

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

DÉBORAH DAYANE LEÃO DOS SANTOS

**RESPOSTA DE UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL EM ONDAS IRREGULARES
USANDO ANSYS AQWA**

Manaus

2025



DÉBORAH DAYANE LEÃO DOS SANTOS

**RESPOSTA DE UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL EM ONDAS IRREGULARES
USANDO ANSYS AQWA**

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

2025



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.

S237r	<p>SANTOS, DÉBORAH DAYANE LEÃO DOS RESPOSTA DE UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL EM ONDAS IRREGULARES USANDO ANSYS AQWA / DÉBORAH DAYANE LEÃO DOS SANTOS. Manaus : [s.n], 2025. 94 f.: color.; 21.0 cm.</p> <p>TCC - Graduação em Engenharia Naval- Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2025. Inclui Bibliografia. Inclui Apêndice. Inclui Anexo. Orientador: JASSIEL VLADIMIR HERNÁNDEZ FONTES.</p> <p>1. Ansys Aqwa. 2. embarcação cabinada. 3. movimentos. 4. ondas irregulares. 5. região amazônica. I. JASSIEL VLADIMIR HERNÁNDEZ FONTES (Orient.) II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU(1997)629.5</p>
-------	--



DÉBORAH DAYANE LEÃO DOS SANTOS

**RESPOSTA DE UMA EMBARCAÇÃO REGIONAL EM ONDAS IRREGULARES
USANDO ANSYS AQWA**

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: 28 de novembro de 2025.

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

2025



AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida, pela força concedida em cada desafio e por me sustentar e guiar até este momento tão significativo da minha trajetória.

Aos meus pais e ao meu irmão, pelo incentivo sem medida, compreensão nos momentos de dificuldade e apoio constante durante toda a jornada acadêmica.

À Sarah Victória, que surgiu em minha vida como apoio e direção, trazendo equilíbrio e inspiração, minha eterna gratidão por ter me colocado no caminho certo, após dificuldades.

Ao meu orientador, Professor Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes, pela dedicação, paciência e pelos valiosos conselhos, atuando como um verdadeiro lapidador neste processo. Sua orientação foi essencial para que este trabalho fosse concluído, e serei sempre grata por isso.

À Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas e aos professores do Curso de Engenharia Naval, pelos ensinamentos compartilhados e pela contribuição na minha formação acadêmica e profissional.

O presente trabalho recebeu suporte do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil, CNPq (Chamada CNPq-FNDCT-MCTI N° 14/2022 – Faixa A, processo 405529/2022-8) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas, FAPEAM (Edital nº013/2024 – PROIN SOCIAL/FAPEAM).





“Sou feita de retalhos, pedacinhos coloridos de cada vida que passa pela minha e que vou costurando na alma.” - Adélia Prado

RESUMO

Na região amazônica, diversos tipos de embarcações podem estar expostos a riscos operacionais devido à interação com ondas causadas por tempestades eventuais ou pelo movimento de outras embarcações, sendo relevante o estudo do seu comportamento nessas condições. O presente trabalho visa demonstrar a aplicabilidade do software Ansys Aqwa para avaliar os movimentos de uma embarcação regional de pequeno porte em condições de ondas irregulares. Como caso de estudo, é considerada uma embarcação do tipo cabinada, comumente utilizada na região para atividades de relevância social, incluindo deslocamento de passageiros, transporte escolar e atendimento emergencial. Foram considerados os módulos *Hydrodynamic Diffraction* e *Hydrodynamic Response* para avaliar os movimentos da embarcação nos domínios da frequência e do tempo, respectivamente. O estado das ondas foi representado com adaptações de período e altura significativa no espectro de ondas JONSWAP. Os resultados demonstraram a aplicabilidade do software para avaliar deslocamentos, velocidades e acelerações, nos seis graus de liberdade e nos domínios da frequência e do tempo. Salienta-se a necessidade de realizar medições das elevações da superfície dos rios da região amazônica para realizar estimativas mais aproximadas. Espera-se que o presente trabalho sirva de base para avaliar a dinâmica de outras embarcações regionais.

Palavras-chave: Ansys Aqwa, embarcação cabinada, movimentos, ondas irregulares, região amazônica.



ABSTRACT

In the Amazon region, various types of vessels may be exposed to operational risks due to interaction with waves caused by occasional storms or the movement of other vessels, making the study of their behavior under these conditions relevant. This work aims to demonstrate the applicability of the Ansys Aqwa software to evaluate the movements of a small regional vessel under irregular wave conditions. As a case study, a cabin-type vessel, commonly used in the region for socially relevant activities, including passenger transport, school transport, and emergency response, is considered. The Hydrodynamic Diffraction and Hydrodynamic Response modules were used to evaluate the vessel's movements in the frequency and time domains, respectively. The wave state was represented with period and significant height adaptations in the JONSWAP wave spectrum. The results demonstrated the applicability of the software to evaluate displacements, velocities, and accelerations in the six degrees of freedom and in the frequency and time domains. The need to measure the surface elevations of rivers in the Amazon region to obtain more accurate estimates is highlighted. It is expected that this work will serve as a basis for evaluating the dynamics of other regional vessels.

Keywords: Ansys Aqwa, cabin-type vessel, motions, irregular waves, Amazon region.



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Exemplos de embarcações regionais encontradas no Estado do Amazonas. (a) Recreio. (b) Ferryboat. (c) Boiadeira. (d) Expresso. (e) e (f) Miniexpresso. (g) Embarcação cabinada de serviços do governo do Estado. (h) Voadeira.	14
Figura 2. Exemplo de transformação dos espectros de onda.....	41
Figura 3. Relação entre espectro de ondas, operadores de amplitude de resposta, e espectros resultantes de resposta.	43
Figura 4. Arranjo geral da embarcação cabinada considerada como caso de estudo.	45
Figura 5. Aspecto da embarcação modelada no Rhino3D e aberta no Ansys Design Modeler.	45
Figura 6. Domínio computacional utilizado nas análises.	46
Figura 7. Aspecto da malha gerada para as análises.....	47
Figura 8. Grid utilizado para a superfície das ondas.	47
Figura 9. Direção das ondas encontrando a embarcação (em °).....	48
Figura 10. Seleção dos parâmetros requeridos para implementar o Espectro JONSWAP.	49
Figura 11. Operadores de Amplitude de Resposta de deslocamento com relação ao ângulo de incidência das ondas com a embarcação e a frequência das ondas. (a) Surge. (b) Sway. (c) Heave. (d) Roll. (e) Pitch. (f) Yaw.	51
Figura 12. Operador de amplitude de resposta do movimento de surge, para um ângulo de incidência das ondas de 180° (pela proa). (a) Amplitude. (b) Fase.	55
Figura 13. Operador de amplitude de resposta do movimento de sway, para um ângulo de incidência das ondas de 180° (pela proa). (a) Amplitude. (b) Fase.	56
Figura 14. Operador de amplitude de resposta do movimento de heave, para um ângulo de incidência das ondas de 180° (pela proa). (a) Amplitude. (b) Fase.	57
Figura 15. Operador de amplitude de resposta do movimento de roll, para um ângulo de incidência das ondas de 180° (pela proa). (a) Amplitude. (b) Fase.	58
Figura 16. Operador de amplitude de resposta do movimento de pitch, para um ângulo de incidência das ondas de 180° (pela proa). (a) Amplitude. (b) Fase.	59
Figura 17. Operador de amplitude de resposta do movimento de yaw, para um ângulo de incidência das ondas de 180° (pela proa). (a) Amplitude. (b) Fase.	60
Figura 18. Comparação da interação da embarcação com ondas regulares de diferentes frequências incidindo pela proa (ângulo de incidência de 180°). A amplitude das ondas foi mantida constante em 0,3m para fins ilustrativos.....	61



Figura 19. Espectro de ondas considerado na análise de movimentos em ondas irregulares...	64
Figura 20. Espectro de resposta do deslocamento de surge.	65
Figura 21. Espectro de resposta do deslocamento de Sway.	66
Figura 22. Espectro de resposta do deslocamento de heave.....	66
Figura 23. Espectro de resposta do deslocamento de roll.....	67
Figura 24. Espectro de resposta do deslocamento de pitch.	67
Figura 25. Espectro de resposta do deslocamento de yaw.....	67
Figura 26. Espectro de resposta da aceleração de surge.....	69
Figura 27. Espectro de resposta da aceleração de sway.	69
Figura 28. Espectro de resposta da aceleração de heave.	70
Figura 29. Espectro de resposta da aceleração de roll.....	70
Figura 30. Espectro de resposta da aceleração de pitch.	71
Figura 31. Espectro de resposta da aceleração de yaw.	71
Figura 32. Série temporal da elevação das ondas irregulares considerada nas análises.....	72
Figura 33. Deslocamento do movimento de surge no domínio do tempo.	73
Figura 34. Deslocamento do movimento de sway no domínio do tempo.	73
Figura 35. Deslocamento do movimento de heave no domínio do tempo.	74
Figura 36. Deslocamento do movimento de roll no domínio do tempo.....	74
Figura 37. Deslocamento do movimento de pitch no domínio do tempo.....	75
Figura 38. Deslocamento do movimento de yaw no domínio do tempo.....	75
Figura 39. Aceleração do movimento de surge no domínio do tempo.	76
Figura 40. Aceleração do movimento de sway no domínio do tempo.	77
Figura 41. Aceleração do movimento de heave no domínio do tempo.	77
Figura 42. Aceleração do movimento de roll no domínio do tempo.	78
Figura 43. Aceleração do movimento de pitch no domínio do tempo.....	78
Figura 44. Aceleração do movimento de yaw no domínio do tempo.....	79
Figura 45. Imagens da simulação das ondas irregulares incidindo pela proa da embarcação, representando diferentes instantes. A embarcação se encontra flutuando livremente, sem velocidade de avanço.....	79
Figura 46. Exemplo de embarcação tipo lancha voadeira no Estado do Amazonas, no Rodway de Manaus - Terminal Ajato.	89
Figura 47. Exemplo de embarcação tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, no Rio Negro em Iranduba.	89



Figura 48. Exemplo de embarcação tipo Lancha no Estado do Amazonas, no Rio Negro em Iranduba.....	89
Figura 49. Exemplo de embarcação tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, na Balsa Amarela em Manaus.....	90
Figura 50. Exemplo de embarcação tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, na Balsa Amarela em Manaus.....	90
Figura 51. Exemplo de embarcação tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, na Balsa Amarela em Manaus.....	90
Figura 52. Exemplo de embarcação tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, no Terminal Ajato em Manaus.....	91
Figura 53. Exemplo de embarcação tipo Lancha Voadeira no Estado do Amazonas, no Porto de Manaus.	91
Figura 54. Exemplo de embarcação tipo lancha expresso no Estado do Amazonas, no Rodway de Manaus.....	91
Figura 55. Exemplo de embarcação tipo Lancha Voadeira do Corpo de Bombeiros no Estado do Amazonas, no Porto de Manaus.	92
Figura 56. Exemplo de embarcação tipo lancha expresso, no Estado do Amazonas, no Porto de Manaus.	92
Figura 57. Exemplo de embarcação Tipo Lancha de Apoio do Corpo de Bombeiros no Estado do Amazonas, no Porto de Manaus.	92
Figura 58. Exemplo de embarcação Tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, no Porto de Itacoatiara.....	93
Figura 59. Exemplo de embarcação Tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, no Porto de Itacoatiara.....	93
Figura 60. Exemplo de embarcação Tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, no Porto de Itacoatiara.....	93
Figura 61. Exemplo de embarcação Tipo Lancha de Praticagem no Estado do Amazonas, na Orla de Itacoatiara.	94
Figura 62. Exemplo de embarcação Tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, no Porto de Itacoatiara.....	94



LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores da Função de Ponderação.....	36
Tabela 2. Características principais da embarcação.	46
Tabela 3. Configuração das ondas irregulares no Ansys.	50
Tabela 4. Resultados hidrostáticos proporcionados pelo software Hydrodynamic Diffraction para a condição de embarcação que foi avaliada.....	88



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Contextualização	14
1.2. Justificativa	16
1.3. Objetivos	16
1.3.1. Objetivo geral	16
1.3.2. Objetivos específicos	16
2. ESTADO DA ARTE	18
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
3.1. Onda linear regular	31
3.2. Ondas irregulares.....	33
3.3. Espectro JONSWAP	35
3.4. Cálculo das forças hidrodinâmicas no corpo usando a teoria potencial.....	37
3.5. Operadores de Amplitude de Resposta.....	39
3.6. Movimentos em ondas irregulares	41
3.6.1. Transformações de Espectro	41
3.6.2 Espectros de resposta	42
4 METODOLOGIA.....	45
5. RESULTADOS DA ANÁLISE EM ONDAS REGULARES	51
6 RESULTADOS DA ANÁLISE EM CONDIÇÕES DE ONDAS IRREGULARES	64
6.1 Resultados da resposta em ondas irregulares no domínio da frequência.....	64
6.1.1 Espectro ondas considerado na análise.....	64
6.1.2 Espectros de resposta de deslocamento	65
6.1.2 Espectros de resposta de aceleração	68
6.2 Resultados da resposta em ondas irregulares no domínio do tempo	72
6.2.1 Deslocamentos no domínio do tempo.....	72



6.2.2 Acelerações no domínio do tempo.....	76
6.2.3 Resultados da simulação no domínio do tempo	79
5. CONCLUSÕES.....	83
REFERÊNCIAS	84
APÊNDICE A: RESULTADOS HIDROSTÁTICOS	88
APÊNDICE B: EXEMPLOS DE EMBARCAÇÕES CABINADAS	89

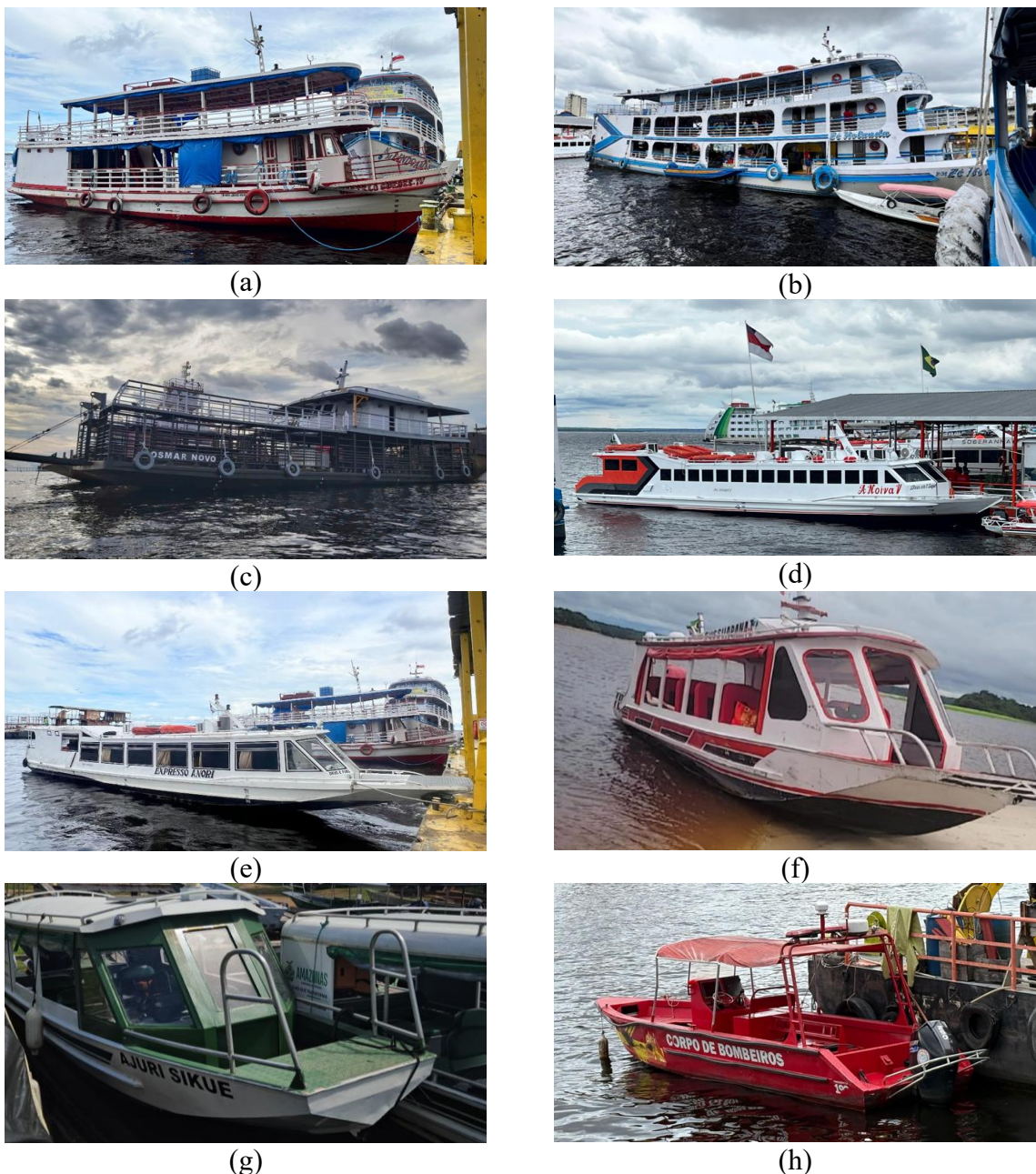


1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Na Amazônia brasileira, a navegação interior é feita utilizando diversos tipos de embarcações. As Figuras 1a – 1h mostram alguns exemplos de embarcações regionais encontradas no Estado do Amazonas, podendo ser identificadas embarcações de diversos tamanhos e usos.

Figura 1. Exemplos de embarcações regionais encontradas no Estado do Amazonas. (a) Recreio. (b) Ferryboat. (c) Boiadeira. (d) Expresso. (e) e (f) Miniexpresso. (g) Embarcação cabinada de serviços do governo do Estado. (h) Voadeira.



Fonte: (a), (b), (d), (e), (h) Déborah Santos, 2025. (c) Francisco Xavier Neto, 2025. (f), (g) Lucas Garcês, 2025.



Estudos relevantes nos projetos navais desenvolvidos na região incluem análises de estabilidade, estruturais e de propulsão. A maioria dos requerimentos de operação podem ser encontradas nas Normas da Autoridade Marítima brasileira (Marinha, 2023). Porém, o comportamento em condições de ondas tem sido pouco pesquisado nas embarcações regionais da Amazônia. Ainda, muitas embarcações regionais costumam ser desenvolvidas utilizando técnicas baseadas em experiência prévia, carecendo de análises utilizando conhecimentos científicos para determinar o seu comportamento.

Embora possa se pensar que nos rios da região amazônica não ocorrem ondas na sua superfície, na realidade elas podem acontecer, mas sem grandes amplificações como acontece no oceano. Essas ondas, que podem ser de diversos tipos (Alfredini; Arasaki, 2014), podem afetar o comportamento de algumas embarcações, principalmente as de pequeno e médio porte. Durante as tempestades, a superfície dos rios tende a ser alterada pelo vento, causando condições de ondas irregulares. Além disso, o movimento de outras embarcações pode criar trens de ondas que podem afetar banhistas ou embarcações menores (Kirkegaard; Kofoed-Hansen; Elfrink, 1998; Li; Yuan; Tao, 2023). Cabe mencionar que, no conhecimento da autora, o monitoramento das elevações das ondas durante tempestades dos rios da Amazônia não existe ou não tem sido disponibilizado na literatura. Algumas evidências da ocorrência de ondas durante tempestades podem ser encontradas na mídia regional e em alguns vídeos de domínio público.

O estudo da dinâmica de embarcações e estruturas flutuantes em ondas é importante para prever o seu comportamento, pois elas podem alterar o seu movimento, causando eventos extremos como impacto do casco com a superfície da água (*slamming*), embarque de água no convés (*shipping water, green water*), movimento de líquidos em tanques (*sloshing*), altas acelerações, balanço paramétrico, entre outros (Chryssostomidis; Liu, 2011; Faltinsen, 1993; Journée; Massie, 2001).

Geralmente, a primeira fase na análise dos movimentos de uma embarcação é estudar a sua resposta em ondas regulares, para obter os operadores de amplitude de resposta nos diferentes graus de liberdade. Subsequentemente, costuma-se avaliar o comportamento em condições de ondas irregulares, visando conhecer a resposta da embarcação nos domínios da frequência e do tempo.

Visando contribuir com o desenvolvimento de embarcações regionais mais seguras, eficientes e sustentáveis, o presente trabalho propõe um estudo para avaliar o movimento de embarcações regionais na condição de flutuação livre em condições de ondas irregulares. A metodologia proposta é feita utilizando o software Ansys Aqwa. Como caso de estudo, foi



considerada uma embarcação regional de pequeno porte cabinada, comumente utilizada na região para transporte de passageiros em atividades diversas, incluindo transporte escolar e atendimento emergencial.

1.2. Justificativa

Poucos estudos têm sido realizados para avaliar a dinâmica de embarcações regionais amazônicas em condições de ondas. Basicamente, os trabalhos realizados têm acadêmicos, visando análises em condições de ondas regulares, baseados no estudo dos operadores de amplitude de resposta. Além dos estudos em ondas regulares, é necessário propor alternativas para estudar condições de ondas irregulares, pois elas são as que podem assemelhar mais às condições reais, já que um sistema de ondas irregulares pode se definir como a combinação de várias componentes de ondas regulares. Os trabalhos acadêmicos mais recentes neste tópico de estudo, desenvolvidos na Universidade do Estado do Amazonas, têm utilizado o software Ansys Aqwa para as análises em ondas regulares (Cursino, 2024; Libório, 2024). O presente trabalho de conclusão de curso visa estender esses estudos, introduzindo o uso do software Ansys Aqwa para avaliar a resposta de uma embarcação regional em condições de ondas irregulares.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Demonstrar a aplicabilidade do software Ansys Aqwa para avaliar a resposta em ondas irregulares de uma embarcação de uso comum na região amazônica, nos domínios da frequência e do tempo.

1.3.2. Objetivos específicos

- Implementar o software Ansys Aqwa para avaliar o movimento em ondas de uma embarcação regional amazônica utilizada em atividades de relevância social, incluindo o transporte de passageiros, na condição de flutuação livre.
- Gerar a geometria tridimensional da embarcação e adaptá-la para uso no software Ansys Aqwa.
- Definir casos de estudo e avaliar a resposta da embarcação em condições de ondas regulares.



- Avaliar os movimentos em condições de ondas irregulares, verificando a aplicabilidade do espectro de ondas JONSWAP para representar o estado das ondas.
- Analisar as respostas da embarcação às ondas irregulares no domínio da frequência e do tempo, utilizando os módulos Hydrodynamic Diffraction e Hydrodynamic Response do Ansys Aqwa, respectivamente.



2. ESTADO DA ARTE

Fonseca e Guedes Soares (1998) desenvolveram um método para analisar os movimentos verticais de navios e cargas induzidas por ondas, levando em conta efeitos não lineares associados a grandes amplitudes de movimento e à forma do casco. Para isso, os pesquisadores utilizaram uma abordagem baseada na teoria de faixas (*strip theory*), resolvendo o problema no domínio do tempo por meio de convolução para considerar os efeitos de memória das oscilações da superfície livre. Os esforços hidrodinâmicos foram representados por funções de resposta ao impulso, massas adicionadas de frequência infinita e coeficientes de restauração da radiação. Além disso, as forças hidrostáticas e de Froude-Krylov foram calculadas sobre a superfície molhada instantânea do casco para capturar os efeitos não lineares. O principal resultado do estudo mostrou que, ao contrário do que a teoria linear prevê, as respostas do navio não aumentam proporcionalmente à amplitude das ondas. Em ondas de grande amplitude, as respostas não lineares apresentaram taxas de variação menores do que as previstas pelos modelos lineares, e os movimentos verticais foram menores do que os calculados linearmente. Além disso, as forças de cisalhamento e momentos fletores na condição de *sagging* foram superiores aos valores na condição de *hogging*, o que está em conformidade com medições experimentais anteriores. A principal conclusão é que a modelagem das forças hidrostáticas e de Froude-Krylov de forma não linear melhora a precisão das previsões, permitindo uma solução computacionalmente viável para aplicações práticas na engenharia naval.

Fonseca e Guedes Soares (2004) utilizaram um modelo de um navio porta-contêineres alterando a velocidade em ondas regulares de proa, tendo objetivo de quantificar e identificar os efeitos não lineares. Com intuito de preencher lacunas na pesquisa existente sobre os efeitos não lineares nos movimentos verticais e nas cargas de navios, e assim, fornecendo dados experimentais detalhados e completos para usar na validação de novas teorias e métodos numéricos não lineares no cálculo das respostas de navios em ondas. O resultado foi que os efeitos não lineares existem nos movimentos e cargas estruturais verticais, com destaque para a maior influência dos efeitos não lineares nas cargas verticais, que apresentaram amplitudes significativas de harmônicos de ordem superior e grande assimetria nos picos de *sagging* e *hogging*. Também foi observado que a influência da inclinação das ondas afetava as amplitudes dos harmônicos de segunda e terceira ordem e a assimetria das cargas. A conclusão foi que os efeitos não lineares nas cargas estruturais verticais são muito mais fortes do que nos movimentos verticais. Além disso, a influência da velocidade do navio, nas condições das ondas e das cargas estruturais constantes também contribui para esses efeitos não lineares.



Reguram et al. (2016) analisaram a eficácia de um sistema de aletas fixas na proa de navios porta-contêineres para controlar o movimento de pitch (afundamento e elevação da proa) e reduzir o risco de rolamento paramétrico, que é perigoso para grandes embarcações. Para isso, foram realizadas simulações utilizando o software ANSYS AQWA, tanto em ondas regulares quanto irregulares, avaliando como diferentes configurações de aletas impactam os movimentos do navio. O estudo considerou uma ampla faixa de condições operacionais, incluindo diferentes velocidades e comprimentos de onda. Os resultados mostraram que o uso das aletas fixas na proa do navio reduziu significativamente os movimentos de pitch, com uma redução de até 37% para combinações específicas de velocidade e comprimento de onda. Além disso, o estudo indicou que a implementação dessas aletas ajudaria a evitar o rolamento paramétrico, um fenômeno perigoso para embarcações com cascos mais esguios, como os porta-contêineres. A principal conclusão foi que as aletas fixas não apenas melhoram a segurança da embarcação, mas também podem resultar em economia para os proprietários, reduzindo os custos operacionais associados aos movimentos do navio. A pesquisa também sugere que a utilização de um sistema de aletas com controle por feedback pode otimizar ainda mais o desempenho da embarcação em diferentes condições marítimas.

Hashimoto et al. (2019) realizaram uma pesquisa com objetivo de aprimorar a previsão das forças induzidas por ondas em navios em ondas irregulares com vento a popa. A pesquisa foi motivada pela importância de prever com precisão os fenômenos de *surf-riding* e *broaching* (perda de estabilidade dinâmica), que são falhas críticas de estabilidade discutidas pela Organização Marítima Internacional (IMO). Para melhorar a precisão das previsões, os autores aplicaram uma ferramenta avançada de simulação computacional baseada na equação de Navier-Stokes (URANS), que já demonstrava bons resultados em condições de mares regulares. O principal resultado da pesquisa foi a validação bem-sucedida da simulação de fluidodinâmica computacional CFD (Computational Fluid Dynamics) com testes experimentais, mostrando que a abordagem pode prever com precisão as forças hidrodinâmicas e os movimentos verticais do navio em ondas irregulares com vento a popa. A principal conclusão do estudo foi que o uso de simulações CFD pode ser uma alternativa viável aos caros e demorados testes experimentais em modelos físicos, particularmente na avaliação da segurança de navios de alta velocidade frente aos riscos de *surf-riding* e *broaching*. Embora as simulações tenham mostrado boa concordância com os resultados experimentais em termos de forças induzidas por ondas, a previsão de momentos de rolamento ainda representa um desafio. Os autores sugerem que investigações adicionais, incluindo condições de ondas mais severas e investigações de uma



variedade maior de tipos de navios, são necessárias para validar completamente a metodologia CFD e permitir sua aplicação generalizada para a segurança naval.

Shen et al. (2019) analisaram numericamente a resposta dinâmica de um sistema acoplado de um barco tanque, operando em ondas irregulares, em uma fazenda de peixes. Primeiro, foi feita a análise numérica para o movimento de deriva lenta, considerando a influência das cargas viscosas transversais e estimando coeficientes de arrasto transversais empíricos. Em seguida, o sistema acoplado foi analisado, com ênfase nas máximas cargas nas linhas de ancoragem e nas tensões, variáveis críticas para a segurança operacional. A análise baseou-se na dificuldade de realizar testes em modelos físicos devido a questões de escala de número de Reynolds, considerando a presença de ondas irregulares, o que torna as condições mais realistas e representa uma contribuição importante para o design de operações de carregamento e descarregamento em fazendas de peixes. A conclusão foi que mesmo em condições de mar agitado, a carga máxima nas âncoras não ultrapassa o limite de ruptura, o que não deve ser uma preocupação.

Zheleznyakova (2020) apresentou uma abordagem alternativa para a modelagem física interação de ondas irregulares com um navio de configuração arbitrária em tempo real. A principal contribuição foi a criação de um modelo de simulação interativa da dinâmica do corpo rígido imerso, utilizando uma combinação do espectro de ondas de Phillips e a técnica de transformação rápida de Fourier bidimensional não uniforme (NUFFT). Esse modelo permitiu simular a interação dinâmica entre ondas e corpos flutuantes com um algoritmo simples, estável, rápido e eficiente em termos de recursos computacionais. O modelo pode ser ajustado para fornecer precisão predeterminada, dependendo da resolução da superfície do mar e da geometria do navio, sem depender de dados experimentais. O principal resultado alcançado foi a criação de uma ferramenta de modelagem matemática que permite simular com precisão o comportamento de navios em superfícies oceânicas dinâmicas, utilizando apenas alguns parâmetros físicos básicos como a velocidade do vento, a densidade da água e as características do navio. Além disso, o modelo desenvolvido pode ser utilizado no estágio inicial de projeto naval para prever o comportamento de novas embarcações e para suportar os testes de manobrabilidade. A principal conclusão do estudo foi que, ao usar uma abordagem de malha não estruturada, foi possível reduzir significativamente os custos computacionais, adaptando a resolução da superfície do oceano de acordo com a distância do espectador. O autor também apontou que, para o futuro, a técnica pode ser aprimorada, aumentando a realismo físico e visual da simulação, com a inclusão de efeitos da interação do navio com as ondas geradas por ele mesmo.



Xiao et al. (2020) investigaram os efeitos da não linearidade das ondas incidentes nos movimentos de um navio avançando em ondas irregulares, utilizando o método HOS (*High Order Spectral*) em combinação com o método de fonte de Rankine e HOBEM (*Higher-order Boundary Element Method*). O foco da pesquisa foi analisar estatisticamente como a não linearidade das ondas influencia os movimentos do navio, considerando diferentes condições de mar. Para isso, foi desenvolvido um modelo híbrido que simula campos de ondas não lineares e calcula as forças que atuam no navio durante seu movimento. A validação do modelo foi realizada por meio de comparações com dados experimentais e simulações de ondas lineares e não lineares, com destaque para a análise das propriedades estatísticas das ondas e os efeitos da não linearidade nos movimentos do navio. O principal resultado do estudo demonstrou que, em casos de ondas não lineares, a probabilidade de grandes movimentos do navio aumenta, e as distribuições de probabilidade das amplitudes de movimento diferem significativamente dos casos lineares, com uma maior possibilidade de ocorrências extremas. A pesquisa concluiu que a não linearidade das ondas não pode ser ignorada, especialmente em condições de mar severas, onde os efeitos podem ser negativos para a segurança do navio. Este estudo fornece insights importantes para o projeto e a verificação da segurança de embarcações, ressaltando a necessidade de levar em consideração os efeitos não lineares das ondas ao estimar as cargas e os movimentos das embarcações em cenários realistas.

Ha et al. (2021) investigaram experimentalmente as cargas de impacto por batimento de ondas na proa de uma unidade FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*) sob condições de ondas irregulares e quebrantes. Para isso, foram realizados experimentos utilizando um modelo físico do FPSO, no qual ondas quebrantes foram geradas pelo método de ondas focadas, e testes com ondas irregulares foram conduzidos para analisar os impactos em diferentes ângulos de incidência. As cargas de impacto foram medidas por meio de 15 sensores de força instalados na proa da embarcação, além de painéis de força para análise dos impactos locais. O estudo foi motivado pela necessidade de compreender melhor os esforços hidrodinâmicos que essas estruturas enfrentam no mar, uma vez que cargas de impacto podem comprometer a integridade estrutural e a segurança operacional das plataformas e embarcações offshore. Os principais resultados indicaram que a localização dos impactos de maior intensidade variou de acordo com o ângulo de incidência das ondas, sendo que o maior impacto foi registrado para um ângulo de 150°. Além disso, foram identificados dois tipos principais de impactos: com um pico e com dois picos, sendo que os impactos duplos ocorreram com maior frequência em um ângulo de 180°, enquanto os impactos únicos foram predominantes para 150°. Nos testes com ondas irregulares, verificou-se que as velocidades dos movimentos de



balanço e guinada foram determinantes na magnitude das cargas de impacto, enquanto para um ângulo de 165° a velocidade do movimento de arfagem foi mais relevante.

