

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

RAYRIMA TIENY DA SILVA FREITAS MARQUES

**DINÂMICA DE UMA ESTRUTURA FLUTUANTE MONOCOLUNA
USANDO O MÉTODO DE ESCOAMENTO POTENCIAL**

Manaus
2023

RAYRIMA TIENY DA SILVA FREITAS MARQUES

**DINÂMICA DE UMA ESTRUTURA FLUTUANTE MONOCOLUNA
USANDO O MÉTODO DE ESCOAMENTO POTENCIAL**

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

Orientador: Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes.

Manaus

2023

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.

D111dd Marques, Rayrima Tieny da Silva Freitas
DINÂMICA DE UMA ESTRUTURA FLUTUANTE
MONOCOLUNA USANDO O MÉTODO DE
ESCOAMENTO POTENCIAL / Rayrima Tieny da Silva
Freitas Marques. Manaus : [s.n], 2023.
64 f.: color.; 297 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Naval - Universidade
do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.

Inclui bibliografia

Orientador: Jassiel Vladimir Hernandez Fontes

1. Estrutura flutuante. 2. Movimentos. 3. Dinâmica.
4. Calado. 5. Região Amazônica. I. Jassiel Vladimir
Hernandez Fontes (Orient.). II. Universidade do Estado do
Amazonas. III. DINÂMICA DE UMA ESTRUTURA
FLUTUANTE MONOCOLUNA USANDO O MÉTODO
DE ESCOAMENTO POTENCIAL

RAYRIMA TIENY DA SILVA FREITAS MARQUES

**DINÂMICA DE UMA ESTRUTURA FLUTUANTE MONOCOLUNA
USANDO O MÉTODO DE ESCOAMENTO POTENCIAL**

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

Aprovado em 29 de Agosto de 2023.

Banca Examinadora:

Dr. Jassiel Vladimir Hernández Fontes
Universidade do Estado do Amazonas

Dr. Elvis Jhoarsy Osório Santander
Universidade do Estado do Amazonas

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

Este trabalho é dedicado aos meus pais, pilares da minha vida ,minha avó, e em memória aos meus avós que partiram cedo.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente apoiado pelo Governo do Estado do Amazonas com recursos da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas – FAPEAM por meio do projeto de pesquisa intitulado “Acidentes com embarcações na região amazônica: identificação de causas e alternativas de prevenção”, chamada N°010/2021 – C, T&I Áreas Prioritárias.

A autora agradece o suporte proporcionado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Brasil, CNPq, pelo suporte durante o projeto de Iniciação Científica intitulado: "Metodologia para calcular o carregamento hidrodinâmico em estruturas flutuantes usando métodos potenciais", o qual foi desenvolvido no curso de Engenharia Naval da Universidade do Estado do Amazonas e serviu como base do presente Trabalho de Conclusão de Curso.

A autora agradece à empresa ANSYS, Inc., pela disponibilidade de uso da versão acadêmica do software utilizado no presente trabalho.

RESUMO

Estruturas flutuantes são amplamente utilizadas ao redor do mundo para desenvolver diversas atividades na indústria naval. Dentre elas, pode-se mencionar o armazenamento de combustíveis e/ou produtos químicos, dessalinização de água, conversão de energias renováveis, abastecimento de operações navais, lazer, moradia, entre outras. A região amazônica possui um grande sistema de hidrovias, onde o uso de estruturas flutuantes torna-se fundamental. No entanto, ainda são necessários estudos que permitam avaliar o comportamento de diversos tipos de estruturas flutuantes que possam ser implementados na região. O presente trabalho visa avaliar o uso de uma plataforma flutuante cilíndrica para possíveis aplicações regionais, analisando o seu comportamento em ondas. O conceito de estrutura é baseado a partir de uma planta flutuante de dessalinização de água proposto na literatura científica. O estudo foi feito utilizando métodos de escoamento potencial de hidrodinâmica disponíveis no *software Ansys Aqwa*. Primeiro, os movimentos do flutuante foram validados com dados experimentais disponíveis na literatura, considerando um caso de referência. Logo, foram avaliadas três estruturas similares de diferentes tamanhos, visando conhecer a diferença entre seus movimentos. Considerando as estruturas propostas, foram calculados os coeficientes hidrodinâmicos de massa adicional e amortecimento, bem como os movimentos de *heave* e *pitch*. Foram avaliados os efeitos do refinamento da malha nesses parâmetros e, finalmente, foi pesquisado o efeito da mudança do calado nos movimentos das estruturas propostas. O conceito de estrutura flutuante estudado pode ser estendido para diversas atividades regionais. Estudos que envolvam a validação e análises paramétricas como o apresentado no presente trabalho, podem ser de utilidade no desenvolvimento de novos conceitos de estruturas flutuantes para uso regional.

Palavras-chave: Estrutura flutuante; movimentos; dinâmica; calado; região amazônica.

ABSTRACT

Floating structures are widely used around the world to develop various activities in the naval industry. Among them, it is possible to mention the storage of fuels and/or chemical products, water desalination, conversion of renewable energy, supply for naval operations, leisure, housing, among others. The Amazon region has a large system of waterways, where the use of floating structures becomes fundamental. However, studies are still needed to evaluate the behavior of different types of floating structures that can be implemented in the region. The present work aims to evaluate the use of a cylindrical floating platform for possible regional applications, analyzing its behavior in waves. The structure concept is based on a floating water desalination plant proposed in scientific literature. The study was carried out using potential flow methods of hydrodynamics available in the Ansys Aqwa software. First, the structure motions were validated with experimental data available in the literature, considering a reference case. Therefore, three similar structures of different sizes were evaluated, aiming to know the difference between their motions. Considering the proposed structures, the hydrodynamic coefficients of additional mass and damping were evaluated, as well as the heave and pitch motions. The effects of mesh refinement on these parameters were evaluated and, finally, the effect of draft changes on the motions of the proposed structures was investigated. The floating structure concept studied can be extended to several naval activities in the region. Studies involving validation and parametric analysis, such as the one presented in the present work, can be useful in the development of new concepts of floating structures for regional use.

Keywords: floating structure; motions; dynamics; draft; Amazon region.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bacia Hidrográfica Região Norte.	13
Figura 2 – Exemplos de estruturas flutuantes utilizadas na região. (a) Flutuante de recreio. (b) Hotel flutuante. (c) Estrutura flutuante para geração de energia. (d) Boia de amarração.	15
Figura 3 – Descrição da estrutura avaliada por Krish Thiagarajan e Moreno (2020), incluindo a estrutura flutuante geral (esquerda), a descrição do flutuador com <i>heave plate</i> (centro), e o detalhe da configuração experimental (direita).	16
Figura 4 – Pesquisa desenvolvida por Jiang <i>et al.</i> (2020), para avaliar a resposta dinâmica de dois tipos de estrutura para FOWT, incluindo a avaliação de geração de vórtices nas bases de <i>heave plates</i>	17
Figura 5 – Ilustrações da pesquisa apresentada por Amin <i>et al.</i> (2022b) para o estudo de uma turbina eólica flutuante (esquerda), incluindo o modelo experimental (centro) e a configuração experimental (direita).	19
Figura 6 – Exemplo de monocoluna FPSO disponibilizada no site da Petrobras.	20
Figura 7 – Exemplo de estrutura monocoluna utilizada como boia de amarração.	21
Figura 8 – Fluxograma proposto para desenvolver o presente estudo.	31
Figura 9 – Aparência das ferramentas do <i>software Hydrodynamic Diffraction</i>	32
Figura 10 – Exemplo definição de malha.	33
Figura 11 – Definição domínio da frequência da onda.	34
Figura 12 – Geração da solução hidrostática.	34
Figura 13 – Eixos coordenados utilizados no <i>software Ansys Aqwa</i>	35
Figura 14 – Geração das curvas de RAO.	35
Figura 15 – Vistas do modelo da estrutura flutuante.	36
Figura 16 – Malha padrão.	37
Figura 17 – Malha pouco refinada caso 3.	37
Figura 18 – Malha padrão caso 3.	37
Figura 19 – Malha muito refinada caso 3.	37
Figura 20 – Definição massa pontual.	38
Figura 21 – Definição constantes do ambiente.	39
Figura 22 – Print da função Grabit no Matlab.	40
Figura 23 – <i>Print</i> da exibição dos resultados finais no <i>Ansys</i>	41
Figura 24 – Comparação dos resultados numéricos (teste) e experimentais (Amin <i>et al.</i> (2020)) do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>heave</i>	42

Figura 25 – Comparação dos resultados numéricos (teste) e experimentais (Amin <i>et al.</i> (2020)) do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>pitch</i>	43
Figura 26 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>heave</i> para o caso 1.	44
Figura 27 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>pitch</i> para o caso 1.	45
Figura 28 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha da massa adicional o caso 1.	45
Figura 29 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do coeficiente de amortecimento para o caso 1.	46
Figura 30 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>heave</i> para o caso 2.	47
Figura 31 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>pitch</i> para o caso 2.	47
Figura 32 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha da massa adicional para o caso 2.	48
Figura 33 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do coeficiente de amortecimento para o caso 2.	48
Figura 34 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>heave</i> para o caso 3.	49
Figura 35 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>pitch</i> para o caso 3.	50
Figura 36 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha da massa adicional para o caso 3.	50
Figura 37 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do coeficiente de amortecimento para o caso 3.	51
Figura 38 – Comparação dos resultados de variação de calado do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>heave</i> para o caso 1.	51
Figura 39 – Comparação dos resultados de variação de calado do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>pitch</i> para o caso 1.	52
Figura 40 – Comparação dos resultados de variação de calado da massa adicional para o caso 1.	52

Figura 41 – Comparação dos resultados de variação de calado do coeficiente de amortecimento para o caso 1.	53
Figura 42 – Comparação dos resultados de variação de calado do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>heave</i> para o caso 2.	54
Figura 43 – Comparação dos resultados de variação de calado do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>pitch</i> para o caso 2.	54
Figura 44 – Comparação dos resultados de variação de calado da massa adicional para o caso 2.	55
Figura 45 – Comparação dos resultados de variação de calado do coeficiente de amortecimento para o caso 2.	55
Figura 46 – Comparação dos resultados de variação de calado do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>heave</i> para o caso 3.	56
Figura 47 – Comparação dos resultados de variação de calado do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de <i>heave</i> para o caso 3.	56
Figura 48 – Comparação dos resultados de variação de calado da massa adicional para o caso 3.	57
Figura 49 – Comparação dos resultados de variação de calado do coeficiente de amortecimento para o caso 3.	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões das estruturas.	36
Tabela 2 – Dados para o refinamento das malhas.	36
Tabela 3 – Valores de calado.	38
Tabela 4 – Casos de estudo para avaliar o refinamento das malhas.	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	13
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
1.3	JUSTIFICATIVA	20
1.4	OBJETIVOS	22
1.4.1	Objetivo Geral	22
1.4.2	Objetivos Específicos	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	SOFTWARE UTILIZADO	23
2.1.1	Principais recursos e funcionalidades	23
2.1.2	Aplicações	23
2.1.3	Benefícios	24
2.2	PRINCIPAIS CONCEITOS DA TEORIA DE ESCOAMENTO POTENCIAL	24
2.3	DINÂMICA DE UM FLUTUANTE	26
2.3.1	Movimentos desacoplados	27
2.3.2	Movimentos acoplados	27
3	METODOLOGIA	31
3.1	DIAGRAMA DE FLUXO DA METODOLOGIA PROPOSTA	31
3.2	DESCRIÇÃO DO <i>SOFTWARE ANSYS AQWA</i>	32
3.3	CONFIGURAÇÃO DO TESTE NUMÉRICO	34
3.4	DESCRIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO	39
3.5	OBTENÇÃO DE DADOS PELO <i>SOFTWARE MATLAB</i>	40
4	RESULTADOS	41
4.1	TESTE DE VALIDAÇÃO	41
4.2	TESTE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA PARA O CASO 1	43
4.3	TESTE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA PARA O CASO 2	46
4.4	TESTE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA PARA O CASO 3	49
4.5	EFEITOS DA VARIAÇÃO DO CALADO PARA CASO 1	51
4.6	EFEITOS DA VARIAÇÃO DO CALADO PARA CASO 2	53
4.7	EFEITOS DA VARIAÇÃO DO CALADO PARA CASO 3	55
5	CONCLUSÕES	58
	REFERÊNCIAS	60

Dentre as diversas abordagens estudadas para o aproveitamento dos recursos hídricos da região, destaca-se a utilização de estruturas flutuantes sem velocidade de avanço para desenvolver diversas atividades industriais. Essas estruturas podem ser uma opção promissora para atender às demandas socioeconômicas e ambientais da Amazônia. A capacidade hidrográfica da região oferece uma oportunidade única para o desenvolvimento de projetos que possam impulsionar a economia local, ao mesmo tempo em que podem contribuir na preservação da sua riqueza natural e cultural.

