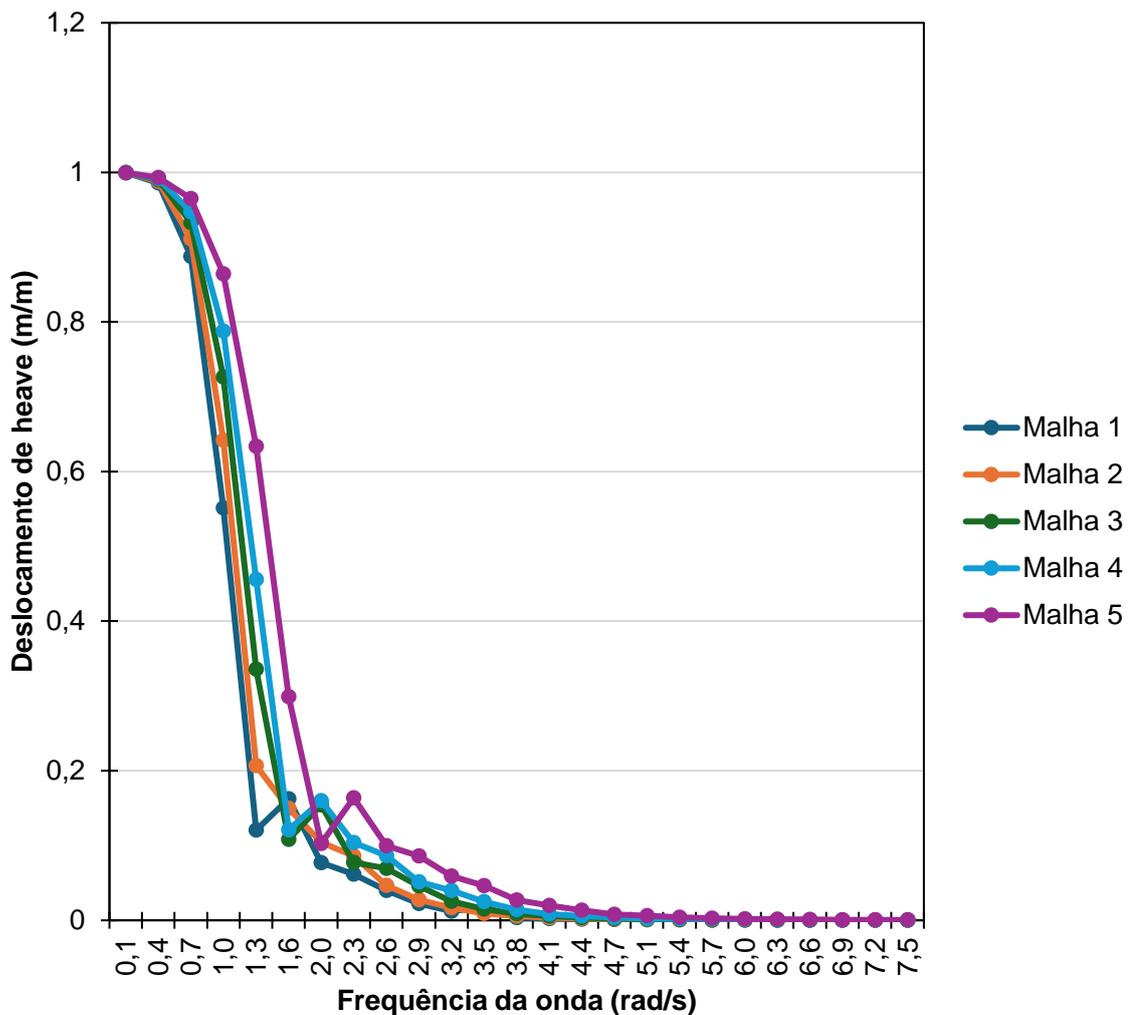


Malha 5  
Fonte: Ansys® 2024 R1.

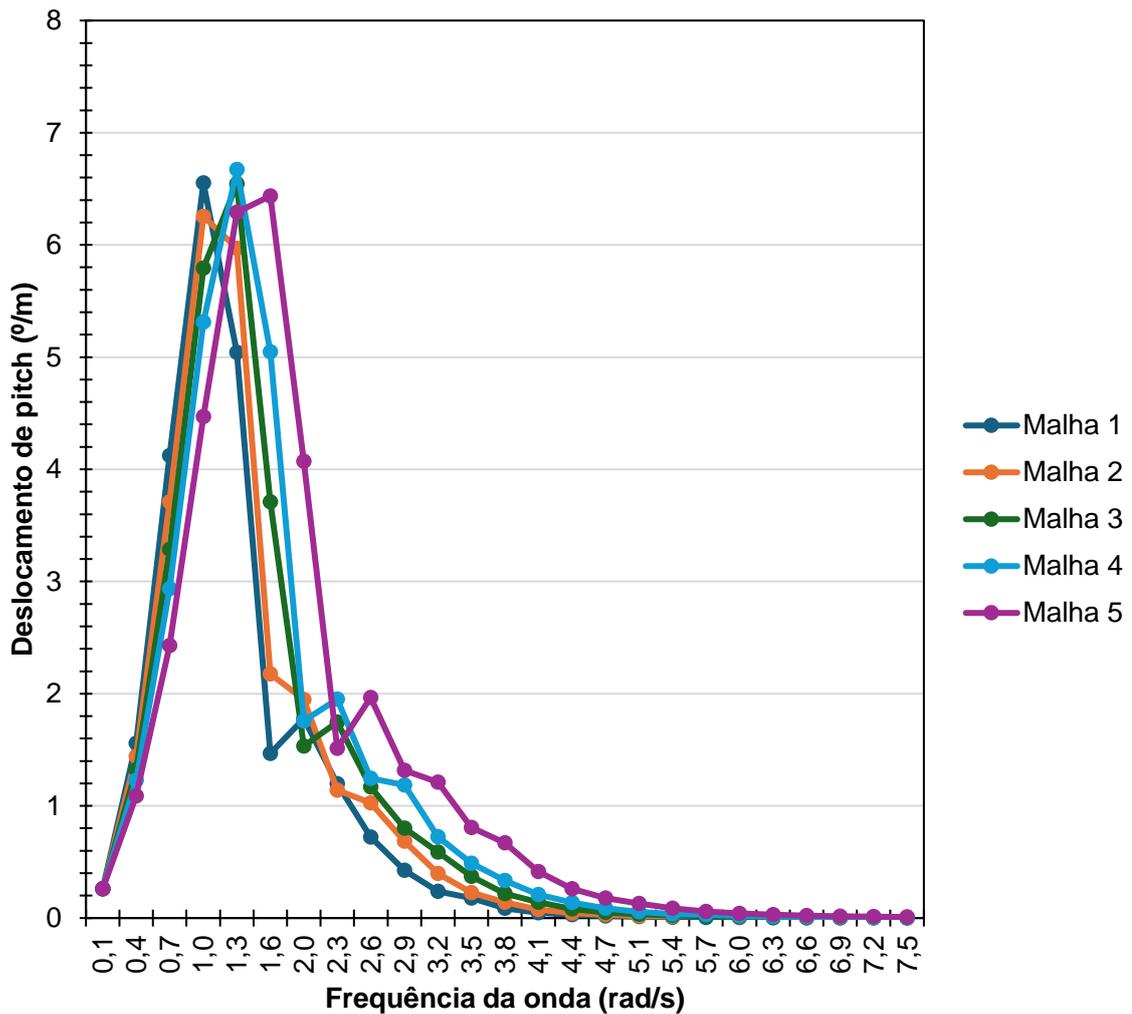
Para verificar o efeito da resolução das malhas nos resultados dos movimentos da embarcação, foram gerados, de maneira sistemática, dois gráficos comparativos dos

movimentos de heave (Figura 22a) e pitch (Figura 22b), para ter uma ideia dos efeitos da discretização espacial. Verificou-se que, com a malha com maior discretização (Malha 5), foi possível rodar mais rápido as simulações do Ansys Aqwa. Porém, como mostrado nas Figuras 22a e 22b, ela apresentou diferenças significantes com relação à malha mais fina (Malha 1). Para fins práticos, decidiu-se considerar uma malha intermédia para realizar as simulações (Malha 2), mostrando um equilíbrio entre os dados obtidos com relação à Malha 1 e custo computacional. Sugere-se que em estudos posteriores seja quantificada a incerteza numérica, seguindo procedimentos disponíveis na literatura (EÇA; HOEKSTRA, 2014; STERN et al., 1999).

**Figura 22. Comparação de operadores de amplitude de resposta (RAO's) para diferentes malhas, considerando ondas regulares incidindo pela proa ( $\alpha=180^\circ$ ). (a) Deslocamento de heave. (b) Deslocamento angular de pitch.**



(a)



(b)

Fonte: Elaboração própria.

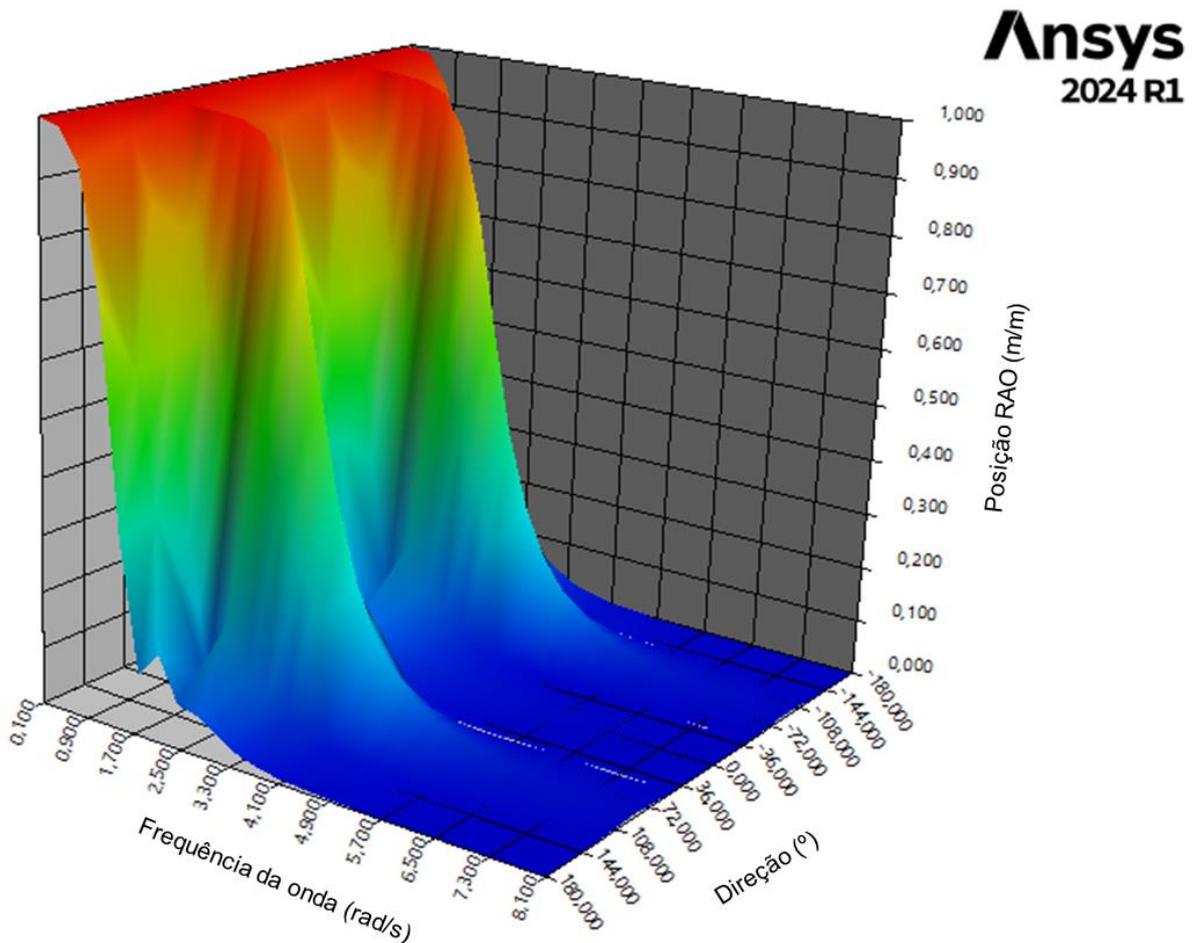
#### 4.4 Resultados da análise da resposta da embarcação no domínio da frequência

A seguir, são mostrados os resultados principais das respostas da embarcação (heave, pitch e roll) no domínio da frequência, os quais foram obtidos com o software *Hydrodynamic Diffraction*. As análises foram feitas considerando a embarcação em flutuação livre, sem propulsão, e sem a influência da viscosidade da água no seu movimento (teoria do escoamento potencial). Os movimentos apresentados correspondem ao deslocamento vertical (arfagem; heave) do centro de gravidade, definido de forma adimensional (m/m). Ou seja, a amplitude do movimento dividido pela amplitude unitária da onda. Por outro lado, os movimentos de rotação (caturro – pitch e balanço – roll) são expressos em graus por amplitude unitária da onda (°/m).