Tang et al. (2021) investigaram o comportamento de um navio porta-contêiner em ondas irregulares, utilizando um método totalmente não linear no domínio do tempo. O principal objetivo da pesquisa foi simular os efeitos das ondas não lineares nas forças hidrodinâmicas e nos movimentos verticais do navio, como o momento de flexão (VBM) e os movimentos de heave e pitch, durante sua navegação em condições marítimas adversas. O método desenvolvido permite calcular a distribuição instantânea da pressão ao redor do casco do navio e a elevação da onda na superfície livre, capturando as interações complexas entre o navio e as ondas, que não podem ser totalmente previstas por métodos lineares ou parcialmente não lineares. O principal resultado do estudo mostrou que, em ondas irregulares severas, o momento de flexão vertical pode ser significativamente maior, podendo ultrapassar duas vezes o valor de momentos em ondas comuns, o que destaca a importância de considerar a não linearidade das ondas para avaliar a segurança estrutural do navio. A pesquisa concluiu que a simulação totalmente não linear é fundamental para prever com precisão os movimentos e as forças hidrodinâmicas em cenários de ondas extremas, onde fenômenos como *slamming* e entrada/saída d'água podem ocorrer, com riscos potenciais de danos estruturais ou até de naufrágio. Esses resultados são essenciais para o design de navios, especialmente para garantir a segurança em condições de mar adversas.

Yu et al. (2021) desenvolveram e validaram um modelo numérico para simular os movimentos induzidos por ondas de um navio em manobra, considerando tanto ondas regulares quanto irregulares de crista longa. Para isso, os pesquisadores propuseram um modelo unificado de 6 graus de liberdade (DOF), acoplado entre a manobra e o comportamento dinâmico do navio em ondas. O modelo foi testado com a simulação de testes de manobra do navio S175 em ondas regulares e irregulares, comparando os resultados numéricos com experimentos anteriores. O principal resultado foi que o modelo foi capaz de reproduzir de maneira satisfatória os trajetos de viragem e os movimentos induzidos por ondas, como os de inclinação e rotação, tanto em ondas regulares quanto irregulares, apresentando boa concordância com os dados experimentais, especialmente para ondas com comprimento de onda longo. A conclusão principal do estudo é que o modelo proposto, que combina manobra e comportamento em ondas em um único sistema de simulação, é altamente eficiente em termos de tempo e capaz de prever com precisão os movimentos do navio em ondas.

Su et al. (2021) avaliaram o desempenho de uma embarcação de estrutura variável em diferentes estados de configuração: monocasco (MFS) e trimarã retrátil (TFS). Para isso, foram



realizados testes experimentais, simulações numéricas (CFD) e testes em mar aberto com um veículo de superfície não tripulado (USV). O modelo projetado possui um casco principal do tipo planador e dois cascos laterais retráteis em formato de V profundo. A pesquisa foi motivada pela necessidade de desenvolver embarcações versáteis, capazes de se adaptar a diferentes condições marítimas e missões, oferecendo maior estabilidade e navegabilidade com baixo custo operacional. Os principais resultados indicaram que a configuração TFS melhora a estabilidade da embarcação em certas condições, reduzindo o rolamento em mares irregulares, especialmente em mares de proa, seguido por mares de popa e través. No entanto, a eficácia da configuração varia com a velocidade e o comprimento das ondas. A principal conclusão é que os cascos laterais retráteis podem ser benéficos para estabilidade e controle da embarcação, mas sua eficiência depende da velocidade e do estado do mar. O estudo fornece informações valiosas para o design de embarcações de estrutura variável, destacando a importância da profundidade dos cascos laterais para resistir a mares mais agitados.

Bieliki (2021) desenvolveu um método experimental alternativo para prever os movimentos de rolamento de navios em ondas irregulares. A abordagem tradicional para essa previsão envolve testes com ondas regulares para calcular os operadores de amplitude de resposta (RAOs), um processo demorado e que pode não representar fielmente a resposta da embarcação em frequências ressonantes. Para superar essas limitações, o autor propôs uma técnica baseada na geração de ondas irregulares com espectro de ruído branco ou colorido, permitindo a avaliação dos RAOs em uma única execução do experimento. Essa nova abordagem reduz significativamente o tempo de testes e fornece resultados mais contínuos e precisos para diferentes estados de mar. Os principais resultados demonstraram que o método proposto conseguiu prever os movimentos de rolamento com alta precisão em diversas condições de mar, apresentando uma correlação de Pearson acima de 0,99 e um erro médio quadrático (RMSE) inferior a 0,25 graus. A principal conclusão do estudo é que essa técnica baseada em ondas de ruído pode ser uma alternativa viável e eficiente aos métodos tradicionais, permitindo a previsão dos movimentos de rolamento em diferentes estados de mar com um número reduzido de medições. Além disso, o autor sugere que essa metodologia pode ser expandida para prever outros movimentos da embarcação, como heave (movimento vertical) e pitch (movimento de arfagem), o que poderia contribuir significativamente para a segurança e a operabilidade dos navios em mares agitados.

Kim e Tezdogan (2022) analisaram a manobrabilidade de um navio de transporte sob condições de mar irregular. Utilizando um modelo totalmente não linear baseado nas equações de Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS). Os autores investigaram o comportamento do



navio em ondas geradas pelo espectro JONSWAP, representando o estado de mar 6, com altura significativa de 5 metros e período de pico de 12,4 segundos. Foram feitas comparações com a manobrabilidade em mar calmo e regular para identificar variações no desempenho de navegação, incluindo a capacidade de manter o curso e realizar curvas. O estudo utilizou simulações de CFD com um modelo de disco atuador para representar o propulsor e um leme semi-balanceado tipo horn. Os principais resultados indicaram que ondas irregulares afetam significativamente a capacidade de manutenção de curso e o desempenho de giro do navio, tornando a navegação mais desafiadora do que em águas calmas. A principal conclusão do estudo é que a inclusão de ondas irregulares em simulações de manobrabilidade proporciona uma compreensão mais realista do comportamento do navio em operações marítimas reais. Isso pode auxiliar comandantes e oficiais de navegação na tomada de decisões para melhorar a segurança marítima. A pesquisa reforça a necessidade de avaliar a manobrabilidade em condições reais de mar, destacando a relevância do uso de CFD para estudar esses efeitos de forma detalhada e econômica.

Liang et al. (2023) analisaram os efeitos de uma placa de amortecimento na resposta ao movimento do navio de transporte de energia eólica offshore "Galaxy Dragon South" (GDS). O objetivo foi melhorar a estabilidade do navio durante o transporte de turbinas eólicas, reduzindo os riscos associados ao deslocamento em mar aberto. Para isso, foi desenvolvido um modelo experimental em escala 1:50 e utilizadas simulações numéricas no software ANSYS-AQWA, avaliando diferentes tamanhos e posicionamentos da placa de amortecimento. Os testes analisaram a influência da placa sobre o período natural da embarcação e sua resposta nos graus de liberdade de rolagem, arfagem, guinada e oscilação lateral e longitudinal. Os resultados mostraram que o aumento do tamanho da placa de amortecimento reduz a amplitude dos movimentos do navio ao aumentar a massa adicional e o momento de inércia, estabilizando a embarcação. Além disso, foi observado que a disposição da placa na proa e nas laterais melhora a estabilidade, enquanto sua presença na popa pode ser prejudicial. A principal conclusão do estudo é que, com o ajuste adequado do tamanho e posicionamento da placa, é possível minimizar a resposta ao movimento do navio, garantindo maior segurança e eficiência no transporte de turbinas eólicas offshore. Futuras pesquisas devem considerar o impacto de deformações elásticas da placa e testar designs curvos para otimizar a estabilidade.

Aliakbari et al. (2023) visaram demonstrar a eficácia de um método inovador para reduzir o movimento de embarcações, utilizando redes de pesca comuns estabilizadoras, chamadas de SOFNets. O experimento foi conduzido no tanque de reboque do National Iranian Marine Laboratory (NIMALA), seguindo as diretrizes da International Towing Tank



Conference (ITTC). Foram testados três tipos diferentes de redes em um modelo de navio SWATH de 2,1 metros de comprimento, submetido a ondas irregulares. O objetivo era encontrar uma solução alternativa e de baixo custo para melhorar a navegabilidade de embarcações, substituindo estabilizadores tradicionais, como tanques anti-rolamento e giroscópios, que são volumosos, pesados e caros. Os principais resultados indicaram que as SOFNets reduziram os movimentos angulares da embarcação, diminuindo a amplitude da arfagem (pitch) entre 10% e 20% e do rolamento (roll) entre 25% e 35%. Além disso, os movimentos verticais (heave) também apresentaram redução, variando de 8% a 17% em mares de proa e até 9% em mares de través. A principal conclusão do estudo é que as SOFNets oferecem uma alternativa viável e econômica para a estabilização de navios, com desempenho semelhante ao de quilhas de balanço e estabilizadores de aletas, sem os altos custos e complexidades dos métodos convencionais. Os pesquisadores sugerem que futuras investigações devem explorar diferentes formatos e dimensões das SOFNets para maximizar sua eficácia.

Gao e Shi (2023) investigaram a dinâmica de rolamento e o risco de emborcamento de navios danificados em ondas irregulares. Utilizando a dinâmica dos fluidos computacionais (CFD), os pesquisadores simularam o comportamento de um navio avariado sob condições de mar agitado a muito agitado. Para gerar as ondas, foram combinadas as condições de contorno de entrada de velocidade e fontes de momento, além de uma fórmula modificada para calcular a viscosidade turbulenta. A malha dinâmica foi utilizada para lidar com os movimentos de guinada, arfagem e rolamento do navio, e um modelo restritivo de deriva lateral foi empregado para conter o deslocamento transversal da embarcação. Os efeitos da inundação cruzada e da orientação do dano foram analisados por meio de simulações, comparando o comportamento de um navio intacto e um avariado em diferentes cenários de ondas. Os principais resultados indicaram que, em casos de inundação simétrica, a orientação da abertura do dano tem pouco impacto na resposta do rolamento, e a embarcação tende a sobreviver até o estado de mar 7 devido ao aumento do amortecimento do rolamento causado pelo afundamento e pelo movimento da água no compartimento. Já para inundações assimétricas, o navio tende a inclinar significativamente para o lado danificado, aumentando o risco de emborcamento, especialmente quando o dano está voltado para a direção das ondas. O estudo reforça que a posição do dano influencia diretamente na estabilidade da embarcação, sendo que danos voltados para o lado de incidência das ondas são mais perigosos. No entanto, as simulações demandam alto tempo computacional, e o estudo foi limitado a um cenário específico de avaria lateral. Como conclusão, os autores destacam a necessidade de integrar simulações CFD de alta



fidelidade com metodologias de previsão de eventos extremos para otimizar a avaliação da estabilidade de navios danificados em mares irregulares.

Zago et al. (2023) desenvolveram um novo método paramétrico para estimar as ondas encontradas por um navio com base nos seus movimentos. A pesquisa propôs uma abordagem inovadora, na qual a estimativa das ondas é feita diretamente no referencial da embarcação e depois convertida para um referencial fixo na Terra. O método utiliza a parametrização baseada na distribuição de Weibull para descrever o espectro das ondas encontradas, tornando a análise mais flexível e precisa. Testes experimentais foram realizados em escala reduzida, tanto com a embarcação parada quanto em movimento, a fim de validar a eficácia da nova abordagem na inferência das ondas. Os resultados mostraram que o método foi capaz de estimar com boa precisão o espectro das ondas encontradas, mesmo em condições com velocidade de avanço. A principal conclusão é que a abordagem proposta se mostra uma alternativa promissora dentro dos métodos de inferência baseados no movimento da embarcação, sendo relativamente simples de implementar e apresentando boas estimativas da distribuição da energia das ondas para períodos de pico acima de 6 segundos. No entanto, foram identificadas limitações, especialmente em ondas que se aproximam da popa da embarcação em velocidades próximas à sua própria velocidade de deslocamento. Os autores recomendam testes adicionais, incluindo ensaios em bacias de manobra com diferentes velocidades e direções de ondas, além de testes em escala real para uma validação mais abrangente do método.

Ma et al. (2022) investigaram a manobrabilidade de navios em ondas regulares e irregulares por meio de simulações numéricas. Para isso, foram realizados testes de *zigzag*, giro e manutenção de curso para um modelo de navio porta-contêineres S175 sob diferentes condições de ondas. As simulações foram conduzidas utilizando um solver URANS (*Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes*) com grade móvel sobreposta e um método de força corporal para prever a atuação da hélice. O estudo foi motivado pela necessidade de prever com maior precisão o comportamento hidrodinâmico e a estabilidade dos navios em mares agitados, especialmente porque falhas de propulsão e controle de manobra são uma das principais causas de acidentes marítimos. Além disso, a pesquisa buscou comparar os efeitos das ondas de crista curta e longa na navegação, fornecendo dados para melhorar a segurança e eficiência operacional das embarcações. Os principais resultados mostraram que os movimentos do navio e as cargas hidrodinâmicas aumentam conforme o comprimento de onda cresce, mantendo a altura da onda constante. Além disso, os componentes de baixa frequência dos fatores de autopropulsão em ondas se comportam de maneira semelhante aos observados em águas calmas, mas com flutuações de alta frequência devido ao efeito das ondas. Os testes de *zigzag*



em ondas irregulares de crista curta e longa apresentaram históricos de guinada e ângulo do leme semelhantes, enquanto os testes de curva revelaram uma amplitude de rolamento maior e desvios mais evidentes da trajetória devido às ondas. A principal conclusão do estudo é que a estratégia de simulação utilizada se mostrou eficiente e confiável para prever manobras em ondas, podendo ser usada como ferramenta alternativa na avaliação da estabilidade e desempenho de navios em condições reais de mar. O estudo também destaca a necessidade de pesquisas futuras sobre movimentos de manobra em mares de través e popa, bem como a influência da escala do modelo nos resultados.

Matsubara et al. (2023) visaram validar e verificar um método probabilístico para estimar a inclinação extrema (heel) causada pelo *broaching* associado ao *surf-riding* em ondas irregulares de crista curta. O *broaching* é um fenômeno perigoso no qual um navio perde a capacidade de manter o curso enquanto desliza na encosta de uma onda de popa, podendo resultar em forças centrífugas que levam ao adernamento excessivo ou até o capotamento. O estudo utilizou simulações numéricas e experimentos com modelos em escala navegando livremente em ondas irregulares de crista curta e longa. A motivação principal foi atender às diretrizes da Organização Marítima Internacional (IMO), que exige que ferramentas de avaliação de estabilidade direta sejam validadas para ondas irregulares em condição comum no oceano real, mas pouco abordada em estudos anteriores. Os resultados indicaram que as estimativas probabilísticas obtidas pelo método da onda crítica apresentaram uma boa concordância com os experimentos em modelo reduzido. A principal conclusão do estudo é que o método da onda crítica fornece previsões conservadoras para a probabilidade de inclinação extrema devido ao *broaching*, com um tempo de computação significativamente reduzido em comparação com a simulação direta. No entanto, como o estudo foi realizado para apenas um modelo de navio e uma condição de mar específica, os autores ressaltam que a validação completa da simulação numérica ainda exige mais testes. Apesar disso, os resultados experimentais não rejeitam a precisão da simulação usada, indicando que a abordagem pode ser uma ferramenta útil para avaliar a estabilidade de navios em mares agitados.

Luhulima et al. (2023) analisaram as respostas de movimento de embarcações pesqueiras do tipo trimarã em ondas irregulares utilizando simulações no software ANSYS AQWA. A pesquisa foi motivada pela necessidade de desenvolver embarcações mais estáveis e eficientes para a pesca nas águas da província de Maluku, na Indonésia, que possui grande potencial pesqueiro, mas enfrenta desafios operacionais devido às condições marítimas adversas. O estudo avaliou as respostas de rolamento (roll) e arfagem (pitch) do trimarã sob diferentes ângulos de incidência das ondas (90°, 135° e 180°) para entender melhor o



comportamento dessas embarcações em alto-mar e melhorar o design de futuras embarcações pesqueiras. Os principais resultados indicaram que o ângulo de onda de 135° gerou as maiores respostas de movimento, com um pico de rolamento de $10,131^\circ$ a 0,4 segundos e um pico de arfagem de $6,593^\circ$ a 17,5 segundos. Isso ocorre porque, nesse ângulo, o trimarã apresenta uma seção transversal maior exposta à excitação das ondas, tornando esse um ponto crítico para a operação da embarcação. A principal conclusão do estudo é que o ângulo de 135° requer atenção especial no projeto e na operação dos trimarãs, pois influencia diretamente sua estabilidade.

Bilandi et al. (2024) analisaram o comportamento dinâmico de cascos de planeio sem steps e com diferentes configurações de steps (um e dois) em ondas aleatórias. Utilizando a modelagem CFD, os pesquisadores simularam as respostas dessas embarcações em um tanque numérico, comparando os dados obtidos com resultados experimentais de testes em tanque de reboque. O estudo foi motivado pela necessidade de compreender melhor o impacto dos steps no comportamento em ondas dessas embarcações, uma vez que planadores operam em altas velocidades e sofrem grandes acelerações verticais, o que pode comprometer a estabilidade, a segurança da tripulação e a integridade estrutural do casco. Os resultados indicaram que a adição de steps influencia significativamente os movimentos da embarcação, dependendo da velocidade e da altura das ondas. O casco sem steps apresentou menores acelerações verticais em velocidades mais baixas, enquanto o casco com dois steps reduziu as acelerações em velocidades mais altas. No entanto, a configuração com dois steps também gerou respostas extremas de heave (movimento vertical), embora tenha diminuído as respostas extremas de pitch (movimento de arfagem) na maior velocidade testada. A principal conclusão do estudo é que o design do casco, incluindo a presença e o número de steps, tem um impacto direto nos movimentos extremos da embarcação em altas velocidades, o que deve ser considerado no desenvolvimento de planeio. O estudo também destacou a importância da simulação CFD como ferramenta para análise do comportamento dinâmico de cascos de planeio, sugerindo que futuras pesquisas explorem modelos matemáticos mais avançados e simulações em diferentes condições de mar.

Lee et al. (2024) investigaram a interação fluido-estrutura (FSI) de um casco planador em ondas irregulares, tanto por meio de experimentos quanto por simulações numéricas. Foram analisados dois painéis de grelha: um projetado com métodos tradicionais de engenharia estrutural e outro otimizado com base em cargas determinadas por CFD e métodos de otimização matemática. O trabalho faz parte de um programa de pesquisa integrado para entender melhor a resposta estrutural de cascos planadores em alto-mar, visando reduzir o peso estrutural sem comprometer a integridade da embarcação.



O estudo foi realizado para validar ferramentas de simulação CFD/CSD (dinâmica estrutural computacional) e avaliar a precisão dos métodos tradicionais de projeto estrutural, compreendendo a resposta estrutural do casco durante eventos extremos, como impactos de ondas severas. Os resultados demonstraram que as maiores cargas de impacto não ocorrem necessariamente nas ondas mais altas, mas sim quando há um vale profundo e altura de onda reduzida. O artigo discute como as práticas do American Bureau of Shipping (ABS) levam a projetos conservadores, enquanto as ferramentas computacionais podem proporcionar soluções mais eficientes. O estudo reforça a importância da otimização estrutural, que permite desenvolver cascos mais leves, aumentando a velocidade, alcance e capacidade de carga das embarcações. Logo, demonstraram que os maiores impactos não ocorrem necessariamente com as ondas mais altas, mas sim em situações de calado profundo e altura de onda baixa. A principal conclusão é que o projeto estrutural deve considerar uma área mais ampla na proa, pois a maior tensão depende do ponto de entrada do casco na água. Além disso, as regras estruturais da ABS foram confirmadas como conservadoras, resultando em projetos seguros, mas com espessuras de chapa superiores às necessárias.

Liu et al. (2025) desenvolveram um modelo para prever diversas respostas estruturais globais de um navio porta-contêineres de 21.000 TEU sob ondas irregulares de crista longa. O modelo proposto integra a técnica de superposição modal generalizada com redes neurais LSTM baseadas em atenção temporal, permitindo a previsão de momentos de flexão vertical (VBM, Vertical Bending Moment), acelerações verticais nodais e tensões estruturais em qualquer ponto da embarcação. A pesquisa foi motivada pela necessidade de melhorar a precisão e a aplicabilidade dos métodos de previsão de respostas estruturais em navios de grande porte, já que modelos baseados apenas em dados geralmente apresentam baixa capacidade de generalização e métodos físicos tradicionais são computacionalmente caros. Os principais resultados demonstraram que o modelo proposto conseguiu prever respostas estruturais com alta precisão em um tempo de 5 segundos, capturando inclusive os sinais de *whipping* (respostas de alta frequência causadas pela flexibilidade estrutural). Além disso, as previsões das tensões de flexão apresentaram boa concordância com os movimentos relativos entre o navio e as ondas, confirmando a capacidade do modelo de representar o comportamento estrutural global do navio. A principal conclusão do estudo é que a combinação de métodos baseados em dados com a superposição modal generalizada pode melhorar significativamente a previsão de respostas estruturais, contribuindo para a operação e segurança de embarcações. No entanto, os autores ressaltam que o modelo precisa ser testado em condições de mar mais



complexas e com dados reais de monitoramento estrutural para ampliar sua aplicabilidade prática.

Komoriyama et al. (2025) desenvolveram e validaram uma técnica baseada no Filtro de Kalman (KF) para estimar perfis de ondas encontradas por um navio e respostas estruturais não medidas a partir de sinais de resposta registrados em ondas irregulares de crista curta. Para isso, foram realizados testes em tanque com um modelo reduzido de navio, onde as ondas foram modeladas como uma superposição de ondas elementares. A técnica KF permitiu a estimativa em tempo real dos perfis das ondas encontradas e das respostas do navio, contribuindo para um melhor entendimento das condições operacionais da embarcação sem a necessidade de medições diretas em todas as áreas do casco. O principal resultado do estudo foi a comprovação da eficácia da técnica KF para estimar com precisão os perfis de ondas e as respostas estruturais do navio em ondas de crista curta. A principal conclusão indica que, ao combinar dados de movimentos do navio e tensões estruturais, é possível mitigar erros de estimativa e melhorar a precisão dos cálculos. Além disso, verificou-se que, mesmo com limitações na estimativa espectral direcional das ondas, a principal direção da onda pode ser corretamente determinada, aprimorando significativamente a estimativa do perfil das ondas. O estudo sugere que futuras pesquisas devem considerar a influência da velocidade do navio e o uso de modelos que incorporem efeitos não lineares, como o fenômeno de *whipping*.



3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta, de maneira resumida, alguns dos conceitos teóricos relacionados com a análise de movimentos de embarcações em ondas, que são comumente avaliados seguindo a teoria de escoamento potencial de Hidrodinâmica. Esta abordagem implica considerar o escoamento como invíscido, incompressível e irrotacional. Os conceitos apresentados foram obtidos da apostilha de Journeé e Massie (2001), assim como dos Manuais do software Ansys Aqwa (Ansys, 2024a, b). Detalhes adicionais podem ser consultados nesses documentos, bem como em literatura relacionada com movimentos de embarcações usando teoria potencial (Bačkalov *et al.*, 2016; Faltinsen, 1993; Newman, 1979). As subseções 3.1 – 3.5 e 3.6 seguintes foram adaptadas e descritas segundo traduções dos manuais do Ansys Aqwa (Ansys, 2024a, b) e a apostilha de Journeé e Massie (2001), respectivamente.

3.1. Onda linear regular

A onda linear regular é considerada a onda oceânica mais simples, baseada na suposição de um fluido homogêneo, incompressível, invíscido e de fluxo irrotacional. Além disso, assume-se que a amplitude da onda seja pequena em comparação com o comprimento de onda e a profundidade da água; portanto, é utilizada a condição linear de superfície livre.

Nos eixos de referência fixos (ERF) do Ansys Aqwa (ver manual), a elevação da superfície da água nas posições X e Y pode ser expressa na forma de valor complexo como

$$\zeta = a_w e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + \alpha]} \quad (1)$$

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

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

Em água de profundidade finita, o potencial de velocidade no local de $\vec{X} = (X, Y, Z)$ é

$$\Phi_I(\vec{X}, t) = \varphi_I(\vec{X}) e^{-i\omega t} = \frac{iga_w \cosh[k(Z + d)]}{w \cosh(kd)} e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + \alpha]} \quad (2)$$



onde está a profundidade da água e a aceleração gravitacional.

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

$$v = \frac{\omega^2}{g} = k \tanh(kd) \quad (3)$$

O comprimento de onda e o período da onda são

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad (4)$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (5)$$

Usando a equação de Bernoulli e levando em conta apenas o termo linear, a pressão do fluido é

$$p(\vec{X}, t) = \frac{\rho g a_w \cosh [k(Z + d)]}{\cosh (kd)} e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + \alpha]} - \rho g Z \quad (6)$$

onde ρ é densidade da água. A velocidade da onda é

$$C = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \left(\frac{2\pi d}{\lambda} \right) \quad (7)$$

Considerado a derivada parcial do potencial de velocidade, a velocidade da partícula do fluido é

$$\vec{v} = (u, v, w) = \frac{a_w \omega \cosh [k(Z + d)]}{\sinh(kd)} e^{i[-\omega t + k(X \cos \chi + Y \sin \chi) + \alpha]} (\cos \chi, \sin \chi, -i \tanh \{k[Z + d]\}) \quad (8)$$



Quando a velocidade da partícula da onda na crista é igual à celeridade da onda, a onda se torna instável e começa a quebrar. A condição limite para a quebra da onda em qualquer profundidade de água é dada por:

$$\left(\frac{2a_w}{\lambda}\right)_{\max} = \frac{1}{7} \tanh(kd) \quad (9)$$

Em água de profundidade infinita ($d \rightarrow \infty$), o potencial de velocidade é simplificado como

$$\Phi_I(\vec{X}, t) = \varphi_I(\vec{X})e^{-i\omega t} = \frac{iga_w}{\omega} e^{i[-\omega t + k(X\cos\chi + Y\sin\chi) + \alpha] + kZ} \quad (10)$$

A relação de dispersão linear é expressa como

$$\omega^2 = gk \quad (11)$$

e a pressão do fluido é

$$p(\vec{X}, t) = -pga_w e^{i[-\omega t + k(X\cos\chi + Y\sin\chi) + \alpha] + kZ - pgZ} \quad (12)$$

A velocidade da onda e a velocidade da partícula fluida são expressas como

$$C = \frac{gT}{2\pi} \quad (13)$$

$$\vec{v} = a_w \omega e^{i[-\omega t + k(X\cos\chi + Y\sin\chi) + \alpha] + kZ - pgZ} (\cos\chi, \sin\chi, -i) \quad (14)$$

3.2. Ondas irregulares

A maior parte da energia na superfície do oceano é gerada por ondas causadas pelo vento, que geralmente resultam do vento soprando sobre uma vasta extensão de superfície líquida. As ondas do mar em pleno desenvolvimento estão em um estado onde a maior das ondas no mar não pode crescer mais, e sua altura e comprimento de onda atingiram seu potencial máximo.



Na prática, a teoria linear é usada para expressar as ondas do mar multidimensionais (ondas de crista curta) como a soma de muitos componentes de ondas, por exemplo:

$$\zeta(X, Y, t) = \sum_{m=1}^{Nd} \sum_{j=1}^{Nm} a_{jm} e^{i(k_{jm}X\cos\chi_m + k_{jm}Y\sin\chi_m - \omega_{jm}t + \alpha_{jm})} \quad (15)$$

onde N_d e N_m são o número de direções de ondas e o número de componentes de ondas ao longo de cada direção de onda χ_m ($m = 1, N_d$), a_{jm} é a amplitude da onda, ω_{jm} é a frequência da onda, k_{jm} é o número de onda, e α_{jm} é o ângulo de fase aleatório de um componente de onda.

A representação das ondas para mares irregulares pode ser alcançada pela especificação de espectros de ondas. Matematicamente falando, o espectro de ondas se estende de zero a frequências infinitas. No entanto, ao examinar o espectro, observa-se que a energia das ondas geralmente está concentrada em uma faixa relativamente estreita, o que determina o padrão real das ondas. A seleção das frequências iniciais e finais deve garantir que essa faixa de frequências cubra pelo menos 99% da energia total das ondas na região de interesse.

Se um espectro de ondas, $S_m(\omega)$, for introduzido para as ondas da m -ésima subdireção, a amplitude a_{jm} da onda pode ser expressa como

$$a_{jm} = \sqrt{2S_m(\omega_j)\Delta\omega_j} \quad (16)$$

Ondas unidimensionais ($N_d = 1$) também são chamadas de ondas de crista longa, que se propagam ao longo de uma direção especificada apenas.

O Ansys Aqwa pode aceitar espectros de ondas formulados, espectros de ondas definidos pelo usuário ou importar o histórico temporal da elevação das ondas, e qualquer combinação desses para descrever um mar irregular.

Os seguintes parâmetros espectrais de ondas podem ser úteis:

- Altura significativa das ondas: $H_s = 4\sqrt{m_0}$
- Período médio das ondas: $T_1 = 2\pi m_0/m_1$
- Período médio de cruzamento zero: $T_2 = \frac{2\pi\sqrt{m_0}}{m_2} = T_z$
- Período de pico: $T_0 = 2\pi/\omega_p$



onde $m_k = \int_0^\infty \omega^k S(\omega) d\omega$ e ω_p são a frequência de pico (em rad/s) na qual ocorre a máxima energia da onda.

Na análise no domínio do tempo do Aqwa, as ondas irregulares na m -ésima subdireção são representadas pelas ondas (em outras palavras, componentes de onda) com amplitude constante. Denotando a altura significativa das ondas como H_s^m , a amplitude constante da onda é

$$a_{jm} = \frac{H_s^m}{\sqrt{8N_m}}, \quad (j = 1N_m) \quad (17)$$

onde N_m é o número de ondas introduzido.

3.3. Espectro JONSWAP

Segundo o manual do software Ansys Aqwa, existem várias opções para seleccionar espectros de ondas predefinidos. Dentre eles, o espectro JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*) pode levar em consideração o desequilíbrio do fluxo de energia no sistema de ondas (por exemplo, quando os mares não estão totalmente desenvolvidos). O desequilíbrio de energia é quase sempre o caso quando há uma alta velocidade do vento. A frequência de pico, bem como os parâmetros empíricos γ e α , são usados nesta formulação. A ordenada espectral em uma frequência é dada por

$$S_{(\omega)} = \frac{\alpha g^2 \gamma^a}{\omega^5} \exp\left(-\frac{5\omega_p^4}{a\omega^4}\right) \quad (18)$$

onde ω_p^2 é a frequência de pico em rad/s, γ é o fator de amplificação de pico, α é uma constante que se relaciona com a velocidade do vento e a frequência de pico do espectro de ondas, e

$$a = \exp\left[-\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 - \omega_p^2}\right] \quad (19)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0.07 & \text{onde } \omega \leq \omega_p \\ 0.08 & \text{onde } \omega > \omega_p \end{cases} \quad (20)$$



Como α é uma constante, a integração deste espectro pode ser expressa como

$$m_0 = \int_0^{\infty} S(\omega) d\omega = \alpha \int_0^{\infty} \frac{g^2 \gamma^a}{\omega^5} \exp\left(-\frac{4\omega^4}{4\omega^4}\right) d\omega = \left(\frac{H_s}{4}\right)^2 \quad (21)$$

Portanto, se γ , ω_p e H_s forem conhecidos, a variável α pode ser determinada por

$$\alpha = \left(\frac{H_s}{4}\right)^2 / \int_0^{\infty} \frac{g^2 \gamma^a}{\omega^5} \exp\left(-\frac{5\omega_p^4}{4\omega^4}\right) d\omega \quad (22)$$

É possível definir as frequências de início e de fim do espectro JONSWAP. Por padrão, o Ansys Aqwa fornece as definições como segue:

Frequência inicial (em rad/s):

$$\omega_s = \omega_p \left(0.58 + 0.05 \frac{\gamma - 1}{19}\right) \quad (23)$$

Frequência final (em rad/s):

$$\omega_f = \omega_p \cdot F(\gamma) \quad (24)$$

onde os valores da função de ponderação em relação a $\gamma \in [1.0, 20.0]$ estão listados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores da Função de Ponderação.

γ	$F(\gamma)$	γ	$F(\gamma)$	γ	$F(\gamma)$
1.0	5.1101	8.0	3.3700	15.0	2.9650
2.0	4.4501	9.0	3.2900	16.0	2.9300
3.0	4.1000	10.0	3.2200	17.0	2.8950
4.0	3.8700	11.0	3.1600	18.0	2.8600
5.0	3.7000	12.0	3.1050	19.0	2.8300
6.0	3.5700	13.0	3.0550	20.0	2.8000
7.0	3.4600	14.0	3.0100		

Fonte: Ansys (2024a) e Ansys (2024b).



3.4. Cálculo das forças hidrodinâmicas no corpo usando a teoria potencial

O campo de escoamento do fluido ao redor de um corpo flutuante, por meio de um potencial de velocidade, é definido por

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

onde a_w é a amplitude da onda incidente e ω é a frequência da onda. O termo dependente do espaço isolado $\varphi(\vec{X})$ pode ser separado em contribuições das ondas de radiação devido aos seis modos básicos de movimento do corpo, da onda incidente e da onda difratada ou espalhada. As funções potenciais são complexas, mas as quantidades físicas resultantes, como a pressão do fluido e os movimentos do corpo na análise no domínio do tempo, são obtidas considerando apenas a parte real. Adotando a notação convencional dos seis movimentos rígidos do corpo na teoria de dinâmica de sistemas flutuantes, três movimentos translacionais e três rotacionais do centro de massa do corpo são excitados por uma onda regular incidente com amplitude unitária:

$$\begin{aligned} x_j &= u_j, \quad (j = 1, 3) \\ x_j &= \theta_{j-3}, \quad (j = 4, 6) \end{aligned} \quad (26)$$

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

$$\varphi(\vec{X}) e^{-i\omega t} = [(\varphi_1 + \varphi_d) + \sum_6^{j=1} \varphi_{rj} x_j] e^{-i\omega t} \quad (27)$$

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

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

$$p^{(1)} = -\rho \frac{\partial \Phi(\vec{X}, t)}{\partial t} = i\omega \rho \varphi(\vec{X}) e^{-i\omega t} \quad (28)$$



A partir da distribuição de pressão, as várias forças do fluido podem ser calculadas integrando a pressão sobre a superfície molhada do corpo. Para ter uma forma geral das forças e momentos atuando no corpo, estende-se a notação do vetor normal unitário da superfície do casco, para 6 componentes correspondentes aos seis movimentos rígidos básicos do corpo, como segue:

$$\begin{aligned}(n_1, n_2, n_3) &= \vec{n} \\ (n_4, n_5, n_6) &= \vec{r} \times \vec{n}\end{aligned}\quad (29)$$

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

$$F_j e^{-i\omega t} = - \int_{S_0} \rho^{(1)} n_j dS = [-i\omega p \int_{S_0} \varphi(\vec{X}) n_j dS] e^{-i\omega t} \quad (30)$$

onde S_0 é a superfície molhada média do corpo.