Na Figura 2 são apresentados alguns exemplos elucidativos da aplicação de distintas estruturas flutuantes na região amazônica. Nos casos representados pela Figura 2a e a Figura 2b, identificam-se as ocorrências mais frequentes, que se caracterizam como estruturas destinadas ao lazer e recreação. Por outro lado, o exemplo da Figura 2c ilustra uma instalação inovadora de usina solar fotovoltaica flutuante, evidenciando a versatilidade dessas soluções. Adicionalmente, na Figura 2d, observa-se a utilização de uma boia náutica de amarração utilizada como sistema de ancoragem de embarcações. Estes exemplos concretos corroboram a amplitude de aplicações das referidas estruturas. Outros exemplos relacionados com o uso de estruturas flutuantes para desenvolver atividades regionais pode ser encontrado no trabalho de Neto, Fontes e Maia (2023).

As estruturas flutuantes apresentam diversas vantagens em relação às soluções convencionais de infraestrutura terrestre na região amazônica. A flexibilidade das estruturas flutuantes permite sua adaptação às variações sazonais dos rios, evitando impactos negativos causados pela inundação ou secas extremas. Além disso, a mobilidade dessas estruturas pode ser explorada para alcançar comunidades remotas e de difícil acesso, promovendo a inclusão e o desenvolvimento sustentável dessas regiões.

Ao compreender a importância e o potencial das estruturas flutuantes na região amazônica, espera-se que este estudo contribua para a ampliação do conhecimento sobre soluções inovadoras, que possam conciliar o aproveitamento dos recursos aquáticos com a preservação ambiental e com a otimização destas estruturas.

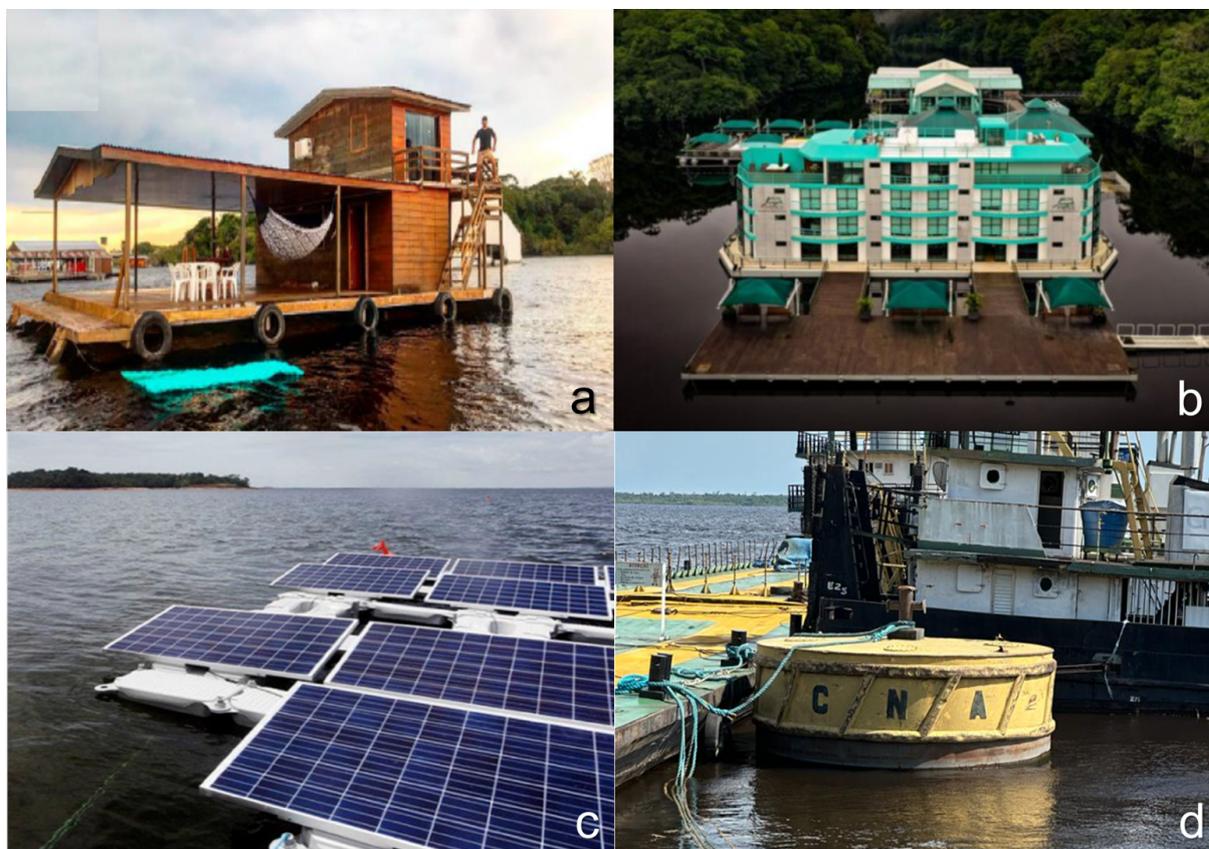
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O uso de estruturas flutuantes é de relevância em diversas áreas da Engenharia Naval, Oceânica e *Offshore*, bem como em diversas áreas na indústria, no âmbito internacional. Uma revisão completa dos diversos tipos de estruturas flutuantes comuns na indústria *Offshore* pode ser encontrada no trabalho de Amaechi *et al.* (2022).

Nos últimos anos, diversos tipos de pesquisas científicas têm sido desenvolvidas, visando o estudo e o desenvolvimento de novas estruturas flutuantes.

Por exemplo, Krish Thiagarajan e Moreno (2020) apresentaram uma pesquisa com o objetivo de investigar os efeitos das ondas nos coeficientes hidrodinâmicos de uma placa oscilante de movimento vertical (*heave plate*) em turbinas eólicas *Offshore*, como mostrado em Figura 3. Segundo Zhu e Lim (2017), as *heave plates* podem causar efeitos adicionais de

Figura 2 – Exemplos de estruturas flutuantes utilizadas na região. (a) Flutuante de recreio. (b) Hotel flutuante. (c) Estrutura flutuante para geração de energia. (d) Boia de amarração.

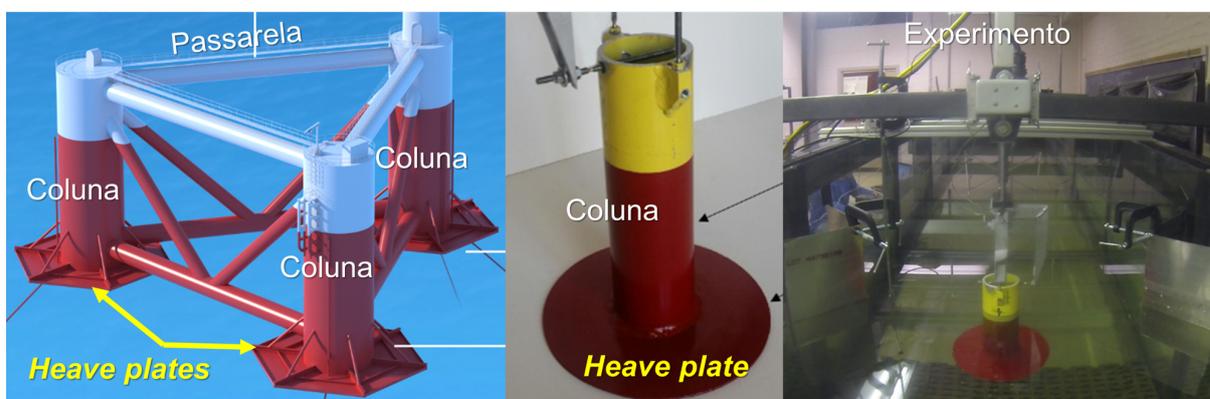


Fonte: (a) Modificado de Lima *et al.* (2022). (b) Modificado de AmazonasNoticias (2022). (c) Modificado de Solar (2017). (d) Acervo da autora.

massa adicional e amortecimento em estruturas flutuantes, sendo implementações bastante efetivas para limitar os movimentos verticais da estrutura.

O estudo de Krish Thiagarajan e Moreno (2020) foi conduzido em instalações de testes hidrodinâmicos, onde um modelo em escala reduzida da placa oscilante foi submetido a diferentes condições de ondas simuladas. A placa oscilante, representando um componente de uma turbina eólica *Offshore*, foi projetada para se mover verticalmente em resposta às ondas. Durante os testes, foram coletados dados dos coeficientes hidrodinâmicos da placa sob diversas condições de ondas. A motivação por trás do estudo foi relacionada à compreensão aprofundada dos efeitos das ondas na performance das turbinas eólicas *Offshore*. Com o aumento da instalação de turbinas eólicas em águas profundas, o conhecimento dos efeitos das ondas nos componentes das turbinas se tornou crucial. Vale ressaltar que, segundo os autores, uma compreensão precisa dos coeficientes hidrodinâmicos é essencial para otimizar o projeto e a operação das turbinas, garantindo a eficiência e a estabilidade durante condições adversas de ondas.

Figura 3 – Descrição da estrutura avaliada por Krish Thiagarajan e Moreno (2020), incluindo a estrutura flutuante geral (esquerda), a descrição do flutuador com *heave plate* (centro), e o detalhe da configuração experimental (direita).