A Figura 23 mostra o operador de amplitude de resposta do movimento de heave da embarcação, para diferentes direções e frequências de ondas regulares (RAO de heave).

Verifica-se que em frequências maiores a 5,7 rad/s, os deslocamentos são quase nulos para todas as direções. Isso se deve a que as ondas passam a ter menor duração, causando pouco efeito no movimento vertical da embarcação. Os máximos valores de heave acontecem para frequências menores, significando ondas muito longas (a amplitude da onda acompanha o movimento vertical da embarcação). O máximo valor foi de aproximadamente 1 m/m com ondas de 0,1 rad/s em todas as direções.

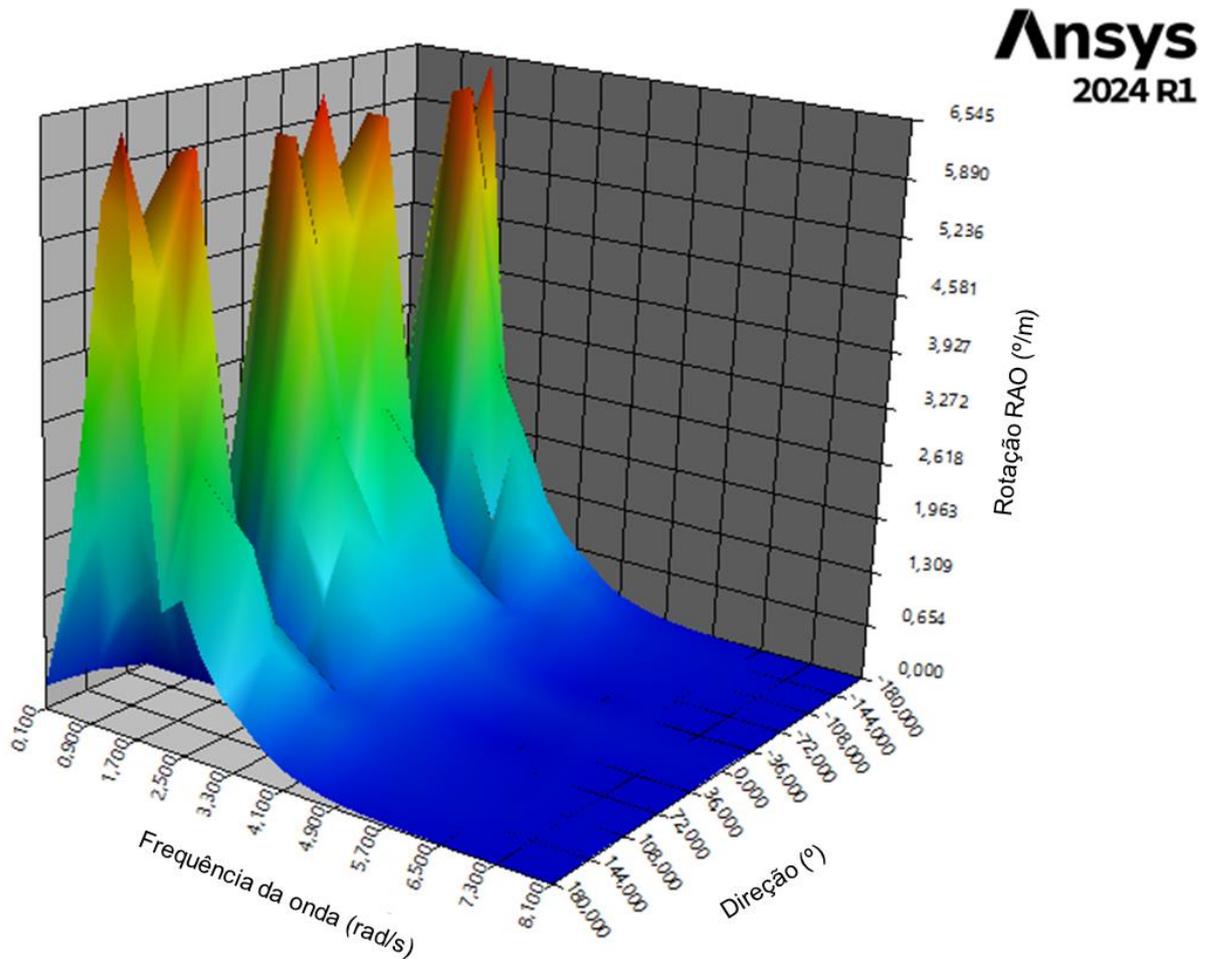
**Figura 23.** Gráfico tridimensional que mostra o operador de amplitude de resposta (RAO) do movimento de heave para diferentes frequências e às direções das ondas com relação à embarcação.



Fonte: Ansys® 2024 R1.

De maneira similar à figura anterior, a Figura 24 mostra os resultados dos operadores de amplitude de resposta (RAO) para o movimento de pitch, com relação à frequência e à direção das ondas. Verifica-se que existem várias direções de incidência das ondas nas quais aconteceram as maiores amplificações de movimento, principalmente em frequências de onda entre 0,1 e 1,7 rad/s, causando rotações acima de 5,89 °/m. Neste caso, o máximo valor de rotação foi de 6,54 °/m com uma onda de 1,43 rad/s e direção de 180°. Vale lembrar que as rotações são mostradas de forma adimensional, para amplitudes de onda unitária.

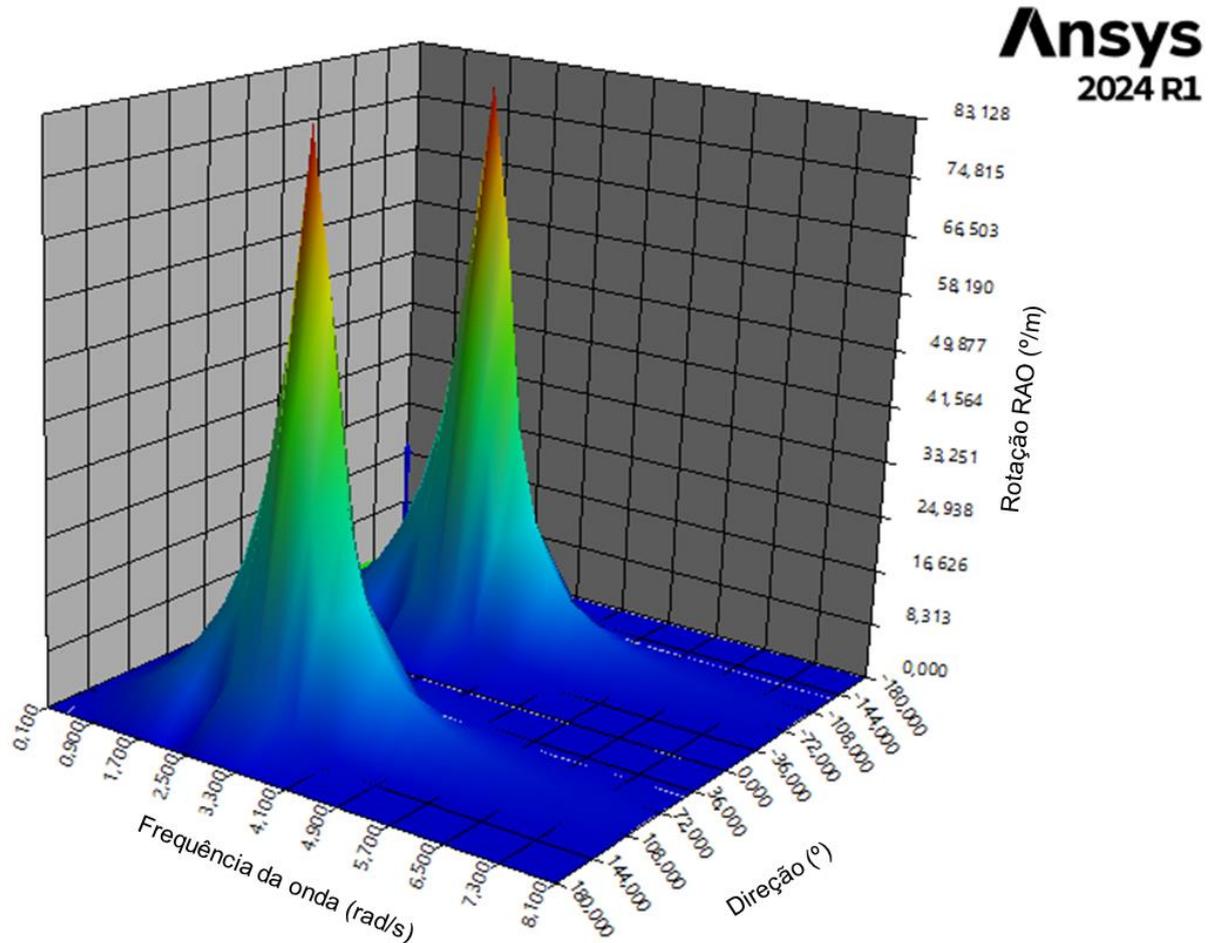
Figura 24. Gráfico tridimensional que mostra o operador de amplitude de resposta (RAO) do movimento de pitch para diferentes frequências e direções das ondas com relação à embarcação.



Fonte: Ansys® 2024 R1.

A Figura 25 mostra o RAO de roll da embarcação para diferentes direções e frequências de ondas regulares. Neste caso, podem ser observados dois picos de ressonância significantes, os quais foram causadas por ondas de través (pelos costados), em frequências entre 2,5 e 3,3 rad/s. O máximo deslocamento foi de 83°/m, com uma onda de frequência 2,76 rad/s, nas direções de 90° e -90°.

Figura 25. Gráfico tridimensional que mostra o operador de amplitude de resposta (RAO) do movimento de roll para diferentes frequências e direções das ondas com relação à embarcação.



Fonte: Ansys® 2024 R1.