A força hidrodinâmica total de primeira ordem pode ser escrita como

$$F_j = [(F_{ij} + F_{dj}) + \sum_{k=1}^6 F_{rjk} X_k] \quad \text{onde } j = 1,6 \quad (31)$$

da qual o j-énésima força de Froude-Krylov devido à onda incidente é

$$F_{ij} = -i\omega p \int_{S_0} \varphi(\vec{X}) n_j dS \quad (32)$$

A j-énésima força de difração, devido à onda de difração é

$$F_{dj} = -i\omega p \int_{S_0} \varphi_d(\vec{X}) n_j dS \quad (33)$$

A j-énésima força de radiação, devido à onda de radiação induzida pelo movimento rígido unitário k-ésimo do corpo é



$$F_{rjk} = -i\omega\rho \int_{s_0} \varphi_{rk}(\vec{X})n_j dS \quad (34)$$

As forças do fluido podem ser ainda descritas em termos de componentes reativas e ativas. A força ativa, ou força excitante das ondas, é composta pela força de Froude-Krylov e pela força de difração. A força reativa é a força de radiação devido às ondas de radiação induzidas pelos movimentos do corpo.

O potencial de onda de radiação, φ_{rk} , pode ser expresso em partes real e imaginária para produzir os coeficientes de massa adicionada e amortecimento das ondas:

$$\begin{aligned} F_{rjk} &= -i\omega\rho \int_{s_0} \{\text{Re}[\varphi_{rk}(\vec{X})] + i\text{Im}[\varphi_{rk}(\vec{X})]\}n_j dS \\ &= \omega\rho \int_{s_0} \text{Im}[\varphi_{rk}(\vec{X})]n_j dS - i\omega\rho \int_{s_0} \text{Re}[\varphi_{rk}(\vec{X})]n_j dS \\ &= \omega^2 A_{jk} + i\omega B_{jk} \end{aligned} \quad (35)$$

onde a massa adicional e o amortecimento são dados por

$$A_{jk} = \frac{\rho}{\omega} \int_{s_0} \text{Im}[\varphi_{rk}(\vec{X})]n_j dS \quad (36)$$

$$B_{jk} = -\rho \int_{s_0} \text{Re}[\varphi_{rk}(\vec{X})]n_j dS \quad (37)$$

Cabe ressaltar que se um problema exigir a carga da onda sobre um corpo fixo, então apenas as forças ativas das ondas são de interesse. Por outro lado, quando o corpo está flutuando, tanto as forças ativas quanto as reativas do fluido devem ser consideradas. Também vale mencionar que todas as forças do fluido calculadas acima são uma função apenas da geometria da superfície molhada do corpo e são independentes das características de massa estrutural do corpo.

3.5. Operadores de Amplitude de Resposta

O Ansys Aqwa resolve um conjunto de equações algébricas lineares para obter a resposta harmônica do corpo a ondas regulares. Essas características de resposta são comumente



chamadas de operadores de amplitude de resposta (RAOs, *Response Amplitude Operator*) e são proporcionais à amplitude da onda.

O conjunto de equações de movimento linear das estruturas com coeficientes dependentes da frequência é descrito como:

$$[-\omega_e^2(M_s + M_a) - i\omega_e C + K_{hys}][x_{jm}] = [F_{jm}] \quad (38)$$

onde M_s é uma matriz de massa estrutural $6M \times 6M$, $M_a = A_{jm, kn}$ e $C = [B_{jm, kn}]$ são as matrizes de massa adicional e amortecimento hidrodinâmicas $6M \times 6M$, incluindo os termos de acoplamento da interação hidrodinâmica entre diferentes estruturas. K_{hys} é a matriz de rigidez hidrostática, onde cada sub-matriz diagonal 6×6 de rigidez hidrostática. A Equação anterior pode ser expressa alternativamente como

$$[x_{jm}] = H[F_{jm}] \quad (39)$$

onde

$$H = [-\omega_e^2(M_s + M_a) - i\omega_e C + K_{hys}]^{-1} \quad (40)$$

é denominada a função de transferência que relaciona as forças de entrada à resposta de saída. Além disso, o Ansys Aqwa pode calcular os RAOs em qualquer ponto da estrutura, dado os RAOs no centro de gravidade da estrutura e o vetor do centro de gravidade até a posição de interesse. Os RAOs de um ponto P de $(X_{pm}, Y_{pm}, Z_{pm})^T$ na m-ésima estrutura pode ser encontrados usando a seguinte relação

$$(x_{pm}, y_{pm}, z_{pm})^T = T[x_{jm}] \quad (41)$$

onde a matriz de translação entre o centro de gravidade $(x_{gm}, y_{gm}, z_{gm})^T$ e o ponto P é

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & (z_{pm} - z_{gm}) & -(y_{pm} - y_{gm}) \\ 0 & 1 & 0 & -(z_{pm} - z_{gm}) & 0 & (x_{pm} - x_{gm}) \\ 0 & 0 & 1 & (y_{pm} - y_{gm}) & -(x_{pm} - x_{gm}) & 0 \end{bmatrix} \quad (42)$$



3.6. Movimentos em ondas irregulares

A teoria relacionada com os movimentos em ondas irregulares foi traduzida da apostila do Jorunée e Massie (2001) e apresentada na presente subseção. Uma vez que as funções de transferência entre a energia das ondas e a energia do movimento (componente) sejam conhecidas, pode-se transformar qualquer espectro de energia das ondas em um espectro correspondente de energia do movimento. Quando um navio está navegando, geralmente ele encontrará ondas com uma frequência aparente diferente, a frequência de encontro ω_e , do que se observaria de um local fixo (ver referência para maiores detalhes).

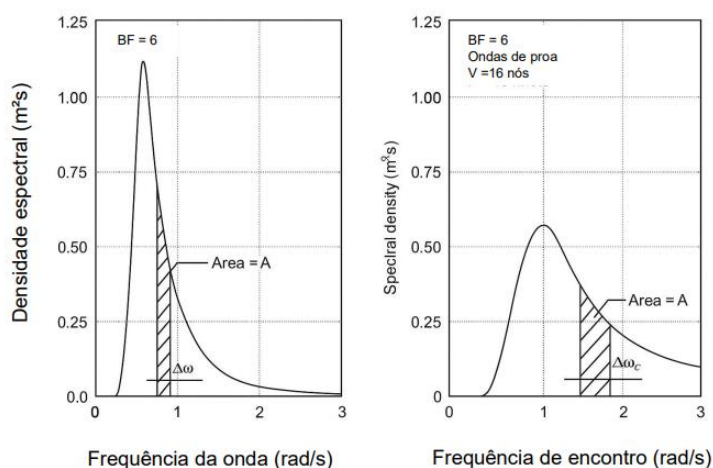
3.6.1. Transformações de Espectro

O valor espectral das ondas, $S_{\zeta}(\omega_e)$, baseado em ω_e , não é igual ao valor espectral, $S_{\zeta}(\omega)$, baseado em ω . Como deve haver uma quantidade igual de energia nas bandas de frequência $\Delta\omega$ e $\Delta\omega_e$ segue-se que:

$$S_{\zeta}(\omega_e) \cdot d\omega_e = S_{\zeta}(\omega) \cdot d\omega \quad (43)$$

Essa regra de transformação é demonstrada na Figura 2.

Figura 2. Exemplo de transformação dos espectros de onda.



Fonte: Adaptado de Jorunée e Massie (2001).

A seguinte relação é obtida:



$$S_{\zeta}(\omega_e) = \frac{S_{\zeta}(\omega)}{\frac{d\omega_e}{d\omega}} \quad (44)$$

A relação entre a frequência de encontro e a frequência da onda em águas profundas é a seguinte:

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} V \cdot \cos\mu \quad (45)$$

$$\omega_e = \omega \cdot \left(1 - \frac{V}{c} \cdot \cos\mu\right) \quad (46)$$

utilizando: $c = g/\omega$

onde:

- ω = frequência da onda em uma referência fixa (rad/s).
- ω_e = frequência de encontro em uma referência móvel (rad/s).
- V = velocidade do navio (m/s).
- c = velocidade da onda (m/s).
- μ = direção do navio em relação à direção da onda.

Assim, para águas profundas:

$$\frac{d\omega_e}{d\omega} = 1 - \frac{2\omega V \cdot \cos\mu}{g} \quad (47)$$

3.6.2 Espectros de resposta

O espectro de resposta de um movimento (ou resposta, r) com base na frequência de encontro, ω_e , pode ser encontrado a partir da função de transferência do movimento e do espectro de ondas por (Figura 3):

$$S_{\zeta}(\omega_e) = S_{\zeta}(\omega_e) \left| \frac{r_a}{\zeta_a}(\omega_e) \right|^2 \quad (48)$$

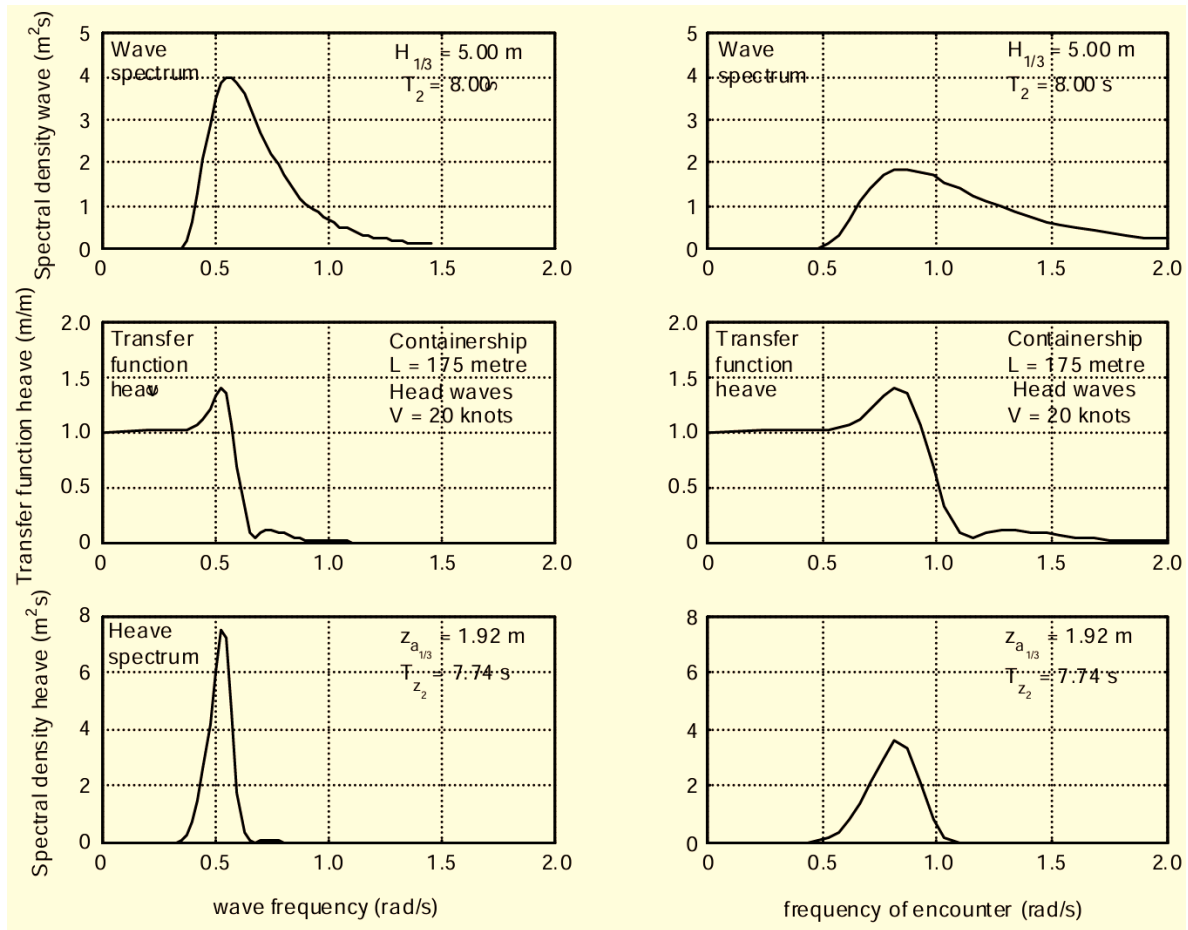
Os momentos do espectro de resposta são dados por:



$$m_{nr} = \int_0^{\infty} \omega_e^n \cdot S_r(\omega_e) \cdot d\omega_e \tag{49}$$

com: $n = 0, 1, 2, \dots$

Figura 3. Relação entre espectro de ondas, operadores de amplitude de resposta, e espectros resultantes de resposta.



Fonte: Jorunée e Massie (2001).

$$m_{0r} = \int_0^{\infty} S_r(\omega_e) \cdot d\omega_e = \int_0^{\infty} S_r(\omega) \cdot d\omega \tag{50}$$

$$m_{1r} = \int_0^{\infty} \omega_e \cdot S_r(\omega_e) \cdot d\omega_e = \int_0^{\infty} \omega_e \cdot S_r(\omega) \cdot d\omega \tag{51}$$

$$m_{2r} = \int_0^{\infty} \omega_e^2 \cdot S_r(\omega_e) \cdot d\omega_e = \int_0^{\infty} \omega_e^2 \cdot S_r(\omega) \cdot d\omega \tag{52}$$



A amplitude significativa da resposta em algum grau de liberdade do movimento pode ser calculada a partir da função de densidade espectral de uma resposta. A amplitude significativa é definida como o valor médio da maior parte (um terço superior) das maiores amplitudes de resposta, ou, equivalentemente:

$$r_{a_{1/3}} = 2\sqrt{m_{0r}} = 2 \cdot \text{RMS} \quad (53)$$

Um período médio pode ser encontrado a partir do centroide do espectro (T_{1r}) ou a partir do raio de giro do espectro (período de zero-crossing, T_{2r}):

$$T_{1r} = 2\pi \cdot \frac{m_{0r}}{m_{1r}} \quad (54)$$

$$T_{2r} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m_{0r}}{m_{2r}}} \quad (55)$$

Espectros de velocidades e acelerações de resposta são encontrados por uma multiplicação do RAO do deslocamento por ω_e e ω_e^2 respectivamente. Como os quadrados dos RAOs são usados para definir os espectros de resposta, os momentos espectrais podem ser escritos como:

$$m_{0\dot{r}} = m_{2r} \text{ e } m_{0\ddot{r}} = m_{2\dot{r}} = m_{4r} \quad (56)$$

$$m_{1\dot{r}} = m_{2r} \text{ e } m_{1\ddot{r}} = m_{3\dot{r}} = m_{5r} \quad (57)$$

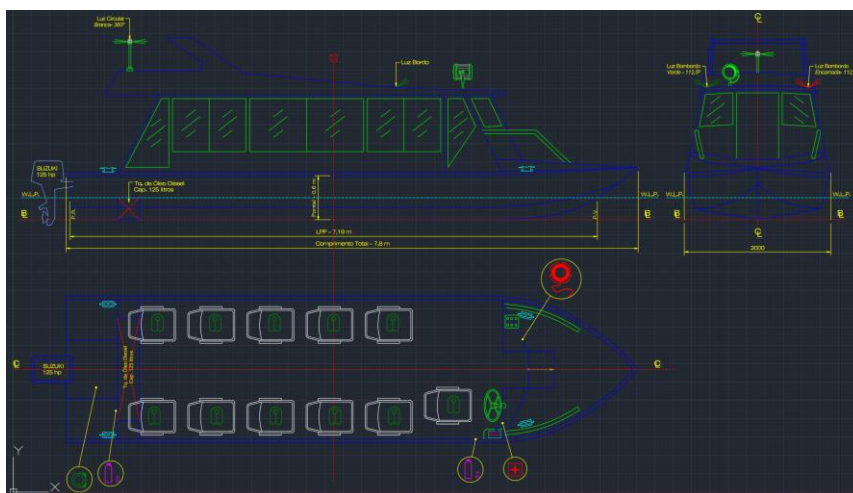
$$m_{2\dot{r}} = m_{4r} \text{ e } m_{2\ddot{r}} = m_{4\dot{r}} = m_{6r} \quad (58)$$



4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia seguida no estudo. Como caso de estudo foi selecionada uma embarcação de pequeno porte cabinada, utilizada na região de Manaus – AM, para atividades de transporte de pessoas (Figura 4).

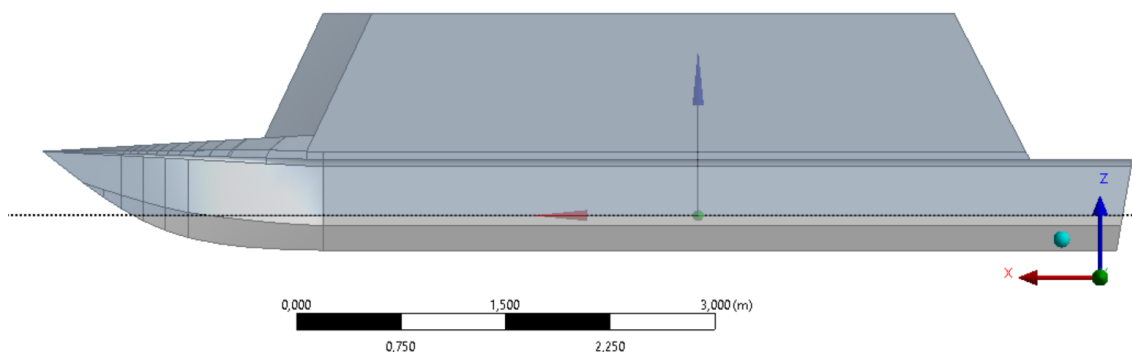
Figura 4. Arranjo geral da embarcação cabinada considerada como caso de estudo.



Fonte: Cortesia de RGF Tecnologia Naval Ltda.

A geometria externa da embarcação foi modelada primeiramente no software Rhinoceros V8 (Mcneel, 2021). Posteriormente, a geometria foi adaptada como uma peça única para seu uso no Ansys Aqwa, especificamente no módulo Design Modeler, onde foi definido o seu calado, Figura 5.

Figura 5. Aspecto da embarcação modelada no Rhino3D e aberta no Ansys Design Modeler.



Fonte: Ansys 2025 R1.

A Tabela 2 mostra as principais dimensões da embarcação, que foram consideradas na análise. Neste estudo, foi considerado um calado de 0,25 m, considerado como calado de carga



média da embarcação. Características hidrostáticas para essa condição de calado foram obtidas com o Ansys Aqwa e são apresentadas no Apêndice A. Por outro lado, o Apêndice B apresenta um levantamento de embarcações similares à do presente caso de estudo.

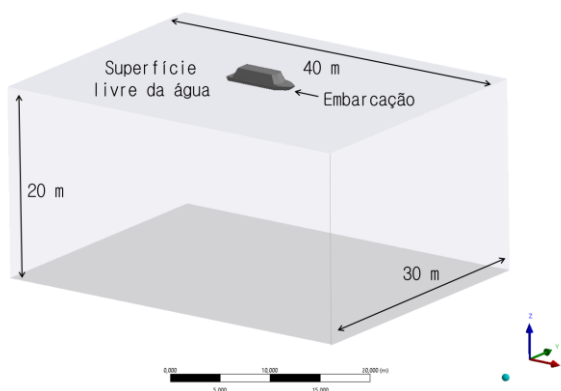
Tabela 2. Características principais da embarcação.

Comprimento total, L	7,8 m
Comprimento entre perpendiculares, Lpp	7,19 m
Boca máxima, B	2 m
Pontal na seção média	0,6 m
Posição do sistema coordenado definido no corpo	X = 3m a partir do espelho de popa Z = na linha de água (0,25 m da linha base)
Calado considerado na análise	0,25 m

Fonte: Elaboração própria.

Com relação ao peso da embarcação, este foi calculado de maneira automática pelo software, considerando o calado definido. A posição vertical do centro de gravidade foi estabelecida a 0,1 m acima da linha de água, ou 0,35 m acima da linha base, considerando o sistema referencial definido na linha de água (Figura 5). Os momentos de inércia foram calculados de maneira empírica segundo a literatura (Journée; Massie, 2001), que sugere que quando a distribuição da massa sólida de uma embarcação é desconhecida, os raios de giração para determinar os momentos de inércia principais podem ser definidos como $k_{xx} \sim 0,3B$ até $0,4B$, $k_{yy} \sim 0,22L$ até $0,28L$, $k_{zz} \sim 0,22L$ até $0,28L$, sendo B e L a boca e o comprimento da embarcação, respectivamente. Neste trabalho foram selecionados $k_{xx} = 0,3(2\text{m}) = 0,6\text{ m}$, e $k_{yy} = k_{zz} = 0,25(7,8\text{ m}) = 1,95\text{ m}$. Nas análises, foi definido um domínio computacional de 20 m de profundidade, 40 metros de comprimento e 30 m de largura, como mostrado na Figura 6. A massa específica da água foi definida como a correspondente a água doce (1000 kg/m^3).

Figura 6. Domínio computacional utilizado nas análises.

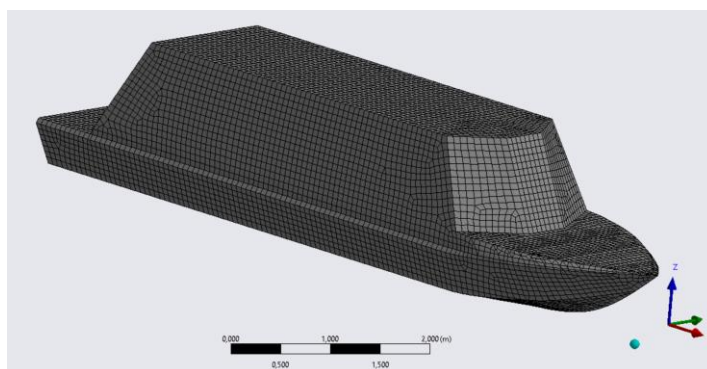


Fonte: Ansys 2025 R1.



Para gerar a malha computacional da geometria (Figura 7), foi considerada a malha default sugerida pelo software, proporcionando uma discretização espacial bastante razoável. O tamanho do elemento foi default 0,069 m, permitindo analisar uma frequência máxima de 10,907 rad/s. A malha teve um total de 10384 nós (*nodes*) e 10441 elementos (*elements*). Foi seguido o procedimento seguido por Cursino (2024). O objetivo do presente trabalho é demonstrar a aplicabilidade do Ansys Aqwa, pelo que o estudo de incertezas devido à discretização da malha está fora do escopo do trabalho. Porém, análises posteriores podem realizar esta análise seguindo procedimentos bem estabelecidos na literatura científica (Celik *et al.*, 2008).

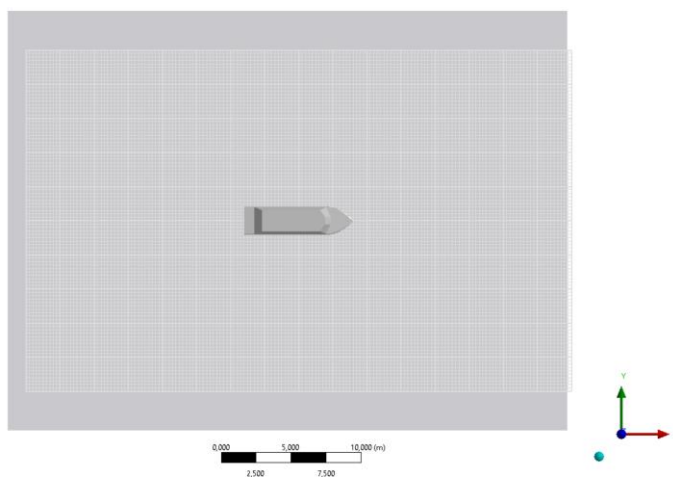
Figura 7. Aspecto da malha gerada para as análises.



Fonte: Ansys 2025 R1.

Para calcular a superfície livre, foi considerada um grid com resolução fina (161 x 101) e um fator de tamanho de grid de 5, segundo as configurações do software, como mostrado na Figura 8.

Figura 8. Grid utilizado para a superfície das ondas.

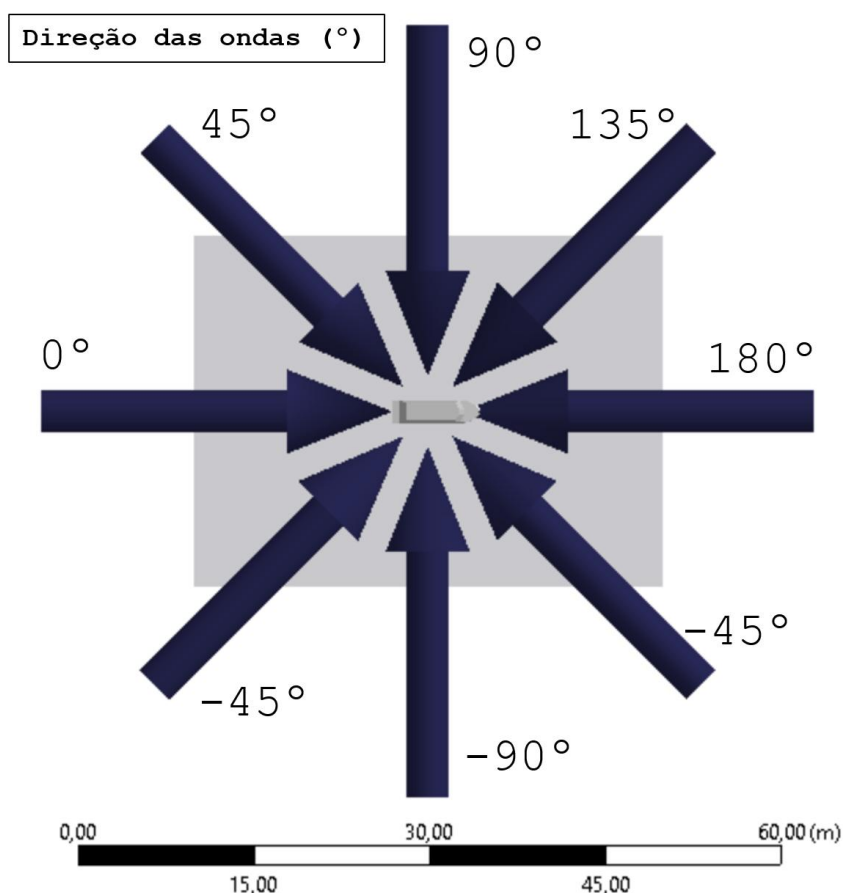


Fonte: Ansys 2025 R1.



Para realizar as análises de movimentos em ondas, foram selecionados diversos ângulos de encontro das ondas com a embarcação, como definido na Figura 9. A embarcação foi assumida como flutuando livremente para fins demonstrativos da presente análise em mar irregular, ou seja, não foi considerada velocidade de avanço. Já que a análise considera ondas regulares, foram definidas 30 frequências de onda (em rad/s), divididas entre 0,1 rad/s e 10,907 rad/s, baseado na configuração do software.

Figura 9. Direção das ondas encontrando a embarcação (em °).



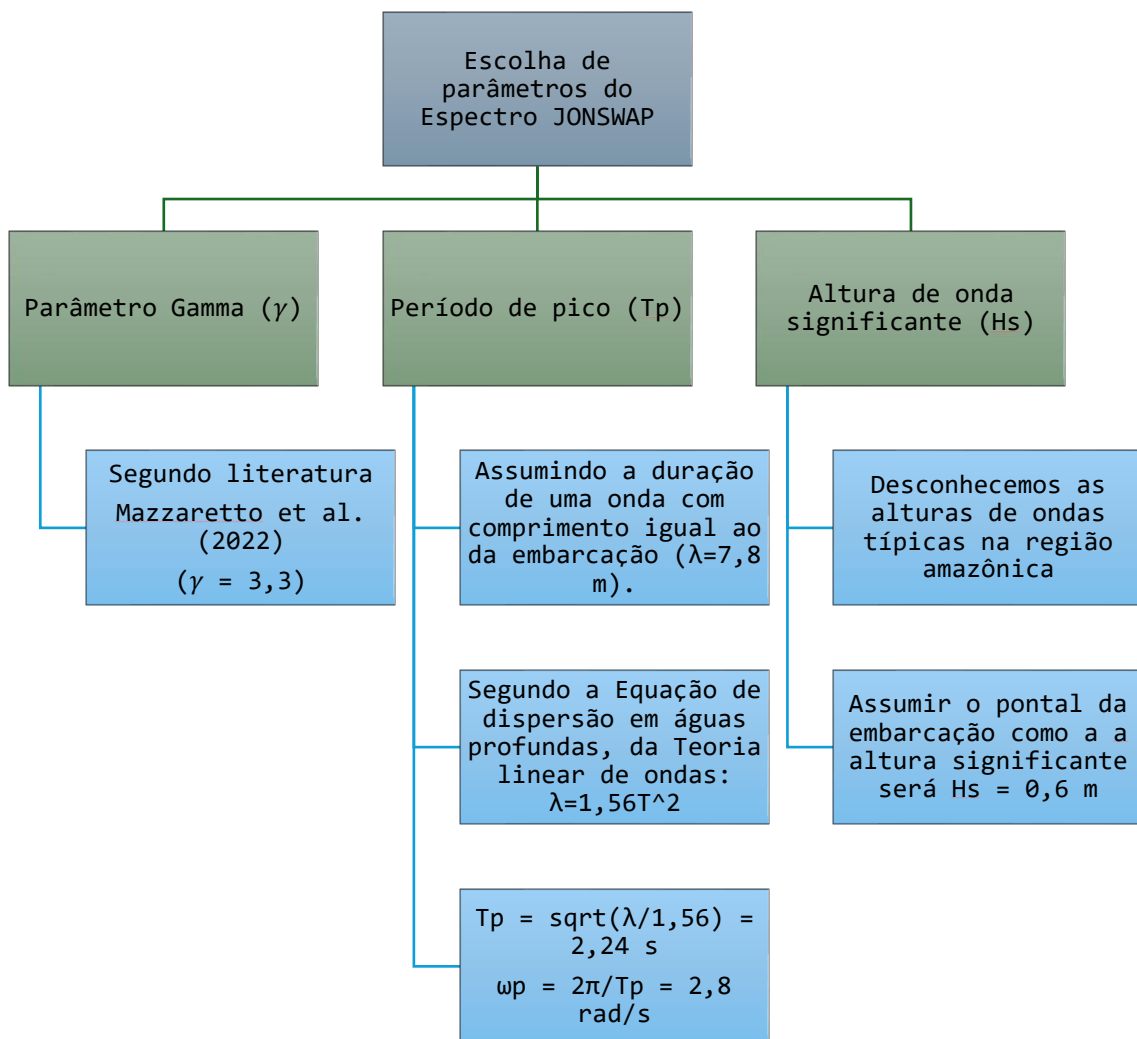
Fonte: Elaboração própria com informação do Ansys 2025 R1.

Para representar o estado de ondas irregulares, foi escolhido dentre as opções do software o espectro de ondas JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*), desenvolvido para representar condições de mar no Mar do Norte. No entanto, cabe mencionar que os parâmetros característicos desse espectro foram modificados de maneira empírica para tentar aplicá-lo na geração de ondas na região amazônica. Para selecionar os parâmetros do espectro JONSWAP, é necessário definir a altura significativa H_s , período pico T_p , e parâmetro gamma γ . O fator de realce de pico (γ) caracteriza o espectro JONSWAP, $SJ(f)$, controlando a nitidez do pico spectral (Mazzaretto; Menéndez; Lobeto, 2022). Este parâmetro pode variar entre 1 e 7 (Ansys,



2024b). Segundo (Goda, 2010), em diferentes regiões do mundo o fator de aumento de pico γ deve variar; porém, ele é geralmente considerado com seu valor médio, $\gamma = 3,3$ (Mazzaretto; Menéndez; Lobeto, 2022). Este valor foi considerado no presente estudo, enquanto H_s foi assumido como o pontal da embarcação para demonstrar a aplicabilidade do software. Finalmente T_p foi assumido como o período da onda cujo comprimento é igual ao comprimento da embarcação. A Figura 10 resume as escolhas feitas.

Figura 10. Seleção dos parâmetros requeridos para implementar o Espectro JONSWAP.



Fonte: Elaboração própria.

A configuração das ondas irregulares no Ansys Aqwa foi feita como mostrado na Tabela 3.



Tabela 3. Configuração das ondas irregulares no Ansys.