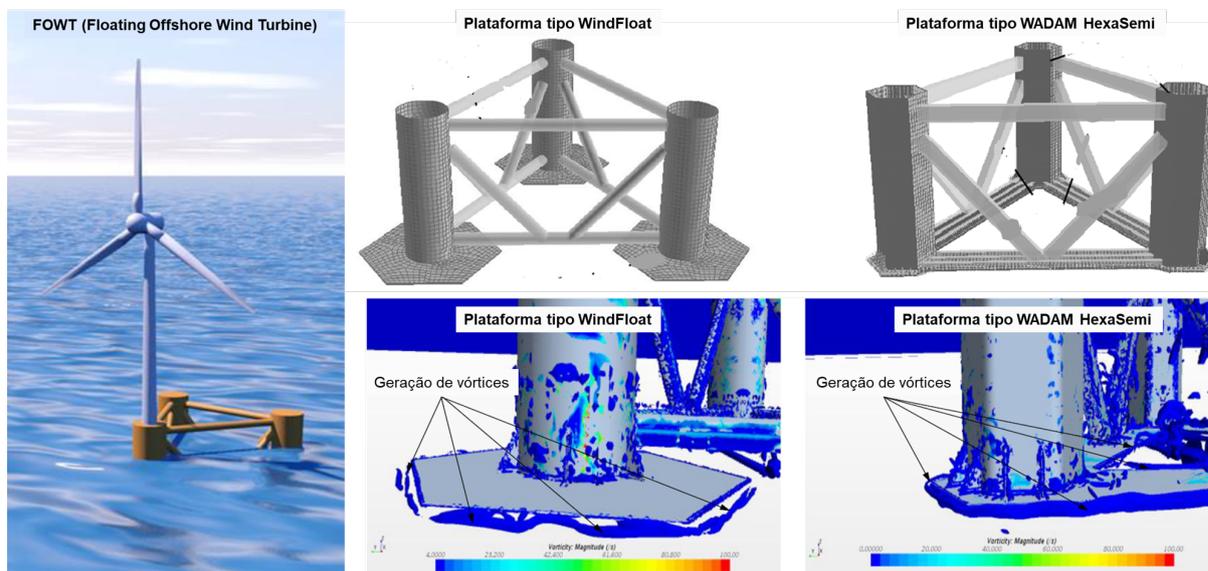
Fonte: Krish Thiagarajan e Moreno (2020)

Os principais resultados do estudo de Krish Thiagarajan e Moreno (2020) indicaram que as condições das ondas exerciam uma influência significativa nos coeficientes hidrodinâmicos da placa oscilante. Os cientistas observaram variações notáveis nos coeficientes de amplitude e fase, dependendo da frequência e altura das ondas. Essas variações podem impactar diretamente o desempenho da turbina eólica *Offshore*, afetando sua eficiência e estabilidade. Portanto, o estudo destacou a importância de considerar os efeitos das ondas ao projetar e operar turbinas eólicas *Offshore*, oferecendo informações valiosas para a melhoria contínua desses sistemas. Cabe mencionar que o estudo dos coeficientes hidrodinâmicos é muito relevante na pesquisa relacionada com estruturas flutuantes, pois esses coeficientes permitem desenvolver modelos matemáticos dos seus movimentos.

Outro estudo relacionado com avaliar os efeitos de uma *heave plate* nos movimentos de uma plataforma flutuante para turbina eólica (FOWT, *Floating Offshore Wind Turbine*) foi o apresentado por Jiang *et al.* (2020). Além de proporcionar uma revisão da literatura desse tópico, avaliaram a resposta da plataforma em condições de operação e de tormenta, usando fluidodinâmica computacional em dois tipos de estrutura flutuante (*WindFloat* e *WADAM HexaSemi*), como mostrado na Figura 4.

Xu, Neng e Yang (2019) apresentaram uma pesquisa que teve como objetivo analisar a resposta de movimento de uma embarcação de mineração por meio do software de simulação *ANSYS AQWA*, para realizar simulações numéricas que modelaram as condições de operação da embarcação de mineração. A embarcação em questão estava equipada para a extração de minerais do leito marinho e, portanto, a análise da resposta de movimento tinha como objetivo avaliar a estabilidade, conforto dos tripulantes e a segurança das operações em diferentes cenários marítimos. O motivo por trás deste estudo era otimizar o projeto e a operação da embarcação de mineração, garantindo que ela pudesse operar

Figura 4 – Pesquisa desenvolvida por Jiang *et al.* (2020), para avaliar a resposta dinâmica de dois tipos de estrutura para FOWT, incluindo a avaliação de geração de vórtices nas bases de *heave plates*.



Fonte: Jiang *et al.* (2020)

de maneira eficaz e segura, mesmo em condições marítimas desafiadoras. A análise da resposta de movimento é fundamental para identificar os pontos de estresse, determinar a capacidade da embarcação para lidar com diferentes níveis de ondas e avaliar o conforto dos tripulantes durante as operações. Foram identificadas faixas de frequência de ondas que poderiam causar oscilações excessivas ou desconforto a bordo. Além disso, os engenheiros puderam ajustar parâmetros de projeto, como a forma do casco e o posicionamento de equipamentos, para melhorar a estabilidade e a resposta de movimento da embarcação. Esses resultados foram essenciais para aprimorar o projeto da embarcação, garantindo sua eficácia operacional e a segurança das tripulações em uma variedade de condições marítimas.

Abazari, Behzad e Krish P Thiagarajan (2022) avaliaram experimentalmente os coeficientes hidrodinâmicos associados a uma placa de movimento vertical (*heave plate*) realizando oscilações de inclinação (*pitch*) em um ambiente aquático controlado. Um modelo em escala da *heave plate* foi projetado e construído para replicar as condições de operação. A placa foi submetida a oscilações controladas de inclinação enquanto era imersa em água, permitindo a medição precisa dos coeficientes hidrodinâmicos que descrevem as forças e os momentos gerados durante o movimento.

O estudo de Abazari, Behzad e Krish P Thiagarajan (2022) foi motivado pela necessidade de compreender as complexas interações hidrodinâmicas que ocorrem quando uma *heave plate* executa oscilações de inclinação em ambientes aquáticos. Essa análise é fundamental para otimizar projetos de sistemas marítimos que envolvem componentes

oscilantes, como plataformas *Offshore*, sistemas de energia das ondas e outras estruturas relacionadas. Os principais resultados do estudo revelaram padrões claros nas variações dos coeficientes hidrodinâmicos conforme a placa de *heave* executava oscilações de inclinação. Foram identificadas relações entre a frequência de oscilação, a amplitude e os coeficientes de força e momento.

Abazari e Behzad (2020) apresentaram uma revisão científica baseada em uma análise abrangente de pesquisas prévias sobre os coeficientes de massa adicionada e amortecimento para placas de movimento vertical em plataformas *Offshore*, considerando oscilações translacionais e rotacionais. A revisão foi realizada por meio de uma abordagem sistemática, em que os pesquisadores compilaram e analisaram uma variedade de estudos anteriores que investigavam os coeficientes de massa adicionada e amortecimento para *heave plates*. Os estudos revisados abrangeram uma ampla gama de condições de operação e configurações de plataformas *Offshore*, considerando tanto as oscilações verticais quanto as oscilações de rotação. O objetivo da revisão foi consolidar e resumir o conhecimento existente sobre os coeficientes de massa adicionada e amortecimento para *heave plates* em plataformas *Offshore*. Isso é crucial para o projeto e análise precisos de estruturas marítimas sujeitas a movimentos oscilatórios, uma vez que esses coeficientes desempenham um papel crítico na previsão do comportamento dinâmico dessas estruturas.

Os principais resultados da revisão de Abazari e Behzad (2020) destacaram a influência de diversos fatores, como geometria da placa, profundidade da água, frequência e amplitude das oscilações, nos coeficientes de massa adicionada e amortecimento. A revisão também identificou lacunas no conhecimento e áreas que poderiam ser alvo de pesquisas futuras. Ao reunir e sintetizar os resultados de estudos anteriores, o artigo forneceu um recurso valioso para engenheiros e pesquisadores envolvidos no projeto e análise de plataformas *Offshore* sujeitas a movimentos oscilatórios.

No estudo desenvolvido por Amin *et al.* (2020), foi pesquisado o conceito de um novo tipo de estrutura flutuante para ser utilizado como planta de dessalinização de água para uso no Egito. O estudo foi desenvolvido por uma equipe de pesquisadores da Universidade de Alexandria, Egito, que desenvolveu uma investigação experimental para avaliar a resposta de movimento da inovadora planta de dessalinização como estrutura flutuante. O estudo foi conduzido em um cenário realista, utilizando um modelo em escala reduzida da planta projetada.

A pesquisa de Amin *et al.* (2020) envolveu a construção de um modelo físico em escala da planta de dessalinização flutuante. Esse modelo foi submetido a testes em um tanque de provas para simular as condições marítimas. A planta incorporava características inovadoras de flutuação e desenho geométrico, visando a mitigação dos efeitos das ondas, incluindo condições adversas do mar. A resposta do modelo às diferentes condições foi monitorada, medida e analisada cuidadosamente. O estudo tinha como objetivo principal avaliar a viabilidade técnica e a eficácia da planta de dessalinização flutuante em condições

reais do mar do Egito. A crescente demanda por água potável e a escassez de recursos hídricos no Egito motivaram a busca por soluções alternativas e eficientes de dessalinização. A planta flutuante prometia ser uma abordagem inovadora para enfrentar esse desafio, proporcionando uma fonte de água potável mais estável e resistente às condições marítimas.

Os principais resultados do estudo de Amin *et al.* (2020) revelaram que a planta de dessalinização flutuante demonstrou uma resposta de movimento satisfatória sob várias condições de ondas. A inovação do projeto permitiu que a planta permanecesse relativamente estável e operacional, mesmo em condições marítimas adversas. Isso sugeriu que a abordagem flutuante tinha potencial para ser uma solução viável para a produção de água potável no contexto desafiador das águas do Egito. Os dados coletados durante os experimentos forneceram descobertas relevantes para o aprimoramento futuro do projeto e sua adaptação para aplicações em larga escala.

Posteriormente, Amin *et al.* (2022b) estenderam a aplicação da plataforma utilizada em Amin *et al.* (2020), para servir como base de uma turbina eólica, como mostrado na Figura 5. De maneira similar ao trabalho anterior, os pesquisadores avaliaram o comportamento dinâmico da plataforma em diversas condições de ondas, incluindo mar irregular. Outro dos objetivos foi avaliar possíveis sítios de instalação da estrutura flutuante no Egito.

Figura 5 – Ilustrações da pesquisa apresentada por Amin *et al.* (2022b) para o estudo de uma turbina eólica flutuante (esquerda), incluindo o modelo experimental (centro) e a configuração experimental (direita).

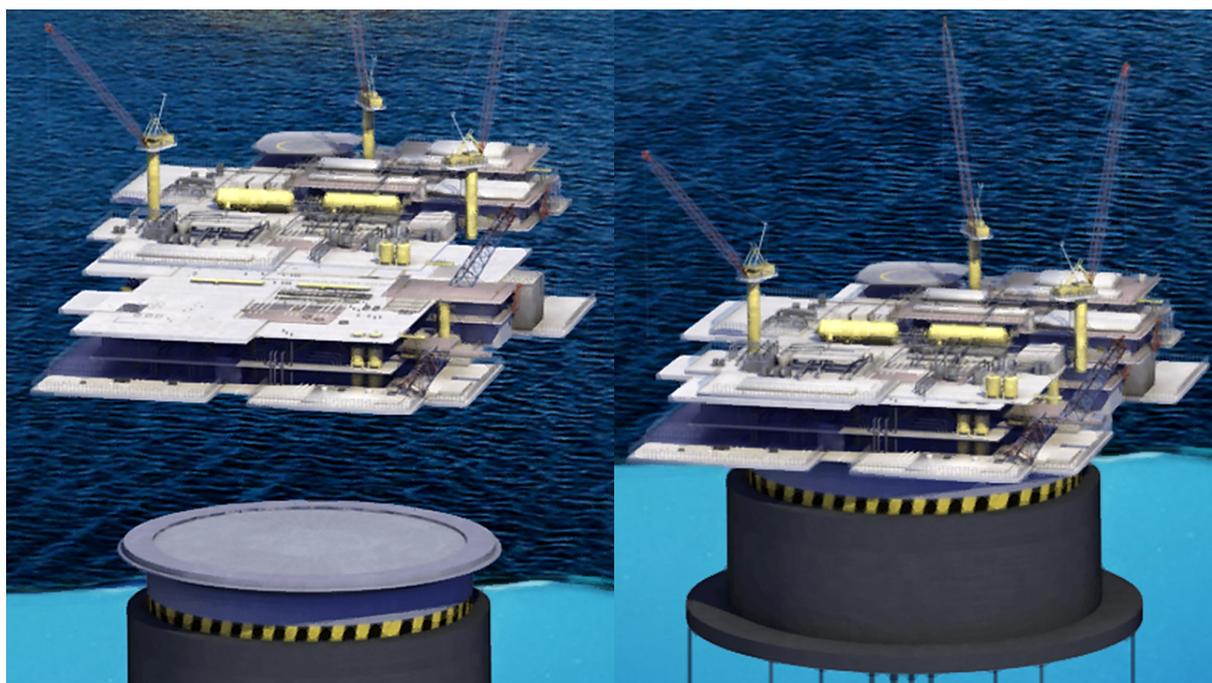


Fonte: Amin *et al.* (2022b)

Considerando o mesmo tipo de estrutura mostrado na figura anterior (monocoluna com *heave plate*, Amin *et al.* (2022a) fizeram outra pesquisa para avaliar o efeito de apêndices tipo *interceptors* nos movimentos de uma estrutura monocoluna similar à utilizada nos estudos prévios, visando a aplicação para servir como uma unidade FPSO (*Floating Production, Storage and Offloading*), amplamente usada na indústria *Offshore* para armazenamento, produção e transferência de combustíveis.