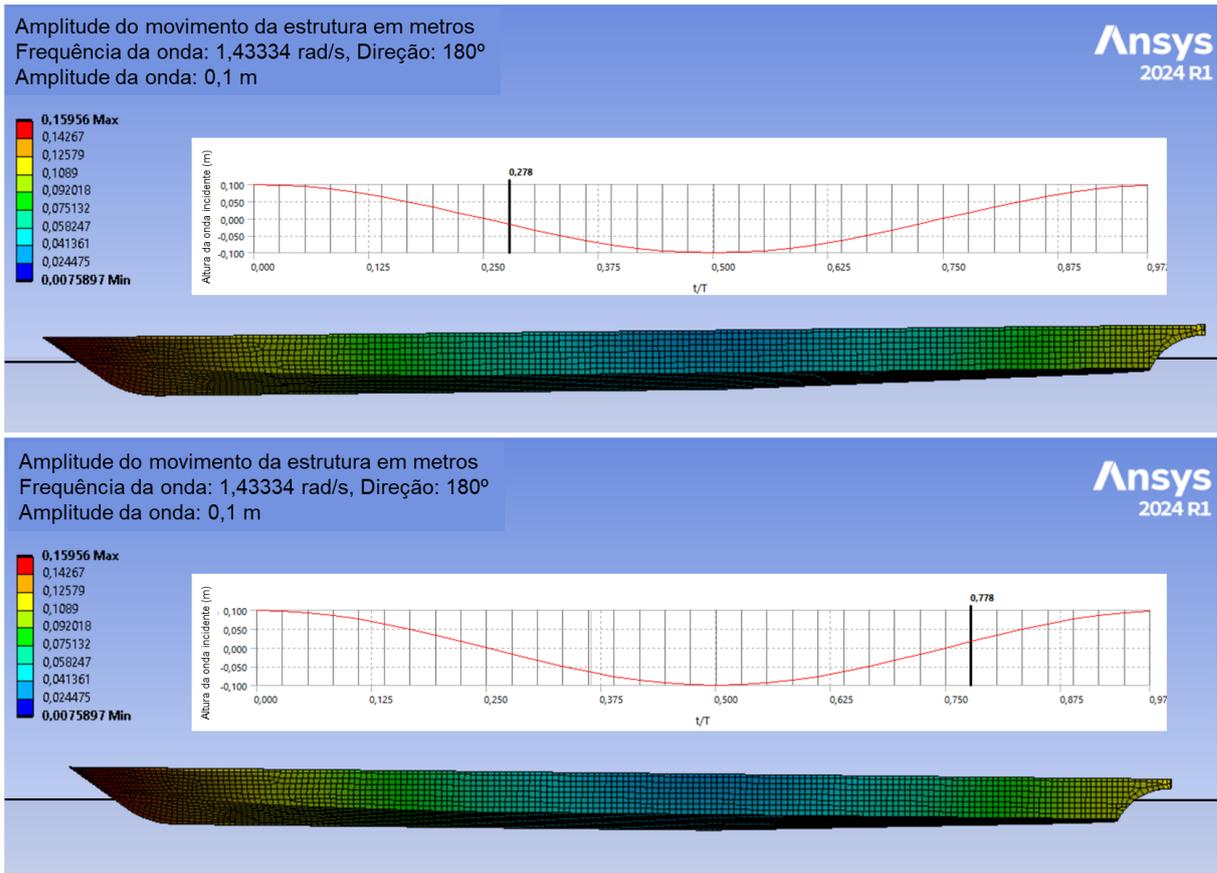
Considerando que a embarcação do tipo expresso selecionada pode navegar ficando exposta ao encontro com ondas pela proa, apresentando deslocamentos relevantes no plano vertical, foi considerada a frequência de ressonância da resposta de pitch (1,43 rad/s; Figura 24), para aprofundar as análises no domínio do tempo na próxima subseção de resultados.

De maneira preliminar, a Figura 26 mostra os movimentos absolutos, ao longo da duração de uma onda de 1,43 rad/s (período  $T = 4,39$  s), para verificar quando acontecem o maior e o menor deslocamento, considerando a vista longitudinal da embarcação. A simulação no tempo foi obtida no módulo *Hydrodynamic Diffraction*, considerando uma onda regular de 0,1 m de amplitude, incidindo pela proa ( $\alpha = 180^\circ$ ). Nas imagens apresentadas podem ser vistos os maiores deslocamentos da simulação, acontecendo pela proa, quando ela se submerge (imagem superior;  $t/T = 0,278$ ) e se emerge (imagem inferior;  $t/T = 0,778$ ).

É importante dizer que foi considerada uma onda com pequena amplitude (de 0,1 m), pois se desconhece ainda quais são as alturas de onda típicas que acontecem na área de

navegação da embarcação. No entanto, essa altura predefinida permite idealizar os efeitos possíveis no movimento da embarcação, os quais tenderão a ser mais significantes para amplitudes de onda maiores.

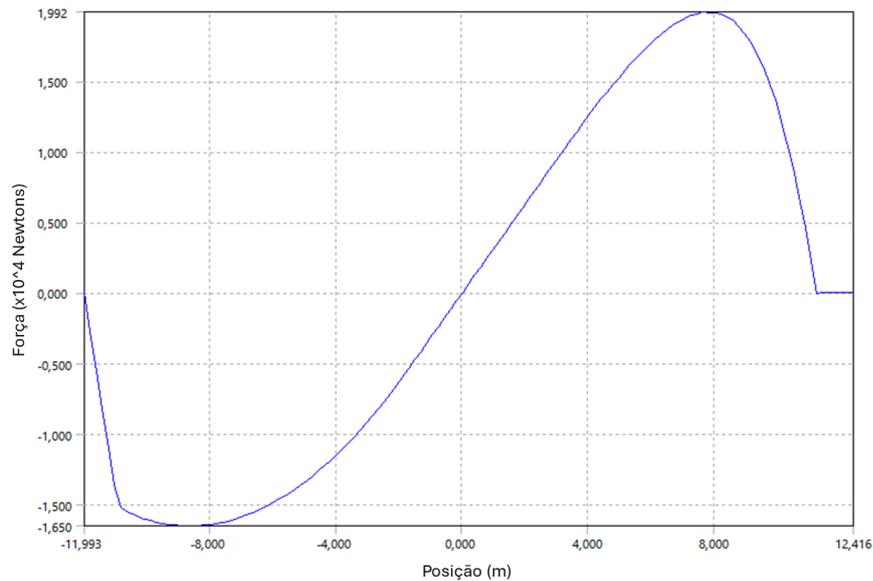
**Figura 26. Exemplo do movimento absoluto da estrutura (ver regiões coloridas) considerando a frequência de onda que causou ressonância durante o movimento de pitch, na direção de 180°. A amplitude da onda foi considerada como 0,1 m para efeitos ilustrativos.**



Fonte: Ansys® 2024 R1.

De maneira complementar às análises de movimento mostradas nas figuras anteriores, os métodos de dinâmica de embarcações permitem gerar gráficos de forças cortantes (*sheering forces*) e momentos fletores (*bending moments*) causados pelas ondas. A Figura 27 mostra o gráfico de força cortante, com relação ao comprimento da embarcação, que é causado pelas forças das ondas na direção vertical. Nota-se que as forças maiores (positivas e negativas) acontecem a +8 m e -8 m, com relação à origem do sistema coordenado da embarcação, alcançando valores de 19920 N e -16500 N, respectivamente.

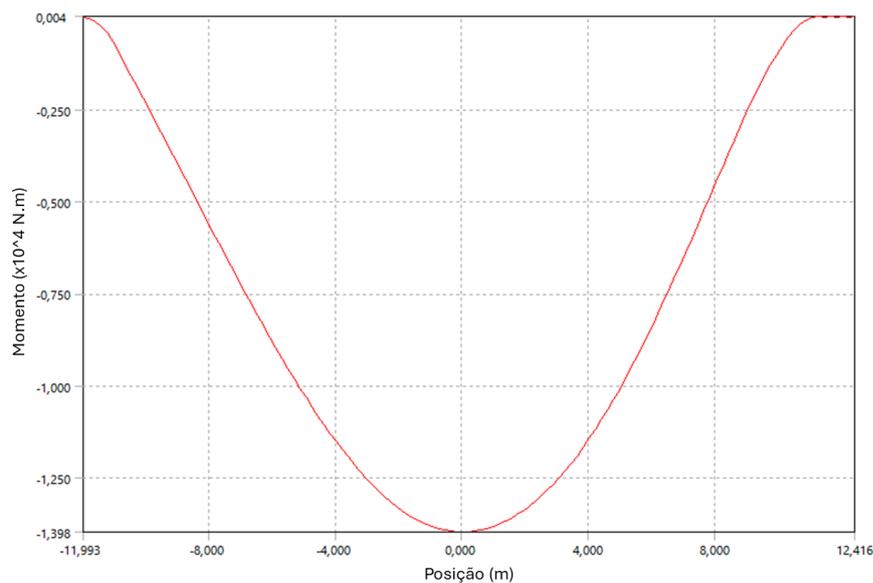
**Figura 27. Força cortante (estática), considerando todas as componentes de pressão na direção vertical Z (heave).**



Fonte: Ansys® 2024 R1.

Também, é possível conhecer os momentos fletores que acontecem ao redor dos eixos do sistema coordenado da embarcação. A Figura 28 mostra o momento fletor causado pelas ondas ao longo do eixo transversal, Y. Pode-se observar que o maior momento acontece na origem do sistema coordenado, localizado quase na metade da embarcação, alcançando valores de -13980 Nm.

**Figura 28. Momento fletor (estático), considerando todas as componentes de pressão em torno ao eixo Y (pitch).**



Fonte: Ansys® 2024 R1.

#### 4.5 Resultados da análise da resposta da embarcação no domínio do tempo

Uma vez que foram feitas as análises no domínio da frequência com o software *Hydrodynamic Diffraction*, foram avaliados os movimentos no domínio do tempo com o *Hydrodynamic Response*. Com este módulo é possível avaliar a resposta temporal de uma estrutura naval, quando submetida a diferentes condições de ondas regulares ou mar irregular. Também, é possível avaliar os efeitos das correntezas nos movimentos.

A Figura 29 ilustra a configuração de dois casos de estudo que foram considerados para realizar as análises da embarcação. Vale lembrar que o software Ansys Aqwa<sup>®</sup> é voltado principalmente para estruturas flutuantes. No entanto, para verificar a aplicabilidade do software para analisar embarcações com velocidade de avanço no *Hydrodynamic Response*, foi aplicada uma correnteza constante na mesma velocidade de avanço da embarcação, incidindo pela proa, e restringindo o movimento de avanço da embarcação (surge). Essa abordagem assemelharia um teste hidrodinâmico em um canal de ondas, onde a embarcação fica presa sem se movimentar e uma correnteza incide sobre ela. Já que o único movimento restrito foi o de avanço, é possível conhecer os demais movimentos devido à interação de um trem de ondas regulares.