Detalhes	
Detalhes da Onda Irregular	
Nome	Onda Irregular 1
Visibilidade	Visível
Atividade	Não Suprimido
Faixa de Onda Definida por	Frequência
Detalhes do Espectro de Onda	
Tipo de Onda	JONSWAP (Hs)
<input type="checkbox"/> Direção do Espectro	180°
Propagação da Onda	Nenhuma (Ondas de Crista Longa)
Método de Apresentação do Espectro	Gráfico 1D
Definição de Semente	Controlado pelo Programa
Número de Linhas Espectrais Definidas	Controlado pelo Programa
Omitir Cálculo da Força de Deriva	Não
Frequência Inicial e Final	Frequência Final Manual, Frequência Inicial Automática
Frequência Inicial	1,64095 rad/s
<input type="checkbox"/> Frequência Final	7 rad/s
<input type="checkbox"/> Altura Significativa da Onda	0,6 m
<input type="checkbox"/> Gama (γ)	3,3
<input type="checkbox"/> Frequência de Pico	2,8 rad/s

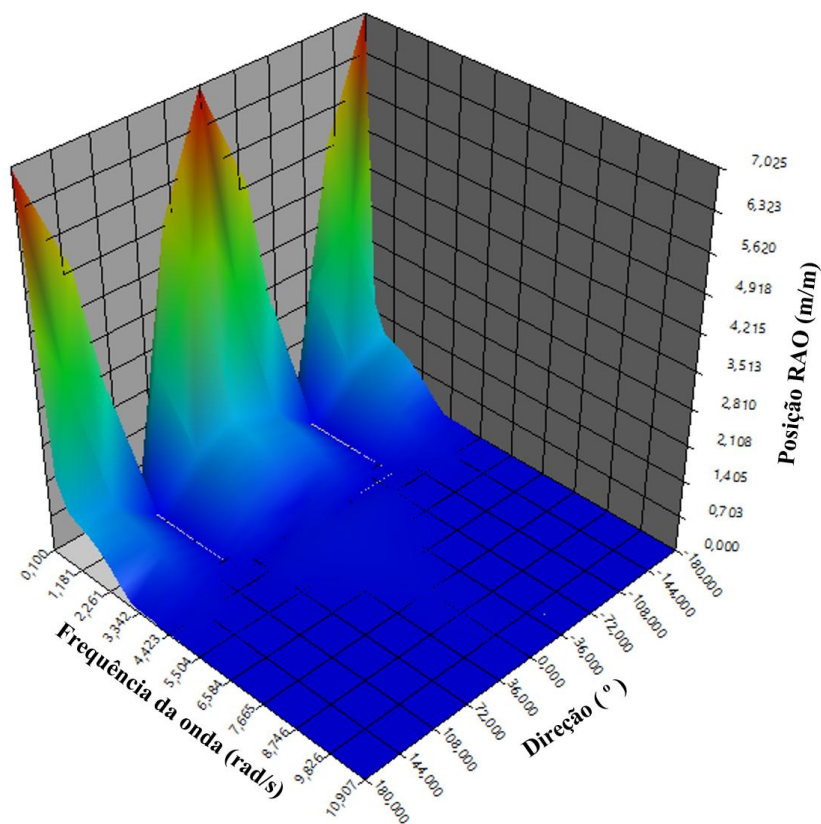
Fonte: Ansys 2025 R1.



5. RESULTADOS DA ANÁLISE EM ONDAS REGULARES

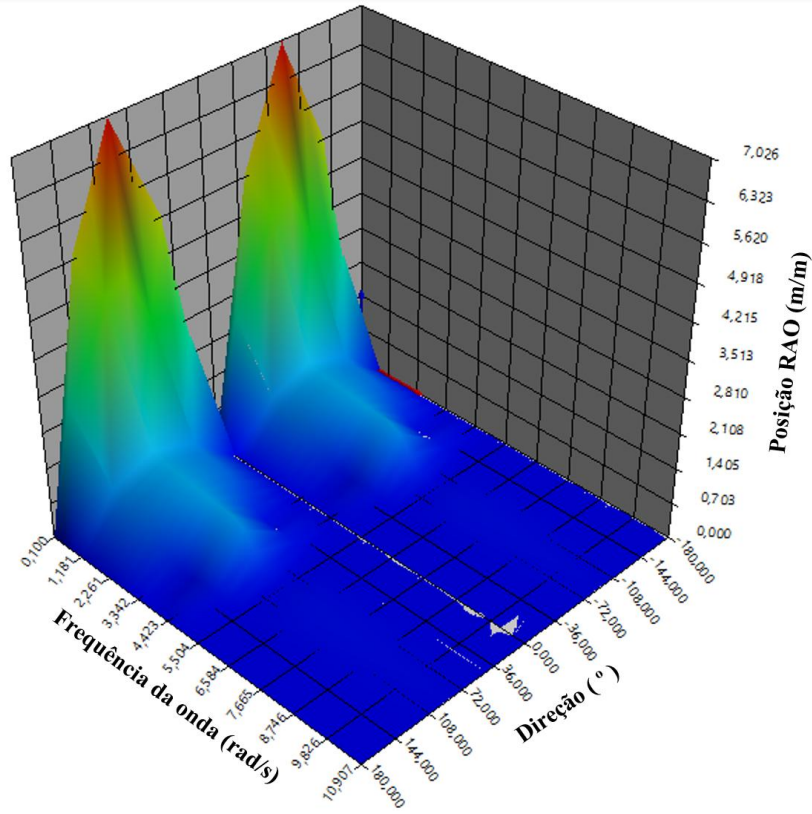
Os resultados da análise da resposta da embarcação em ondas regulares, no domínio da frequência, foram obtidos com o módulo *Hydrodynamic Diffraction*. Eles correspondem aos deslocamentos da embarcação devido às ondas regulares com diferentes frequências e ângulos de encontro. A Figura 11 mostra os operadores de amplitude de resposta (RAOs – *Response Amplitude Operators*) de deslocamento com relação às direções e as frequências das ondas avaliadas, para os seis movimentos da embarcação: surge (Figura 11a), sway (Figura 11b), heave (Figura 11c), roll (Figura 11d), pitch (Figura 11e) e yaw (Figura 11f). As cores vermelhas nos gráficos representam os maiores deslocamentos para cada grau de liberdade, podendo ser identificadas as frequências de ressonância e a direção das ondas que causaram essas condições. Vale notar que os deslocamentos de translação (surge, sway e heave) e rotação (roll, pitch e yaw) são dados por amplitude unitária de onda.

Figura 11. Operadores de Amplitude de Resposta de deslocamento com relação ao ângulo de incidência das ondas com a embarcação e a frequência das ondas. (a) Surge. (b) Sway. (c) Heave. (d) Roll. (e) Pitch. (f) Yaw.

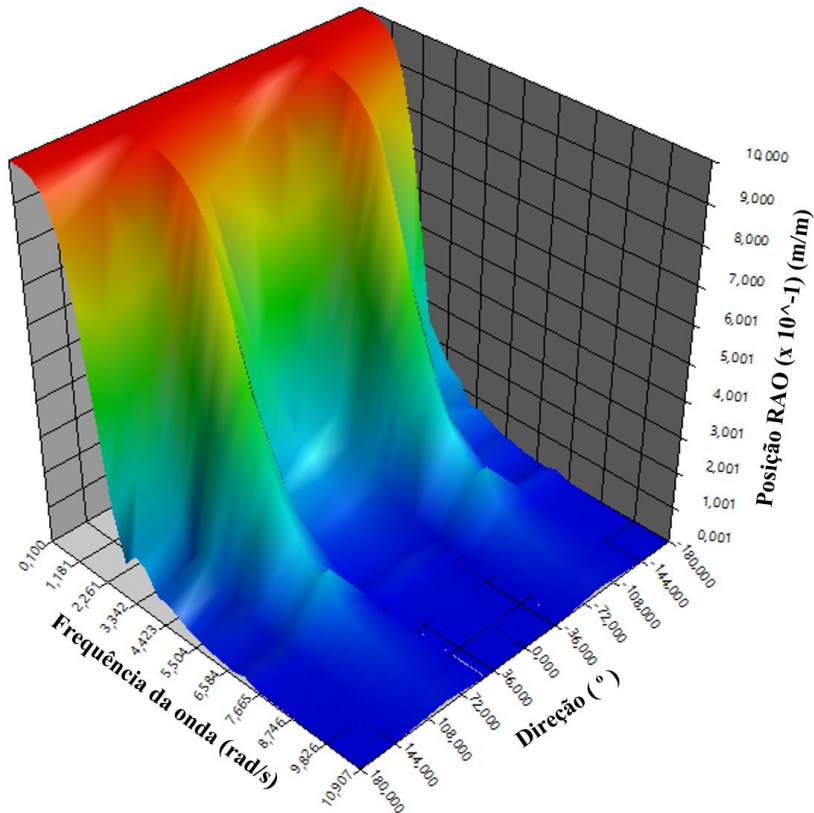


(a)- surge



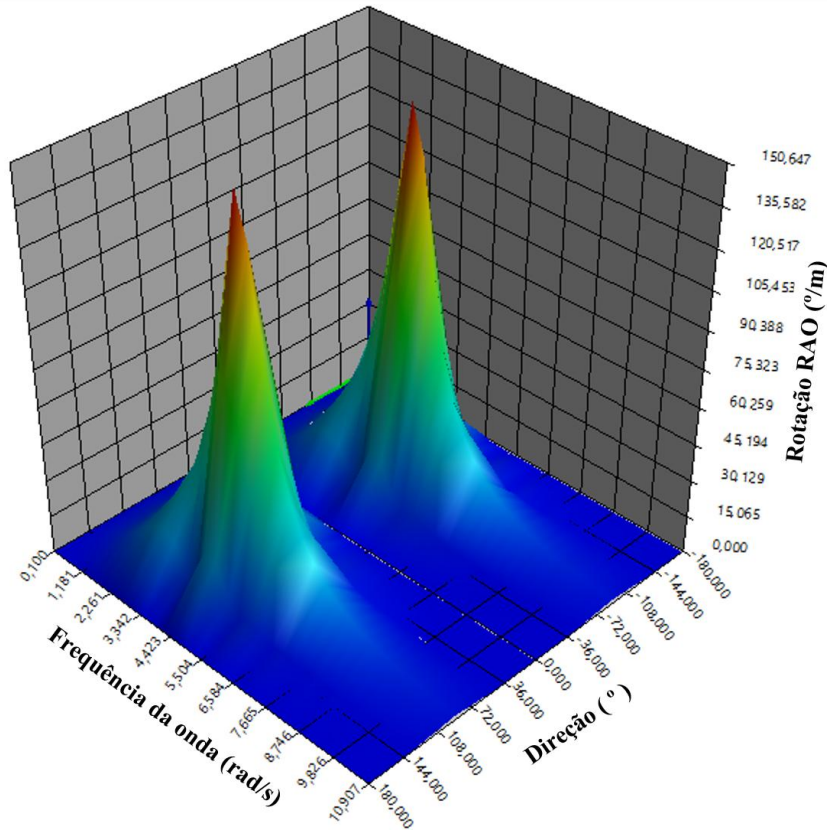


(b)- sway

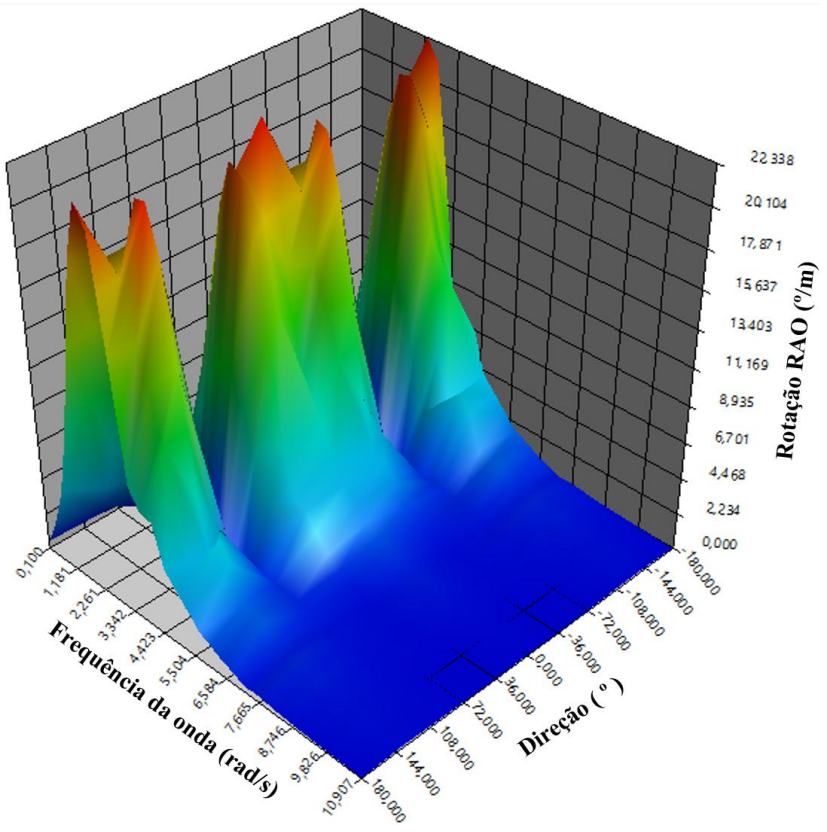


(c)- heave



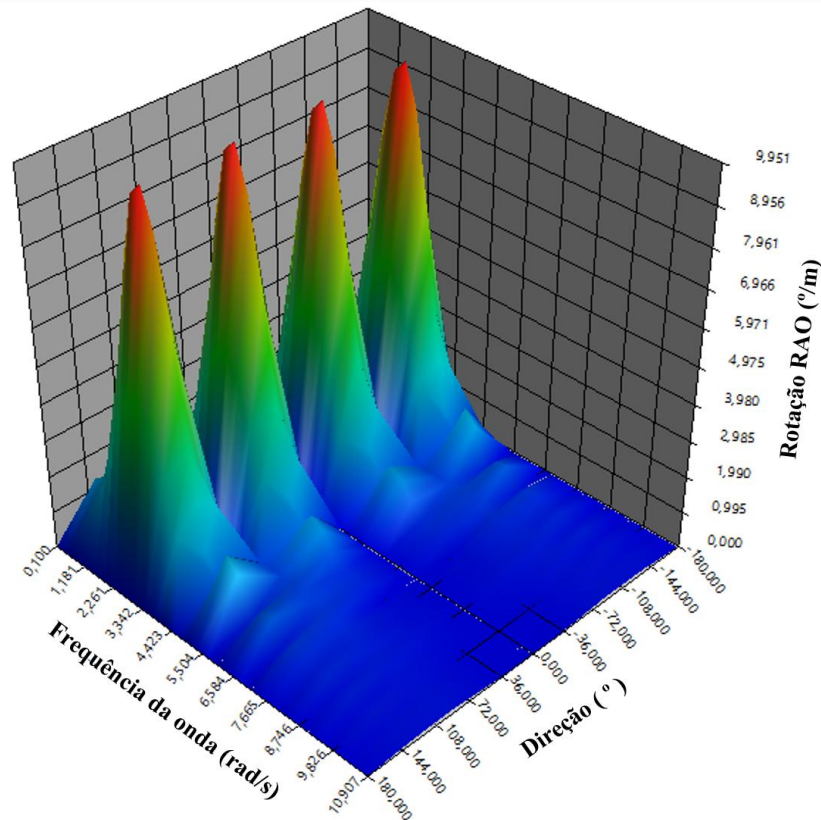


(d)- roll



(e)- pitch





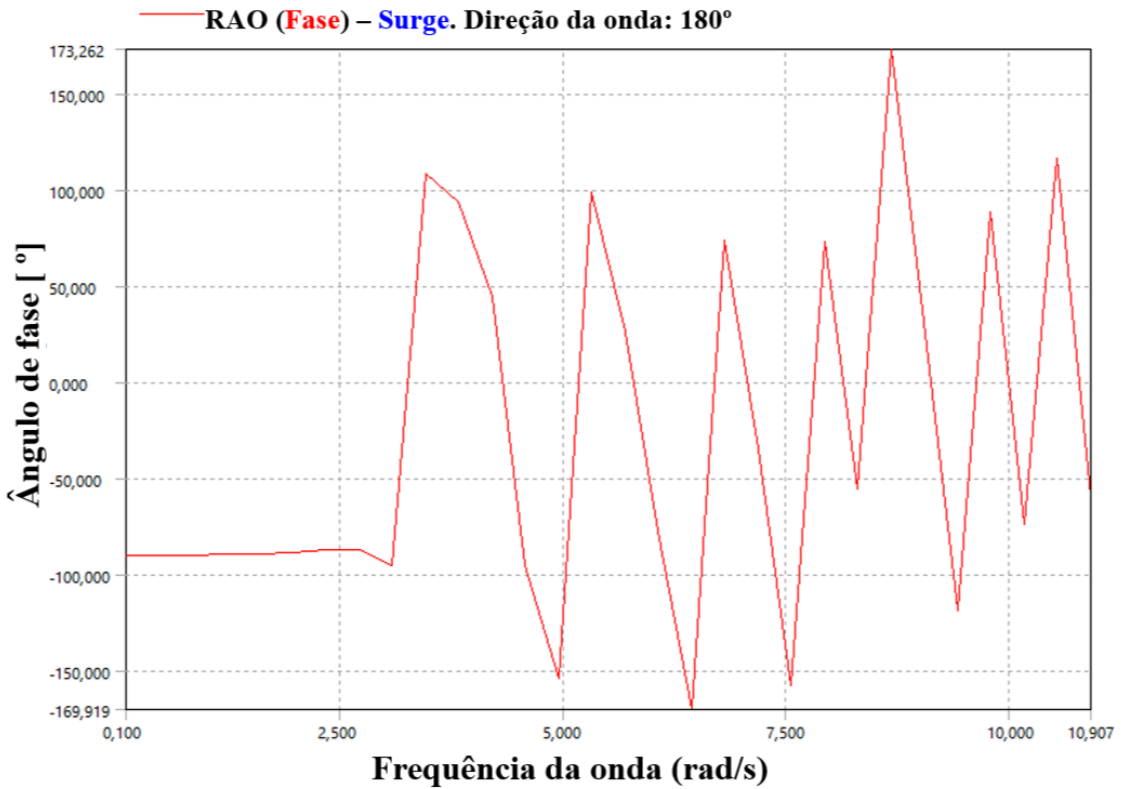
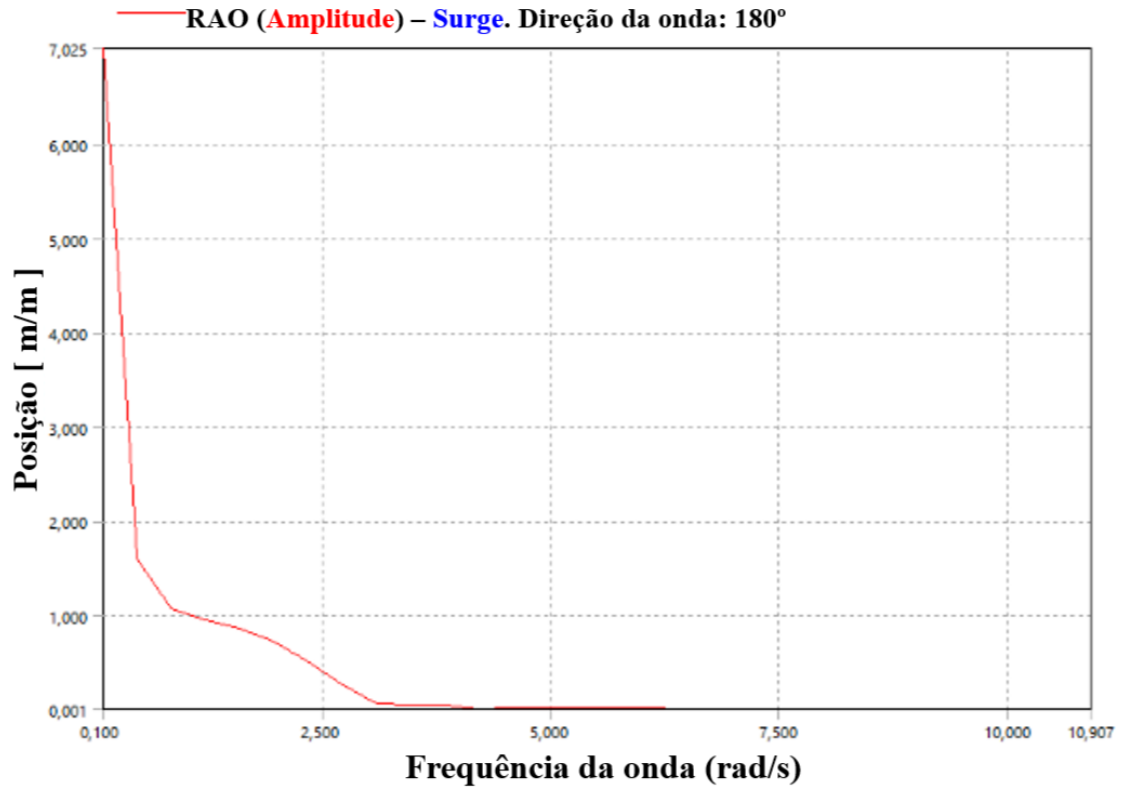
(f)- yaw

Fonte: Ansys 2025 R1.

Para fins ilustrativos, as Figuras 12, 13, 14, 15, 16 e 17 mostram os operadores de amplitude de resposta bidimensionais, considerando a resposta da embarcação em relação à frequência das ondas regulares, para um ângulo de incidência de 180° , isto é, incidindo pela proa. Nesses gráficos é possível visualizar os dois componentes do operador: a amplitude (parte superior) e a fase (parte inferior). Esta última corresponde à fase da onda com relação ao movimento da embarcação, representado pela posição do sistema referencial localizado no centro de gravidade. Porém, existem opções para monitorar a resposta em qualquer ponto da embarcação.



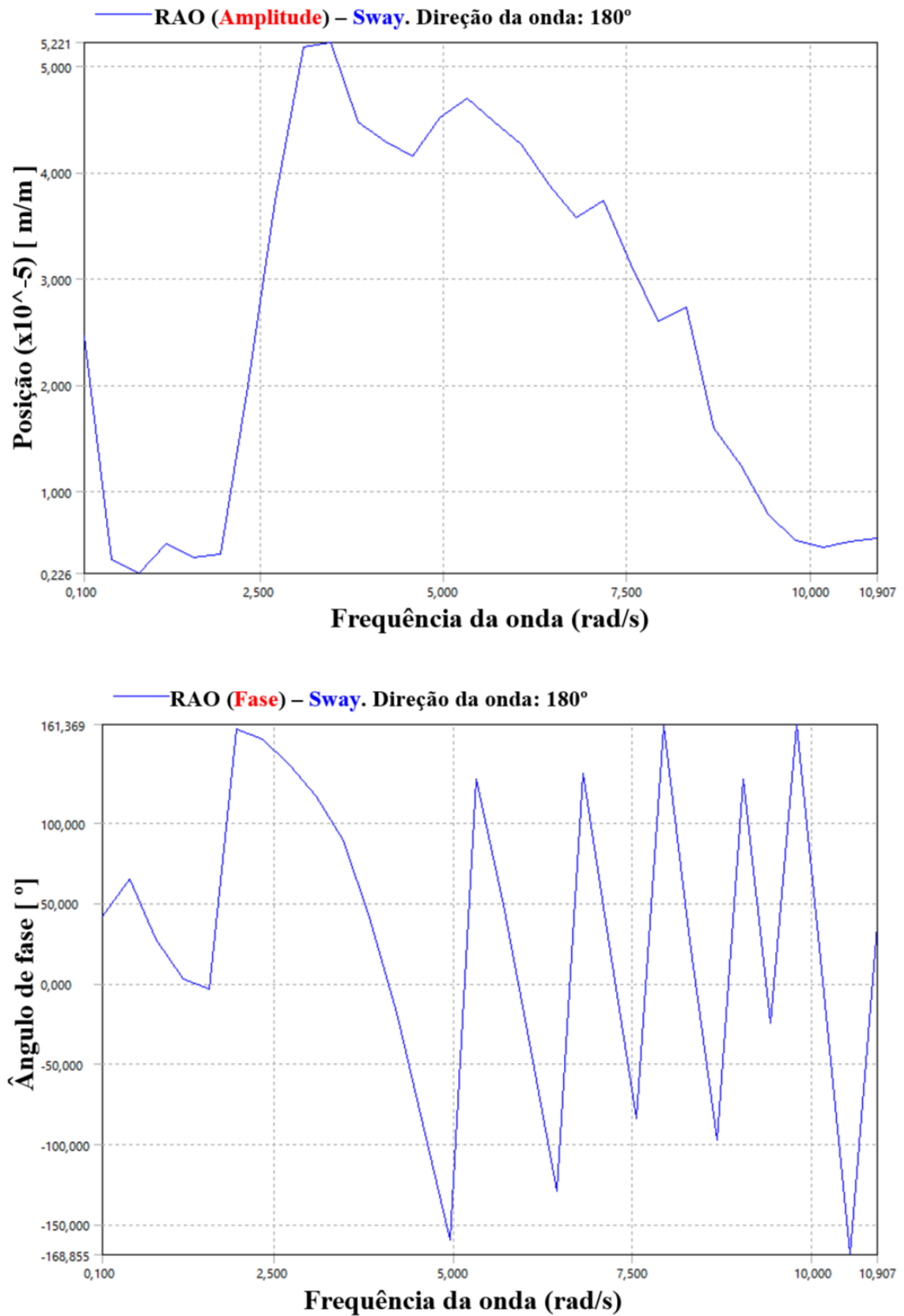
Figura 12. Operador de amplitude de resposta do movimento de surge, para um ângulo de incidência das ondas de 180° (pela proa). (a) Amplitude. (b) Fase.



Fonte: Ansys 2025 R1.



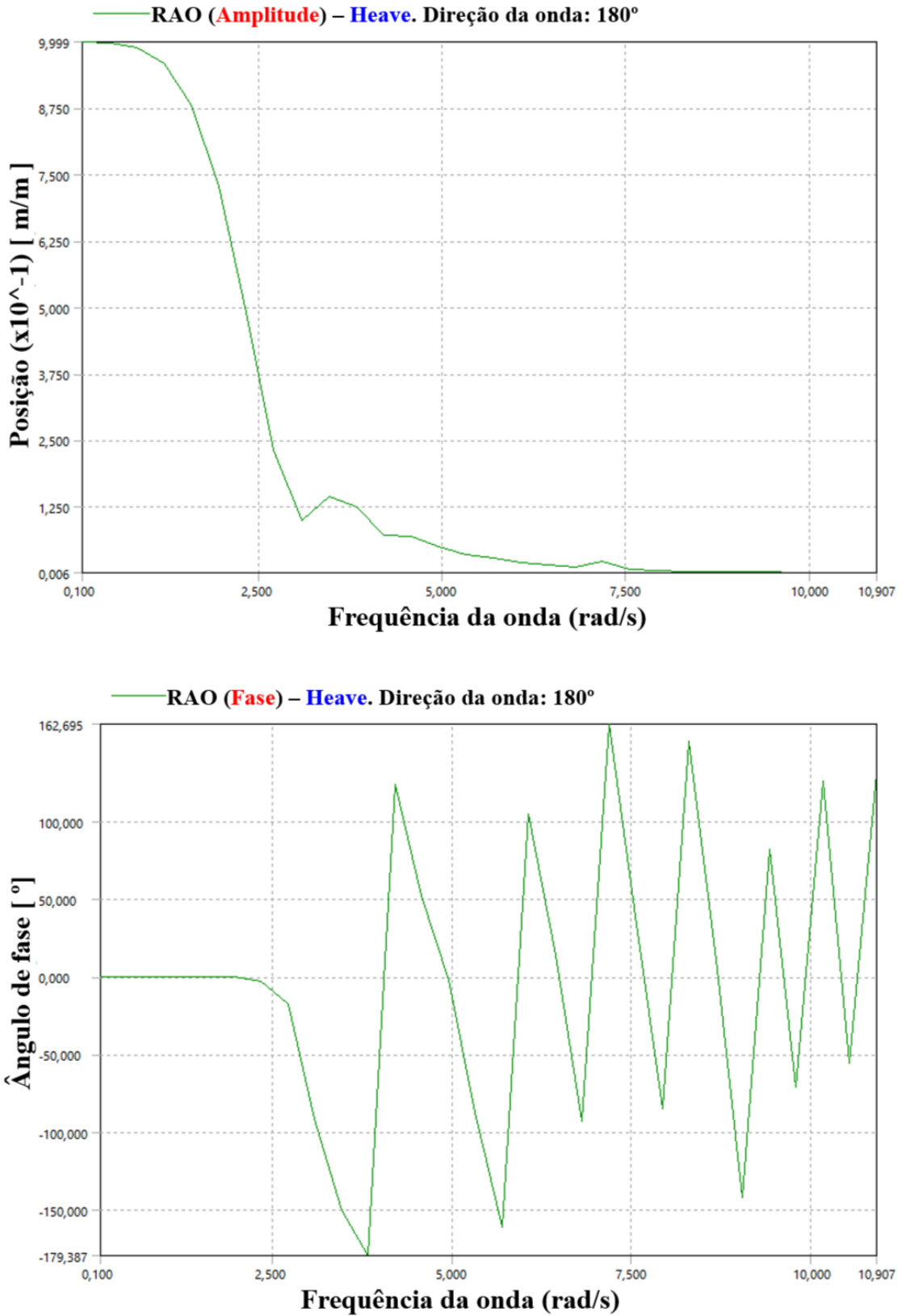
Figura 13. Operador de amplitude de resposta do movimento de sway, para um ângulo de incidência das ondas de 180° (pela proa). (a) Amplitude. (b) Fase.



Fonte: Ansys 2025 R1.



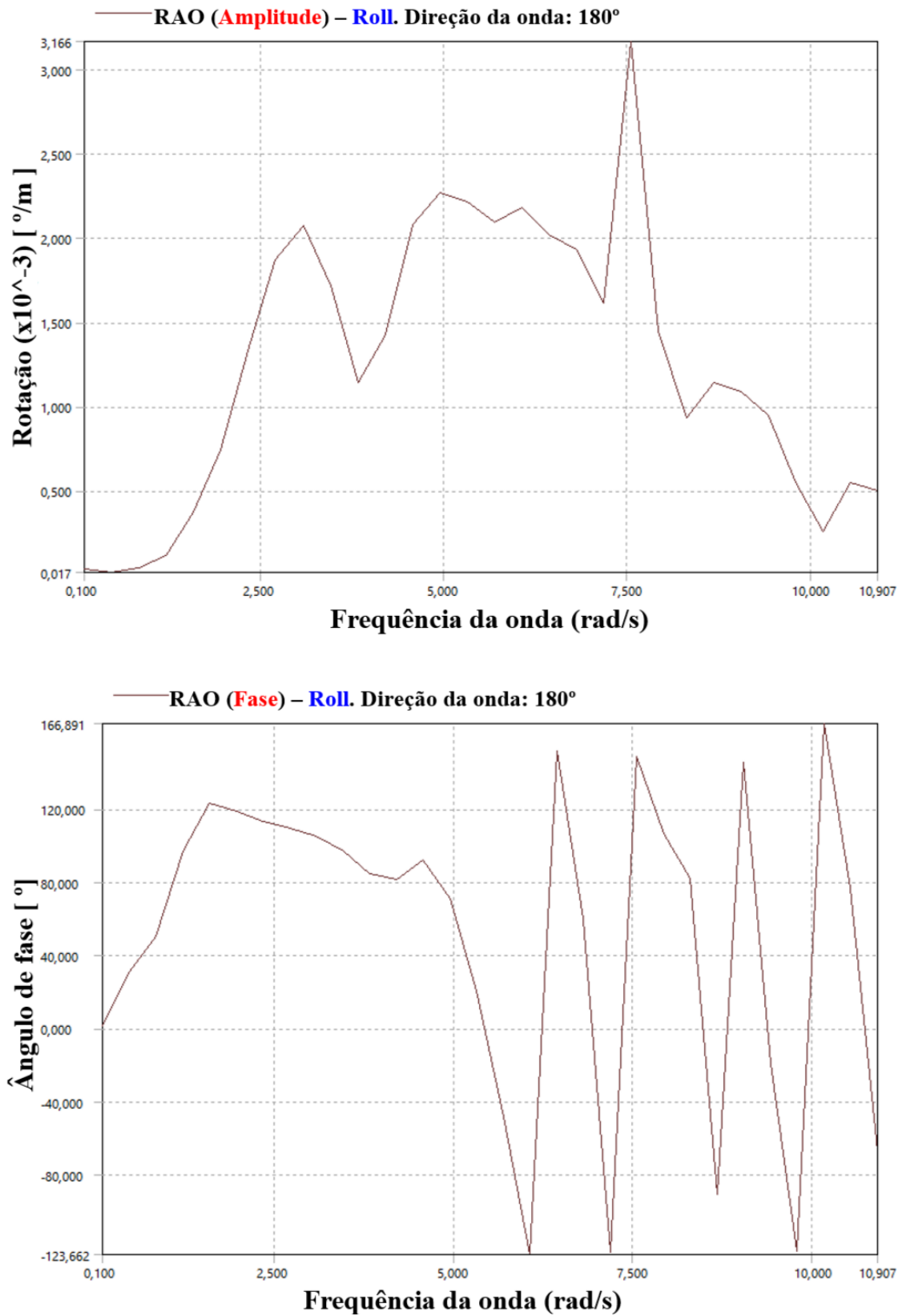
Figura 14. Operador de amplitude de resposta do movimento de heave, para um ângulo de incidência das ondas de 180° (pela proa). (a) Amplitude. (b) Fase.



Fonte: Ansys 2025 R1.