De fato, cabe ressaltar que esse tipo de estruturas monocolunas têm sido usadas pela Petrobras como FPSO desde 2007, como descrito em PETROBRAS (2014), onde podem ser visualizadas diversos tipos de plataformas usadas na indústria *Offshore*. A Figura 6 mostra um exemplo de plataforma monocoluna usada como FPSO, que segundo as descrições do site, gera mais estabilidade com relação a um FPSO do tipo embarcação.

Figura 6 – Exemplo de monocoluna FPSO disponibilizada no site da Petrobras.



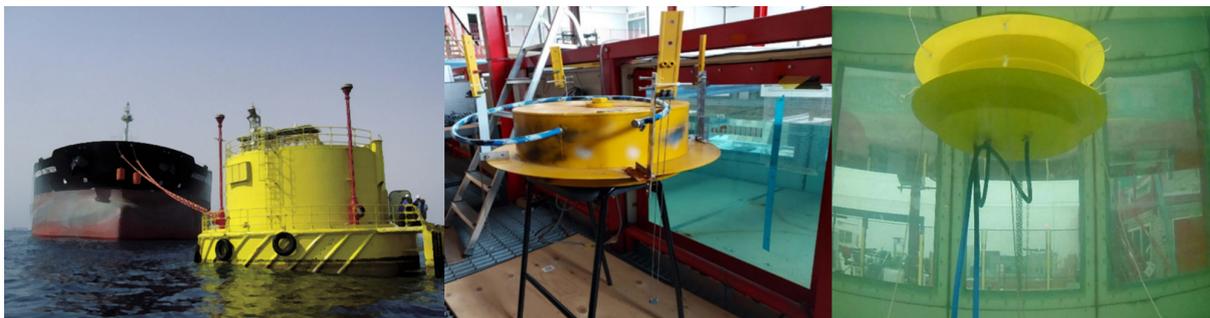
Fonte: Adaptado de PETROBRAS (2014)

Outra aplicação de estruturas monocoluna com *heave plates* consiste em servir como boias ancoradas para proporcionar suporte à amarração de navios e outros sistemas flutuantes, como apresentado por Amaechi, Facheng Wang e Ye (2022). Esses autores realizaram uma pesquisa experimental para avaliar o comportamento dinâmico desse tipo de estruturas de maneira ancorada Figura 7, conhecido como boias tipo CALM *Catenary Anchor Leg Mooring*, ou seja, boias ancoradas com âncora e linhas de amarração do tipo catenária.

1.3 JUSTIFICATIVA

Além dos tipos de estruturas flutuantes que já existem na região amazônica para desenvolver diversas atividades industriais, ainda é possível introduzir conceitos de estruturas flutuantes com geometrias e inovações diferentes. Alguns exemplos recentes consistem no estudo do comportamento plataformas flutuantes com forma de polígono regular (e.g., triângulo, quadrado, hexágono) como feito por Park e Chien Ming Wang (2021); e no

Figura 7 – Exemplo de estrutura monocoluna utilizada como boia de amarração.



Fonte: Adaptado de Amaechi, Facheng Wang e Ye (2022)

aproveitamento de energia das ondas aproveitando o movimento das *heave plates*, como proposto por Liu *et al.* (2022). Porém, para toda nova tecnologia de estruturas flutuantes, existe a necessidade de caracterizar o seu comportamento hidrodinâmico, para assim, poder prever as condições adequadas de operação, identificar eventuais riscos de falha e outros desafios operacionais que possam surgir durante a sua vida útil.

A caracterização hidrodinâmica das estruturas flutuantes, incluindo a avaliação dos seus movimentos em diversas condições de ondas, pode contribuir no planejamento de medidas preventivas para garantir a segurança e o desempenho adequado das estruturas flutuantes ao longo do tempo.

Devido à facilidade de construção e às características de estabilidade vertical que apresentam as estruturas monocoluna, reforçadas com *heave plates*, como têm sido documentado em diversas áreas da engenharia, o presente trabalho visa pesquisar os movimentos de uma estrutura similar que possa ser introduzida para diversas aplicações na região amazônica no futuro.

A plataforma considerada consiste no modelo proposto por Amin *et al.* (2020) e Amin *et al.* (2022b), pois se trata de um modelo simplificado que pode ser estendido para desenvolver diversas aplicações e que possui dados experimentais disponíveis na literatura, úteis para fins de validação.

O presente estudo visa o estudo dos movimentos verticais dessa estrutura utilizando métodos da teoria potencial de hidrodinâmica disponível na versão acadêmica do *software Ansys Aqwa*. A partir dos resultados obtidos, espera-se contribuir com um procedimento de análise que sirva como base para orientar o estudo de estruturas flutuantes mais seguras, eficientes e sustentáveis, alinhadas com as particularidades e desafios hidrográficos da Amazônia e outras regiões no mundo.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Avaliar os movimentos de *heave* e *pitch* de uma plataforma monocoluna com *heave plate* em ondas regulares, utilizando métodos de escoamento potencial disponíveis no software *Ansys Aqwa*.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar estudos recentes de estruturas flutuantes, particularmente do tipo monocoluna com *heave plate*.
- Modelar e avaliar a dinâmica do modelo de estrutura flutuante monocoluna proposto por Amin *et al.* (2020), cuja pesquisa proporciona dados experimentais que podem ser usados para validação.
- Avaliar os movimentos verticais (*heave* e *pitch*) da estrutura flutuante considerada, utilizando métodos de escoamento potencial disponíveis na versão acadêmica do software *Ansys Aqwa*.
- Comparar os resultados numéricos com os apresentados de maneira experimental na literatura.
- Analisar três casos de estudo com estruturas de diferente tamanho, estudando os seus movimentos verticais e coeficientes hidrodinâmicos para diversas condições de ondas regulares.
- Verificar os efeitos da resolução da malha nos movimentos dos casos de estudo.
- Avaliar os efeitos da variação do calado nos movimentos dos casos de estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SOFTWARE UTILIZADO

Para avaliar os movimentos da estrutura flutuante do presente estudo, foram utilizados métodos baseados na teoria potencial de hidrodinâmica. Tais métodos se encontram disponíveis no software *Hydrodynamic Diffraction*, disponível no *Ansys Aqwa*.

De acordo com ANSYS (2012), *Ansys Aqwa* é um software de simulação hidrodinâmica que é amplamente utilizado na indústria marítima e *Offshore* para realizar análises e simulações relacionadas à interação entre estruturas e o ambiente aquático.

2.1.1 Principais recursos e funcionalidades

No que diz respeito à funcionalidades e recursos disponíveis durante a utilização do software *Ansys Aqwa*, tem-se que:

- **Análise de Hidrodinâmica:** Permite avaliar a interação hidrodinâmica entre estruturas e ondas, podendo calcular as forças, momentos e movimentos resultantes em plataformas *Offshore*, navios, diques, boias, entre outras estruturas navais e oceânicas;
- **Modelagem de ondas:** Permite a modelagem e análise de distintos tipos de ondas, incluindo ondas regulares, multidirecionais, transitórias, e condições de mar irregular. Ele utiliza a teoria potencial de hidrodinâmica para calcular as forças exercidas pelas ondas nas estruturas;
- **Resposta no domínio da frequência e no domínio do tempo:** Suporta ambos tipos de análises, permitindo avaliar a resposta das estruturas em diferentes condições ambientais, tais como ondas e correntes ao longo do tempo;
- **Modelagem de aspectos não-lineares:** Oferece alguns recursos para levar em conta efeitos não lineares durante as interações da água com a estrutura, que podem ser importantes em algumas situações de análise;
- **Interação com outros módulos do *Ansys*:** Pode ser integrado com outros módulos do *Ansys*, permitindo simulações mais complexas e abrangentes, tais como análises de comportamento estrutural, fluidodinâmica computacional (CFD), análises térmicas, entre outras.

2.1.2 Aplicações

No que diz respeito às aplicações usuais do *software Ansys Aqwa*, tem-se as seguintes:

- Estudo e projeto de estruturas *Offshore*, tais como plataformas de petróleo e gás, parques eólicos marítimos e instalações de aquicultura;

- Estudo da interação das ondas com estruturas costeiras, como diques e quebra-mares;
- Análise de resposta de navios e embarcações a ondas e correntes;
- Estudos de viabilidade para projetos de energias renováveis oceânicas, como energia das ondas e energia maremotriz.

2.1.3 Benefícios

O uso do *software Ansys Aqwa* pode contribuir com alguns benefícios para a indústria marítima e *Offshore*, tais como:

- Redução de custos e riscos de projetos, pois permite simular e otimizar o desempenho das estruturas antes de sua implementação física;
- Melhoria da segurança, já que proporciona uma compreensão mais detalhada dos efeitos hidrodinâmicos e das forças que as estruturas podem enfrentar em condições reais;
- Capacidade de avaliar diferentes cenários e condições ambientais, contribuindo na tomada de decisões mais informadas ao longo do ciclo de vida do projeto;
- Estudos de viabilidade para projetos de energias renováveis oceânicas, como energia das ondas e energia maremotriz.

Em síntese, o *Ansys Aqwa* é uma ferramenta bastante útil para a simulação hidrodinâmica, permitindo que engenheiros e pesquisadores compreendam, avaliem, e otimizem o comportamento de diversas estruturas flutuantes, em resposta às ondas e outras condições marítimas, ajudando no aumento da eficiência e segurança de projetos marítimos e *Offshore*.

2.2 PRINCIPAIS CONCEITOS DA TEORIA DE ESCOAMENTO POTENCIAL

A teoria de escoamento potencial, conhecida em inglês como *Potential Flow Theory*, está baseada em modelos matemáticos de Hidrodinâmica para descrever o comportamento das ondas em corpos d'água, como oceanos, mares, lagos e canais. Essa teoria é amplamente utilizada na engenharia marítima, oceanografia e outras disciplinas relacionadas para entender como as ondas se propagam e interagem com estruturas costeiras e marítimas. Explicações mais detalhadas podem ser encontradas nos livros dos professores Newman (2018) e Faltinsen (1993).

- Fluidos irrotacionais: A teoria do escoamento potencial da água pressupõe que o fluido (água) é irrotacional, ou seja, não há rotação local em qualquer ponto do fluxo. Essa suposição é válida quando a viscosidade do fluido é baixa e os efeitos de rotação são desprezíveis. Também pode se entender como vorticidade nula.