Embora existam diversas situações que possam ser avaliadas no domínio do tempo, o presente estudo apenas visou demonstrar a aplicabilidade do software *Hydrodynamic Response* para avaliar os casos da Figura 29, considerando os seguintes aspectos:

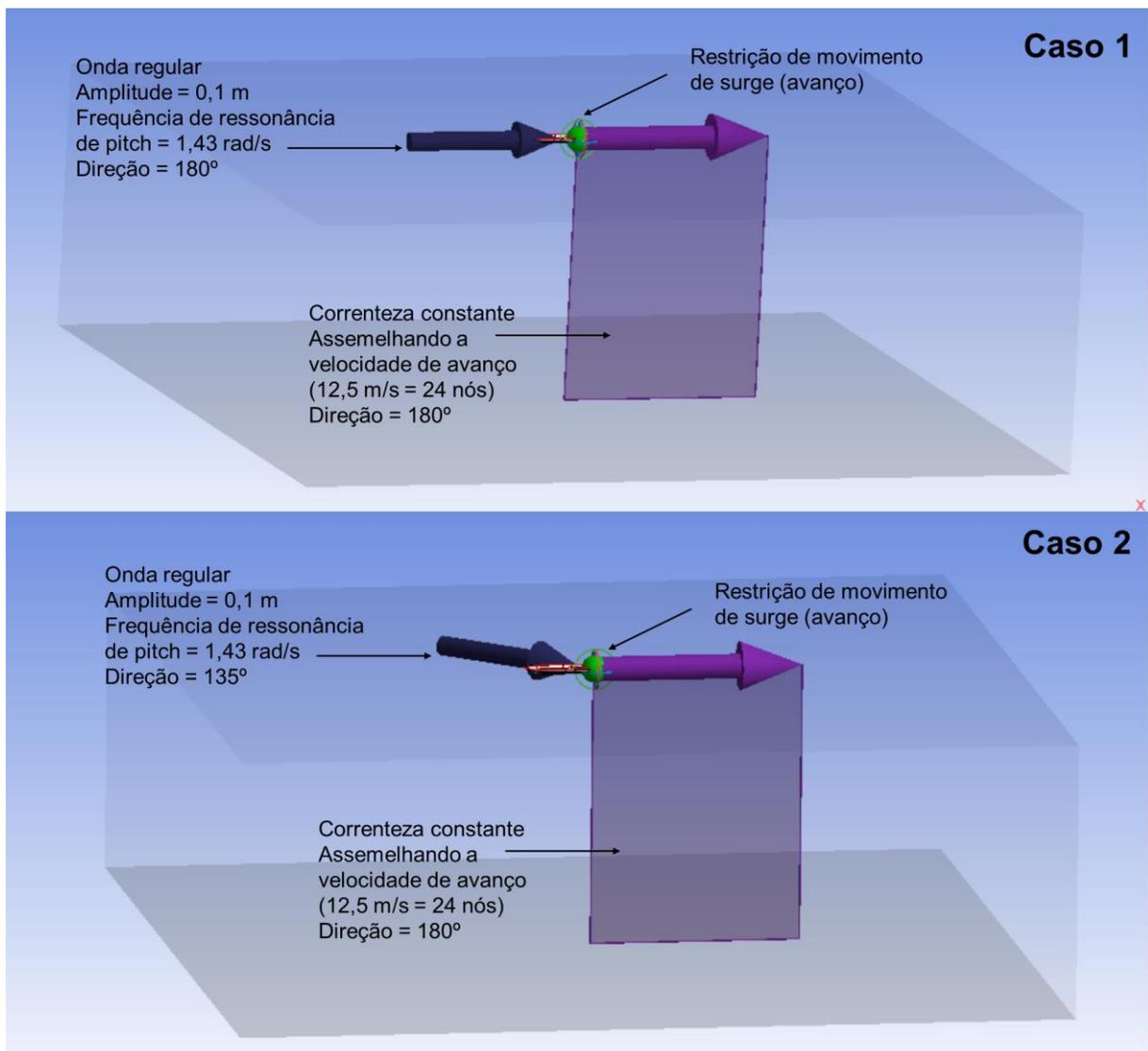
- Restringir o movimento de avanço da embarcação, considerando uma correnteza de 12,5 m/s (análoga à velocidade de operação considerada de ~24 nós), incidindo pela proa (180°, Figura 29);
- Manter um calado constante de 0,4 m (configurado na análise do domínio da frequência), sendo uma condição simplificada, pois na prática, as embarcações na velocidade avaliada tendem a se deslocar em regime de semi-deslocamento, sendo comum um trim pela proa;
- Considerar um trem incidente de ondas regulares. As ondas têm a frequência que causou a condição de ressonância em pitch na análise da seção anterior (1,43 rad/s). A altura das ondas foi considerada, de maneira empírica para fins demonstrativos, como 0,1 m, assumindo uma condição tranquila que possa acontecer comumente na região amazônica. Com os resultados apresentados, espera-se que possam ser avaliadas outras condições de ondas no futuro, sendo comparadas com dados obtidos experimentalmente.

- A onda incidente foi considerada com direções de  $180^\circ$  e  $135^\circ$  com relação à embarcação, como mostrado na Figura 29, definindo assim, respectivamente, os Casos 1 e 2 que foram considerados na análise da presente subseção.

- As variáveis de movimento avaliadas correspondem aos deslocamentos, velocidades, e acelerações de arfagem (heave), caturro (pitch), e balanço (roll), durante 20 segundos de simulação no tempo.

Os tópicos abordados nesta subseção, quando considerado o movimento de avanço restrito e uma condição de correnteza incidindo pela proa, são os seguintes: avaliação dos efeitos da correnteza nos movimentos (subseção 4.5.1); e avaliação dos efeitos da direção das ondas incidentes nos movimentos da embarcação (subseção 4.5.2).

**Figura 29. Casos de estudo para realizar a análise da resposta da embarcação no domínio do tempo.**



Fonte: Ansys® 2024 R1.

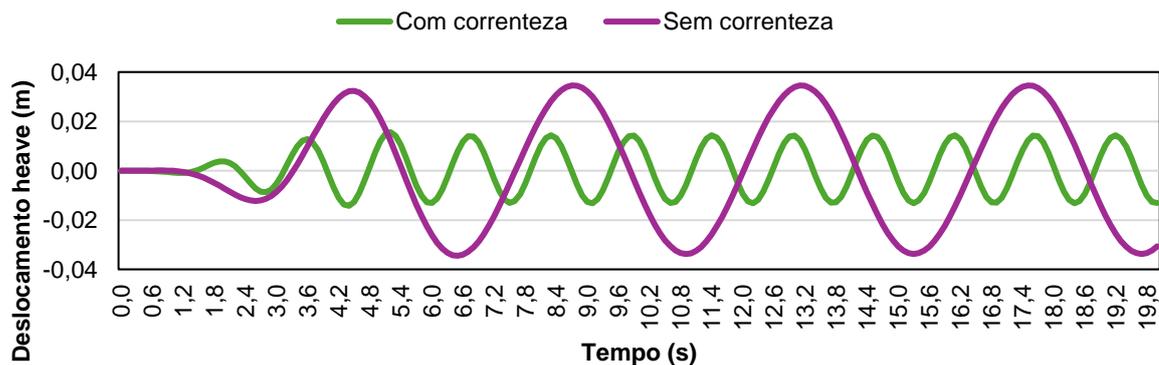
#### 4.5.1 Efeitos da correnteza nos movimentos

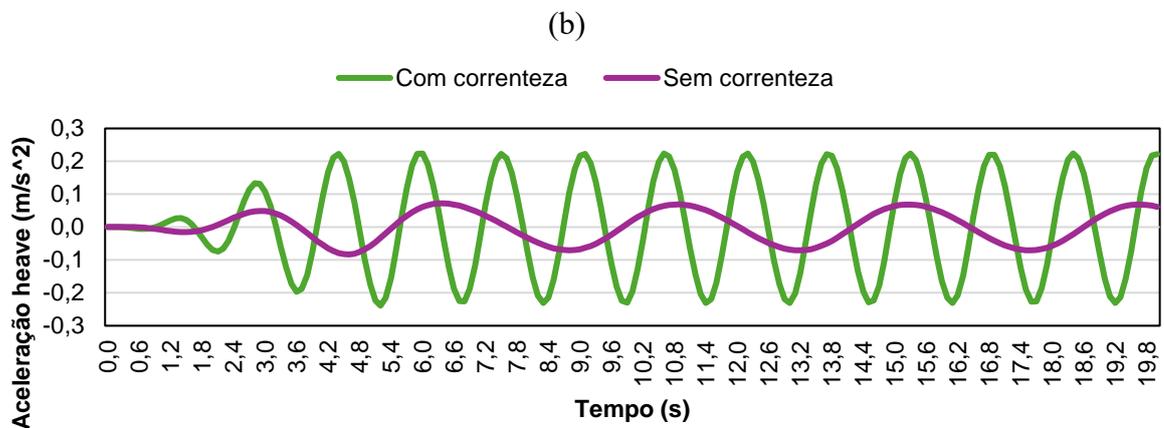
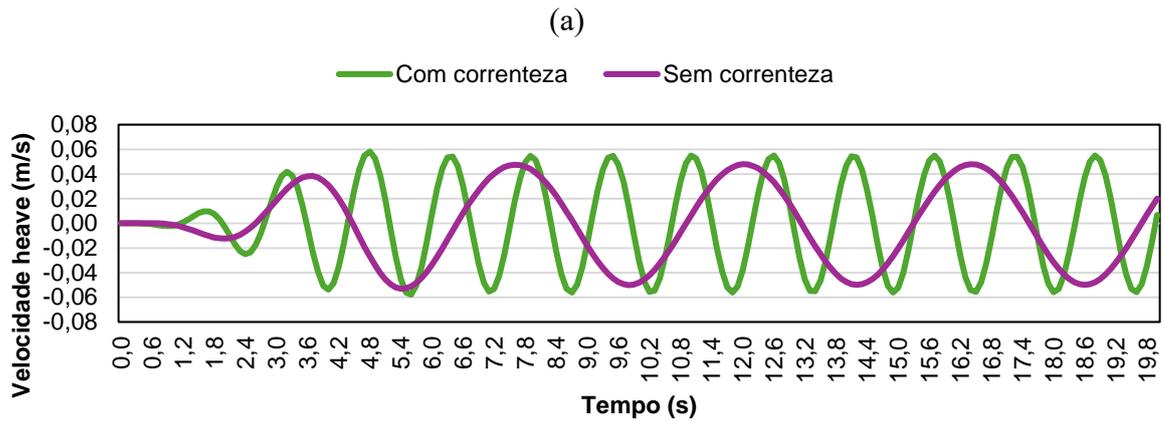
A primeira análise no domínio no tempo consiste em verificar se a correnteza aplicada possui efeitos nos movimentos de heave, pitch e roll da embarcação, assumindo que essa situação representaria a embarcação com velocidade de avanço constante. Então, foram comparadas as condições de onda regular incidindo pela proa ( $\alpha = 180^\circ$ ), com e sem correnteza. Ou seja, assemelhando ou não a embarcação se movimentando com velocidade de avanço em águas calmas.

A Figura 30 mostra os resultados da comparação para o deslocamento (Figura 30a), velocidade (Figura 30b), e aceleração (Figura 30c) do movimento de heave. Com a correnteza, o período de oscilação da embarcação muda com relação à incidência da onda sem correnteza. Nota-se que com a correnteza, são reduzidas as amplitudes do deslocamento (Figura 30a), mas a velocidade e a aceleração aumentam, como mostrado pelas Figuras 30b e 30c, respectivamente.

A mudança no período está explicada pela equação do período de encontro, que considera que uma embarcação com ondas pela proa terá período de encontro definido pelas equações descritas na subseção 2.2. Durante o avanço, o período de encontro de uma embarcação, com ondas pela proa, tende a diminuir com relação à situação sem velocidade de avanço. Assim, utilizando as equações da seção 2.2, a onda incidente (sem correnteza) tem um período de encontro de 4,39 s enquanto o período de encontro causado pela onda com a correnteza (assumindo a velocidade da correnteza como a velocidade de avanço da embarcação na equação 25) é de 1,56 s. Esses períodos calculados coincidem com a duração de um ciclo de onda regular com e sem correnteza das curvas das Figuras 30 – 32.