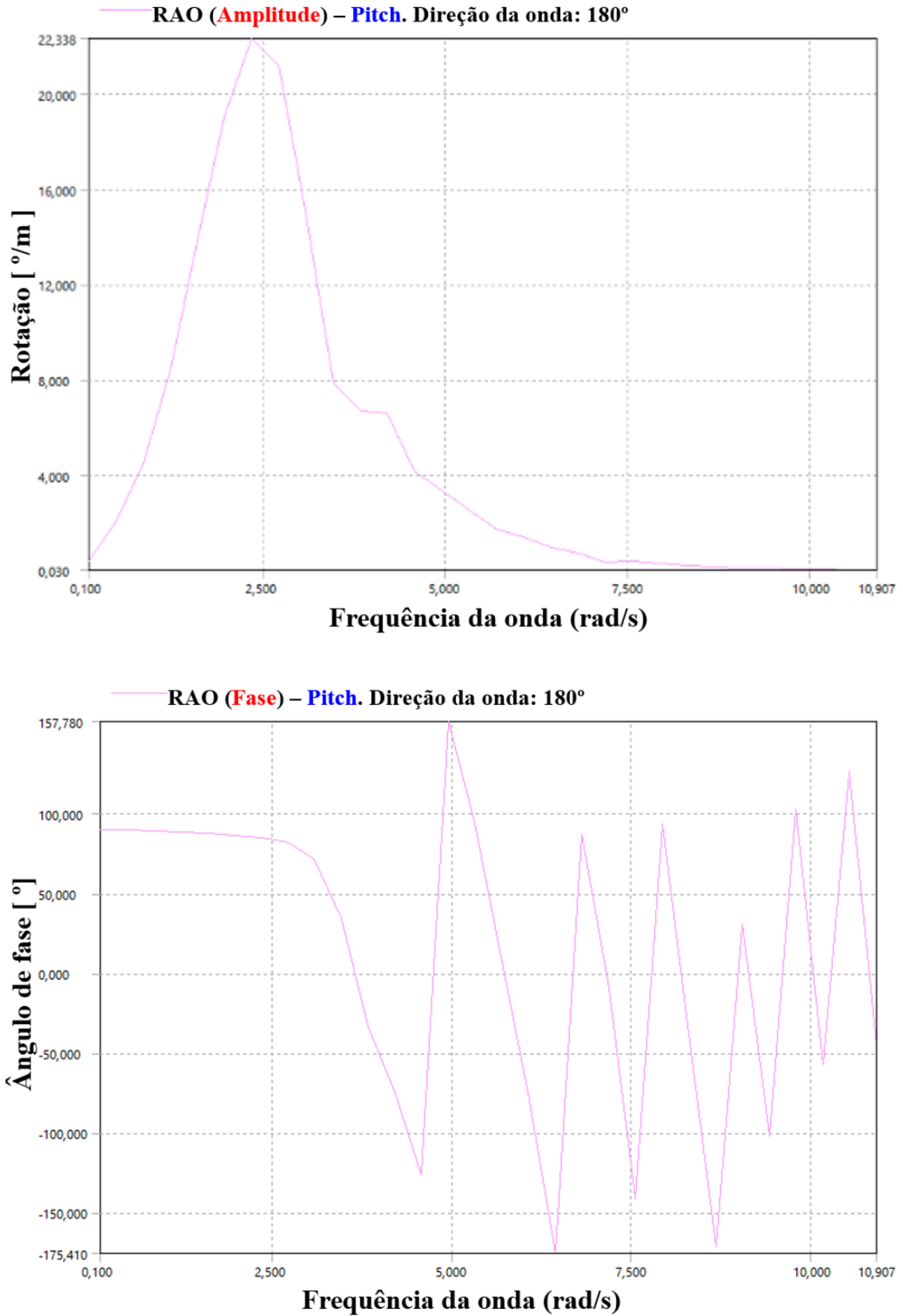
Figura 15. Operador de amplitude de resposta do movimento de roll, para um ângulo de incidência das ondas de 180° (pela proa). (a) Amplitude. (b) Fase.



Fonte: Ansys 2025 R1.



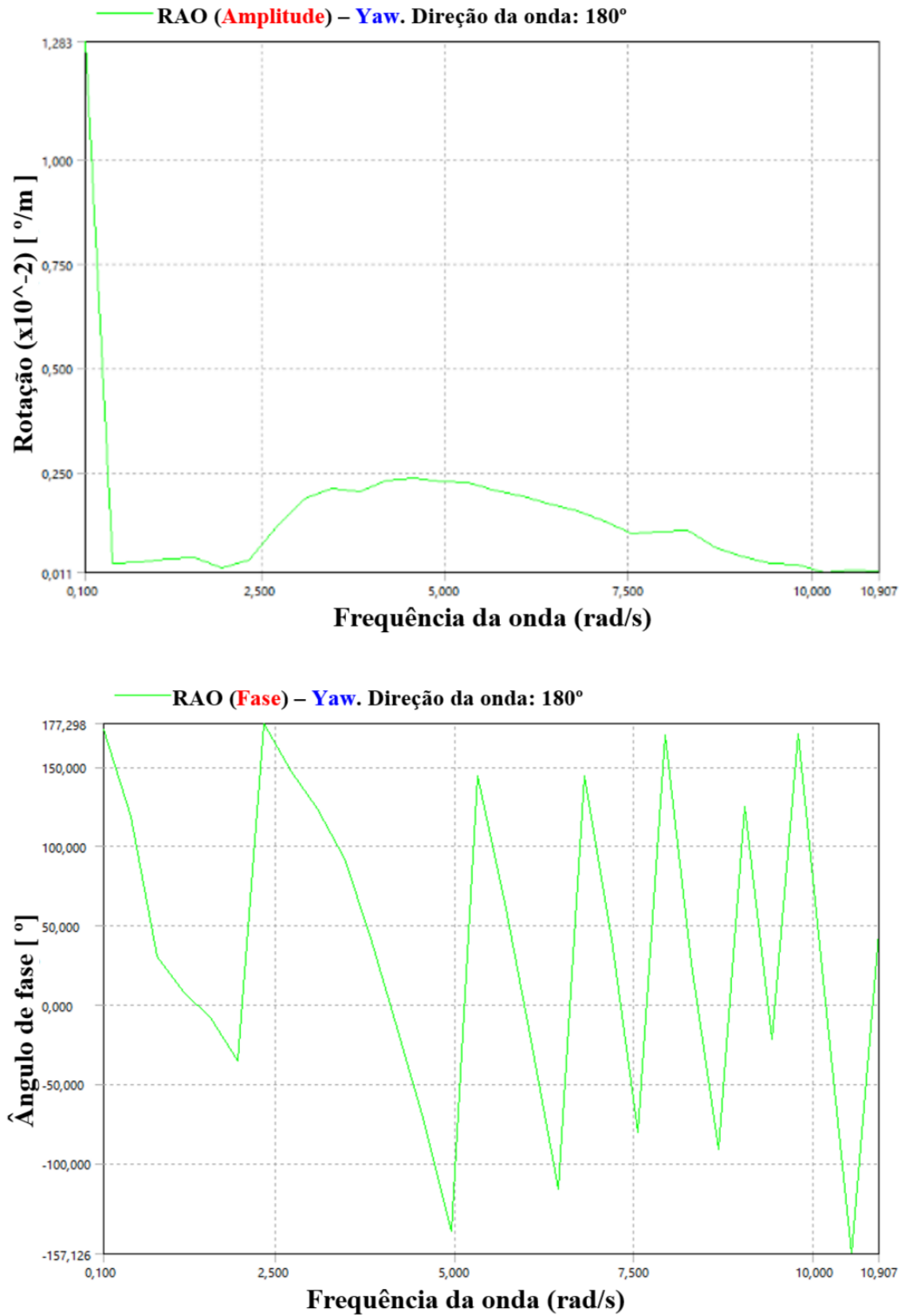
Figura 16. Operador de amplitude de resposta do movimento de pitch, para um ângulo de incidência das ondas de 180° (pela proa). (a) Amplitude. (b) Fase.



Fonte: Ansys 2025 R1.



Figura 17. Operador de amplitude de resposta do movimento de yaw, para um ângulo de incidência das ondas de 180° (pela proa). (a) Amplitude. (b) Fase.

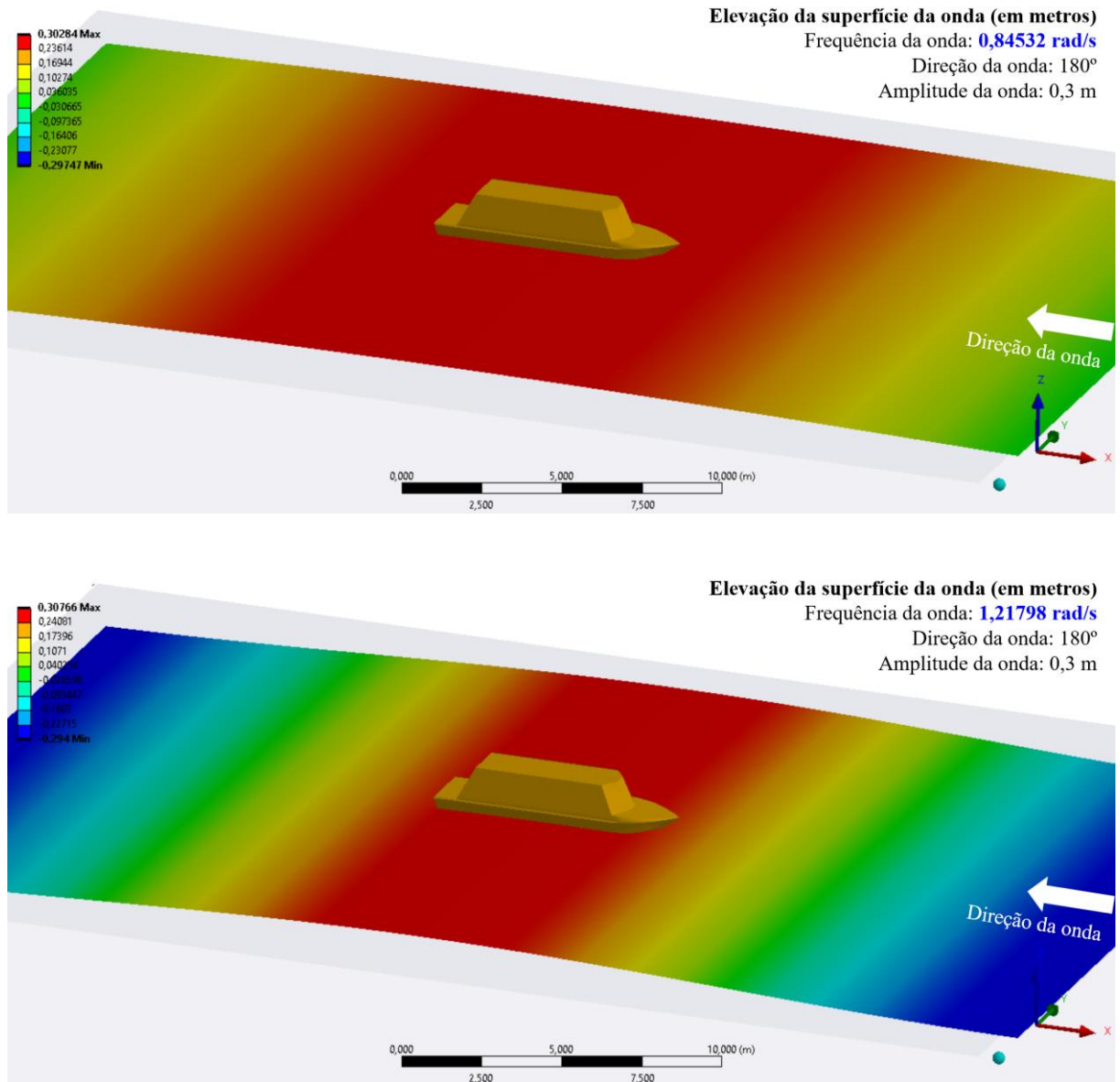


Fonte: Ansys 2025 R1.



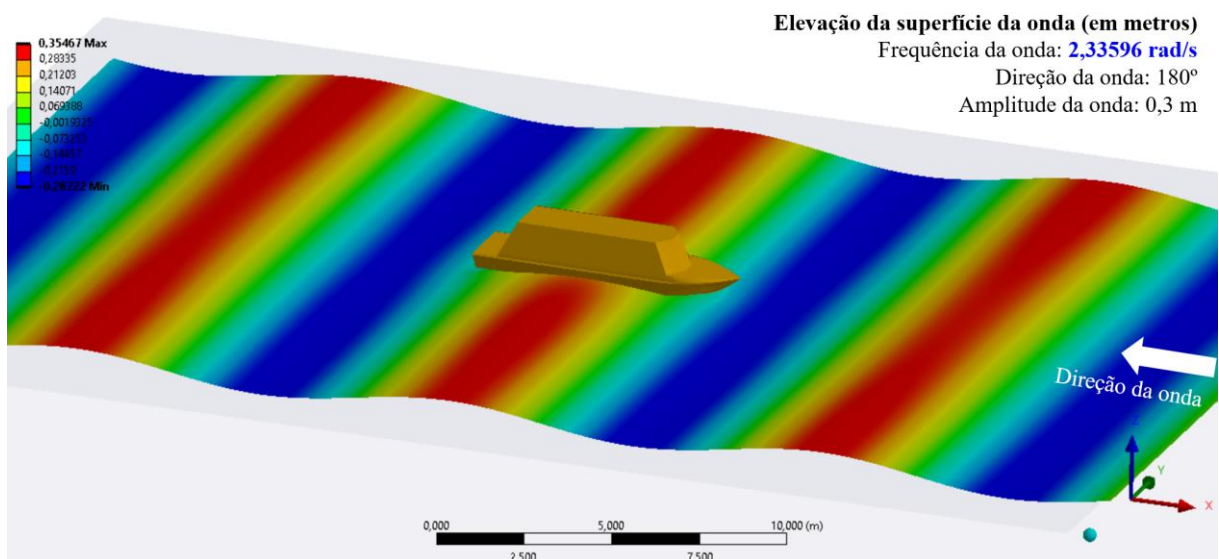
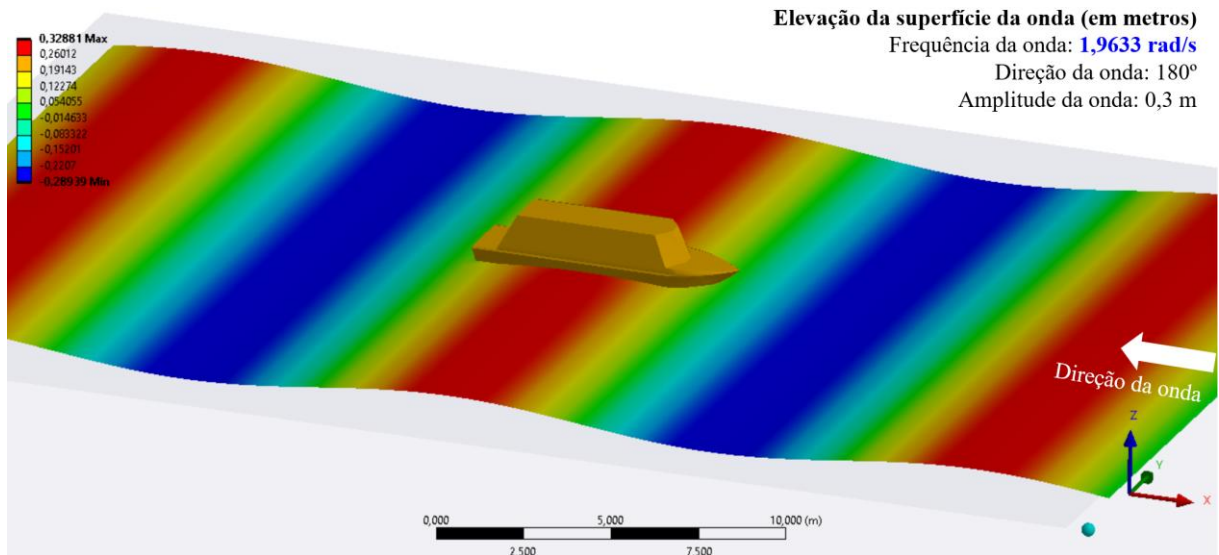
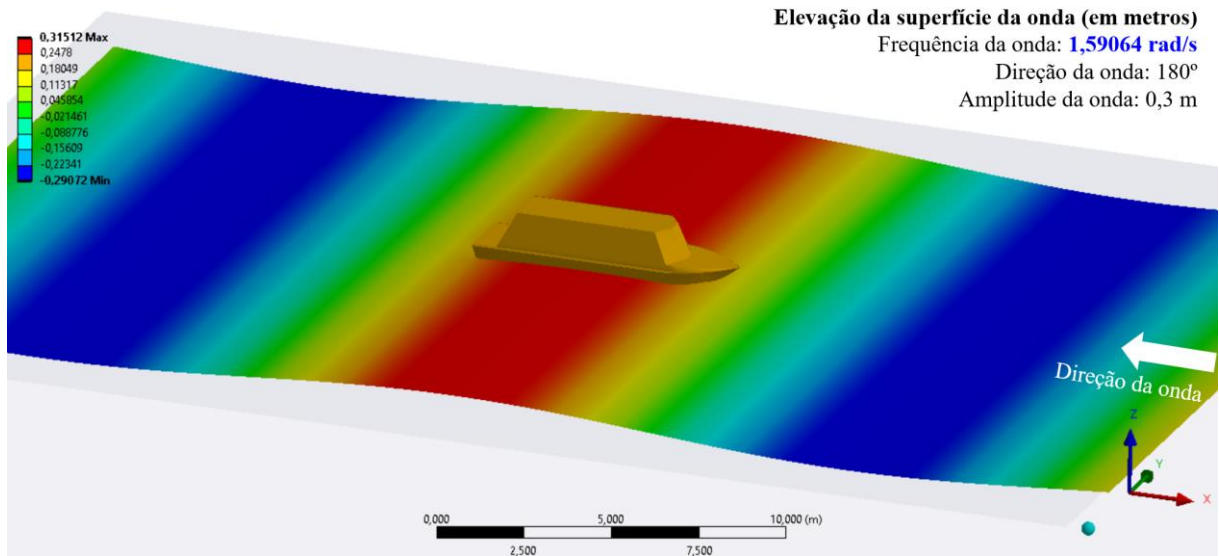
O módulo *Hydrodynamic Diffraction*, além de permitir o cálculo dos operadores de amplitude de resposta, permite visualizar o comportamento da embarcação no domínio do tempo, considerando ondas regulares de amplitude e frequência específicas, como mostrado na Figura 18. Na Figura, é possível comparar a influência de ondas regulares incidindo pela proa, com diferentes frequências, na elevação da superfície livre. Nota-se que em maiores frequências, as componentes de difração e refração de ondas devido à presença da embarcação são mais evidentes. Esta opção do software permite avaliar os efeitos da interação das ondas com a estrutura flutuante nas elevações da superfície livre.

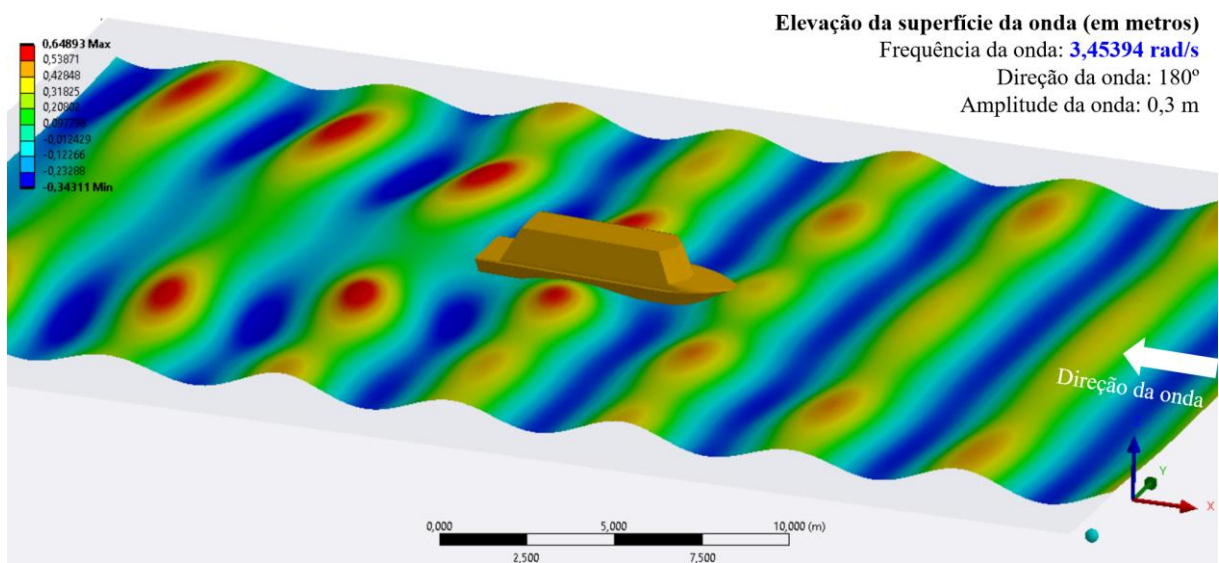
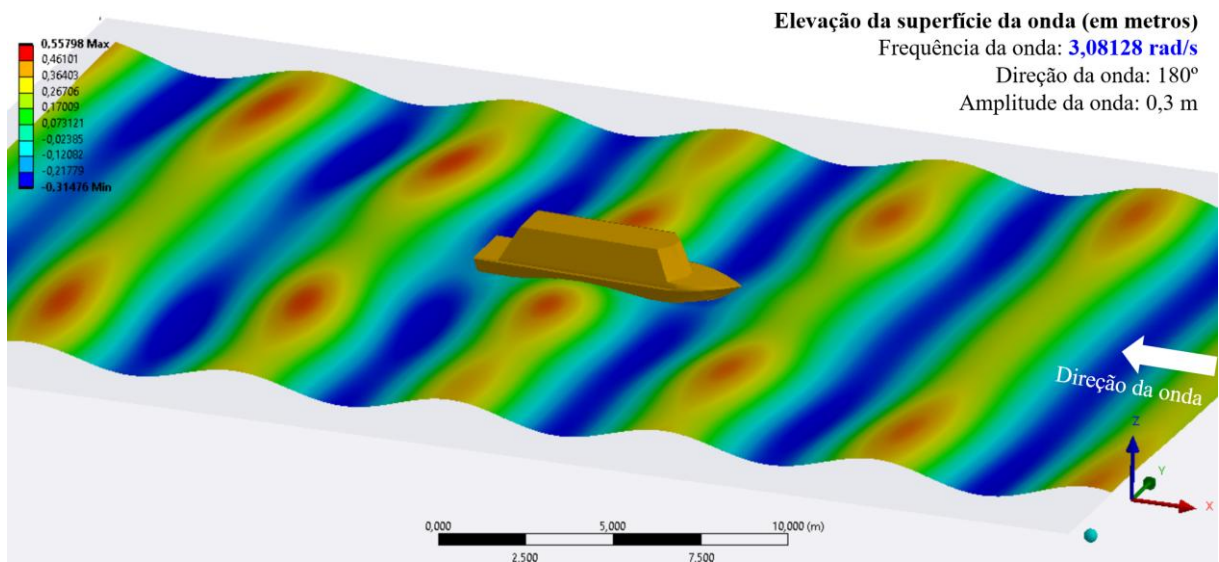
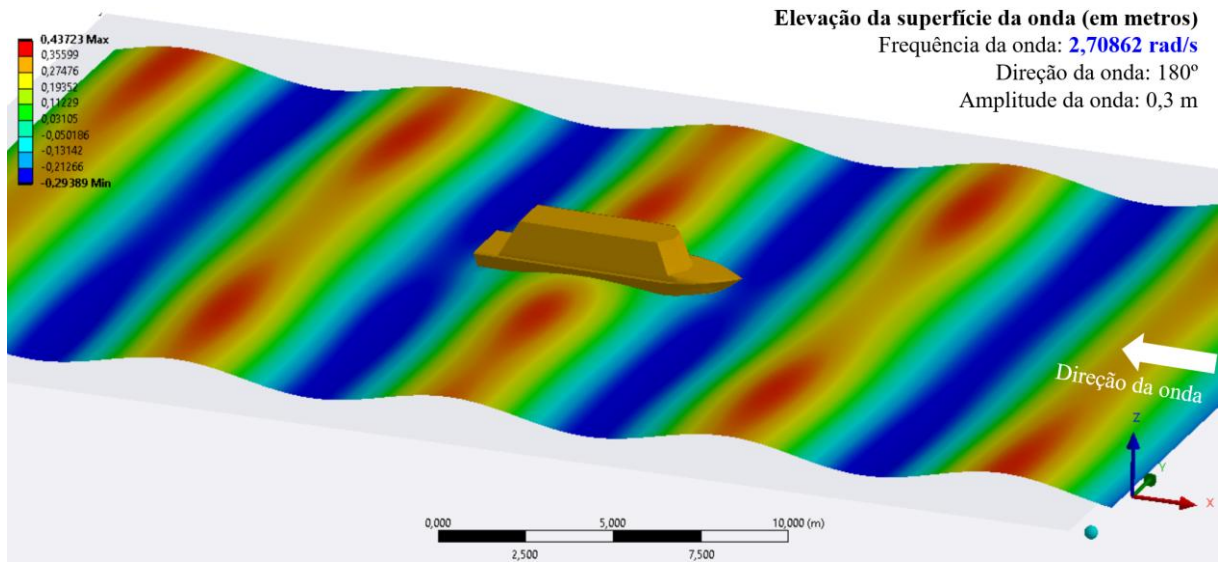
Figura 18. Comparação da interação da embarcação com ondas regulares de diferentes frequências incidindo pela proa (ângulo de incidência de 180°). A amplitude das ondas foi mantida constante em 0,3m para fins ilustrativos.



Documento assinado por: EDUARDO RAFAEL BARREDA DEL CAMPO:253***** em 11/12/2025 às 17:52 utilizando assinatura por login/senha.
 Documento assinado por: CLAUDIA TEIXEIRA DE SOUZA:897***** em 11/12/2025 às 17:50 utilizando assinatura por login/senha.







Fonte: Ansys 2025 R1.



6 RESULTADOS DA ANÁLISE EM CONDIÇÕES DE ONDAS IRREGULARES

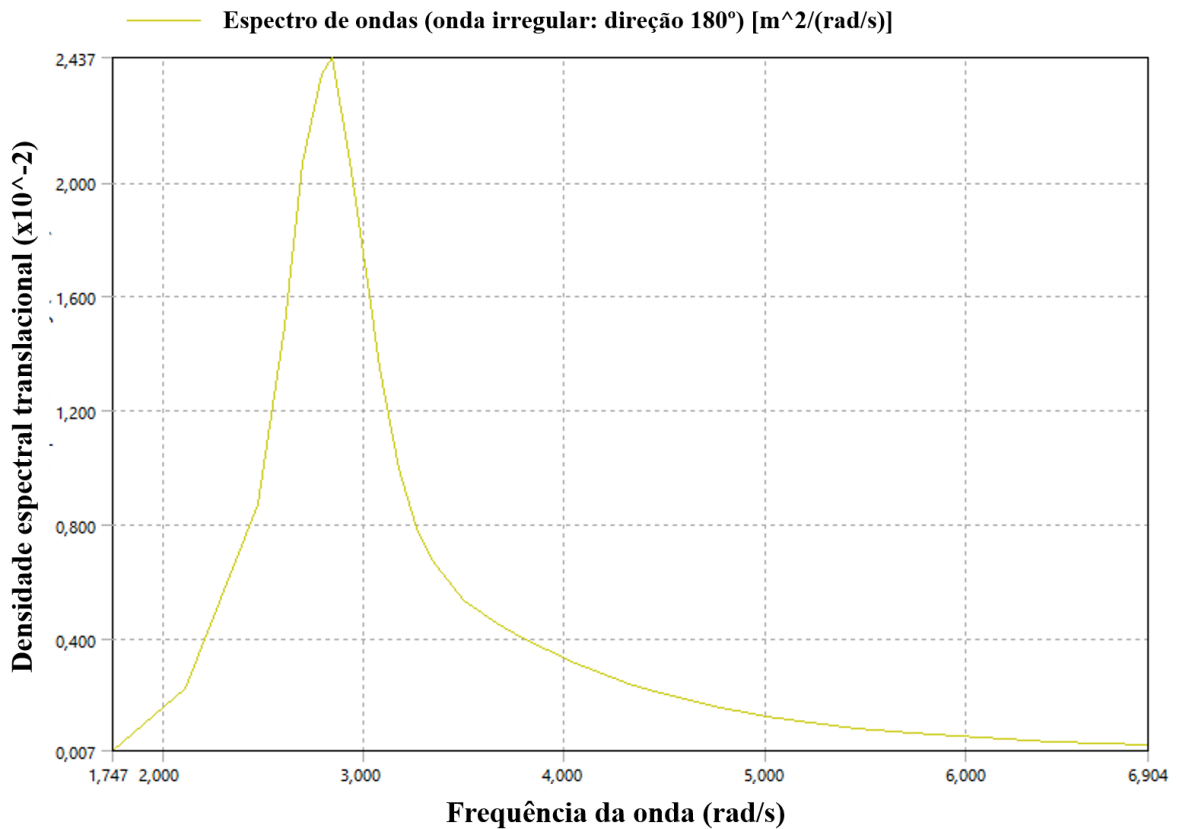
Os resultados da análise em ondas irregulares foram obtidos no módulo *Hydrodynamic Response* do Ansys Aqwa. Nesse módulo é possível obter resultados no domínio da frequência ou no domínio do tempo. A seguir, são apresentados ambos os tipos de resultados.

6.1 Resultados da resposta em ondas irregulares no domínio da frequência

6.1.1 Espectro ondas considerado na análise

A Figura 19 mostra o espectro de ondas que representa a energia das ondas considerada nas análises em ondas irregulares. Esse espectro foi obtido a partir da escolha do espectro JONSWAP, assumindo parâmetros H_s e T_p . Nota-se no eixo vertical a densidade espectral, enquanto o eixo horizontal representa as frequências das componentes de onda.

Figura 19. Espectro de ondas considerado na análise de movimentos em ondas irregulares.



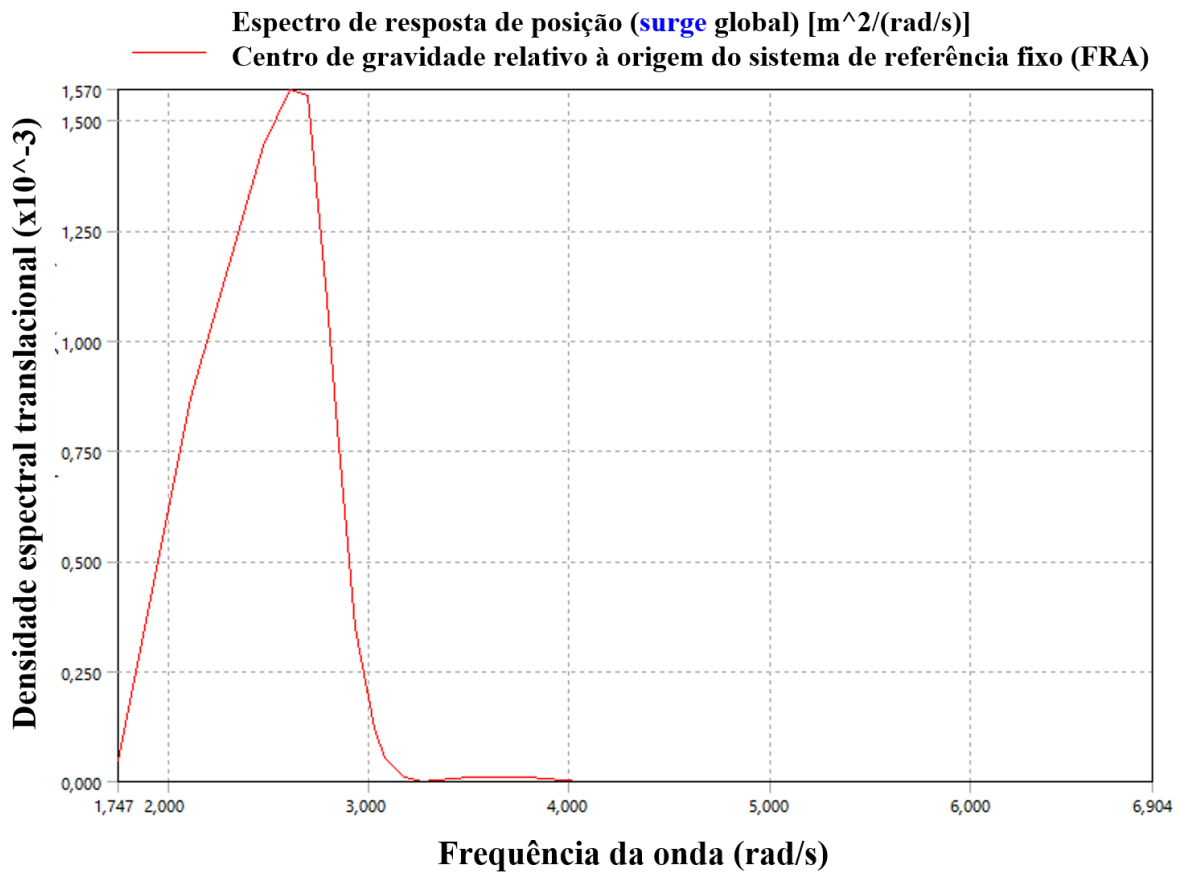
Fonte: Ansys 2025 R1.



6.1.2 Espectros de resposta de deslocamento

As Figuras 20, 21, 22, 23, 24, e 25 e mostram os espectros de resposta de deslocamento dos graus de liberdade de surge, sway, heave, roll, pitch e yaw, respectivamente. Deve-se notar que esses dados representam a resposta em ondas irregulares no domínio da frequência, e que métodos estatísticos são necessários para determinar valores significativos, como resposta e períodos significativos, por meio do uso dos momentos dos gráficos, como descrito pelas equações (50) – (58).