- Incompressibilidade do fluido: A água é considerada incompressível, o que significa que sua densidade permanece constante ao longo do tempo. Essa suposição é razoável para muitas aplicações envolvendo ondas em corpos d'água, uma vez que as variações de pressão são pequenas em comparação com a densidade da água.

A base matemática da teoria potencial da água é a Equação de Laplace, que descreve o comportamento do potencial do fluxo (φ) em um fluido irrotacional e incompressível. Em outras palavras, essa equação diferencial é a que governa o problema de escoamento potencial. A Equação de Laplace é dada por:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (1)$$

sendo ∇^2 o operador Laplaciano, que representa a soma das segundas derivadas parciais em relação às coordenadas espaciais (x, y, z); e φ o potencial do escoamento, uma função matemática que descreve as características do fluxo de água e das ondas e que geralmente é a incógnita a ser encontrada.

A velocidade do escoamento V pode ser relacionada ao potencial do fluxo (φ) através do gradiente do potencial:

$$V = \nabla \varphi \quad (2)$$

A Equação (2) mostra que a velocidade do fluido é igual ao gradiente do potencial do fluxo em um fluido irrotacional.

Para resolver problemas práticos com a teoria do escoamento potencial, é necessário definir condições de contorno adequadas nas superfícies livres da água e nas estruturas. As condições de contorno são essenciais para simular com precisão a propagação das ondas e a interação com as estruturas.

A teoria do escoamento potencial é aplicada em várias áreas da engenharia naval e oceânica, incluindo:

- Previsão de ondas e estudos de clima marinho. Exemplo: Weizhi Wang *et al.* (2022).
- Projeto e análise de estruturas marítimas, como plataformas, diques e quebra-mares. Exemplo: Han e CM Wang (2022).
- Simulação da interação entre ondas e embarcações. Exemplo: Noblesse e Hendrix (1992).
- Estudos de energia das ondas para aproveitamento de energia renovável. Exemplo: Papillon, Costello e Ringwood (2020).

Em resumo, a teoria de escoamento potencial é uma ferramenta essencial para entender e analisar o comportamento das ondas em ambientes marinhos e costeiros. Ela fornece uma base teórica sólida para abordar questões complexas relacionadas à propagação

de ondas e sua influência em estruturas costeiras e marítimas. No entanto, é importante considerar que não permite simular os efeitos de viscosidade da água no escoamento, o que pode ser relevante em regiões muito próximas à superfície do corpo em estudo.

2.3 DINÂMICA DE UM FLUTUANTE

Os movimentos de uma estrutura flutuante pode ser estudada por meio da teoria do corpo rígido, considerando a estrutura indeformável com uma massa invariável.

Conforme explicado acima, pode-se explicar que as equações do movimento de um corpo rígido são definidas em um sistema de coordenadas fixo, que a segunda lei de Newton. As equações vetoriais para as translações e rotações em torno do centro de gravidade são dadas por:

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{U})}{dt} \quad (3)$$

$$\vec{M} = \frac{d(\vec{H})}{dt} \quad (4)$$

Sendo:

- \vec{F} = força externa resultante agindo no centro de gravidade.
- m = massa do corpo rígido.
- \vec{U} = velocidade instantânea no centro de gravidade.
- \vec{M} = momento externo resultante agindo sobre o centro de gravidade.
- \vec{H} = momento angular instantâneo sobre o centro de gravidade.

Com essa hipótese, uma massa poderá ter seis graus de liberdade possíveis, sendo três deslocamentos de translação e três de rotação. Tais deslocamentos poderão ser avaliados de forma desacoplada (i.e., os seis movimentos independentes) ou acoplada (i.e., os seis movimentos interagindo entre eles).

Uma maneira de representar os movimentos de estruturas flutuantes é por meio da teoria de vibrações mecânicas, considerando equações massa-mola-amortecedor. Essas equações permitem descrever movimentos acoplados e desacoplados, podendo ser usadas para descrever sistemas mecânicos que envolvem movimentos de rotação e translação simultaneamente. A escolha entre usar as equações acopladas ou desacopladas depende da natureza do sistema e das propriedades dos elementos massa-mola-amortecedor envolvidos. Em alguns casos, a acoplamento entre os modos de movimento pode ser significativo, exigindo a utilização das equações acopladas para uma análise mais precisa. Em outros casos, o acoplamento pode ser negligenciado, permitindo o uso das equações desacopladas para uma simplificação da análise. No presente trabalho serão avaliados os movimentos desacoplados de uma estrutura flutuante.

2.3.1 Movimentos desacoplados

De acordo com Journée e Massie (2001) os seis graus de liberdade de uma embarcação resultantes em relação ao sistema de translação constante $O(x,y,z)$ são definidos por três equações que representam a translação do centro de gravidade (CG) na direção dos eixos x -, y - e z -, mais três equações que representam a rotação sobre eles:

$$\text{Surge} : x = x_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_x \zeta) \quad (5)$$

$$\text{Sway} : y = y_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_y \zeta) \quad (6)$$

$$\text{Heave} : z = z_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_z \zeta) \quad (7)$$

$$\text{Roll} : \phi = \phi_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_\phi \zeta) \quad (8)$$

$$\text{Pitch} : \theta = \theta_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_\theta \zeta) \quad (9)$$

$$\text{Yaw} : \psi = \psi_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_\psi \zeta) \quad (10)$$

Em cada uma das equações descritas, ε representa o ângulo de fase entre o movimento e a elevação da onda (ζ), e ω_e a frequência de encontro da onda com a embarcação. As mudanças de fase dos movimentos estão relacionadas à elevação de onda na origem do eixo $O(x,y,x)$. A origem desse eixo está localizada na posição do centro de gravidade da embarcação estudada. A elevação de onda no CG ou O pode se definir como segue:

$$\zeta = \zeta_a \cos(\omega_e t) \quad (11)$$

As velocidades e acelerações harmônicas na coordenada $O(x,y,z)$ são encontrados realizando as derivadas dos deslocamentos, como expressado na Equação (12), a Equação (13) e a Equação (14), que foram descritas por Journée e Massie (2001) para o movimento desacoplado de *heave*:

$$\text{Deslocamento} : z = z_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_z \zeta) \quad (12)$$

$$\text{Velocidade} : \dot{z} = -\omega_e z_a \sin(\omega_e t + \varepsilon_z \zeta) \quad (13)$$

$$\text{Aceleração} : \ddot{z} = -\omega_e^2 z_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_z \zeta) \quad (14)$$

2.3.2 Movimentos acoplados

A matriz massa e inércia de uma estrutura flutuante com uma massa invariável no tempo pode ser descrita de acordo com Journée e Massie (2001) como:

$$m = \begin{pmatrix} \rho \nabla & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho \nabla & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \rho \nabla & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_{xx} & 0 & -I_{xz} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_{zx} & 0 & I_{zz} \end{pmatrix} \quad (15)$$

Nota-se na matriz acima que as três primeiras linhas e colunas estão relacionadas com os três movimentos de translação do sistema, nos quais a massa permite quantificar a oposição à translação. Por outro lado, as três últimas linhas e colunas estão relacionadas com os movimentos de rotação. Na matriz de inércia mostrada acima, o tensor de inércia indica apenas os momentos principais de inércia e os produtos de inércia I_{zx} e I_{xz} , os quais indicam um acoplamento parcial de movimento de rotação. Porém, é importante mencionar que caso o tensor de inércia esteja completo, podemos representar um acoplamento em todas as rotações. Se os produtos de inércia são nulos, então a matriz de massa e inércia possuirá apenas a diagonal, indicando que os seis movimentos possíveis serão desacoplados.

Para fins práticos, os momentos de inercia são podem ser expressados em termos do raio de giração com relação aos eixos principais (k) e a massa invariável da estrutura ($\rho \nabla$):

$$I_{xx} = K_{xx}^2 \cdot \rho \nabla \quad (16)$$

$$I_{yy} = K_{yy}^2 \cdot \rho \nabla \quad (17)$$

$$I_{zz} = K_{zz}^2 \cdot \rho \nabla \quad (18)$$

As forças e momentos hidromecânicos são induzidos pelos movimentos oscilatórios do corpo rígido, enquanto esse corpo se move no fluido sem perturbações. Os momentos e as forças de excitação das ondas são produzidos por ondas que vêm em direção ao corpo. Como o sistema é linear, as forças e momentos já mencionados são adicionados para se obter as cargas totais. Ao assumir pequenos deslocamentos angulares, a simetria do corpo e o eixo x-, y-, e z- como principais eixos, são definidas as seguintes seis equações de movimentos para uma estrutura flutuante:

$$Surge : \frac{d}{dt}(\rho \nabla \cdot \dot{x}) = \rho \nabla \cdot \ddot{x} = X_{h1} + X_{w1} \quad (19)$$

$$Sway : \frac{d}{dt}(\rho \nabla \cdot \dot{y}) = \rho \nabla \cdot \ddot{y} = X_{h2} + X_{w2} \quad (20)$$

$$Heave : \frac{d}{dt}(\rho \nabla \cdot \dot{z}) = \rho \nabla \cdot \ddot{z} = X_{h3} + X_{w3} \quad (21)$$

$$Roll : \frac{d}{dt}(I_{xx} \cdot \dot{\phi} - I_{xz} \cdot \dot{\psi}) = I_{xx} \cdot \ddot{\phi} - I_{xz} \cdot \ddot{\psi} = X_{h4} + X_{w4} \quad (22)$$

$$\text{Pitch} : \frac{d}{dt}(I_{yy} \cdot \dot{\theta}) = I_{xx} \cdot \ddot{\theta} = X_{h5} + X_{w5} \quad (23)$$

$$\text{Yaw} : \frac{d}{dt}(I_{zz} \cdot \dot{\psi} - I_{zx} \cdot \dot{\phi}) = I_{zz} \cdot \ddot{\psi} - I_{zx} \cdot \ddot{\phi} = X_{h6} + X_{w6} \quad (24)$$

sendo:

- ρ = densidade da água.
- ∇ = volume deslocado da embarcação.
- I_{ij} = momento de inércia da embarcação.
- X_{h1}, X_{h2}, X_{h3} = forças hidromecânicas na direção x-, y- e z- respectivamente.
- X_{h4}, X_{h5}, X_{h6} = momentos hidromecânicos na direção x-, y- e z- respectivamente.
- X_{w1}, X_{w2}, X_{w3} = forças de excitação das ondas na direção x-, y- e z- respectivamente.
- X_{w4}, X_{w5}, X_{w6} = momento de excitação das ondas na direção x-, y- e z- respectivamente.

Conhecendo a massa do corpo flutuante e sua distribuição dentro do corpo, é possível descrever as equações acopladas do movimento para os seis graus de liberdade. Baseado novamente, na segunda lei de Newton, as equações gerais podem ser descritas como:

$$\sum_{j=1}^6 m_{ij} \cdot \ddot{x}_j = F_i \quad (25)$$

para $i = 1, \dots, 6$ Sendo:

- m_{ij} = matriz de ordem 6x6 da massa sólida e momento de inércia do corpo.
- \ddot{x}_j = aceleração do corpo na direção j.
- F_i = soma das forças e momentos agindo na direção i.