**Figura 30. Séries temporais do movimento de heave devido à incidência das ondas regulares (altura = 0,1 m e frequência angular de 1,43 rad/s) pela proa ( $\alpha = 180^\circ$ ), sem e com a correnteza assemelhando a velocidade de avanço da embarcação. (a) Deslocamento de heave. (b) Velocidade de heave. (c) Aceleração de heave.**

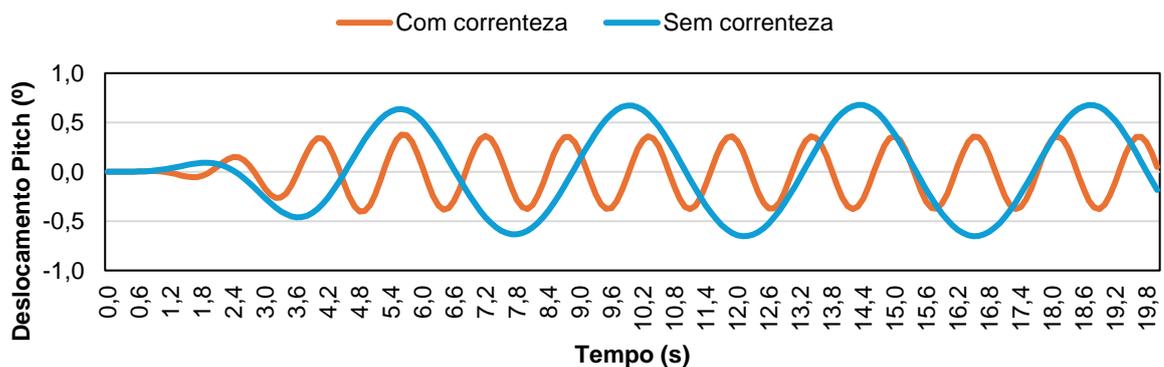


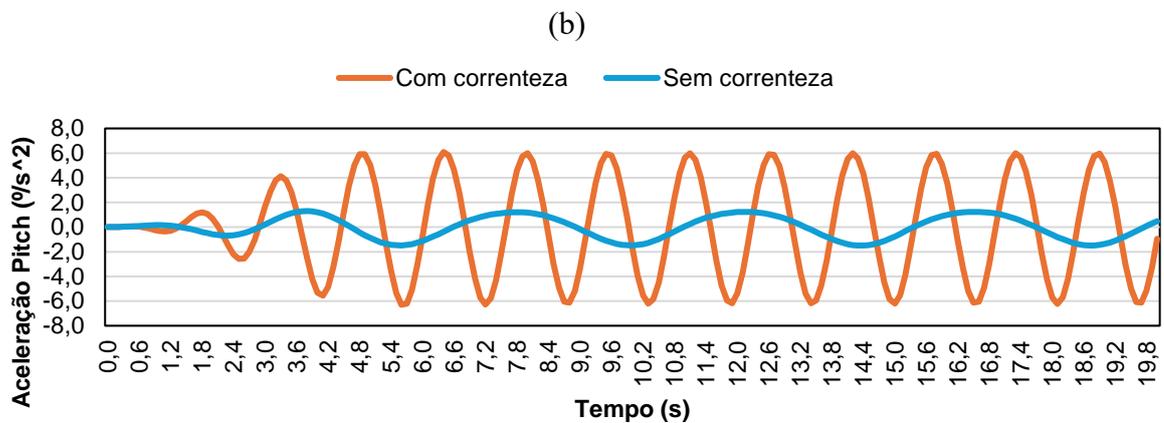
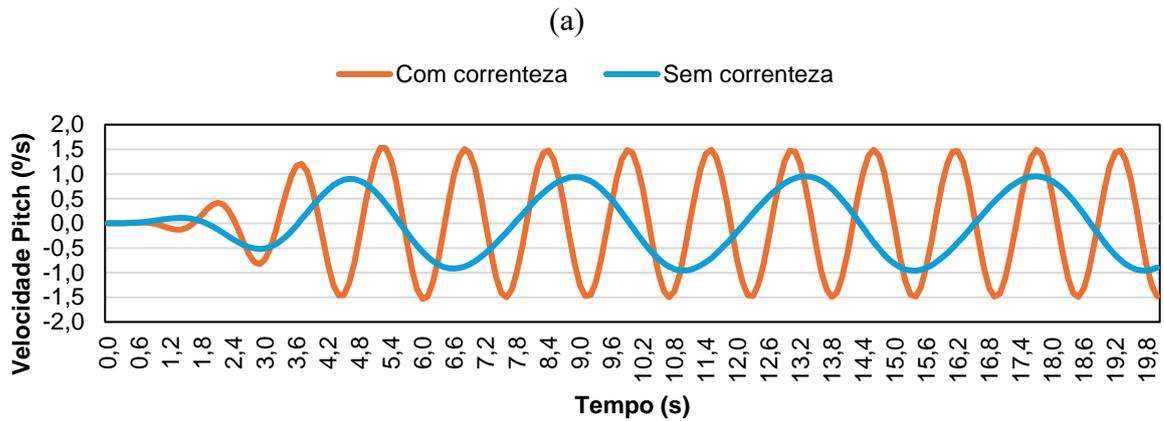


(c)  
Fonte: Elaboração própria.

Com relação ao movimento de pitch (Figura 30), o deslocamento angular apresentou amplitudes menores com correnteza do que sem ela (Figura 31a). Por outro lado, as velocidades e as acelerações angulares foram maiores quando se teve a condição de onda com a correnteza, como mostrado nas Figuras 31b e 31c, respectivamente.

Figura 31. Séries temporais do movimento de pitch devido à incidência das ondas regulares (altura = 0,1 m e frequência angular de 1,43 rad/s) pela proa ( $\alpha = 180^\circ$ ), sem e com a correnteza assemelhando a velocidade de avanço da embarcação. (a) Deslocamento angular de pitch. (b) Velocidade angular de pitch. (c) Aceleração angular de pitch.





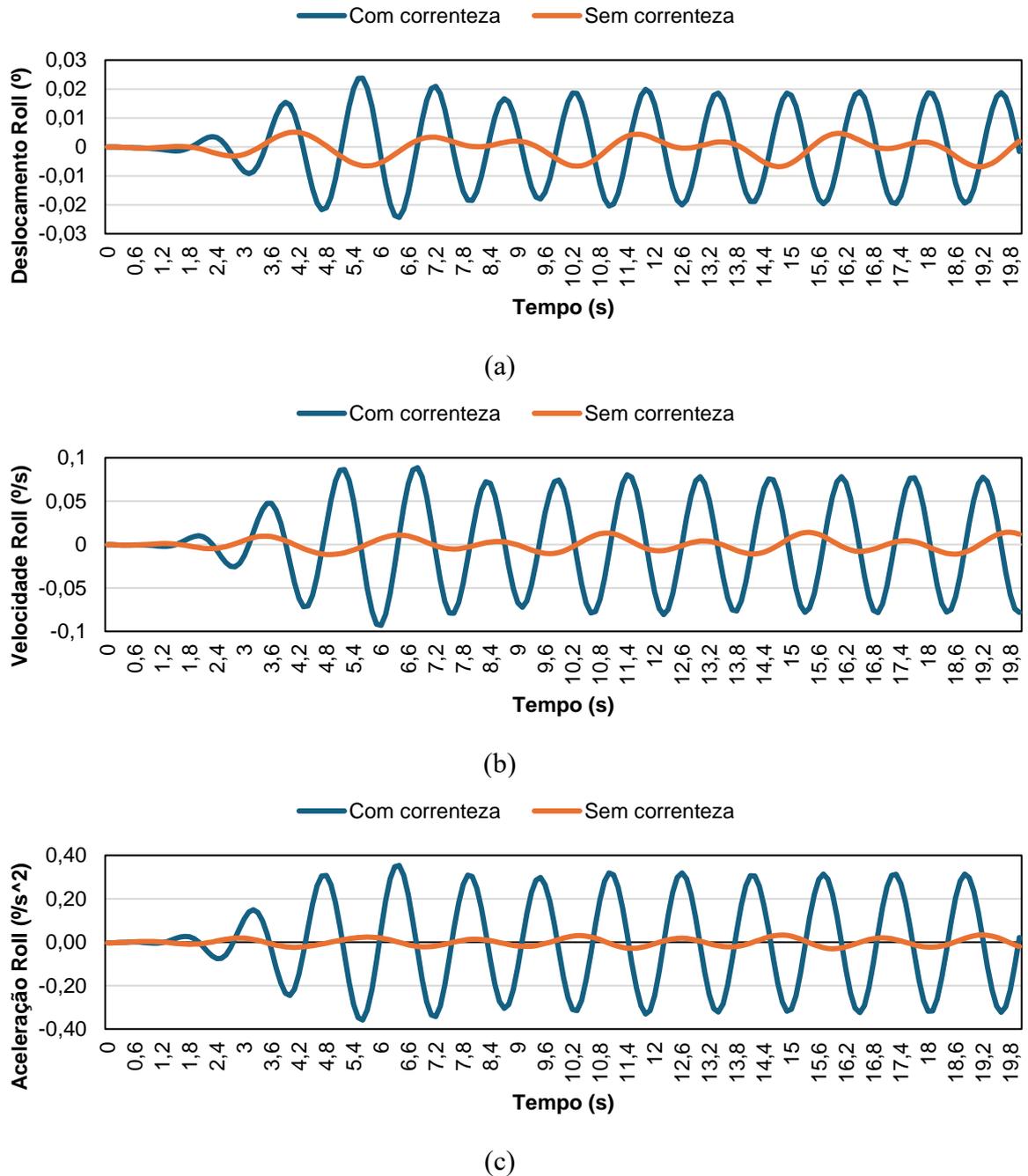
(c)

Fonte: Elaboração própria.

Um comportamento diferente foi observado com relação ao movimento de roll (Figura 32). Neste caso, as amplitudes dos deslocamentos, velocidades e acelerações angulares foram maiores quando foi aplicada a correnteza, como pode ser observado nas Figuras 32a, 32b e 32c, respectivamente.

Com os resultados obtidos, verifica-se que o método de análise adotado, considerando a velocidade da correnteza como a velocidade de avanço da operação, pode proporcionar uma abordagem alternativa para o estudo do comportamento em ondas de uma embarcação com velocidade de avanço no domínio do tempo. No entanto, recomenda-se que seja verificado o grau de aplicabilidade desta abordagem, comparando os resultados com dados experimentais ou obtidos por meio de softwares desenvolvidos para estudo de movimentos da embarcação com velocidade de avanço.

Figura 32. Séries temporais do movimento de roll devido à incidência das ondas regulares (altura = 0,1 m e frequência angular de 1,43 rad/s) pela proa ( $\alpha = 180^\circ$ ), sem e com a correnteza assemelhando a velocidade de avanço da embarcação. (a) Deslocamento angular de roll. (b) Velocidade angular de roll. (c) Aceleração angular de roll.



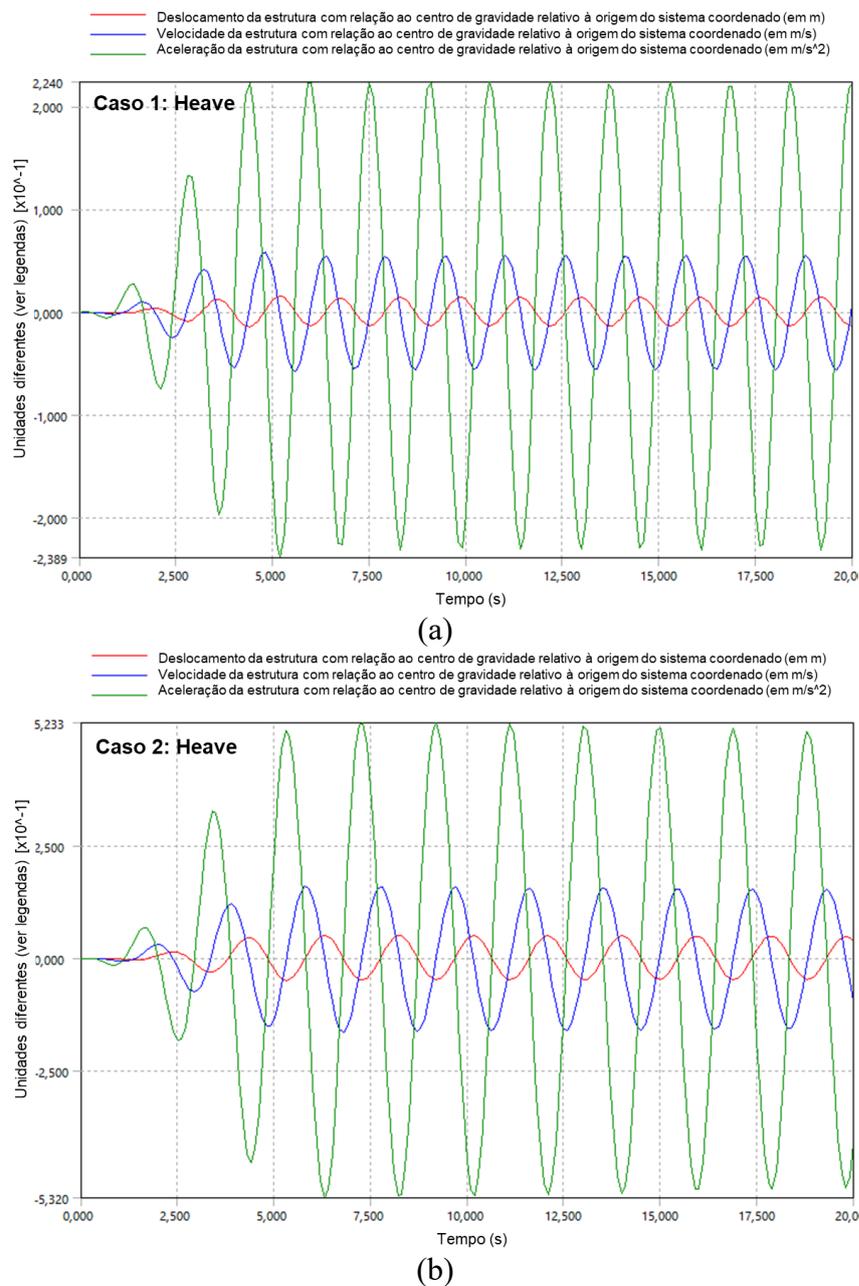
Fonte: Elaboração própria.