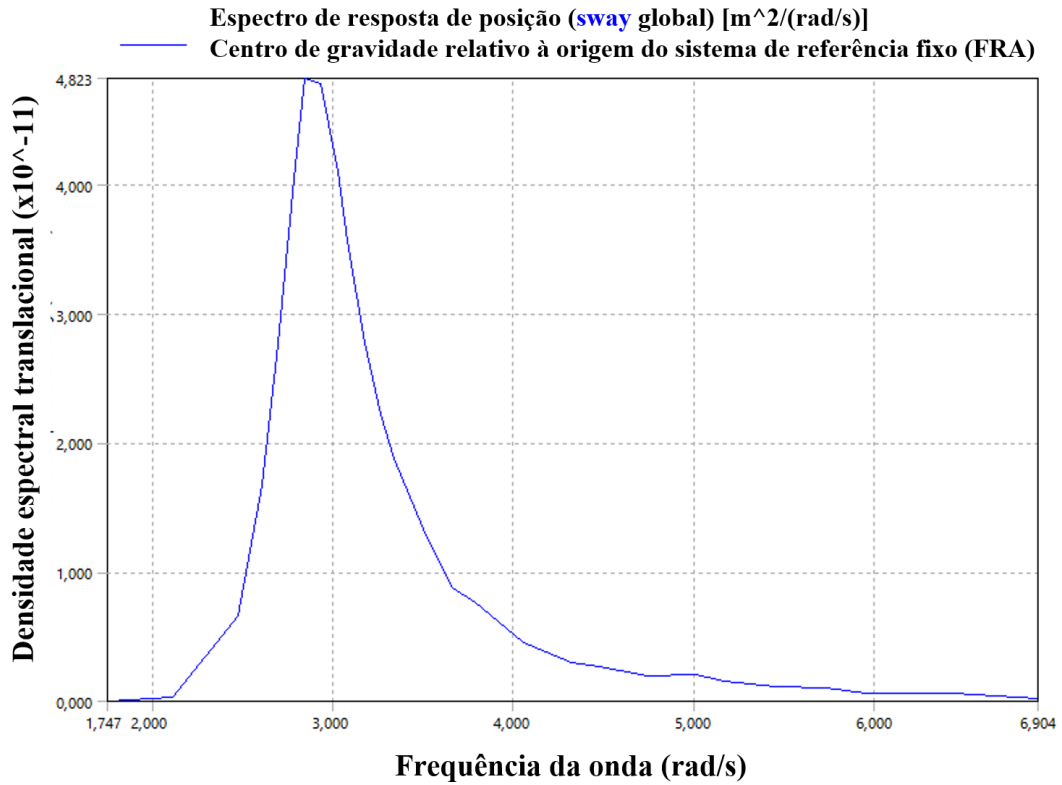
Figura 20. Espectro de resposta do deslocamento de surge.



Fonte: Ansys 2025 R1.

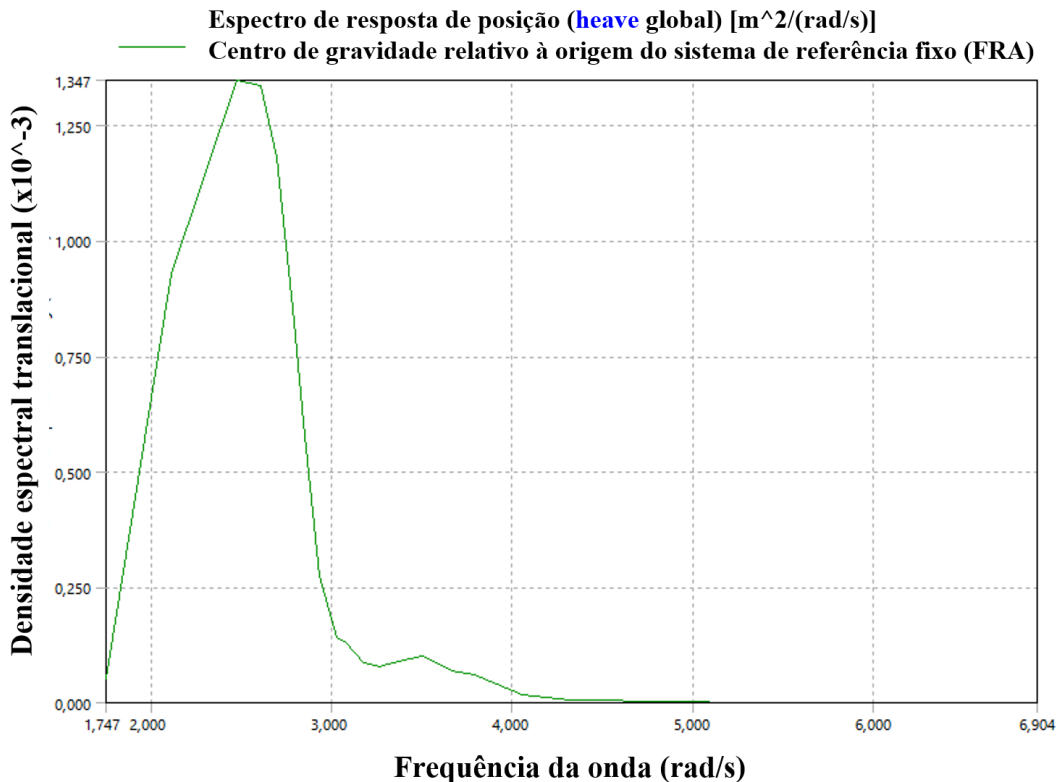


Figura 21. Espectro de resposta do deslocamento de Sway.



Fonte: Ansys 2025 R1.

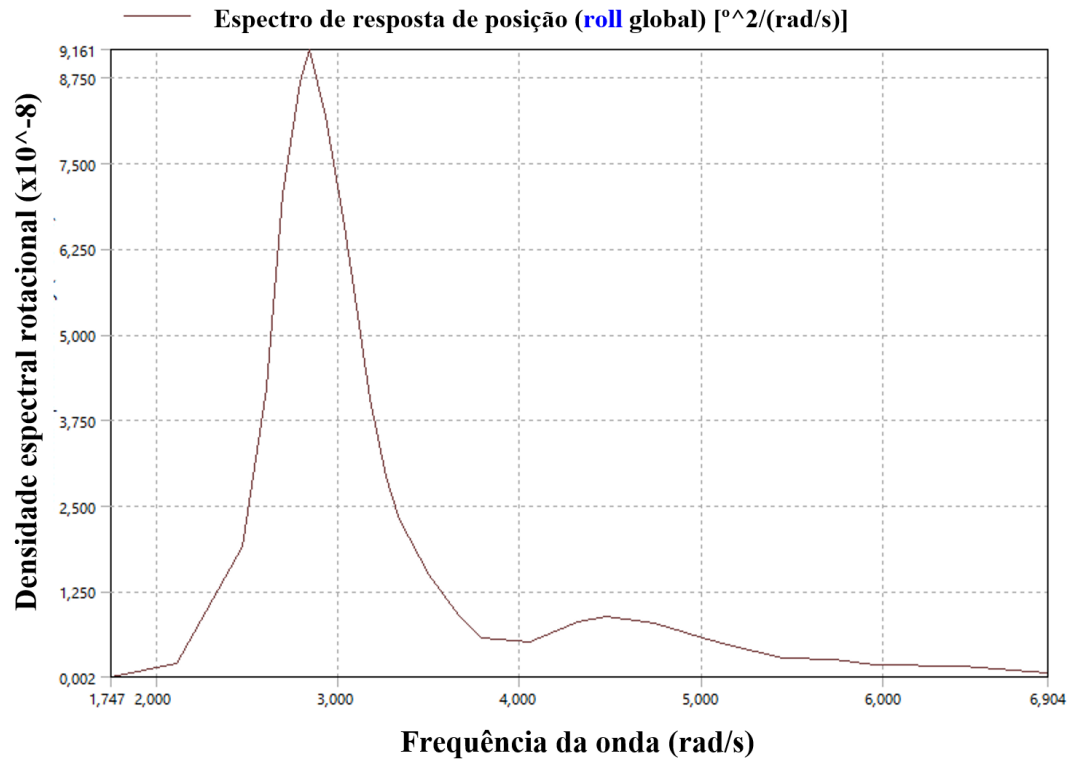
Figura 22. Espectro de resposta do deslocamento de heave.



Fonte: Ansys 2025 R1.

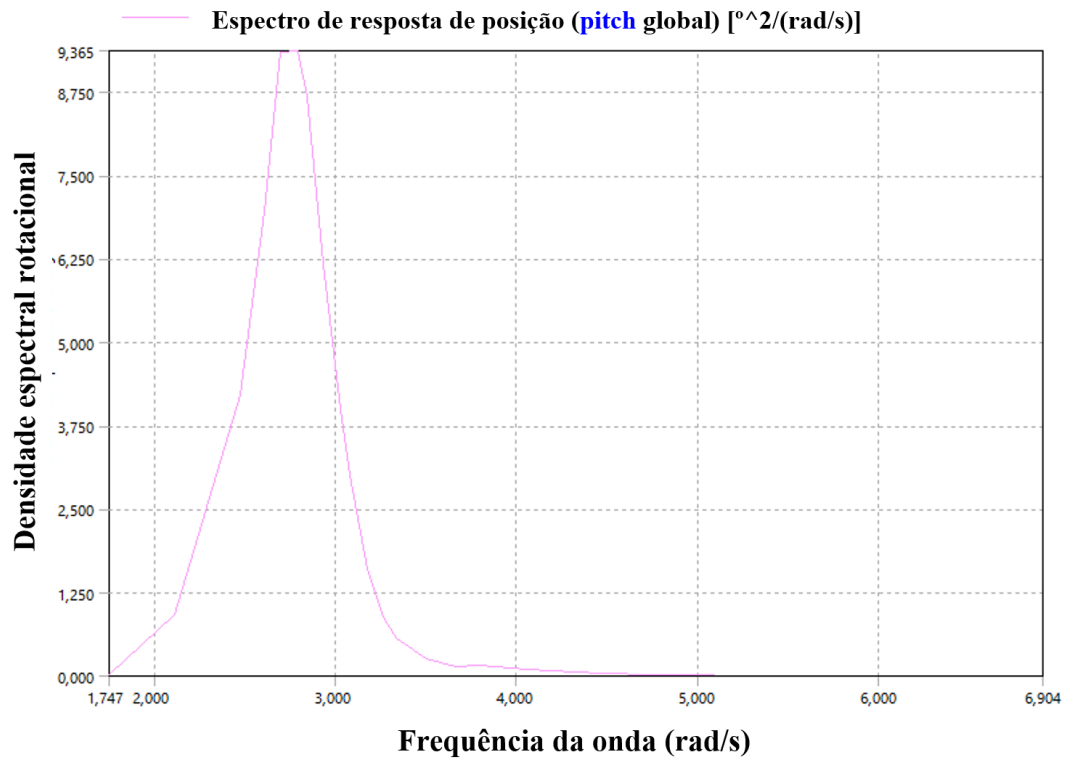


Figura 23. Espectro de resposta do deslocamento de roll.



Fonte: Ansys 2025 R1.

Figura 24. Espectro de resposta do deslocamento de pitch.

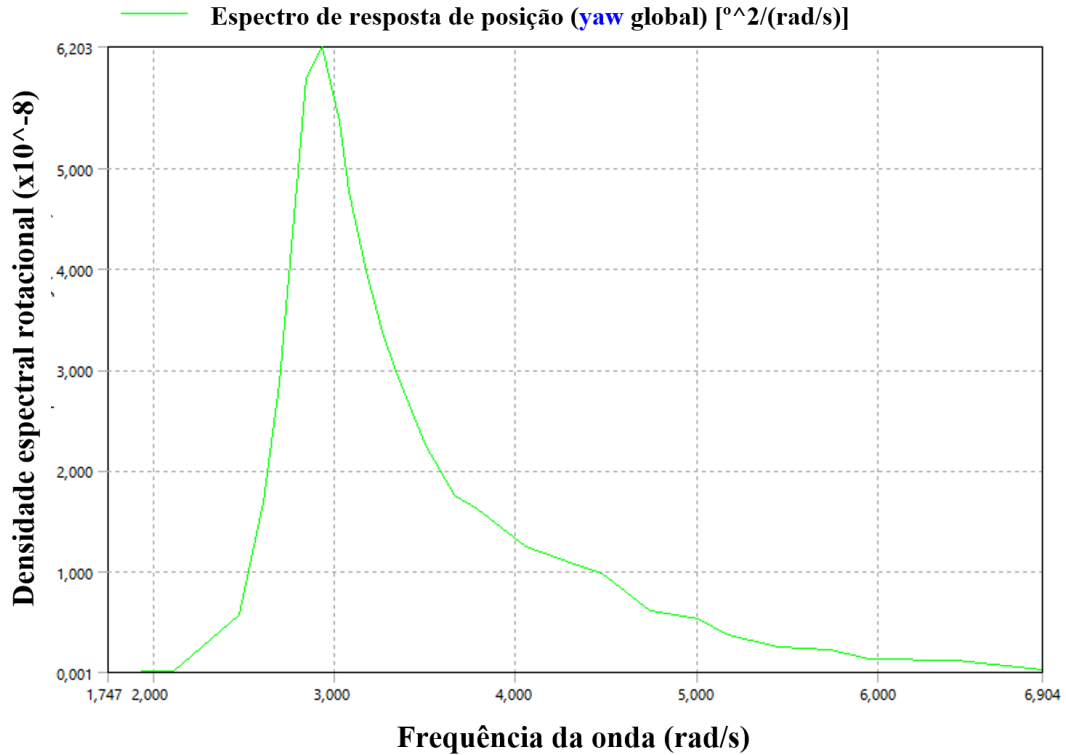


Fonte: Ansys 2025 R1.

Figura 25. Espectro de resposta do deslocamento de yaw.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
<https://edoc.amazonas.am.gov.br/86BE.226D.CC5A.C065/15AEB3A4>
 Código verificador: **86BE.226D.CC5A.C065** CRC: **15AEB3A4**



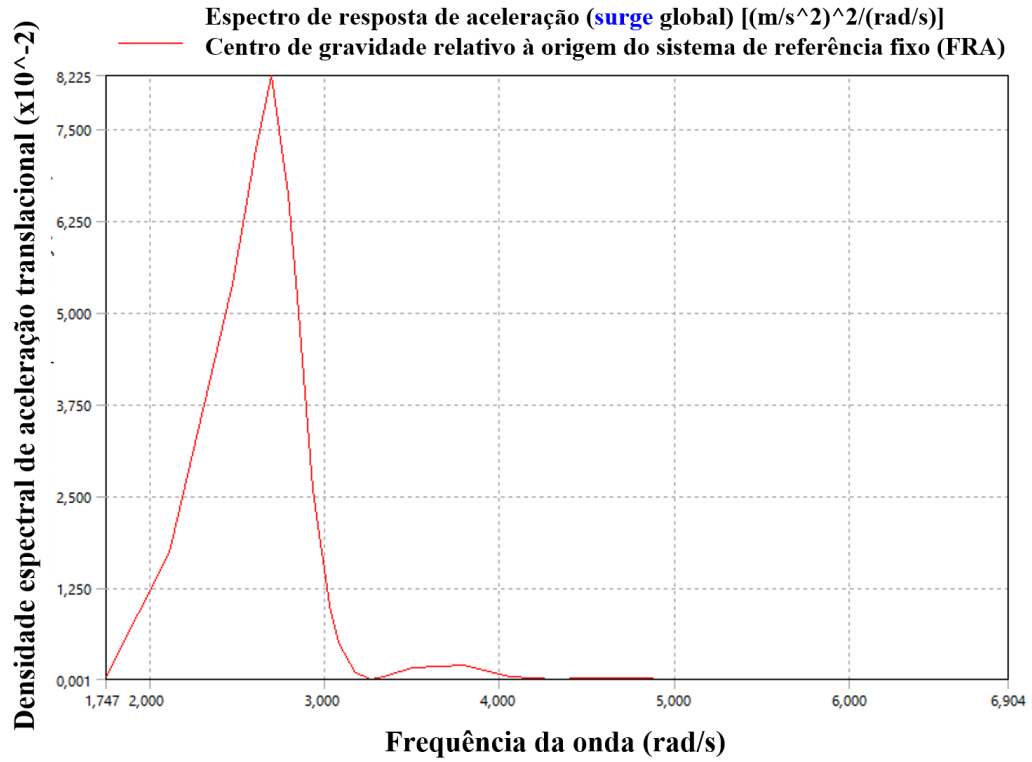
Fonte: Ansys 2025 R1.

6.1.2 Espectros de resposta de aceleração

Além dos deslocamentos obtidos como resposta da embarcação em ondas regulares, o módulo *Hydrodynamic Response* também permite obter os espectros de resposta de velocidade e de aceleração. Estes últimos são apresentados nas Figuras 26, 27, 28, 29, 30, e 31, para os movimentos de surge, sway, heave, roll, pitch e yaw, respectivamente. Esses gráficos são de interesse para prever as acelerações (translacionais e rotacionais) mais significativas nas condições de ondas consideradas. Este tipo de dados é de utilidade para avaliar limites de aceleração de embarcações que, possivelmente, tenham de atingir critérios de segurança para manter a saúde e bem-estar de passageiros e tripulação (Acanfora et al., 2017; Boccadamo; Rosano, 2019).

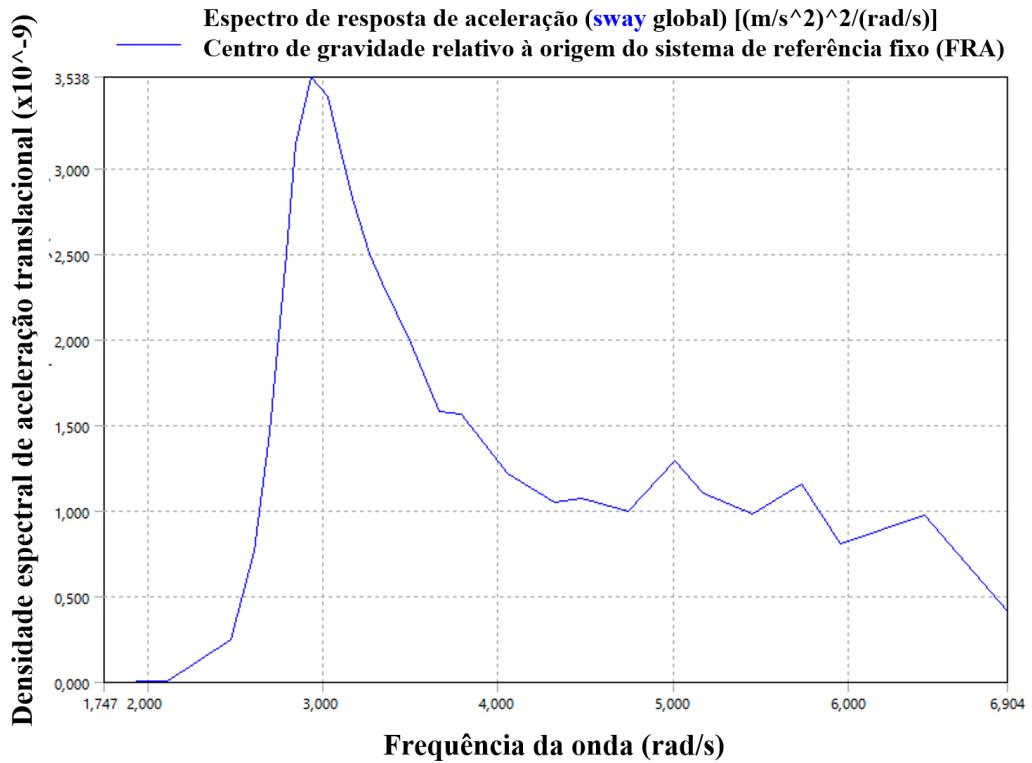


Figura 26. Espectro de resposta da aceleração de surge.



Fonte: Ansys 2025 R1.

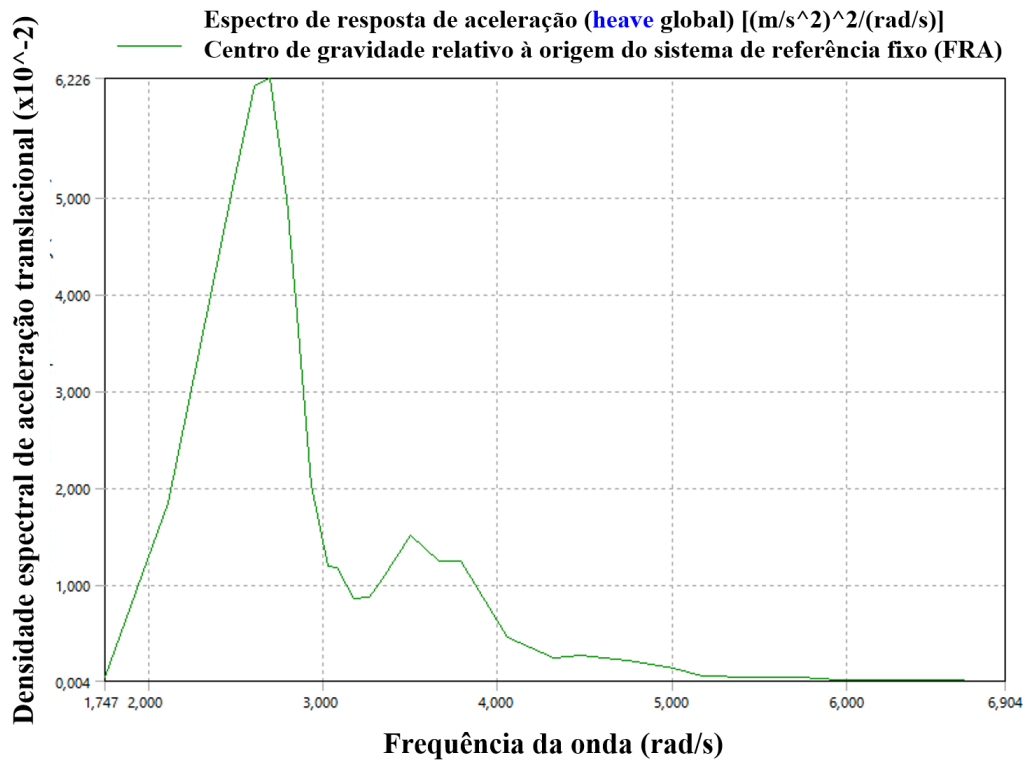
Figura 27. Espectro de resposta da aceleração de sway.



Fonte: Ansys 2025 R1.

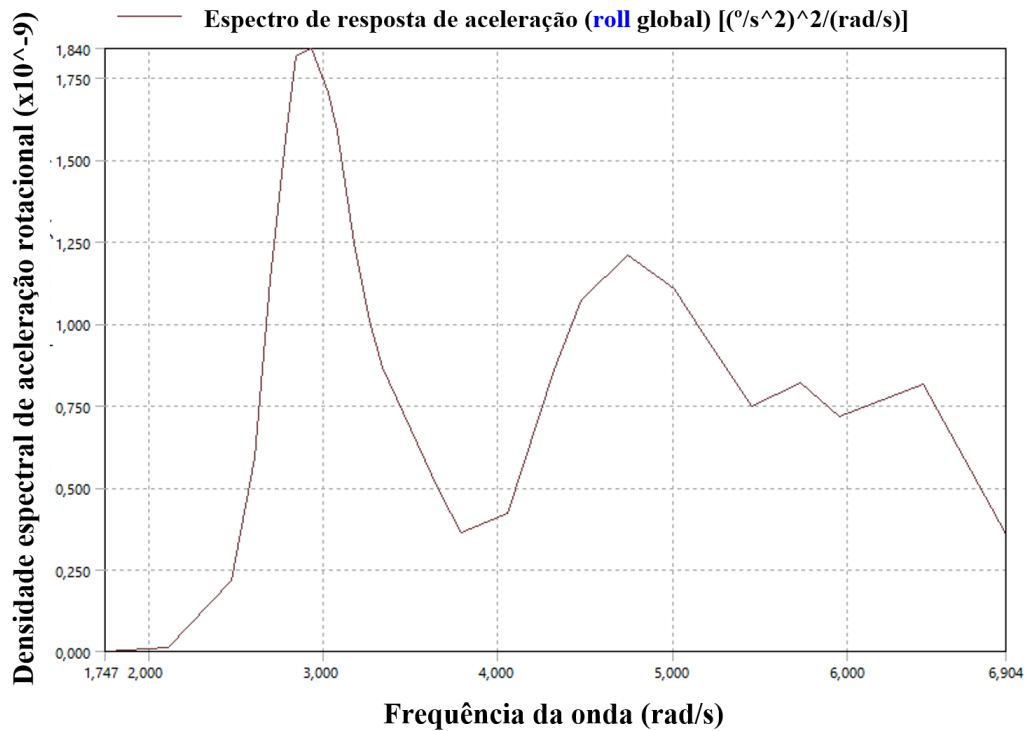


Figura 28. Espectro de resposta da aceleração de heave.



Fonte: Ansys 2025 R1.

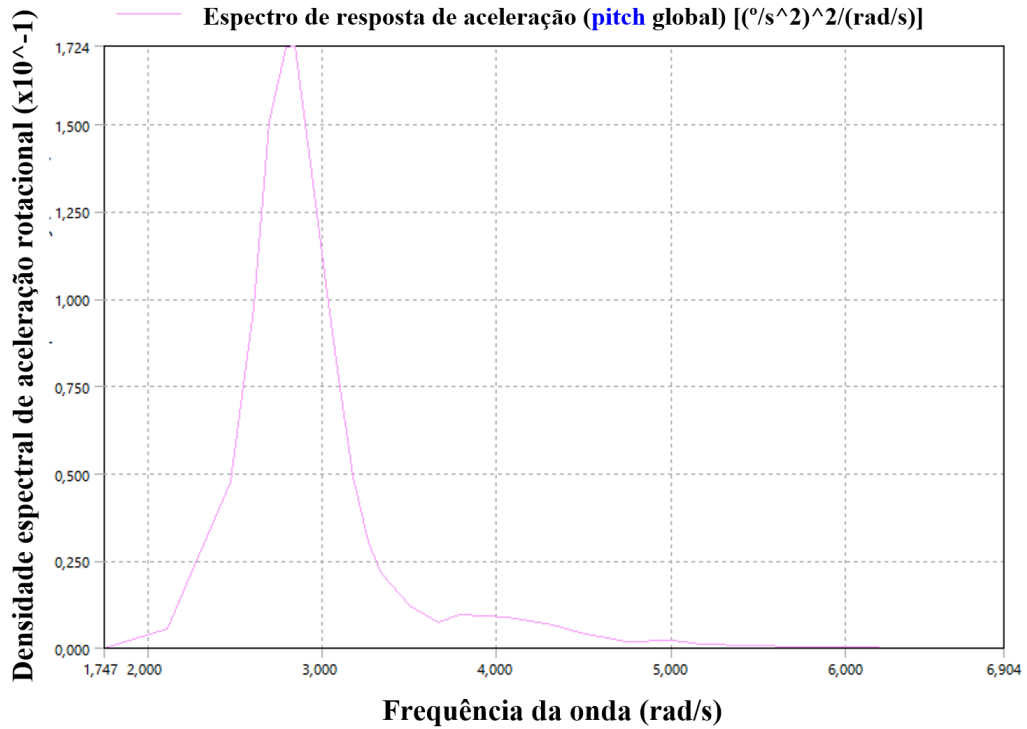
Figura 29. Espectro de resposta da aceleração de roll.



Fonte: Ansys 2025 R1.

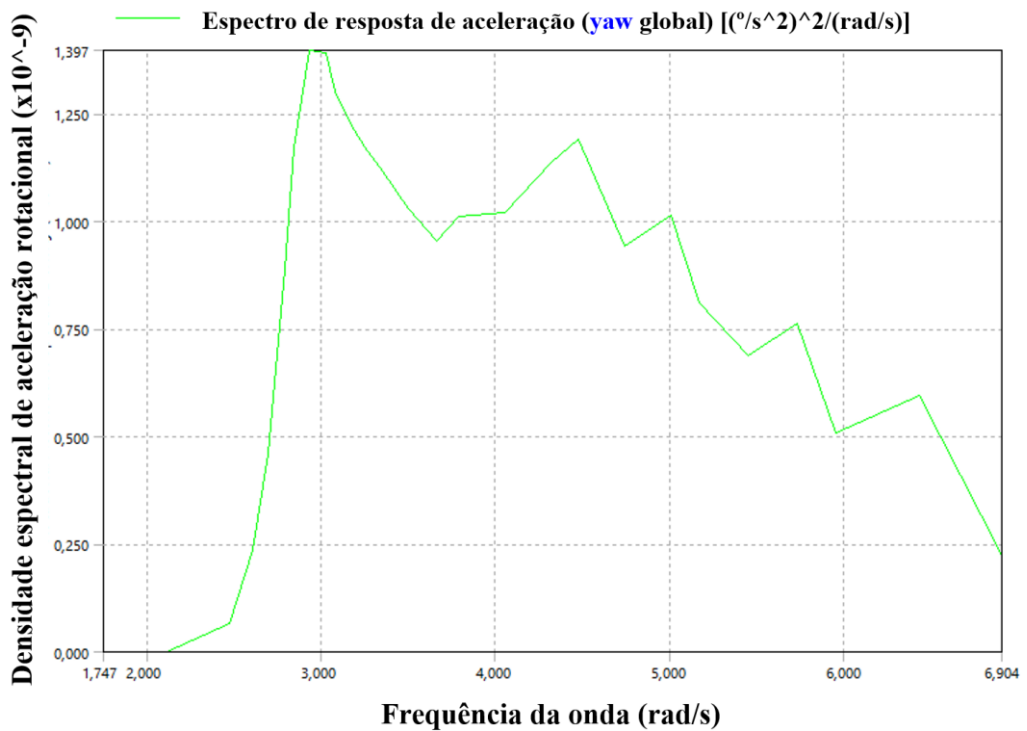


Figura 30. Espectro de resposta da aceleração de pitch.



Fonte: Ansys 2025 R1.

Figura 31. Espectro de resposta da aceleração de yaw.



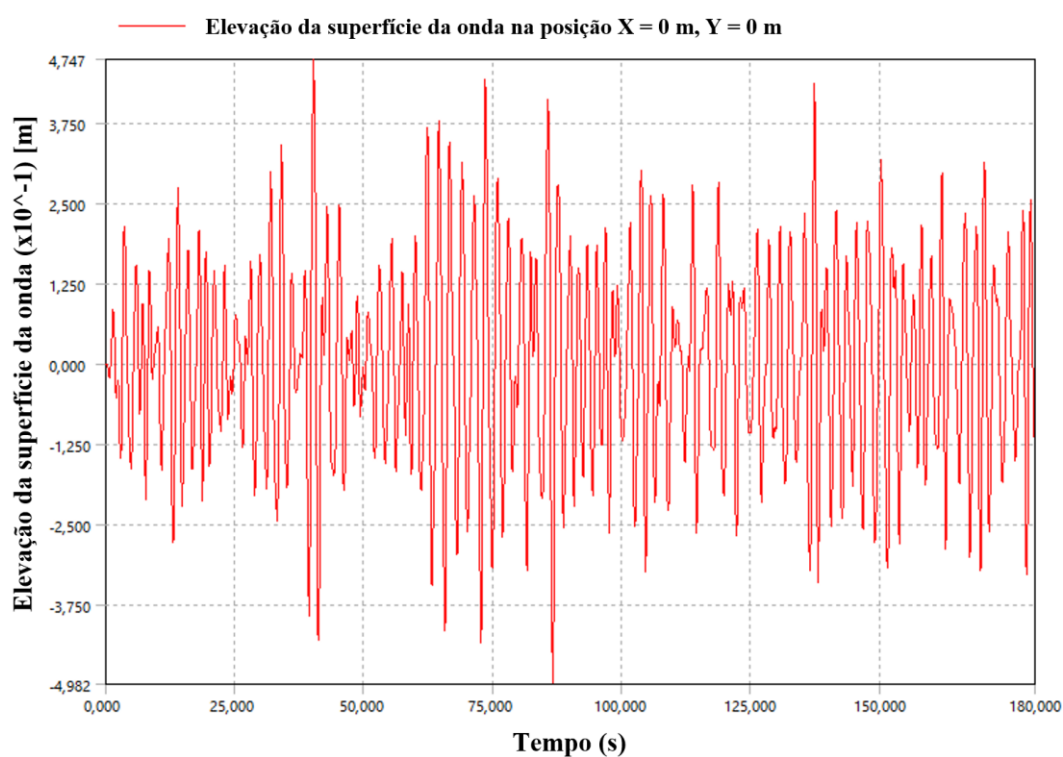
Fonte: Ansys 2025 R1.



6.2 Resultados da resposta em ondas irregulares no domínio do tempo

De maneira complementar, o módulo *Hydrodynamic Response* também permite realizar análises no domínio do tempo da resposta da embarcação em ondas regulares. Nesta situação, é criada uma série temporal de ondas irregulares (Figura 32), a partir do espectro de ondas JONSWAP mostrado na Figura 19. Levando em consideração que a embarcação estará exposta à interação de ondas representadas pela Figura 32, o software permite calcular a resposta temporal do movimento da embarcação, incluindo deslocamentos, velocidades e acelerações.

Figura 32. Série temporal da elevação das ondas irregulares considerada nas análises.