Quando se define um sistema linear, com movimentos harmônicos simples de forças e momentos de excitação de ondas dados por:

$$F_{w_i}(w_e, t) = F_{wa_i}(w_e) \cdot \cos(w_e t + \varepsilon F_i(w_e)) \quad (26)$$

Os movimentos harmônicos simples resultantes são:

$$x_j(w_e, t) = x_{a_i}(w_e) \cdot \cos(w_e t) \quad (27)$$

$$\dot{x}_j(w_e, t) = -w_e \cdot x_{a_i}(w_e) \cdot \sin(w_e t) \quad (28)$$

$$\ddot{x}_j(w_e, t) = -w_e^2 \cdot x_{a_i}(w_e) \cdot \cos(w_e t) \quad (29)$$

As forças hidromecânicas e momentos F_{ij} agindo no corpo oscilando em águas calmas consistem em forças e momentos de reação hidrodinâmicas lineares expressos em termos da massa hidrodinâmica e coeficientes de amortecimento:

$$-a_{i,j}(w_e) \cdot \ddot{x}_j(w_e, t) - b_{i,j}(w_e) \cdot \dot{x}_j(w_e, t) \quad (30)$$

Forças e momentos hidrostáticos de restauração expressados em termos do coeficiente de mola:

$$-c_{i,j} \cdot \dot{x}_j(w_e, t) \quad (31)$$

Fazendo Equação (31), Equação (30), Equação (29) e Equação (26) em Equação (32), tem-se a equação geral linear de movimento para os seis graus de liberdade, no domínio da frequência:

$$\sum_{j=1}^6 \{(m_{ij} + a_{ij}(w_e)) \cdot \ddot{x}_j(w_e, t) + b_{i,j}(w_e) \cdot \dot{x}_j(w_e, t) + c_{i,j} \cdot \dot{x}_j(w_e, t)\} = F_{wa_i}(w_e) \cdot \cos(w_e t + \varepsilon(w_e)) \quad (32)$$

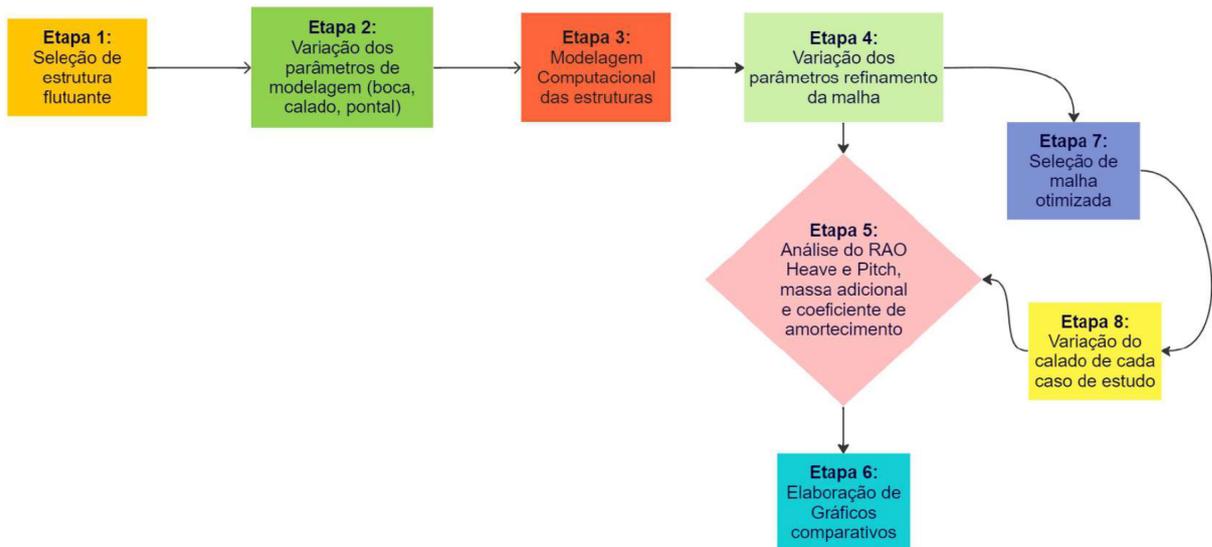
3 METODOLOGIA

3.1 DIAGRAMA DE FLUXO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Este capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia aplicada para o desenvolvimento dos objetivos propostos, abordando cada processo do estudo desenvolvido.

O objetivo deste estudo é analisar os operadores de amplitude de resposta do movimento ao longo do eixo vertical (*heave*), ao redor do eixo transversal (*pitch*), juntamente com os coeficientes hidrodinâmicos (de amortecimento e massa adicional) de uma estrutura cilíndrica flutuante. O principal foco é obter resultados para análise do comportamento da estrutura conforme seus parâmetros variam. Este estudo tem como escopo a execução de 7 etapas de desenvolvimento, que expõe desde a seleção e geração da geometria da estrutura flutuante as discussões finais dos resultados obtidos, como mostrado na Figura 8. A seguir, são descritas cada uma das etapas consideradas na metodologia.

Figura 8 – Fluxograma proposto para desenvolver o presente estudo.



Fonte: Autor (2023).

Etapa 1: A modelagem do casco foi fundamentada na estrutura modelada por Amin *et al.* (2020), visando a possibilidade de propor uma estrutura flutuante de construção prática para a região amazônica. As dimensões da estrutura foram obtidas do artigo de Amin *et al.* (2020), que também apresentou dados experimentais, úteis para fins de validação.

Etapa 2: Nesta etapa, analisaram-se os tamanhos de estruturas flutuantes convencionais utilizadas na região amazônica. Assim, foram estabelecidas três variações de dimensões, diferenciando pelas características principais, como a boca, pontal e calado.

Etapa 3: Nessa etapa a estrutura flutuante foi modelada no *software Rhinoceros*, com o objetivo de importar a melhor extensão de arquivo .igs para o *Ansys Aqwa*.

Etapa 4: Após a modelagem dos 3 casos no *Rhinoceros*, a análise por *Hydrodynamic Diffraction* é iniciada no *Ansys Aqwa*. Nesta etapa é analisado para cada caso o comportamento limite das malhas no software. De início, a malha padrão automática é registrada em uma tabela. As demais malhas são testadas até o limite permitido e em seguida também são registradas.

Etapa 5: Nessa etapa, a análise completa é feita no *Hydrodynamic Diffraction*. Nela são analisados os movimentos de *heave*, *pitch*, massa adicional e coeficientes de amortecimento.

Etapa 6: Com os valores obtidos de cada refinamento de malha para cada caso de estrutura, são feitos gráficos comparativos.

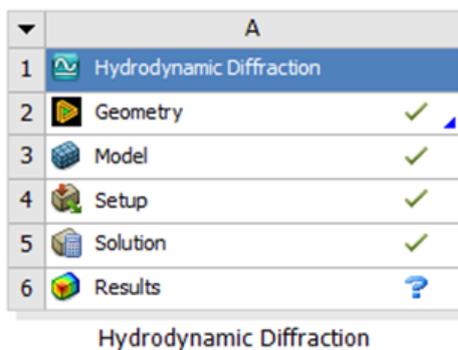
Etapa 7: Nessa etapa, os gráficos de resultados são averiguados para definir o refinamento de malha que será usado para seguir com a variação do próximo parâmetro.

Etapa 8: Nessa etapa, o calado das estruturas é variado para realização de novos estudos de comportamento dos movimentos, e em seguida o processo retorna para a etapa 5 e 6.

3.2 DESCRIÇÃO DO SOFTWARE ANSYS AQWA

O sistema de análise *Hydrodynamic Diffraction* do *Ansys Aqwa*, mostrado na Figura 9, fornece um ambiente integrado, que permite avaliar os principais parâmetros hidrodinâmicos necessários para analisar movimentos complexos e respostas em ambientes aquáticos de diversas estruturas flutuantes. É possível conduzir análises tridimensionais de radiação e difração linear, considerando a interação hidrodinâmica entre vários corpos.

Figura 9 – Aparência das ferramentas do *software Hydrodynamic Diffraction*.

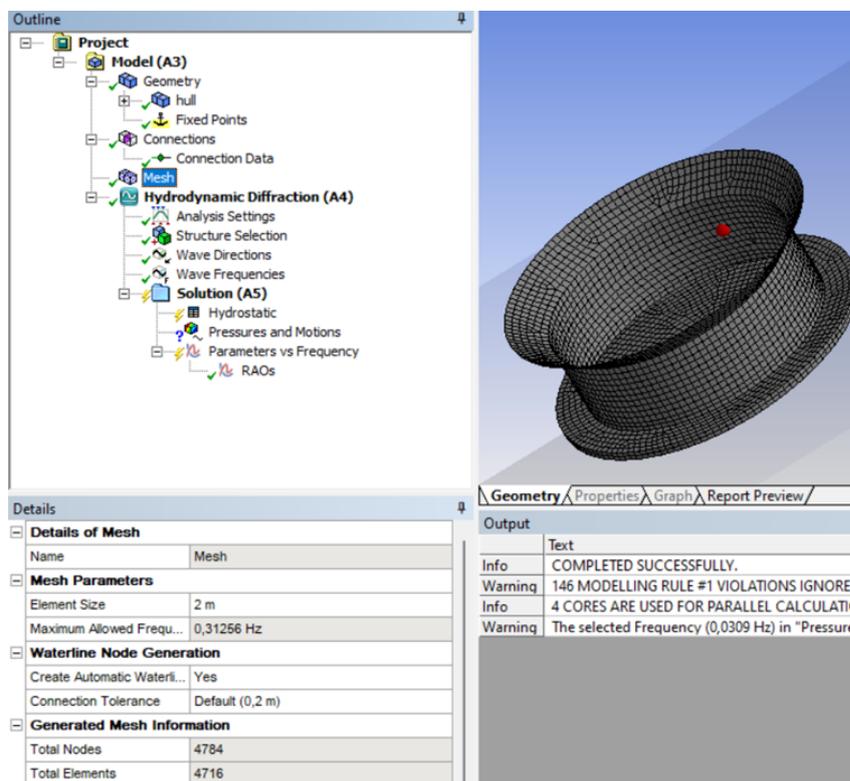


Fonte: Autor (2023).

No momento em que é definida a malha, é possível modificar o tamanho do elemento de malha desejado, conforme representado na Figura 10. Observa-se que a malha tem

elementos máximos definidos pelo software, todavia os mesmos podem ser modificados. Cabe mencionar que no presente estudo foi utilizada a versão acadêmica do software, tendo restrições no refinamento da malha.

Figura 10 – Exemplo definição de malha.



Fonte: Autor (2023).

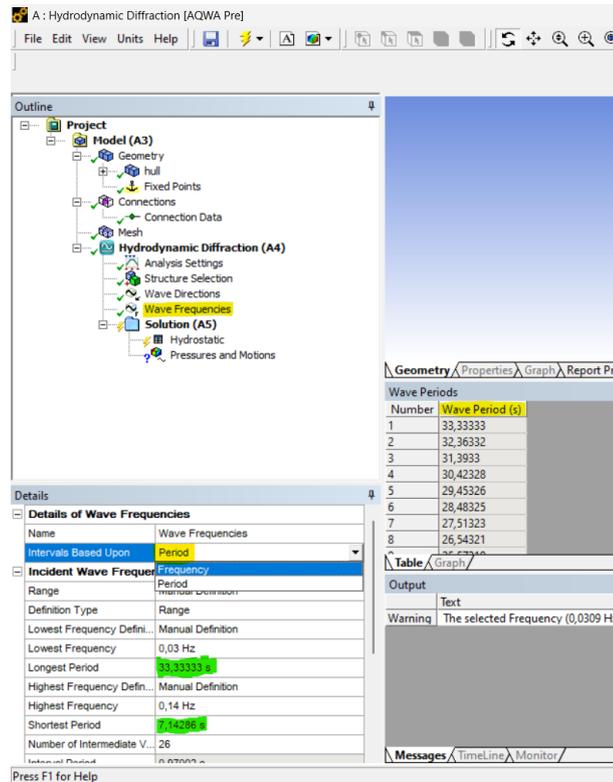
No *Ansys* é possível obter os resultados tanto no domínio da frequência (Hz e rad/s) quanto no domínio do período (tempo em segundos) como demonstra a Figura 11, sem ser preciso fazer os cálculos para modificar esses parâmetros. Outra possibilidade no software é definir o início e o fim desses intervalos. O programa faz a definição automática, porém é possível fazer a mudança para definição manual do usuário.