#### 4.5.2 Efeitos da direção das ondas nos movimentos da embarcação

A Figura 33 mostra as comparações das séries temporais dos movimentos de heave para os Casos 1 (Figura 33a) e 2 (Figura 33b) mostrados na Figura 29, considerados para avaliar a influência da direção da onda incidente nos movimentos da embarcação. Por se tratar de

movimentos harmônicos, nota-se que o deslocamento, velocidade e aceleração estão desfasados entre eles, como explicado em Faltinsen (1993). Nos dados de deslocamento de heave, pode-se verificar que, no Caso 2, as maiores amplitudes do movimento superestimaram mais de 2 vezes o deslocamento do Caso 1. Conseqüentemente, as velocidades e acelerações também apresentaram essa tendência.

**Figura 33. Comparação de séries temporais de deslocamento, velocidade e aceleração do movimento de heave. (a) Caso 1. (b) Caso 2.**

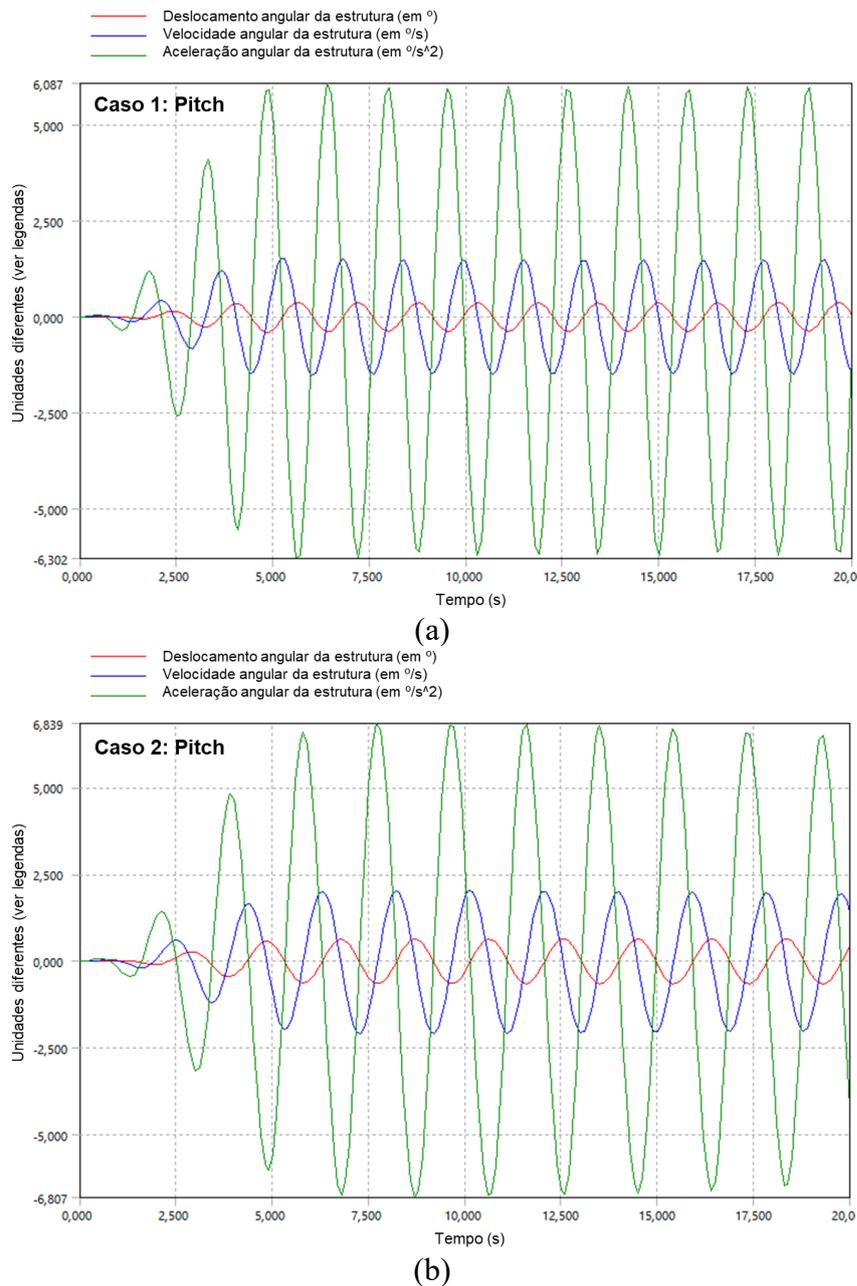


Fonte: Ansys® 2024 R1.

Com relação ao movimento de pitch (Figura 34), não houve aumentos significantes de deslocamento angular no Caso 1 (Figura 34a) com relação ao Caso 2 (Figura 34b). O

deslocamento angular máximo no Caso 2 aumentou aproximadamente 12% com relação ao Caso 1. Uma tendência similar foi observada nas velocidades e acelerações angulares de pitch para o mesmo caso.

**Figura 34. Comparação de séries temporais de deslocamento, velocidade e aceleração do movimento de pitch. (a) Caso 1. (b) Caso 2.**

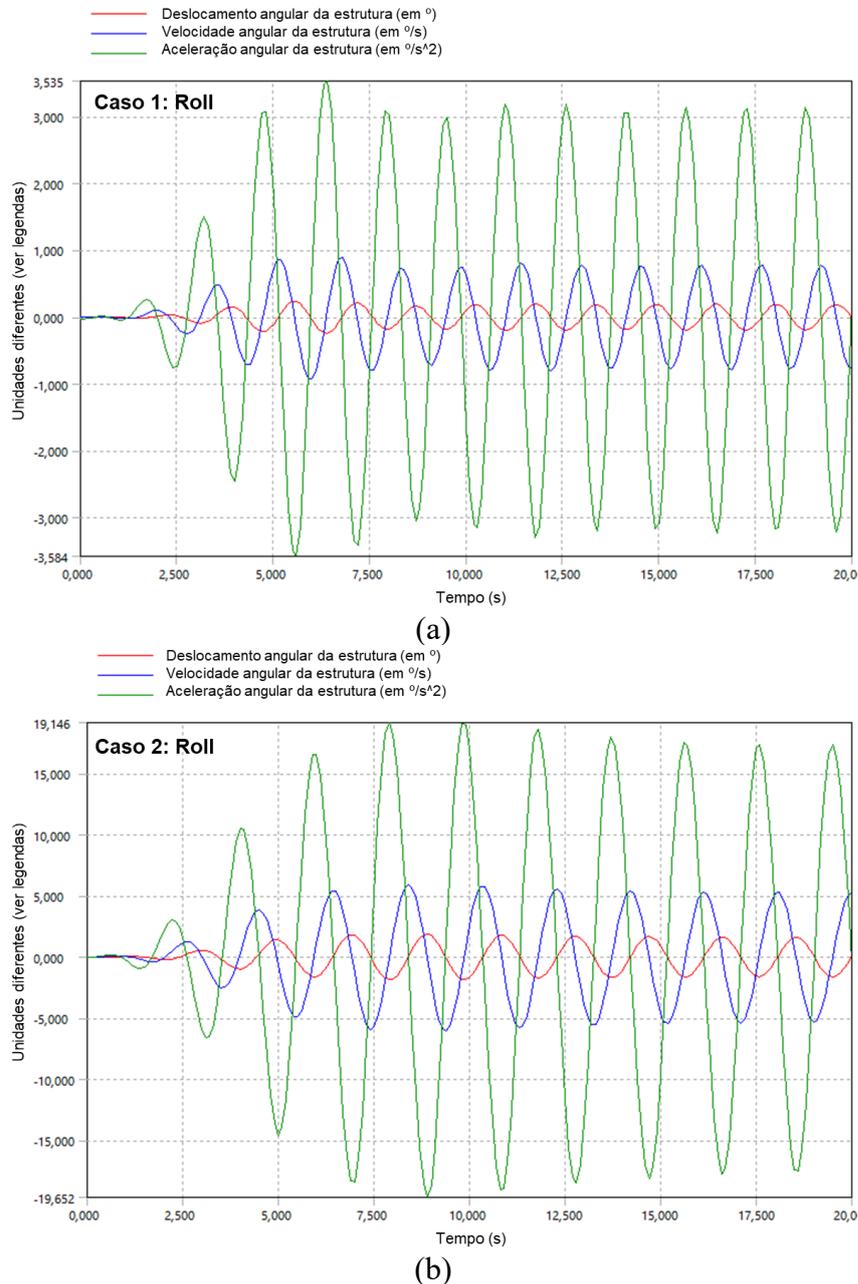


Fonte: Ansys<sup>®</sup> 2024 R1.

Para o movimento de roll (Figuras 35a e 35b), houve uma variação significativa no deslocamento angular do Caso 2 com relação ao Caso 1. As acelerações máximas alcançadas no Caso 2 superestimaram mais de cinco vezes as que foram obtidas no Caso 1. Isto é evidente

pois no Caso 2, as ondas incidiram com um ângulo de 45° com relação à proa, causando uma componente que contribuiu ao momento que causa o balanço da embarcação.