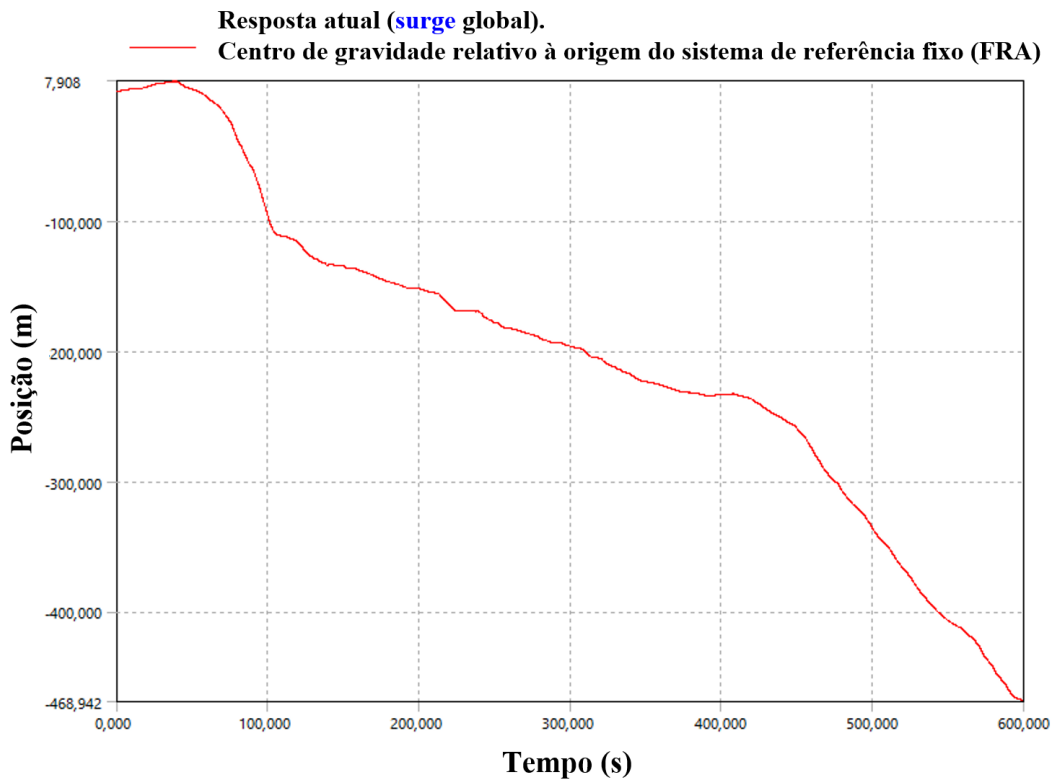
Fonte: Ansys 2025 R1.

6.2.1 Deslocamentos no domínio do tempo.

Os deslocamentos da embarcação no domínio do tempo, para os movimentos de surge, sway, heave, roll, pitch e yaw são mostrados nas Figuras 33, 34, 35, 36, 37 e 38, respectivamente, para 600 segundos de simulação. Para o caso de surge (Figura 33) e sway (Figura 34) pode ser visto que não existem movimentos restauradores, como vistos nos casos de heave (Figure 35), pitch (Figura 36) e roll (Figura 37), parecendo mais movimentos na forma de deriva, tendo em vista que a embarcação está na condição de flutuação livre.

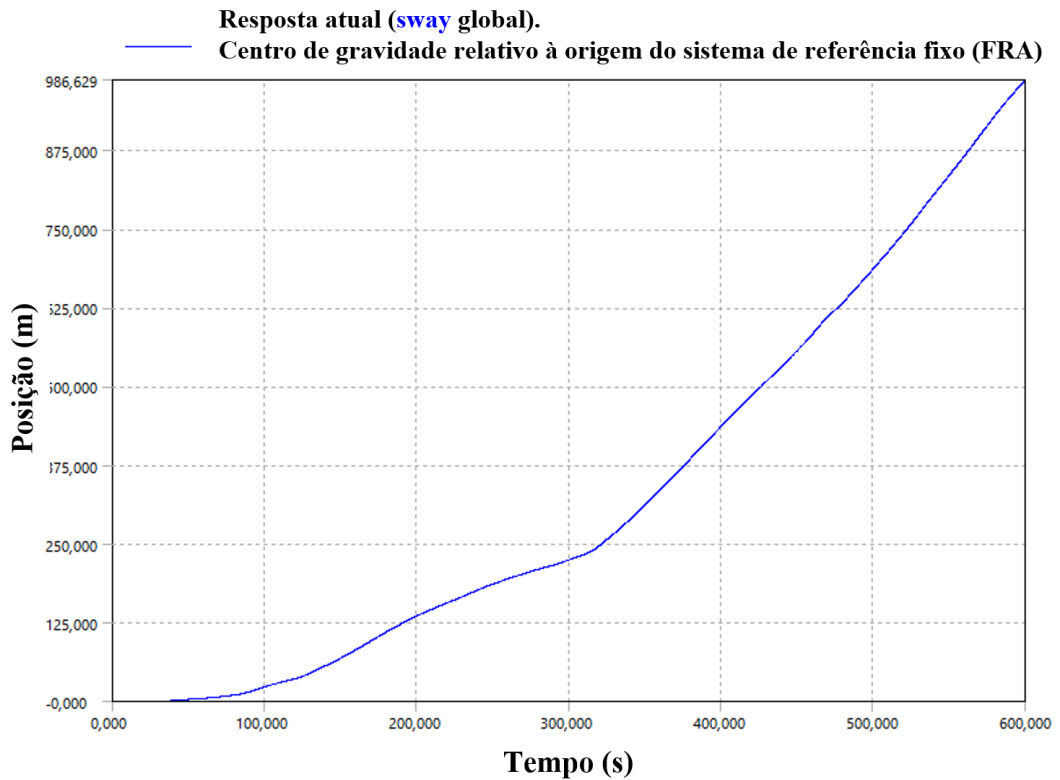


Figura 33. Deslocamento do movimento de surge no domínio do tempo.



Fonte: Ansys 2025 R1.

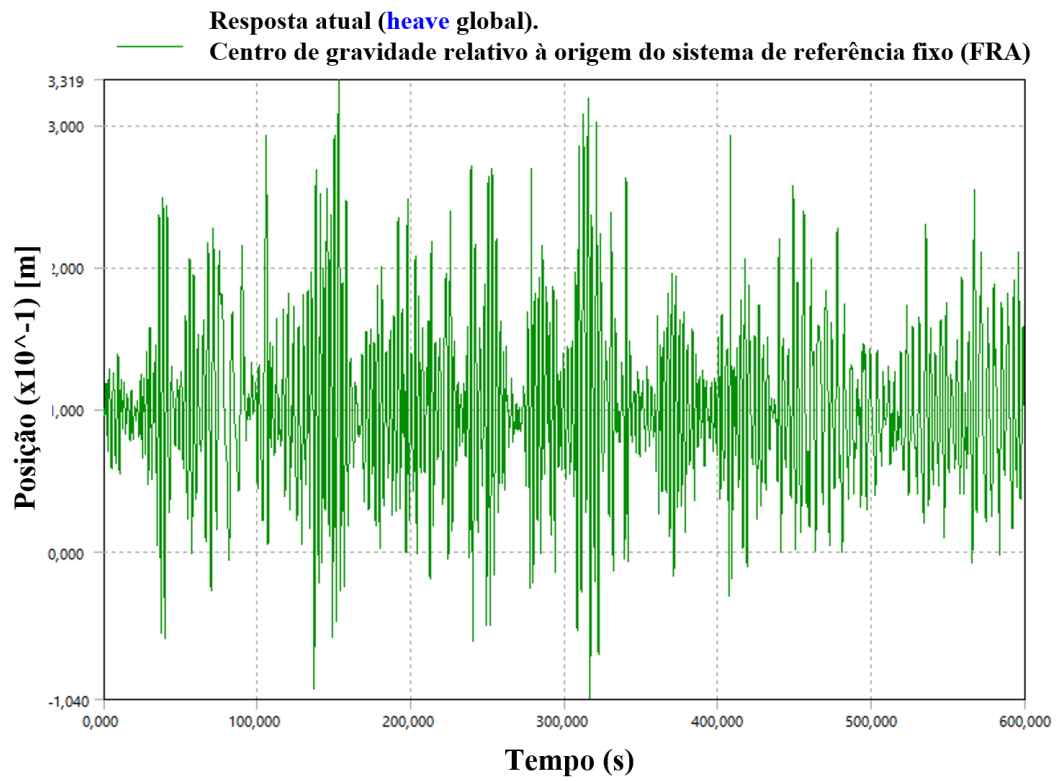
Figura 34. Deslocamento do movimento de sway no domínio do tempo.



Fonte: Ansys 2025 R1.

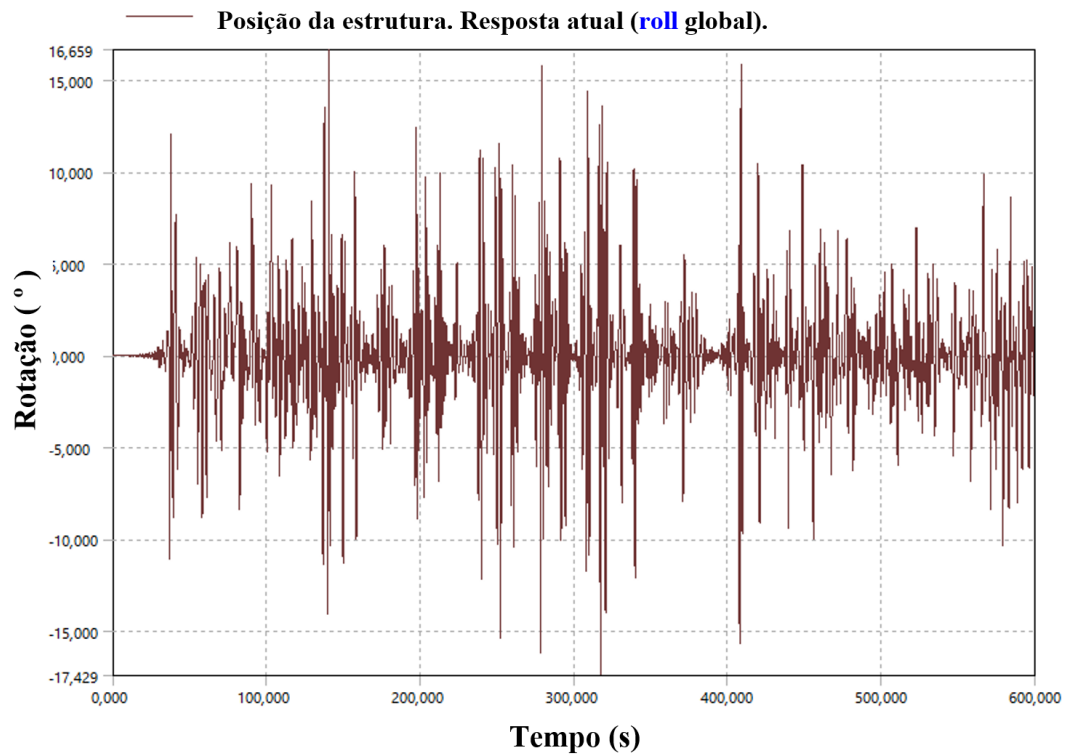


Figura 35. Deslocamento do movimento de heave no domínio do tempo.



Fonte: Ansys 2025 R1.

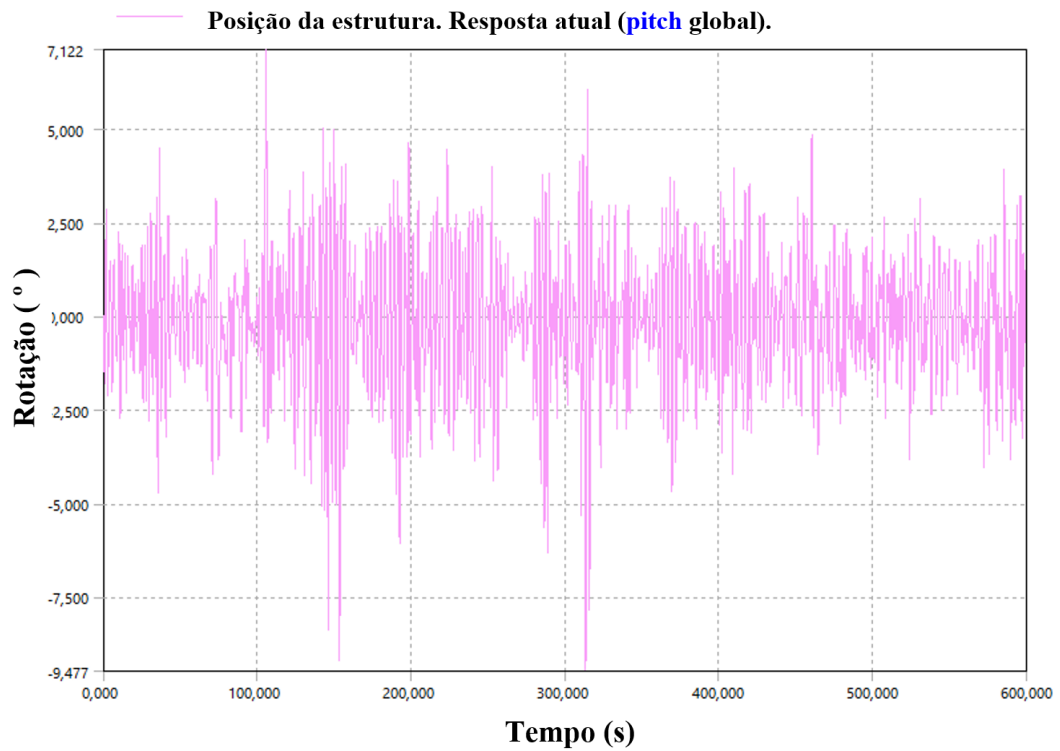
Figura 36. Deslocamento do movimento de roll no domínio do tempo.



Fonte: Ansys 2025 R1.

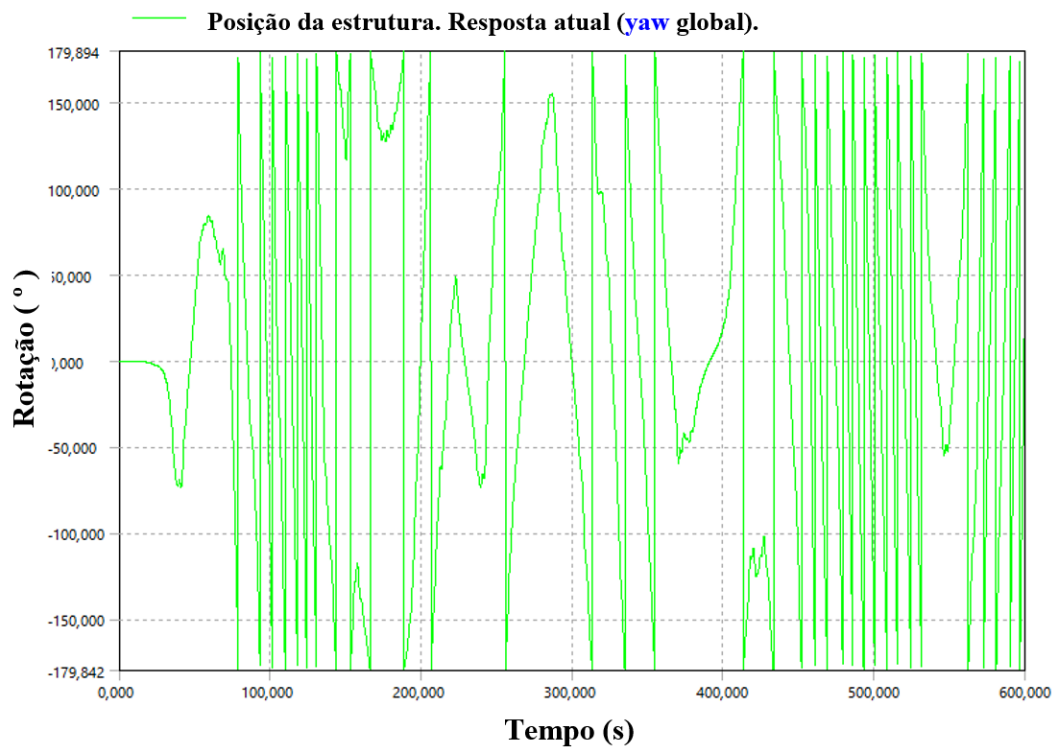


Figura 37. Deslocamento do movimento de pitch no domínio do tempo.



Fonte: Ansys 2025 R1.

Figura 38. Deslocamento do movimento de yaw no domínio do tempo.



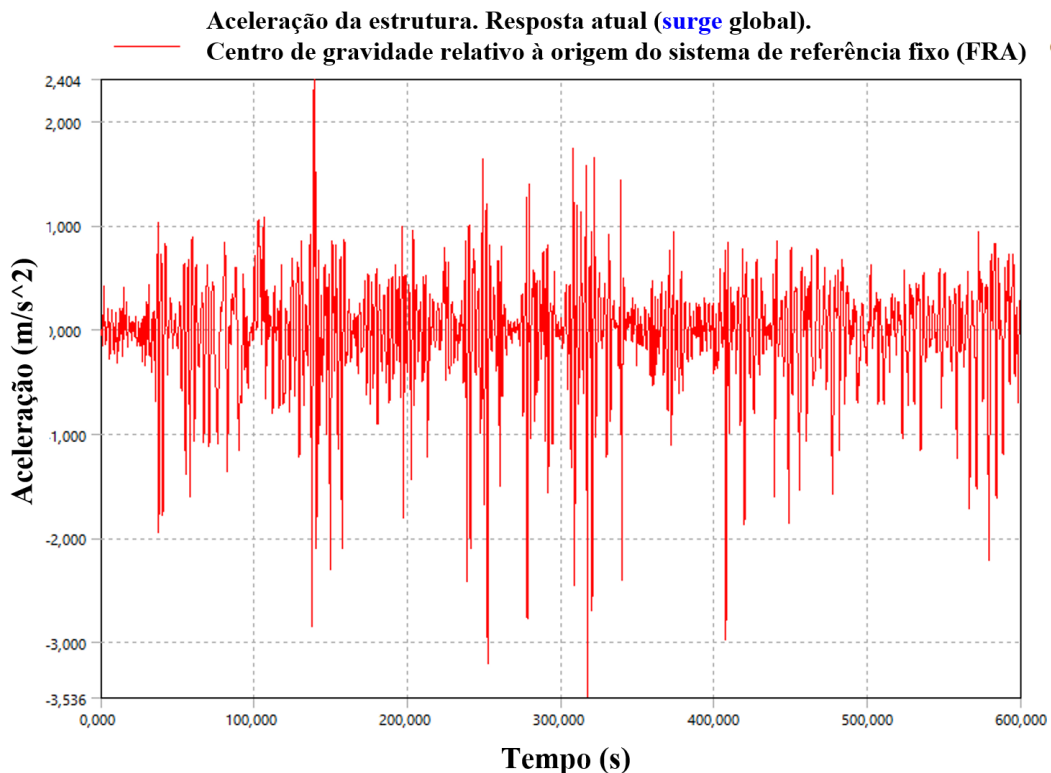
Fonte: Ansys 2025 R1.



6.2.2 Acelerações no domínio do tempo

De maneira complementar à análise dos deslocamentos, o módulo *Hydrodynamic Response* também permite calcular as velocidades e acelerações no domínio do tempo. As Figuras 39, 40, 41, 42, 43 e 44 mostram as acelerações no domínio do tempo da embarcação, para os graus de liberdade de surge, sway, heave, roll, pitch e yaw, respectivamente. Esse tipo de resultados é interessante desde o ponto de análise de acelerações, permitindo identificar, de maneira direta as máximas acelerações. Por exemplo, acelerações críticas nos graus de liberdade de heave e roll correspondem a aproximadamente $\pm 2,2 \text{ m/s}^2$ e $\pm 115 \text{ }^\circ/\text{s}^2$, respectivamente. Esse tipo de análises pode contribuir nos estudos que permitam avaliar critérios de aceleração segundo normativas internacionais (Boccamano; Rosano, 2019).

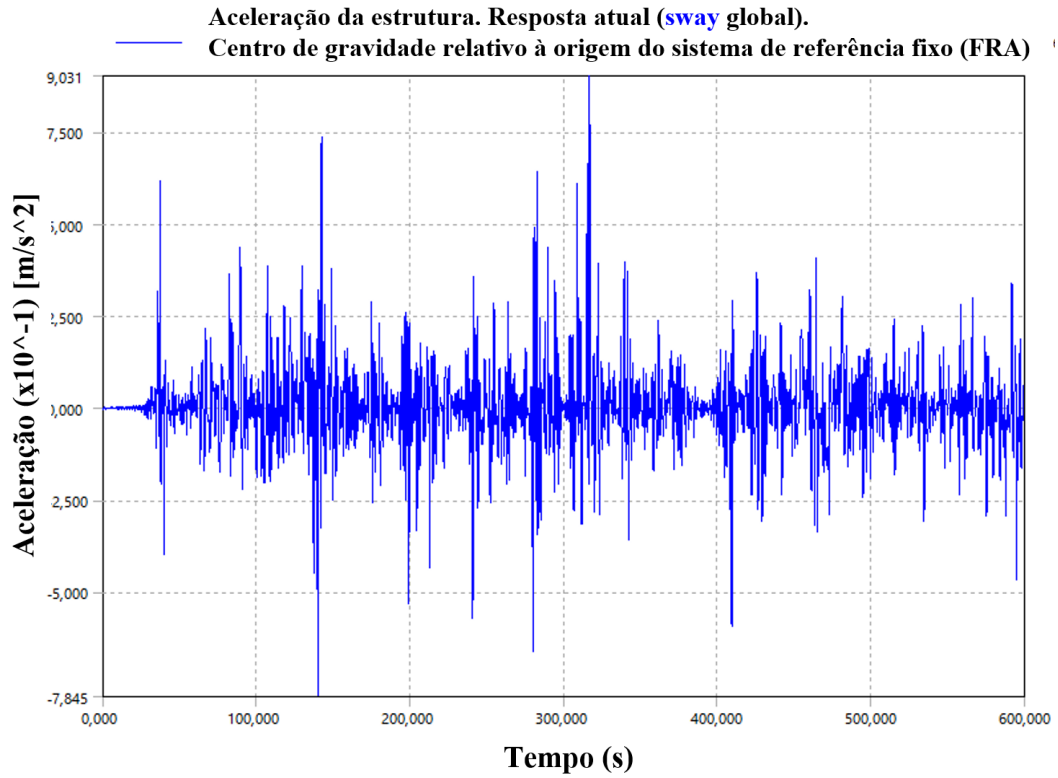
Figura 39. Aceleração do movimento de surge no domínio do tempo.



Fonte: Ansys 2025 R1.

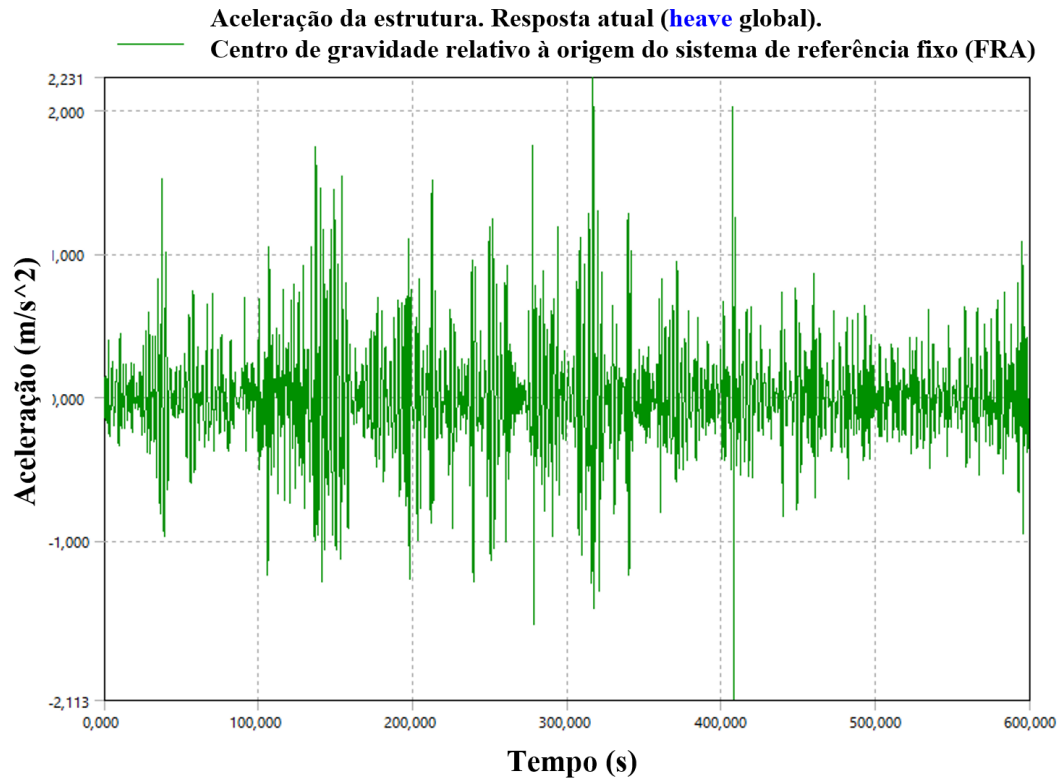


Figura 40. Aceleração do movimento de sway no domínio do tempo.



Fonte: Ansys 2025 R1.

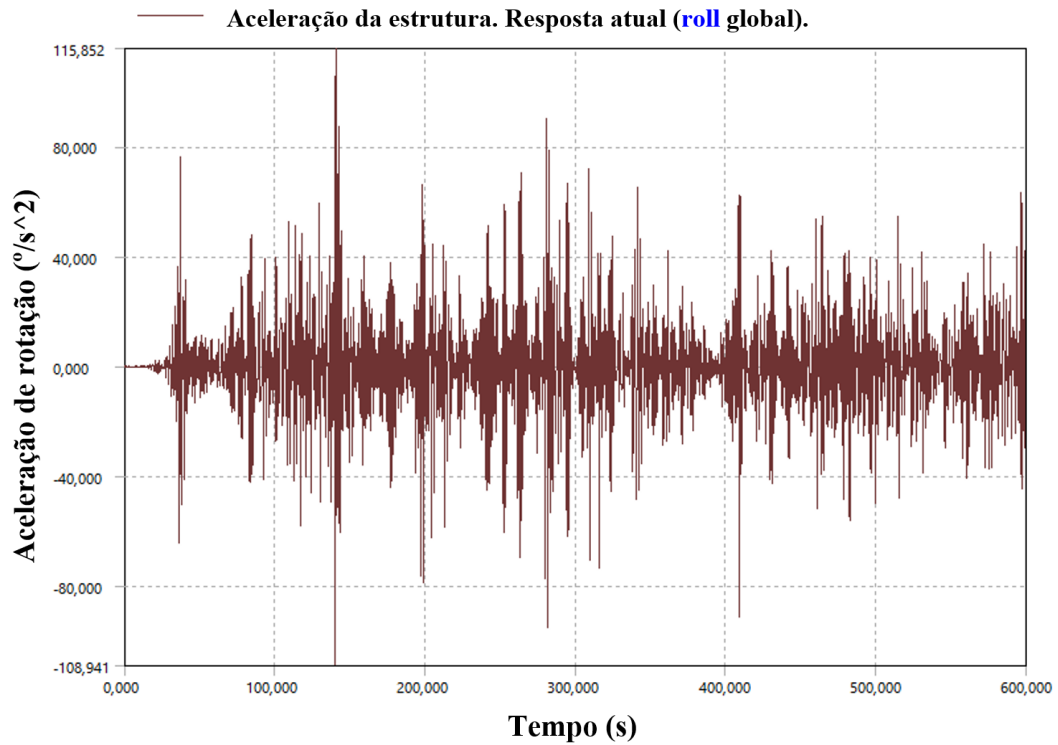
Figura 41. Aceleração do movimento de heave no domínio do tempo.



Fonte: Ansys 2025 R1.

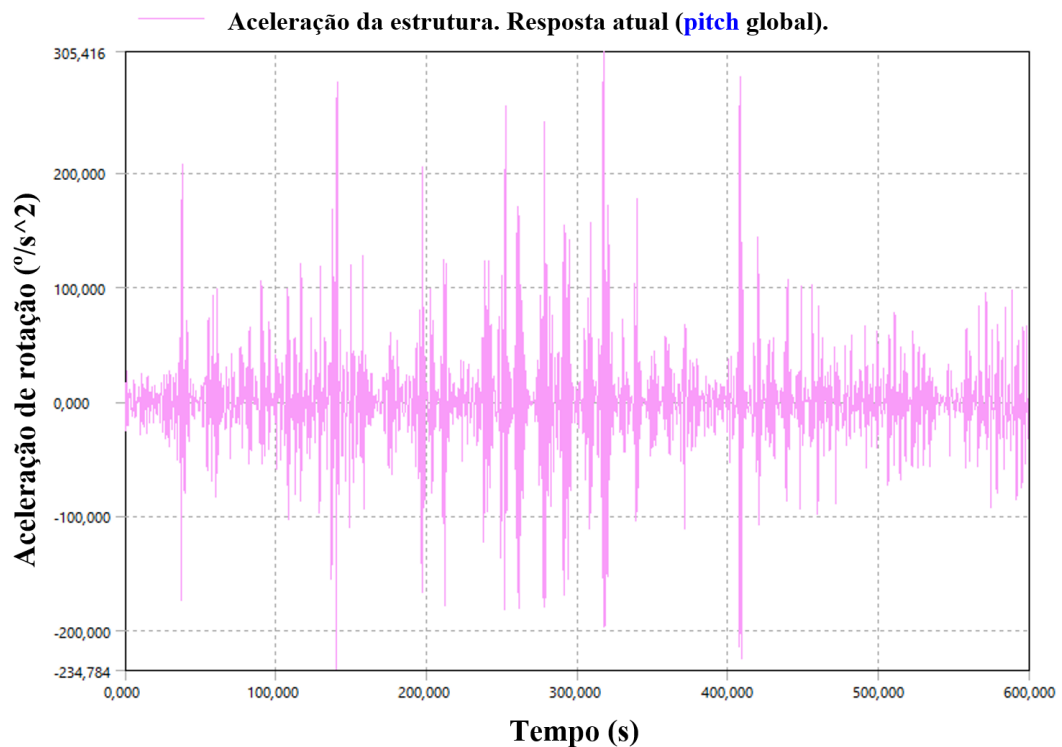


Figura 42. Aceleração do movimento de roll no domínio do tempo.



Fonte: Ansys 2025 R1.

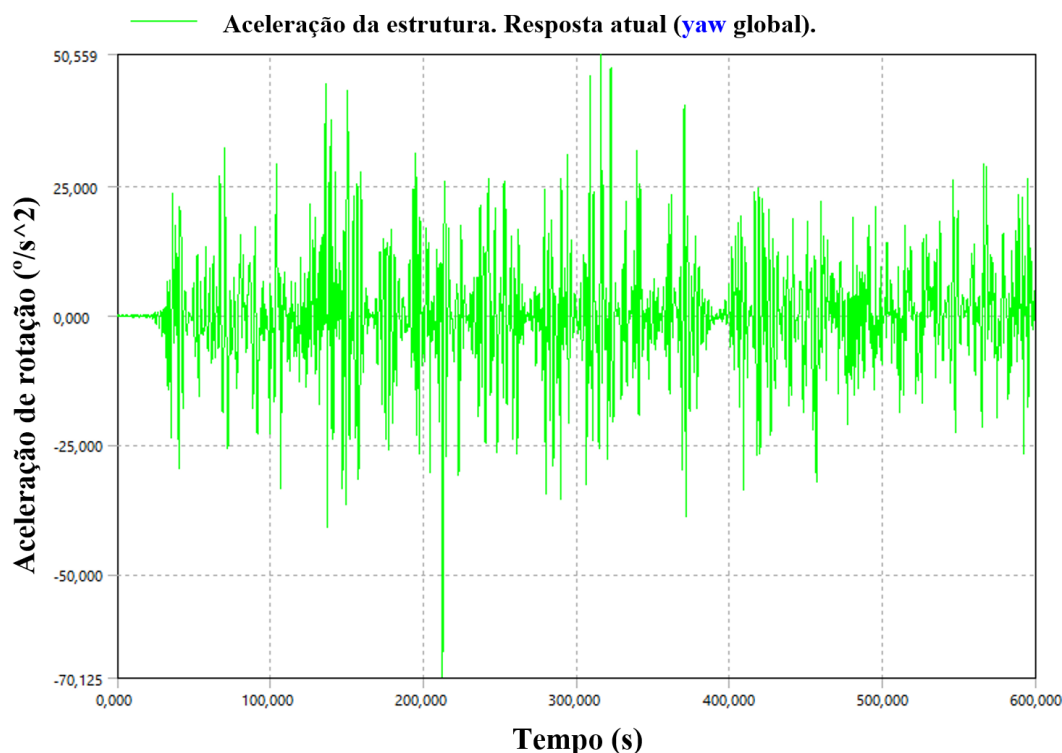
Figura 43. Aceleração do movimento de pitch no domínio do tempo.



Fonte: Ansys 2025 R1.



Figura 44. Aceleração do movimento de yaw no domínio do tempo.