Após definidas as frequências das ondas, é necessário fazer a geração da solução hidrostática antes de prosseguir para a geração dos parâmetros de movimento da estrutura. Existem seis opções, para o estudo em questão foi usado Distância/Rotação vs Frequência (Figura 12).

O sistema de eixos coordenados definidos no *software Ansys Aqwa* é representado pela Figura 13.

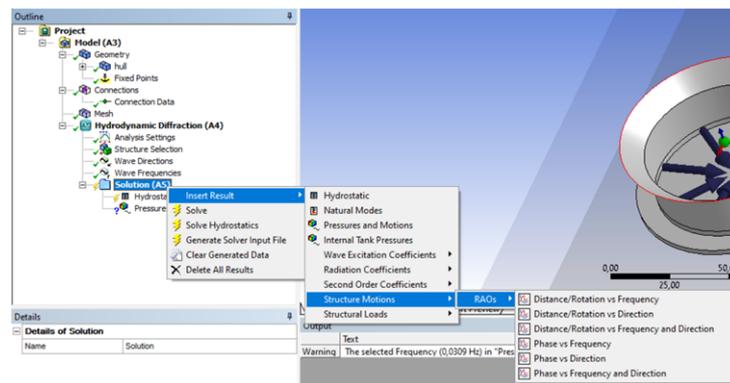
Na Figura 14, é demonstrado que é possível selecionar a componente que será verificada; no *print* em questão o exemplo é da componente global x.

Figura 11 – Definição domínio da frequência da onda.



Fonte: Autor (2023).

Figura 12 – Geração da solução hidrostática.

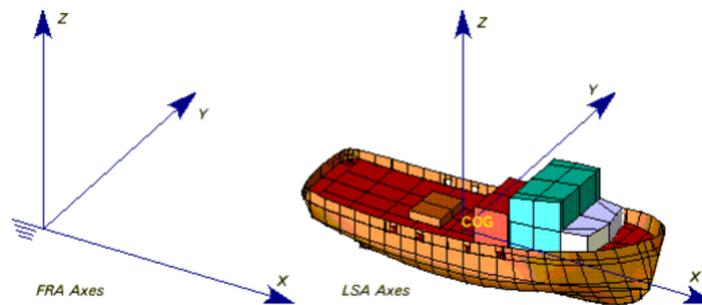


Fonte: Autor (2023).

3.3 CONFIGURAÇÃO DO TESTE NUMÉRICO

A Figura 15 representa as 4 vistas da estrutura flutuante modelada no *software Rhinoceros*, incluindo a vista de cima, do lado boreste, bombordo e uma de perspectiva; o eixo de origem da figura fica em seu centro de gravidade. É importante notar que a estrutura proposta é simétrica e todos os três casos de estudo foram modelados conforme

Figura 13 – Eixos coordenados utilizados no *software Ansys Aqwa*.



Fonte: Aqwa Reference Manual (2012).

Figura 14 – Geração das curvas de RAO.

Details	
Details of RAOs	
Name	RAOs
Line Inputs	
Structure	hull
Type	RAOs
Component	Global X
Direction	-3,14159 rad
Reference Point	Center of Gravity (hull)
Motion Relative To	Origin of Fixed Reference Axes (FRA)

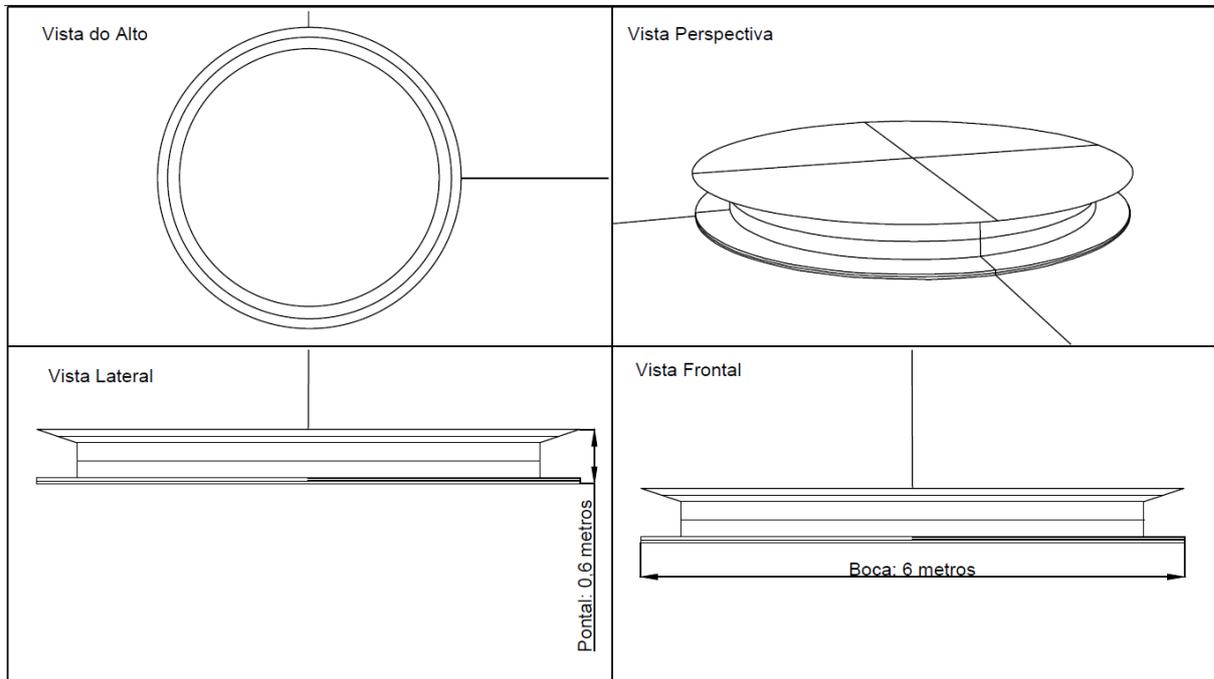
Fonte: Autor (2023).

representa-se nesta figura.

A Tabela 1 retrata os parâmetros em metros, usados para definir as dimensões do casco da estrutura modelada.

Para a definição da unidade dimensional da malha, foi utilizado o padrão do próprio software. O valor de malha padrão é dado automaticamente ao importar a estrutura na etapa 4, os demais valores, tanto o pouco refinado quanto o muito refinado, foram testados

Figura 15 – Vistas do modelo da estrutura flutuante.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 1 – Dimensões das estruturas.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Boca (m)	6	10	15
Pontal (m)	0,6	1,0	1,5
Calado (m)	0,270	0,450	0,675

Fonte: Autor (2023).

um a um, respeitando os limites suportados pelo *Ansys* devido a licença de uso estudantil. Assim foi feito para todos os casos, gerando a Tabela 2.

Tabela 2 – Dados para o refinamento das malhas.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Malha pouco refinada (m)	0,480	0,715	1,2
Malha padrão (m)	0,38104	0,61091	0,95259
Malha muito refinada (m)	0,205	0,299	0,5

Fonte: Autor (2023).

A Figura 16 mostra os detalhes da malha padrão proporcionados pelo software.

A Figura 17, Figura 18 e Figura 19 demonstram uma comparação para o caso 3 de como é observado no software a geração dessas malhas.

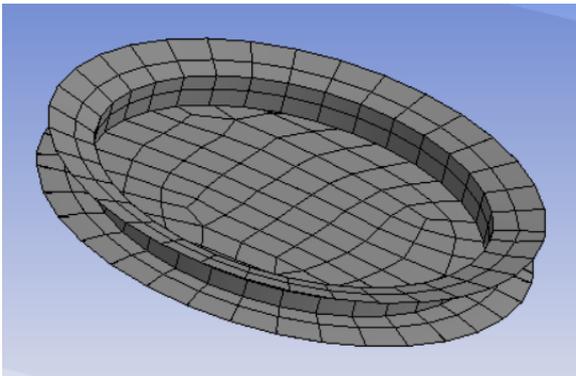
Para a próxima comparação, após feita a análise da malha mais otimizada, foi feita a variação do parâmetro de calado. Três calados diferentes para cada um dos 3 casos de

Figura 16 – Malha padrão.

Details	
Details of Mesh	
Name	Mesh
Mesh Parameters	
Element Size	Default (1,04351 m)
Maximum Allowed Frequ...	0,4622 Hz (Estimated from input)
Waterline Node Generation	
Create Automatic Waterli...	Yes
Connection Tolerance	Default (0,10435 m)

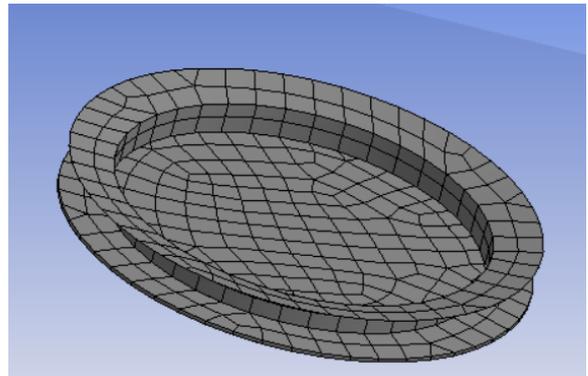
Fonte: Autor (2023).

Figura 17 – Malha pouco refinada caso 3.



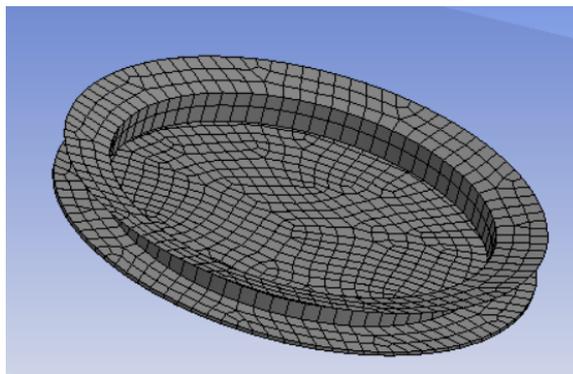
Fonte: Autor (2023).

Figura 18 – Malha padrão caso 3.



Fonte: Autor (2023).

Figura 19 – Malha muito refinada caso 3.