**Figura 35. Comparação de séries temporais de deslocamento, velocidade e aceleração do movimento de roll. (a) Caso 1. (b) Caso 2.**



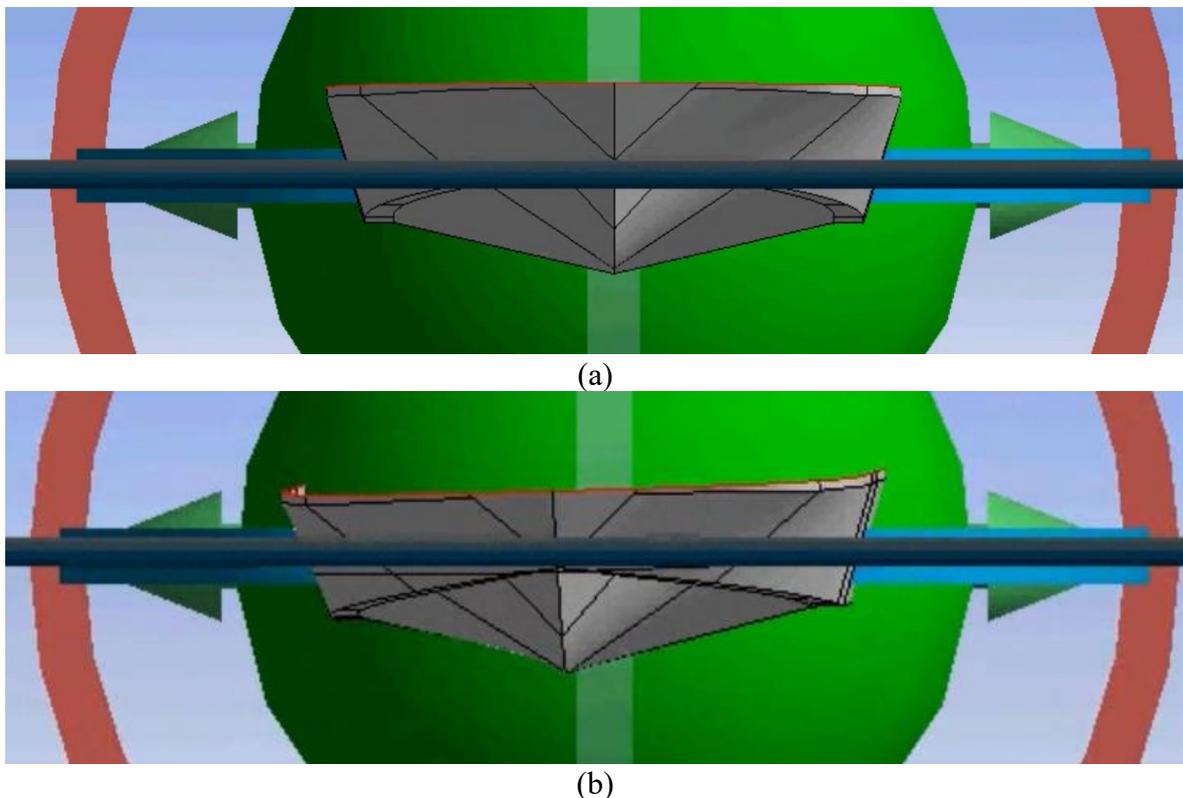
Fonte: Ansys® 2024 R1.

A influência da direção das ondas no movimento de roll da embarcação pode ser ilustrada, de maneira simplificada, pelas Figuras 36a e 36b, que mostra duas imagens obtidas por meio de uma simulação de movimento dos Casos 1 e 2, no software Ansys Aqwa®. Ambas as imagens foram capturadas mantendo o plano Y-Z constante, aproximadamente na metade das simulações de 20 s que foram feitas. Verifica-se que no Caso 2, a embarcação tende a manter

a direção do movimento, mas começa a apresentar efeitos das ondas incidindo pelo boreste. Nas simulações foi observado um movimento de balanço significativo nessa situação, apesar da baixa amplitude considerada na onda incidente (0,1 m). Vale lembrar que a situação avaliada não considera os efeitos da propulsão nem do leme. É possível que em condições reais, essa situação possa ser controlada durante a navegação. No entanto, outras condições ambientais, considerando vento e ondas de maior amplitude podem ser avaliadas para prever o comportamento de diversas embarcações regionais.

Vale mencionar que a abordagem seguida no *Hydrodynamic Response* ainda precisa ser conferida teoricamente e validada com resultados experimentais. Embora o módulo permita realizar simulações baseadas nos resultados do *Hydrodynamic Diffraction*, cuja modelagem desconsidera os efeitos viscosos da água (teoria potencial linear), ainda é necessário comprovar se os resultados permitem representar o comportamento real das embarcações com velocidade de avanço no domínio do tempo.

**Figura 36. Exemplos de situações observadas durante as simulações no domínio do tempo dos Casos 1 e 2. (a) Vista no plano Y-Z durante a simulação do Caso 1 ( $\alpha = 180^\circ$ ). (b) Vista no plano Y-Z durante a simulação do Caso 2 ( $\alpha = 135^\circ$ ).**



Fonte: Ansys® 2024 R1.

## 5 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi feito um levantamento fotográfico de embarcações regionais rápidas na cidade de Parintins – AM, visando documentar mais embarcações amazônicas. Também, foi feita uma análise da dinâmica de uma embarcação do tipo expresso nos domínios da frequência e do tempo, demonstrando a aplicabilidade do software Ansys Aqwa<sup>®</sup>, com seus módulos *Hydrodynamic Diffraction* e *Response*, respectivamente. Com isto, foi apresentado um procedimento alternativo para avaliar a dinâmica de embarcações regionais. As principais conclusões são descritas como segue:

- Existem diversos tipos de embarcações de alta velocidade regionais, as quais desenvolvem atividades de relevância econômica e socioambiental diariamente na região amazônica. Muitas das embarcações regionais precisam de avaliações técnico-científicas que permitam prever o seu comportamento, visando melhoras de segurança, eficiência e sustentabilidade.

- Devido à relevância regional no transporte longitudinal de passageiros, foi escolhida uma embarcação de alta velocidade do tipo expresso para avaliar a sua dinâmica nos domínios da frequência e do tempo. A embarcação escolhida opera com uma velocidade média de 12,5 m/s, em um regime de operação de semi-deslocamento.

- O estudo apresentado pode servir como exemplo para avaliar os movimentos de outras embarcações regionais, sob a ótica da teoria do escoamento potencial. Isto é, considerando o fluido como invíscido e o escoamento como incompressível e irrotacional.

- As análises feitas consideraram a variação de alguns parâmetros para demonstrar o procedimento de análise e avaliar algumas situações de interesse. Estudos posteriores poderão pesquisar os efeitos de mais variáveis nos movimentos da embarcação.

- A análise do domínio da frequência, feita no módulo *Hydrodynamic Diffraction*, permitiu identificar as condições de ondas incidentes que mais podem amplificar os movimentos de heave, pitch e roll da embarcação, considerando a condição de carregamento que foi assumida.

- A análise no domínio do tempo, feita no módulo *Hydrodynamic Response*, permitiu demonstrar um método alternativo para simular o movimento da embarcação com velocidade de avanço. Foi restrito o movimento de avanço e foi aplicada uma correnteza com velocidade constante igual à velocidade da embarcação. O procedimento permitiu avaliar os movimentos resultantes sob a incidência de trens de ondas regulares. Este procedimento precisa ser

comparado com testes experimentais ou outros métodos para avaliar movimentos de embarcações com velocidade de avanço.

- O estudo apresentado pode ser estendido para avaliar os efeitos de diversas condições de carregamento e outros tipos de ondas incidindo com a embarcação, incluindo condições de mar irregular. Também, sugere-se pesquisar mais abordagens práticas para determinar a matriz de inércia da embarcação.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, H. R. **Levantamento de embarcações de pequeno porte comuns na região amazônica e estudo da resposta em ondas de uma embarcação do tipo voadeira**. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2024.

AMARAL, G. A. et al. Seakeeping tests of a FOWT in wind and waves: An analysis of dynamic coupling effects and their impact on the predictions of pitch motion response. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 2, p. 179, 2021.

ANA. **ANA - Agência Nacional de Águas. Região hidrográfica amazônica**. Disponível em: <<https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/fa3edd5c-152e-4e69-91fb-26281bafc811/attachments/Amazonica.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2024.

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

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

ANSYS, A. **AQWA theory manual**. ed. Canonsburg, PA 15317, USA, 2013.

BECHMAN, V. S. **Metodologia para caracterizar a geometria do casco e o comportamento hidrodinâmico de uma embarcação regional amazônica do tipo expresso**. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2024.

BERNAL-CAMACHO, D. F.; FONTES, J. V.; MENDOZA, E. A Technical Assessment of Offshore Wind Energy in Mexico: A Case Study in Tehuantepec Gulf. **Energies**, v. 15, n. 12, p. 4367, 2022.

BITENCOURTT, D. S. **Estudo experimental da velocidade de avanço e das ondas geradas por uma embarcação regional do tipo rabeta**. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2024.

BNCAMAZONAS. **Além da cobra grande, o que mais tem nas profundezas do rio Amazonas?** Disponível em: <<https://bncamazonas.com.br/municipios/alem-da-cobra-grande-o-que-mais-tem-nas-profundezas-do-rio-amazonas/>>. Acesso em: 30 abr. 2024.

CHANDRASEKARAN, S. Parametric studies on the impact response of offshore triceratops in ultra-deep waters. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 16, n. 7, p. 1002–1018, 2020.

CHEN, L. et al. CFD Modelling to Investigate Design of a Whaleback-Type Forecastle for Greenwater Protection. **ASME 2019 38th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering**. Anais...American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2019.

CHU, Y.; WANG, C.; ZHANG, H. A frequency domain approach for analyzing motion responses of integrated offshore fish cage and wind turbine under wind and wave actions. **Aquacultural Engineering**, v. 97, p. 102241, 2022.

CRESPO, A. J. et al. DualSPHysics: Open-source parallel CFD solver based on Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH). **Computer Physics Communications**, v. 187, p. 204–216, 2015.

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.

DAVID, R. C. DE A. **A dinâmica do transporte fluvial de passageiros no Estado do Amazonas** (in portuguese). Master Dissertation—Amazonas, Brazil: Federal University of Amazonas, 2010.

DE SOUZA, J. A. et al. A problemática dos acidentes de embarcações no Rio Madeira e os desafios para a engenharia naval regional. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 14, n. 12, p. 20814–20834, 2023.

DPC. **Regulamento Internacional para Evitar Abalroamento no Mar - RIPEAM**. Disponível em: <<https://www3.dpc.mar.mil.br/portagevi/publicacoes/colreg/Ripeam.pdf>>. Acesso em: 29 maio. 2023.

EÇA, L.; HOEKSTRA, M. A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies. **Journal of Computational Physics**, v. 262, p. 104–130, 2014.

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

FALTINSEN, O. M. **Hydrodynamics of high-speed marine vehicles**. [s.l.] Cambridge university press, 2005.

FERZIGER, J. H.; PERIĆ, M. Further discussion of numerical errors in CFD. **International Journal for Numerical Methods in Fluids**, v. 23, n. 12, p. 1263–1274, 1996.

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

FONTES, J. V. H. et al. Marine Accidents in the Brazilian Amazon: Potential Risks to the Aquatic Environment. **Sustainability**, v. 15, n. 14, 2023b.

GRECO, M.; LUGNI, C.; FALTINSEN, O. M. Can the water on deck influence the parametric roll of a FPSO? A numerical and experimental investigation. **European Journal of Mechanics-B/Fluids**, v. 47, p. 188–201, 2014.

HERNÁNDEZ-FONTES, J. V. et al. Toward More Sustainable River Transportation in Remote Regions of the Amazon, Brazil. **Applied Sciences**, v. 11, n. 5, p. 2077, 2021.

HSU, W. et al. Prediction of extreme tensions in mooring lines of a floating offshore wind turbine in a 100-year storm. **International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. Anais...American Society of Mechanical Engineers, 2015.

IBGE. **Cidades e Estados: Parintins**. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/am/parintins.html>>. Acesso em: 3 jul. 2024.

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

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

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

LIAN, J. et al. Effects of damping plate on the motion response of transport ships under waves. **Applied Ocean Research**, v. 134, p. 103507, 2023.

MAIA, H. W. et al. Computational Fluid Dynamics Applied to River Boat Hull Optimization. **Marine Technology Society Journal**, v. 55, n. 5, p. 94–108, 2021.

MAIA, H. W. et al. COVID Pandemics and Inland Transportation in the Brazilian Amazon: A Note on the Risks of Infection in Typical Passenger Vessels. **COVID**, v. 3, n. 8, p. 1052–1062, 2023.

MAIA, H. W.; SAID, M. Analysis for Resistance Reduction of an Amazon School Boat Through Hull Shape Modification Utilizing a CFD Tool. **Marine Technology Society Journal**, v. 53, n. 4, p. 57–67, 2019.