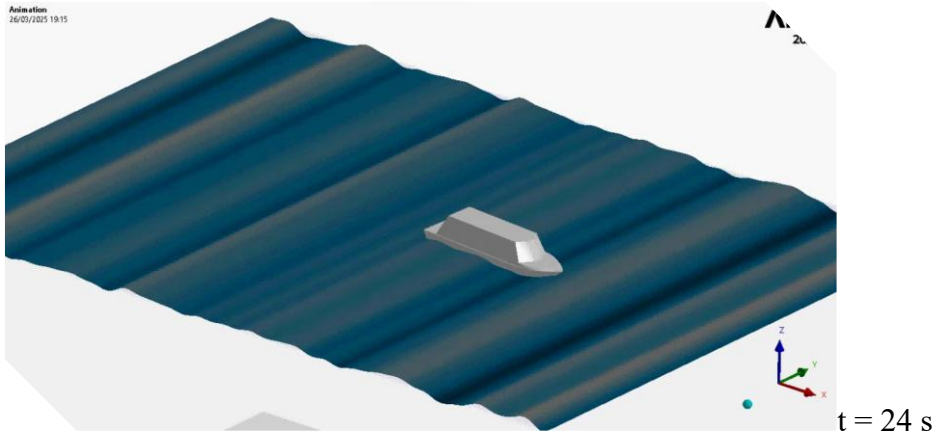
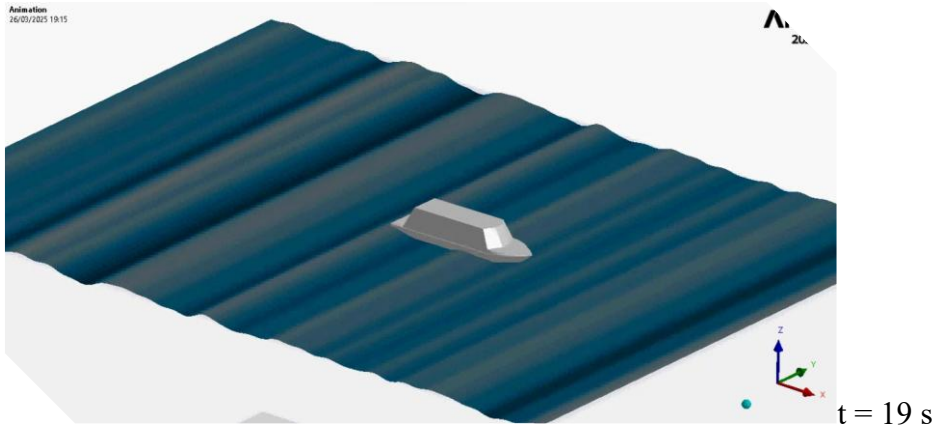
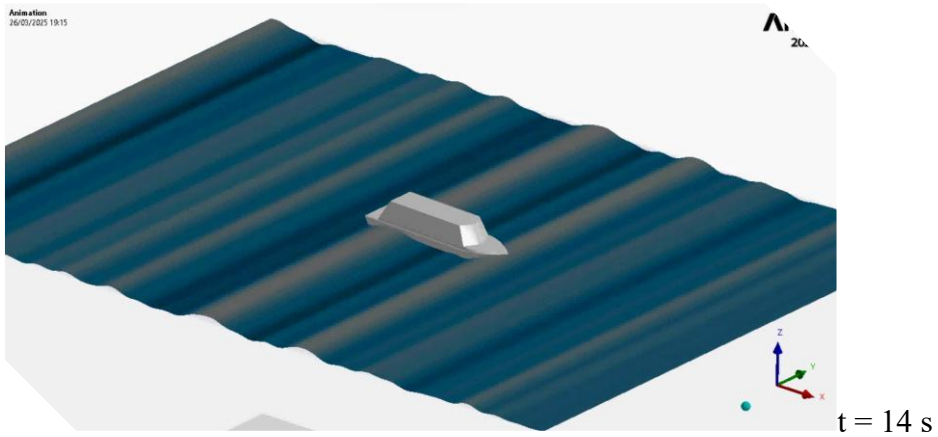
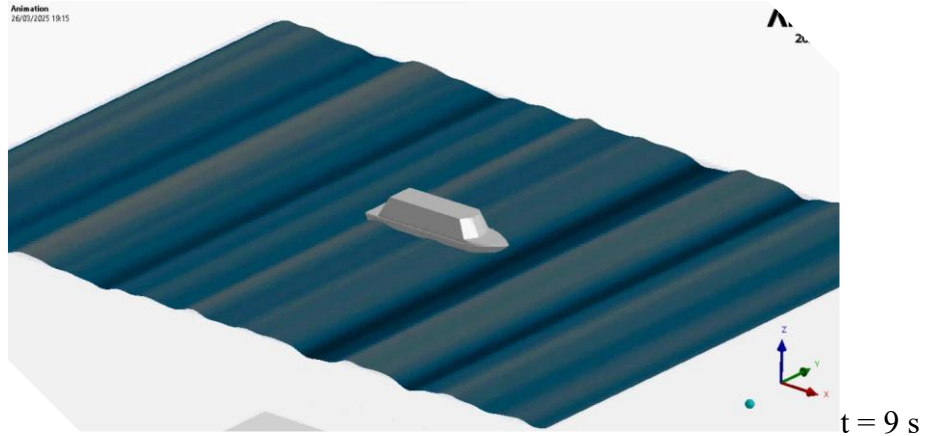
Fonte: Ansys 2025 R1.

6.2.3 Resultados da simulação no domínio do tempo

Uma das vantagens de utilizar o software Ansys Aqwa é que permite visualizar o comportamento da embarcação quando submetida a diferentes sequências de ondas, incidindo em diversos ângulos de encontro. Vale lembrar que, como visto na Figura 18, o módulo *Hydrodynamic Diffraction* permite simular ondas regulares, incluindo a visualização das componentes de ondas difratadas e refratadas. Por outro lado, o módulo *Hydrodynamic Response* permite visualizar a interação com ondas regulares e irregulares, permitindo a visualização do comportamento da embarcação nos seus seis graus de liberdade. A Figura 45 ilustra o comportamento da embarcação quando submetida à interação com a série temporal de ondas mostrada previamente na Figura 32. Pode-se verificar a posição inicial e final, ao longo de 64 segundos de simulação, o que permite explicar o comportamento observado nos gráficos das Figuras 33 – 38.

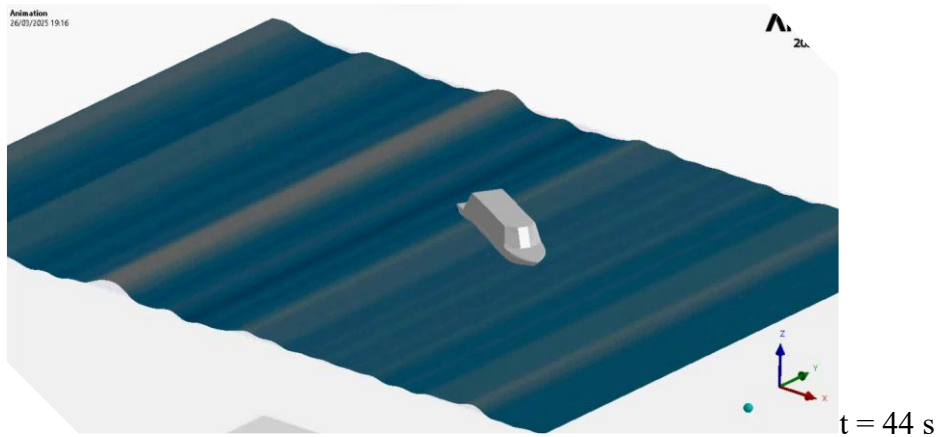
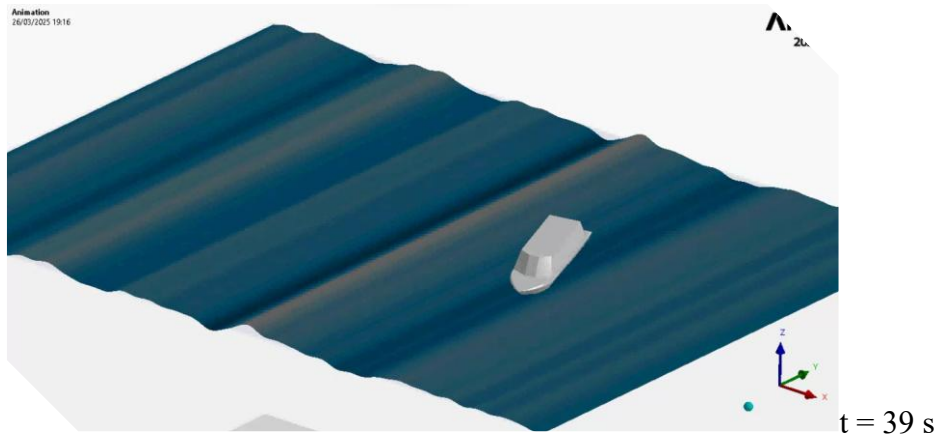
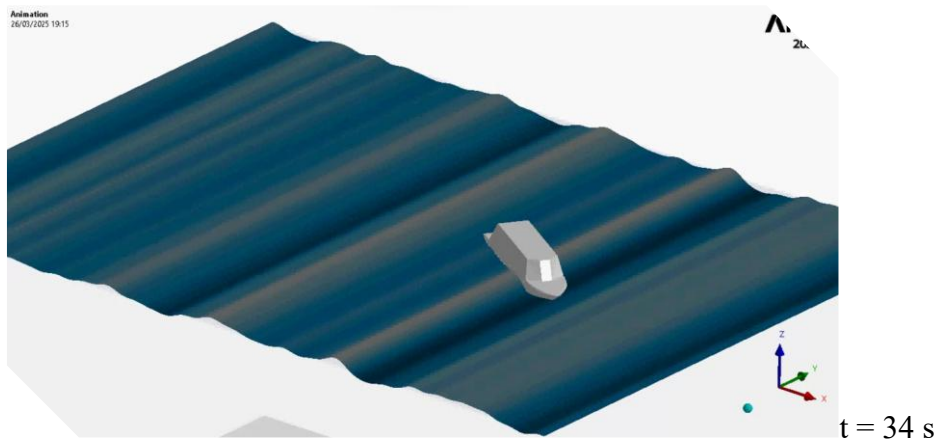
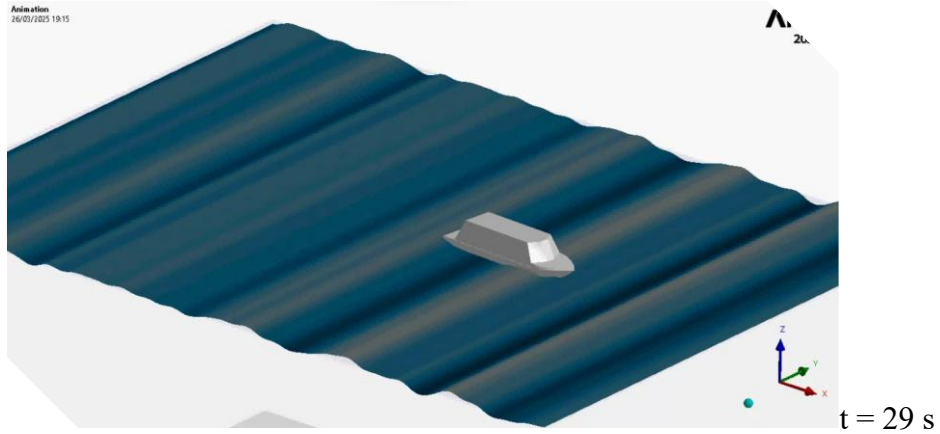
Figura 45. Imagens da simulação das ondas irregulares incidindo pela proa da embarcação, representando diferentes instantes. A embarcação se encontra flutuando livremente, sem velocidade de avanço.

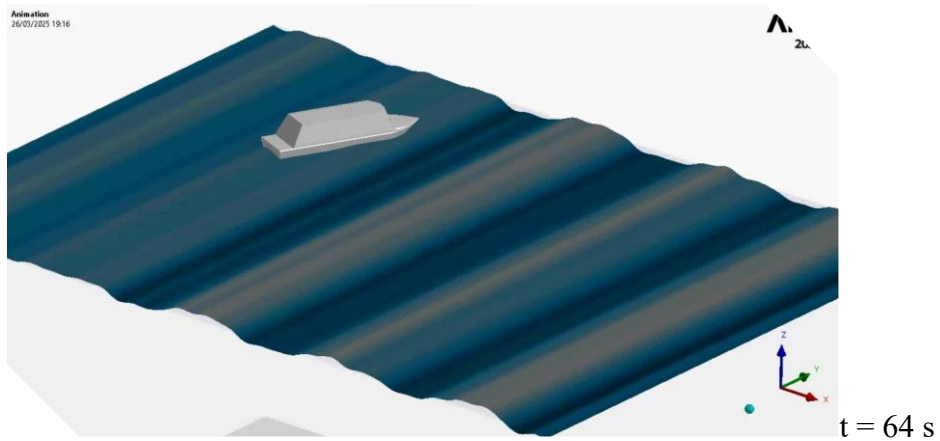
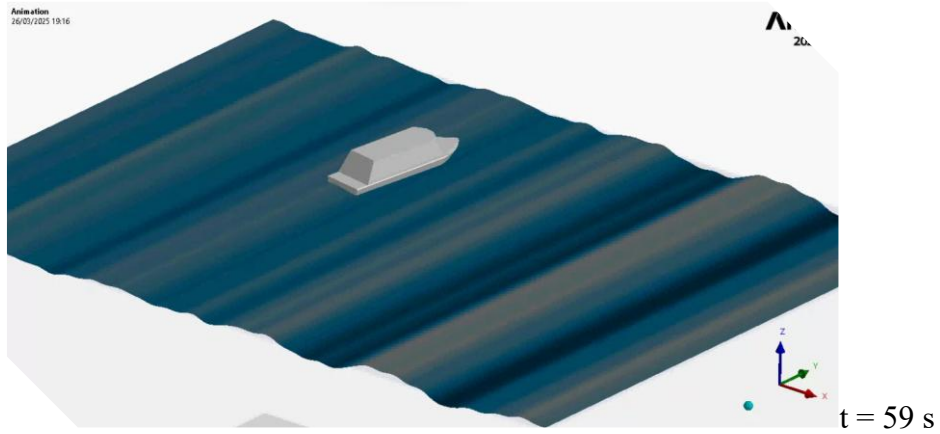
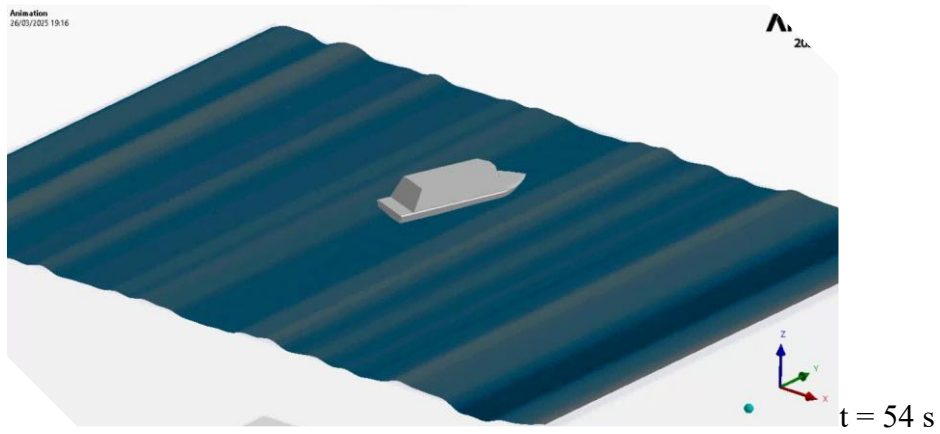
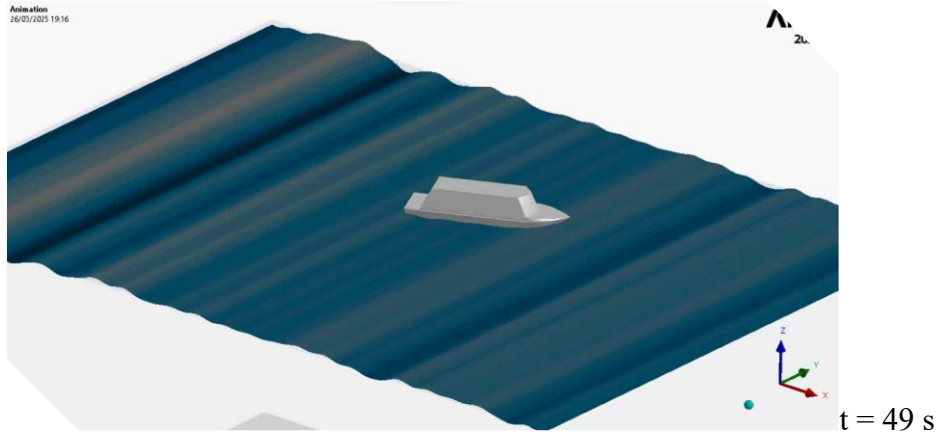




Documento assinado por: EDUARDO RAFAEL BARREDA DEL CAMPO:253***** em 11/12/2025 às 17:52 utilizando assinatura por login/senha.
Documento assinado por: CLAUDIA TEIXEIRA DE SOUZA:897***** em 11/12/2025 às 17:50 utilizando assinatura por login/senha.







Fonte: Ansys 2025 R1.



5. CONCLUSÕES

No presente trabalho, foi demonstrada a aplicabilidade do software Ansys Aqwa para avaliar a resposta em ondas irregulares de uma embarcação de pequeno porte amazônica, considerando a condição de flutuação livre. Foi assumido que as condições do estado de ondas podem ser representadas pelo espectro JONSWAP, assumindo altura significativa e período de pico de maneira empírica para demonstrar o uso do método. Esses valores podem ser atualizados posteriormente quando se tiver um maior conhecimento das características das ondas que podem acontecer na região amazônica.

Verificou-se a aplicabilidade do módulo *Hydrodynamic Diffraction*, que permitiu conhecer os operadores de amplitude de resposta do movimento da embarcação, nos seis graus de liberdade e para diferentes ângulos de incidência com as ondas. Esse módulo também é muito útil para avaliar as componentes de ondas, incluindo as ondas difratadas, bem como simular e visualizar o comportamento da embarcação em ondas regulares.

Por outro lado, o módulo *Hydrodynamic Response* permitiu avaliar a resposta em ondas irregulares, seja por meio de análise espectral no domínio da frequência ou no domínio do tempo. Esta última opção é bastante útil para avaliar o comportamento da embarcação em diversas condições definidas por ondas irregulares. Neste estudo foi escolhido o espectro JONSWAP para gerar essas condições de ondas, porém, o software permite selecionar e aplicar diversos métodos, inclusive espectros de ondas definidos manualmente. Sugere-se que esses métodos sejam explorados na análise de embarcações regionais, incluindo os efeitos de linhas de ancoragem, correntezas e vento, que também são possíveis de simular nesse módulo.

Espera-se que o presente trabalho sirva de exemplo para próximos estudos relacionados com análises da dinâmica de embarcações e estruturas flutuantes no Brasil, visando a contribuir na sua eficiência, segurança e sustentabilidade.



REFERÊNCIAS

- ACANFORA, Maria; MONTEWKA, Jakub; HINZ, Tomasz; MATUSIAK, Jerzy. On the estimation of the design loads on container stacks due to excessive acceleration in adverse weather conditions. **Marine Structures**, [S. l.], v. 53, p. 105–123, 2017.
- ALFREDINI, Paolo; ARASAKI, Emilia. **Engenharia portuária**. [S. l.]: Editora Blucher, 2014.
- ALIAKBARI, Taghi; ADJAMI, Mehdi; MOONESUN, Mohammad. An experimental study of stabilizing ordinary fishing nets (SOFNets) on a stationary SWATH ship seakeeping behavior under irregular waves. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 283, p. 115191, 2023.
- ANSYS. Aqwa Reference Manual - Release 2024 R1. **Ansys 2024 R1**, [S. l.], 2024a.
- ANSYS. Aqwa Theory Manual - Release 2024 R1. **Ansys 2024 R1**, [S. l.], 2024b.
- BAČKALOV, Igor; BULIAN, Gabriele; CICHOWICZ, Jakub; ELIOPOULOU, Eleftheria; KONOVESSIS, Dimitris; LEGUEN, Jean-Francois; ROSÉN, Anders; THEMELIS, Nikolaos. Ship stability, dynamics and safety: Status and perspectives from a review of recent STAB conferences and ISSW events. **Ocean engineering**, [S. l.], v. 116, p. 312–349, 2016.
- BIELICKI, Sebastian. Prediction of ship motions in irregular waves based on response amplitude operators evaluated experimentally in noise waves. **Polish Maritime Research**, [S. l.], v. 28, p. 16–27, 2021.
- BILANDI, Rasul Niazmand; TAVAKOLI, Sasan; MANCINI, Simone; DASHTIMANESH, Abbas. Dynamic motion analysis of stepless and stepped planing hulls in random waves: A CFD model perspective. **Applied Ocean Research**, [S. l.], v. 149, p. 104046, 2024.
- BOCCADAMO, Guido; ROSANO, Gennaro. Excessive Acceleration Criterion: Application to Naval Ships. **Journal of Marine Science and Engineering**, [S. l.], v. 7, n. 12, p. 431, n. 12, 2019.
- CELIK, Ishmail B; GHIA, Urmila; ROACHE, Patrick J; FREITAS, Christopher J. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of fluids Engineering-Transactions of the ASME**, [S. l.], v. 130, n. 7, 2008.
- CHRYSSOSTOMIDIS, C; LIU, Y. Design of Ocean Systems (2.019), Spring 2011, Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, Spring 2011. 2011. Disponível em: <https://ocw.mit.edu/courses/2-019-design-of-ocean-systems-spring-2011/>. Acesso em: 6 fev. 2023.
- CURSINO, Marcelo Wilson de Jesus. **Descrição de embarcações regionais rápidas comuns em Parintins (AM) e estudo da dinâmica de uma embarcação tipo expresso usando Ansys Aqwa**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2024. .
- FALTINSEN, Odd. **Sea loads on ships and offshore structures**. [S. l.]: Cambridge university press, 1993.



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

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

GAO, Zhiliang; SHI, Zhengyu. Numerical study on damaged ship rolling and capsizing in irregular beam waves during quasi-steady flooding. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 289, p. 116308, 2023.

GODA, Yoshimi. **Random seas and design of maritime structures**. [S. l.]: World Scientific Publishing Company, 2010.

HA, Yoon-Jin; KIM, Kyong-Hwan; NAM, Bo Woo; HONG, Sa Young; KIM, Hyunjo. Experimental study for characteristics of slamming loads on bow of a ship-type FPSO under breaking and irregular wave conditions. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 224, p. 108738, 2021.

HASHIMOTO, Hirotada; YONEDA, Shota; OMURA, Tomoyuki; UMEDA, Naoya; MATSUDA, Akihiko; STERN, Frederick; TAHARA, Yusuke. CFD prediction of wave-induced forces on ships running in irregular stern quartering seas. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 188, p. 106277, 2019.

JOURNÉE, Johan MJ; MASSIE, W. W. Offshore hydromechanics. **TU Delft, Lecture Notes**, [S. l.], 2001.

KIM, Daejeong; TEZDOGAN, Tahsin. CFD-based hydrodynamic analyses of ship course keeping control and turning performance in irregular waves. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 248, p. 110808, 2022.

KIRKEGAARD, Jens; KOFOED-HANSEN, Henrik; ELFRINK, Berry. Wake wash of high-speed craft in coastal areas. **Coastal Engineering 1998**. [S. l.]: [S. n.], 1998. p. 325–337.

KOMORIYAMA, Yusuke; IJIMA, Kazuhiro; HOUTANI, Hidetaka; TATSUMI, Akira; FUJIKUBO, Masahiko. Kalman filter technique for estimating encountered wave profiles and unmeasured ship responses using measurement data in short-crested irregular waves. **Applied Ocean Research**, [S. l.], v. 155, p. 104453, 2025.

LEE, Evan J; DIEZ, Matteo; HARRISON, Emily L; JIANG, Minyee J; SNYDER, Lawrence A; POWERS, Ann Marie R; BAY, Raymond J; SERANI, Andrea; NADAL, Maria L; KUBINA, Eric R; OTHERS. Experimental and computational fluid-structure interaction analysis and optimization of Deep-V planing-hull grillage panels subject to slamming loads—Part II: Irregular waves. **Ocean engineering**, [S. l.], v. 292, p. 116346, 2024.

LI, Mingxin; YUAN, Zhi-Ming; TAO, Longbin. Wash waves generated by ship moving across a depth change. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 275, p. 114073, 2023.

LIAN, Jijian; XIONG, Dongzhi; WANG, Haijun; GUO, Yaohua; WANG, Pengwen; YE, Fangdi; XIAO, Tianrun. Effects of damping plate on the motion response of transport ships under waves. **Applied Ocean Research**, [S. l.], v. 134, p. 103507, 2023.



LIBÓRIO, Gabriel Barroncas. **Movimentos de uma embarcação do tipo expresso em ondas regulares incidindo pela proa**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, Brazil, 2024. .

LIU, Ruixiang; LI, Hui; ONG, Muk Chen; ZOU, Jian; LU, Lin. Prediction of global structural responses for an ultra-large container ship under long-crested irregular waves using generalized modes and artificial neural networks. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 318, p. 120152, 2025.

LUHULIMA, R. B.; GASPERZ, F.; METEKOHY, O.; LAINSAMPUTTY, H. S. Response motion analysis of trimaran fishing vessels on irregular waves using CFD. **International Journal of Progressive Sciences and Technologies (IJPSAT)**, [S. l.], v. 38, n. 1, p. 162–169, 2023.

MA, Chengqian; HINO, Takanori; MA, Ning; TAKAGI, Youhei. CFD investigation on the hydrodynamic loads and motions when ship maneuvers in regular and irregular waves. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 266, p. 113040, 2022.

MARINHA. Diretoria de Portos e Costas. Marinha do Brasil. NORMAM - Normas da Autoridade Marítima. 2023. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/dpc/normas-autoridade-maritima-brasileira>. Acesso em: 27 jul. 2021.

MATSUBARA, Kazuma; UMEDA, Naoya; MATSUDA, Akihiko. Probabilistic estimation of the large heel due to broaching associated with surf-riding for a ship in short-crested irregular waves and its experimental validation. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 269, p. 113540, 2023.

MAZZARETTO, Ottavio Mattia; MENÉNDEZ, Melisa; LOBETO, Héctor. A global evaluation of the JONSWAP spectra suitability on coastal areas. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 266, p. 112756, 2022.

MCNEEL. Rhino user's guide for Windows. 2021. Disponível em: <https://docs.mcneel.com/rhino/8/usersguide/en-us/index.htm>. Acesso em: 12 jun. 2024.

NEWMAN, John Nicholas. The theory of ship motions. **Advances in applied mechanics**, [S. l.], v. 18, p. 221–283, 1979.

REGURAM, B Rajesh; SURENDRAN, S; LEE, Seung Keon. Application of fin system to reduce pitch motion. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, [S. l.], v. 8, n. 4, p. 409–421, 2016.

SHEN, Yugao; GRECO, Marilena; FALTINSEN, Odd M. Numerical study of a well boat operating at a fish farm in long-crested irregular waves and current. **Journal of Fluids and Structures**, [S. l.], v. 84, p. 97–121, 2019.

SU, Yumin; WANG, Jiandong; ZHUANG, Jiayuan; SHEN, Hailong; BI, Xiaosheng. Experiments and CFD of a variable-structure boat with retractable twin side-hulls: Seakeeping in waves. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 235, p. 109358, 2021.

TANG, Ying; SUN, Shi-Li; REN, Hui-Long. Numerical investigation on a container ship navigating in irregular waves by a fully nonlinear time domain method. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 223, p. 108705, 2021.



XIAO, Qian; ZHOU, Wenjun; ZHU, Renchuan. Effects of wave-field nonlinearity on motions of ship advancing in irregular waves using HOS method. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 199, p. 106947, 2020.

YU, Liwei; WANG, Shuqing; MA, Ning. Study on wave-induced motions of a turning ship in regular and long-crest irregular waves. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 225, p. 108807, 2021.

ZAGO, Lariuss; SIMOS, Alexandre N; KAWANO, Alexandre; KOGISHI, Andre M. A new vessel motion based method for parametric estimation of the waves encountered by the ship in a seaway. **Applied Ocean Research**, [S. l.], v. 134, p. 103499, 2023.

ZHELEZNYAKOVA, Alexandra L. Physically-based method for real-time modelling of ship motion in irregular waves. **Ocean Engineering**, [S. l.], v. 195, p. 106686, 2020.



APÊNDICE A: RESULTADOS HIDROSTÁTICOS

A Tabela 4 mostra um resumo dos principais parâmetros hidrostáticos da embarcação, obtidos para a condição de operação que foi pesquisada. Os dados foram proporcionados pela análise hidrostática disponível no módulo *Hydrodynamic Diffraction*.

Tabela 4. Resultados hidrostáticos proporcionados pelo software Hydrodynamic Diffraction para a condição de embarcação que foi avaliada.

Estrutura	Resultados Hidrostáticos		
	Embarcação cabinada		
Rigidez Hidrostática			
Posição do Centro de Gravidade (CoG):	X: 0,1963218 m	Y: 2,6337e-5 m	Z: 0,1 m
	Z	RX	RY
Heave (Z):	114275,73 N/m	-3,8021e-2 N/°	-194,11678 N/°
Roll (RX):	-2,1784289 N·m/m	430,77286 N·m/°	-4,5372 N·m/°
Pitch (RY):	-11122,072 N·m/m	-4,5372 N·m/°	7434,3765 N·m/°
Propriedades de Deslocamento Hidrostático			
Deslocamento Volumétrico Real:	1,7608336 m ³		
Deslocamento Volumétrico Equivalente:	1,7608322 m ³		
Posição do Centro de Flutuação (CoB):	X: 0,1964546 m	Y: 2,4422e-5 m	Z: -8,6628e-2 m
Forças/Peso Desequilibradas:	FX: 2,6171e-9	FY: 7,8334e-8	FZ: 1,1311e-6
Momentos/Peso Desequilibrados:	MX: 2,0135e-6 m	MY: -1,3221e-4 m	MZ: 1,3251e-8 m
Propriedades do Plano de Flutuação			
Área do Plano de Flutuação:	11,652882 m ²		
Área do Plano de Flutuação:	X: 0,2934684 m	Y: 7,2741e-6 m ⁴	
2º Momento Principal de Área:	X: 2,8544299 m ⁴	Y: 43,653908 m ⁴	
Ângulo entre Eixo Principal X e Eixo Global X:	-4,025e-4°		
Parâmetros de Estabilidade de Pequeno Ângulo com respeito aos Eixos Principais			
CoG para CoB (BG):	0,1862681 m		
Alturas Metacêntricas (GMX/GMY):	1,4293281 m	24,604986 m	
CoB para Metacêntrico (BMX/BMY):	1,6159962 m	24,791615 m	
Momentos Restauradores (MX/MY):	430,77283 N·m/°	7415,4839 N·m/°	

Fonte: Ansys 2025 R1.



APÊNDICE B: EXEMPLOS DE EMBARCAÇÕES CABINADAS

As Figuras 46 – 62 mostram embarcações típicas de alta velocidade cabinadas encontradas no Estado do Amazonas. Elas foram capturadas pela autora durante visitas de campo.

Figura 46. Exemplo de embarcação tipo lancha voadeira no Estado do Amazonas, no Rodway de Manaus - Terminal Ajato.



Fonte: Déborah Santos, 2025.

Figura 47. Exemplo de embarcação tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, no Rio Negro em Iranduba.



Fonte: Déborah Santos, 2025.

Figura 48. Exemplo de embarcação tipo Lancha no Estado do Amazonas, no Rio Negro em Iranduba.



Fonte: Déborah Santos, 2025.



Figura 49. Exemplo de embarcação tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, na Balsa Amarela em Manaus.



Fonte: Déborah Santos, 2025.

Figura 50. Exemplo de embarcação tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, na Balsa Amarela em Manaus.



Fonte: Déborah Santos, 2025.

Figura 51. Exemplo de embarcação tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, na Balsa Amarela em Manaus.



Fonte: Déborah Santos, 2025.



Figura 52. Exemplo de embarcação tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, no Terminal Ajato em Manaus.



Fonte: Déborah Santos, 2025.

Figura 53. Exemplo de embarcação tipo Lancha Voadeira no Estado do Amazonas, no Porto de Manaus.



Fonte: Déborah Santos, 2025.

Figura 54. Exemplo de embarcação tipo lancha expresso no Estado do Amazonas, no Rodway de Manaus.



Fonte: Déborah Santos, 2025.



Figura 55. Exemplo de embarcação tipo Lancha Voadeira do Corpo de Bombeiros no Estado do Amazonas, no Porto de Manaus.



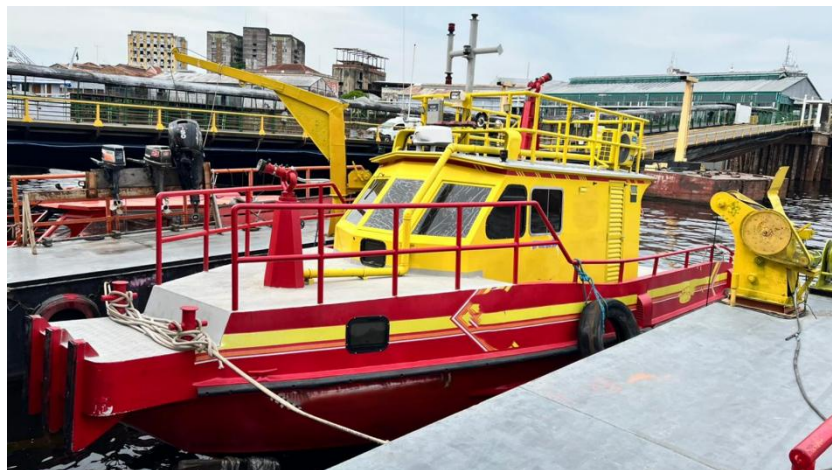
Fonte: Déborah Santos, 2025.

Figura 56. Exemplo de embarcação tipo lancha expresso, no Estado do Amazonas, no Porto de Manaus.



Fonte: Déborah Santos, 2025.

Figura 57. Exemplo de embarcação Tipo Lancha de Apoio do Corpo de Bombeiros no Estado do Amazonas, no Porto de Manaus.



Fonte: Déborah Santos, 2025.



Figura 58. Exemplo de embarcação Tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, no Porto de Itacoatiara.



Fonte: Déborah Santos, 2025.

Figura 59. Exemplo de embarcação Tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, no Porto de Itacoatiara.



Fonte: Déborah Santos, 2025.

Figura 60. Exemplo de embarcação Tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, no Porto de Itacoatiara.



Fonte: Déborah Santos, 2025.



Figura 61. Exemplo de embarcação Tipo Lancha de Praticagem no Estado do Amazonas, na Orla de Itacoatiara.



Fonte: Déborah Santos, 2025.

Figura 62. Exemplo de embarcação Tipo Lancha Expresso no Estado do Amazonas, no Porto de Itacoatiara.



Fonte: Déborah Santos, 2025.