MARINHA-DO-BRASIL. **NORMAM - Normas da Autoridade Marítima (in Portuguese)**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/dpc/normas>>. Acesso em: 24 mar. 2020.

MARQUES, R. T. S. F. **Dinâmica de uma estrutura flutuante monocoluna usando o método de escoamento potencial**. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2023.

MAXSURF. **Maxsurf Motions**. Disponível em: <<https://maxsurf.net/motions-seakeeping-performance-prediction>>. Acesso em: 3 jul. 2024.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. **Ship resistance and propulsion**. [s.l.] Cambridge university press, 2017.

NEWMAN, J. The Green function for potential flow in a rectangular channel. **Journal of engineering mathematics**, v. 26, p. 51–59, 1992.

NEWMAN, J. N. **Marine hydrodynamics**. [s.l.] The MIT press, 2018.

ORCA3D. **Orca3D Marine design for Rhinoceros. Naval architecture in Rhino. Software written and supported by naval architects, for naval architects**. Disponível em: <<https://orca3d.com/>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

PEET, G. The MARPOL Convention: implementation and effectiveness. **Int'l J. Estuarine & Coastal L.**, v. 7, p. 277, 1992.

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

PORTALAMAZONIA. **Você sabe a profundidade do rio Amazonas?** Disponível em: <<https://portalamazonia.com/amazonia/voce-sabe-a-profundidade-do-rio-amazonas>>. Acesso em: 28 abr. 2024.

QIN, S. et al. Flume experiments on energy conversion behavior for oscillating buoy devices interacting with different wave types. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 8, p. 852, 2021.

REN, Y.; VENUGOPAL, V.; SHI, W. Dynamic analysis of a multi-column TLP floating offshore wind turbine with tendon failure scenarios. **Ocean engineering**, v. 245, p. 110472, 2022.

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

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

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

SOARES, N. L. DO N. et al. Estudo das ondas geradas por uma embarcação regional do tipo Expresso utilizando o software Maxsurf Resistance. **Revista Foco**, v. 16, n. 12, p. e3861–e3861, 2023.

SOARES, N. L. DO N. **Recomendações para o estudo das ondas geradas por embarcações utilizando o Maxsurf Resistance**. Trabalho de Conclusão de Curso. Trabalho de Conclusão de Curso—Manaus: Universidade do Estado do Amazonas, 2023.

STERN, F. et al. **Verification and validation of CFD simulations**. [s.l.] IOWA INST OF HYDRAULIC RESEARCH IOWA CITY, 1999.

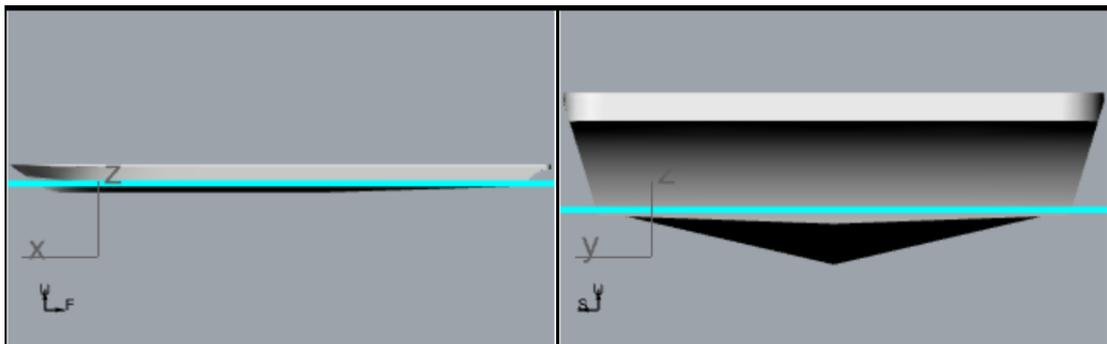
WAMIT. **WAMIT User Manual Version 7.5**. Disponível em: <<https://www.wamit.com/manual.htm>>. Acesso em: 3 jul. 2024.

XU, H.; NENG, P.; YANG, F. Motion response analysis of mining vessel based on ANSYS/AQWA. **Journal of physics: Conference series**. Anais...IOP Publishing, 2019.

## APÊNDICE A

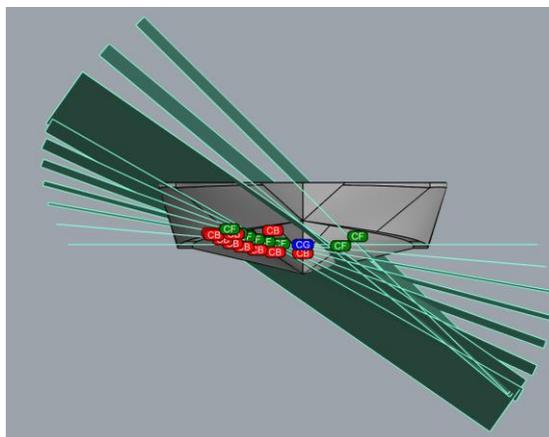
O apêndice mostra um relatório, feito na versão acadêmica do software Orca3D<sup>®</sup>, que é um plugin para o software Rhinoceros<sup>®</sup> (DA SILVA, 2024), dos parâmetros hidrostáticos para a condição de carga considerada no presente estudo. Tal condição foi avaliada no software Ansys Aqwa<sup>®</sup>, considerando um calado de 0,4 m, assim como a posição do centro de gravidade na linha de água (VCG) e na metade da embarcação (LCG). É importante considerar que os dados foram dados com relação ao sistema referencial do Orca3D<sup>®</sup>, cuja posição vertical da origem estava a +0,297 m da linha de base da embarcação. A Figura 37 mostra a condição de carregamento avaliada, enquanto a Figura 38 mostra as inclinações consideradas durante o teste hidrostático. Finalmente, a Tabela 3 a e Figura 39 apresentam dados relevantes do relatório gerado pelo software. Informações relacionadas com a definição de cada parâmetro podem ser encontrados no manual técnico do software (ORCA3D, 2024).

**Figura 37. Condição de flutuação para o caso de estudo cujos movimentos em ondas foram avaliados.**



Fonte: software Orca3D<sup>®</sup>.

**Figura 38. Inclinações consideradas durante a análise de estabilidade intacta.**



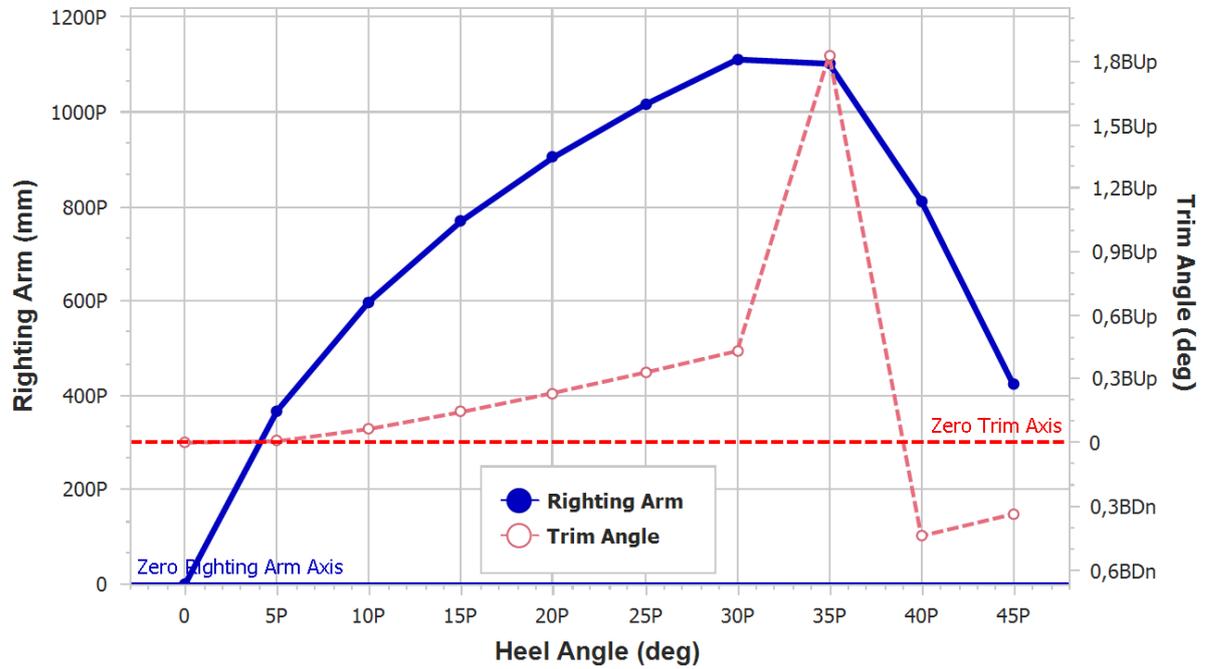
Fonte: software Orca3D<sup>®</sup>.

Tabela 3. Relatório de análise hidrostática feito no software Orca3D®, na condição de calado avaliada.

<b>Propriedades de massa</b>		
Deslocamento	23953 kgf	Calculado a partir do calado definido
LCG	10,92 m	Calculado a partir do sistema coordenado e trim definido
TCG	0 m	Calculado a partir do heel definido
VCG	0.103 m	Especificado como entrada
<b>Orientação do modelo</b>		
Afundamento (sinkage)	0,103 m	Medido a partir da posição do sistema de coordenadas definido no software
Trim	0 m	Medido a partir da posição do sistema de coordenadas definido no software
Heel	0 m	Medido a partir da posição do sistema de coordenadas definido no software
<b>Dimensões principais</b>		
Comprimento total (L)	24,4 m	Corresponde à geometria modelada, não ao caso real
Boca total (B)	3,9 m	Corresponde à geometria modelada, não ao caso real
Pontal (D)	1,25 m	Corresponde à geometria modelada, não ao caso real
Comprimento / Boca	6,247	---
Boca / Pontal	3,126	---
Pontal / Comprimento	0,051	---
<b>Dimensões na linha da água</b>		
Comprimento da linha da água (Lwl)	22,06 m	Corresponde à geometria modelada
Boca na linha da água (Bwl)	3,42 m	Corresponde à geometria modelada
Calado de navegação (T)	0,4 m	Corresponde à geometria modelada
<b>Parâmetros volumétricos</b>		
Peso do deslocamento	23953 kgf	---
Volume	23,35 m <sup>3</sup>	---
LCB	10,92 m	---
TCB	0 m	---
VCB	-0,015 m	---
Superfície de água molhada	141,7 m <sup>2</sup>	---
Momento para causar trim	20850,1 N-m/cm	---
Radio de deslocamento / comprimento	62,11	---
<b>Parâmetros do plano da água</b>		
Área do plano da linha da água	135,352 m <sup>2</sup>	---
LCF	9,8 m	---
TCF	0 m	---
Peso para imersão	1388,6 kgf/cm	---
Momento de inércia (I, transversal)	122,7 m <sup>4</sup>	---
Momento de inércia (I, longitudinal)	4576,1 m <sup>4</sup>	---
<b>Coefficientes de forma</b>		
Cb	0,772	---
Cvp	0,431	---
Cwp	1,788	---
Cws	6,243	---
<b>Parâmetros de estabilidade estática</b>		
Mt	5,14 m	---
BMt	5,25 m	---
GMT	5,14 m	Não possui correção
MI	195,8 m	---
BMI	195,9 m	---
GML	195,8 m	Não possui correção

Fonte: software Orca3D®.

Figura 39. Relatório de análise hidrostática feito no software Orca3D®, na condição de calado avaliada. O gráfico corresponde ao ângulo endiretador (righting arm) e ângulo de trim (trim angle) para diferentes ângulos de heel (inclinação transversal).



Fonte: software Orca3D®.