Fonte: Autor (2023).

estudo, como demonstrado na Tabela 3:

Os valores dos momentos de inércia das estruturas analisadas foram estimados baseados no cálculo para um cilindro oco de paredes finas. No software esses valores são

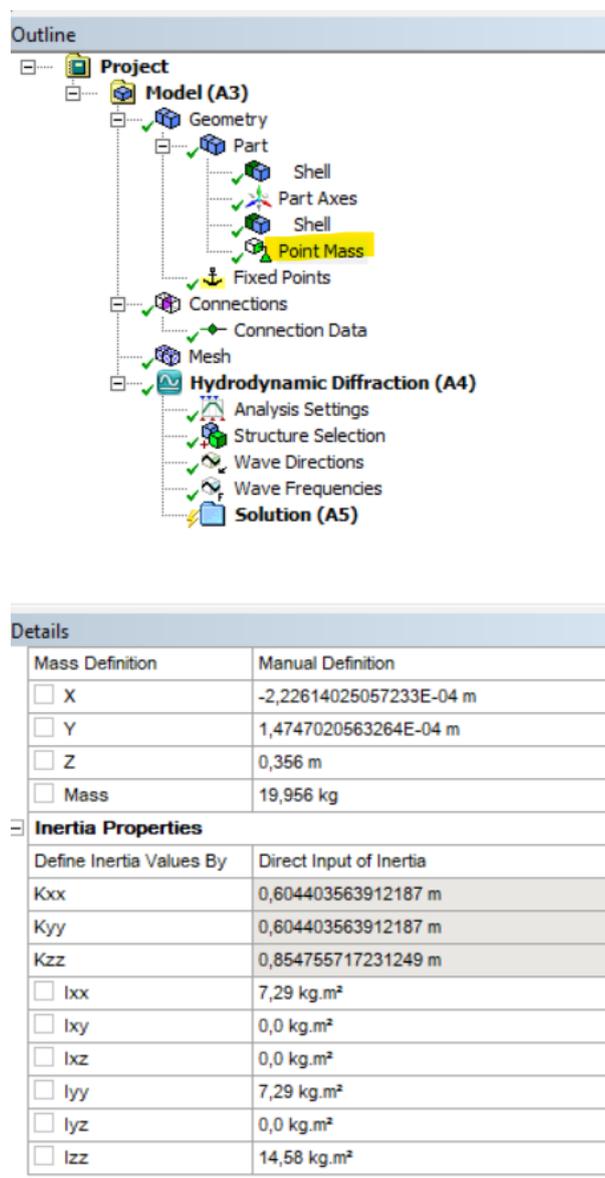
Tabela 3 – Valores de calado.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Calado 1 (m)	0,270	0,450	0,675
Calado 2 (m)	0,170	0,250	0,475
Calado 3 (m)	0,370	0,650	0,875

Fonte: Autor (2023).

inseridos representados por uma massa pontual como mostra a Figura 20, o Z é o VCG da estrutura.

Figura 20 – Definição massa pontual.



Fonte: Autor (2023).

As definições de ambiente são definidas conforme a área de estudo (Figura 21), no

caso da região amazônica em específico o Rio Negro, é usado como referência a profundidade da água de 90 metros e a densidade da água doce.

Figura 21 – Definição constantes do ambiente.

Details of Geometry	
Name	Geometry
Attached Assembly Path	C:\Users\DELL\AppData\Local\Temp\WB_...
Environment Constants	
<input type="checkbox"/> Water Depth	90 m
<input type="checkbox"/> Water Density	1000 kg/m ³
<input type="checkbox"/> Gravity	9,80665 m/s ²
Water Size X	48 m
Water Size Y	30 m
Stability/Time Response-Specific Options	

Fonte: Autor (2023).

3.4 DESCRIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO

Foram definidos de início, três casos de estudo para variação do refinamento da malha suportado pelo *software Ansys Aqwa*. Conforme a Tabela 4, foi avaliado o comportamento do movimento de *heave*, *pitch*, assim como dos coeficientes de amortecimento e massa adicional, para três tamanhos diferentes de estruturas, com três tamanhos diferentes de malha. Foram usados códigos para identificar cada caso de estudo a ser avaliado com o software.

Tabela 4 – Casos de estudo para avaliar o refinamento das malhas.

	Caso 1 (C1)	Caso 2 (C2)	Caso 3 (C3)
<i>Heave</i> (A)	C1M1A	C2M1A	C3M1A
	C1M2A	C2M2A	C3M2A
	C1M3A	C2M3A	C3M3A
<i>Pitch</i> (B)	C1M1B	C2M1B	C3M1B
	C1M2B	C2M2B	C3M2B
	C1M3B	C2M3B	C3M3B
Coeficientes de Amortecimento (C)	C1M1C	C2M1C	C3M1C
	C1M2C	C2M2C	C3M2C
	C1M3C	C2M3C	C3M3C
Massa adicional (D)	C1M1D	C2M1D	C3M1D
	C1M2D	C2M2D	C3M2D
	C1M3D	C2M3D	C3M3D

Fonte: Autor (2023).

A mesma estrutura tabular pode ser concebida quando a profundidade do casco (calado) é modificada, efetuando-se exclusivamente a substituição dos termos C1, C2 e C3 por Ca1, Ca2 e Ca3.

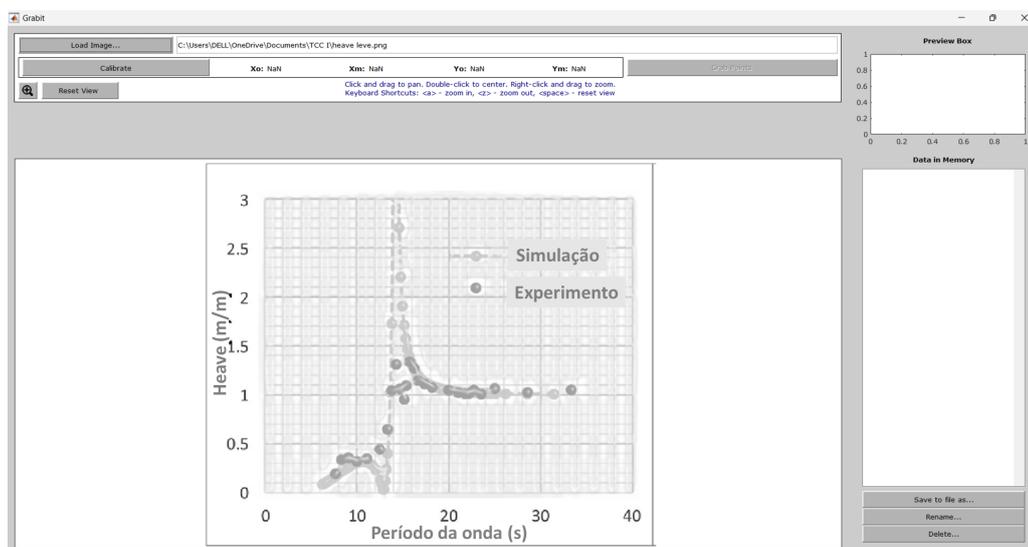
3.5 OBTENÇÃO DE DADOS PELO *SOFTWARE MATLAB*

Conforme o propósito de efetuar uma análise comparativa entre os resultados experimentais mostrados na publicação de Amin *et al.* (2020) e aqueles obtidos de forma numérica no presente trabalho, derivados de um teste executado utilizando os parâmetros muito similares aos fornecidos na pesquisa original, procedeu-se com a obtenção dos dados gráficos por meio da aplicação da função *GrabIt* presente no ambiente *Matlab*. A funcionalidade do procedimento mencionado se baseia na captura dos pontos de dados através da interpretação de arquivos de imagem.

As seguintes etapas foram seguidas:

1. O arquivo de imagem é carregado como mostra a Figura 22.
2. As dimensões dos eixos são calibradas e quatro pontos são solicitados a serem selecionados na imagem.
3. Os pontos são selecionados clicando nos pontos da imagem. A imagem pode ser ampliada durante esta fase.
4. Múltiplos conjuntos de dados permanecerão na memória enquanto a GUI estiver aberta. As variáveis podem ser renomeadas, salvas em arquivo ou editadas no *Array Editor*.

Figura 22 – Print da função *GrabIt* no *Matlab*.



Fonte: Autor (2023).

4 RESULTADOS

4.1 TESTE DE VALIDAÇÃO

No presente estudo, um procedimento simplificado de validação (i.e., comparação dos dados numéricos com experimentais) foi implementado. A intenção principal foi conferir que os resultados obtidos com o método numérico representassem as principais ordens de magnitude e tendência dos experimentos. Cabe mencionar que o modelo utilizado não simula os efeitos viscosos da água, a qual pode ter significância em experimentos de escala reduzida. Por esse motivo, é importante salientar que a validação é simplificada.

A validação foi feita por meio de uma comparação dos resultados numéricos com os disponibilizados nos gráficos da publicação de Amin *et al.* (2020). Para isto, foi reproduzido, da maneira mais similar possível, um caso de estudo representativo dessa publicação. Primeiro são coletados os resultados provenientes do *Ansys* para o caso estudado. Os resultados são obtidos tanto em gráficos quanto em tabelas. Na Figura 23 é representado a forma como os resultados são exibidos, na coluna da esquerda é exibido o intervalo do período de tempo de onda, e no direito na denominada *line A*, estão os valores obtidos para o *heave* em (m/m).

Figura 23 – *Print* da exibição dos resultados finais no *Ansys*.

Tabulated Results Data	
Wave Period (s)	Line A (m/m)
33,33333	2,2701
32,36331	2,18999
31,39329	2,10544
30,42328	2,01327
29,45326	1,90627
28,48324	1,76404
27,51323	1,49652
26,54321	1,13022
25,57319	2,40271
24,60317	1,99823
23,63316	1,83101
22,66314	1,71491
21,69312	1,61806
20,7231	1,53042
19,75308	1,44782
18,78307	1,36818
17,81305	1,29032
16,84303	1,21349
15,87301	1,13717
14,903	1,06105
13,93298	0,98539
12,96296	0,9101
11,99294	0,82454
11,02293	0,74115
10,05291	0,65274
9,08289	0,5545
8,11287	0,42681
7,14286	0,27354

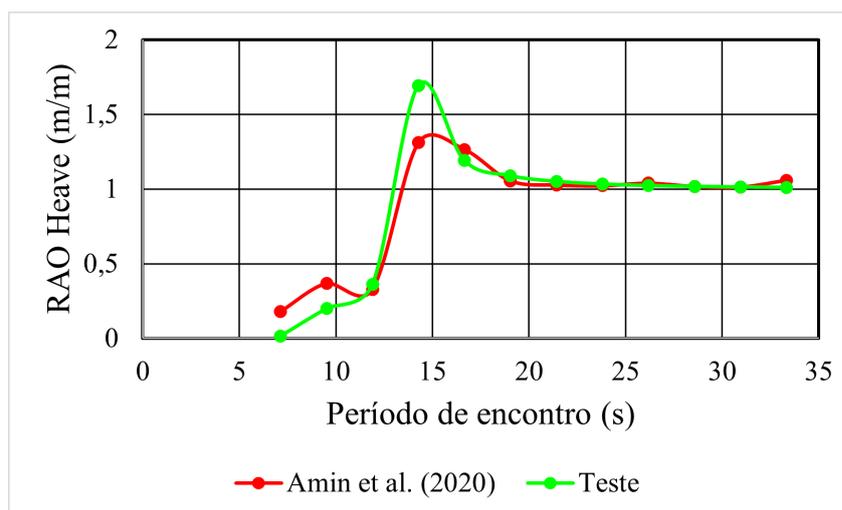
Fonte: Autor (2023).

Os valores a serem comparados são provenientes de uma análise feita utilizando como referência os dados encontrados em Amin *et al.* (2020). Os valores aproximados são

obtidos através da função *Grabit* do *Matlab*; assim é possível fazer um gráfico comparativo com os valores achados no *Ansys* e o do artigo.

Na Figura 24 tem-se o gráfico de comparação dos resultados numéricos (teste do presente estudo) e os dados experimentais de Amin *et al.* (2020), para o movimento de *heave*. O gráfico representa o Operador de Amplitude de Resposta (RAO - *Response Amplitude Operator*), que mostra os valores adimensionais do deslocamento (eixo vertical) em relação ao período de encontro com as ondas (eixo horizontal). A curva em verde representa os valores obtidos ao ser replicada a mesma experiência feita por Amin *et al.* (2020). Pode-se perceber que as curvas não coincidem de maneira exata nas magnitudes, mas que se tornam suficientemente correlatas e podem ser levados em consideração para os seguintes testes.

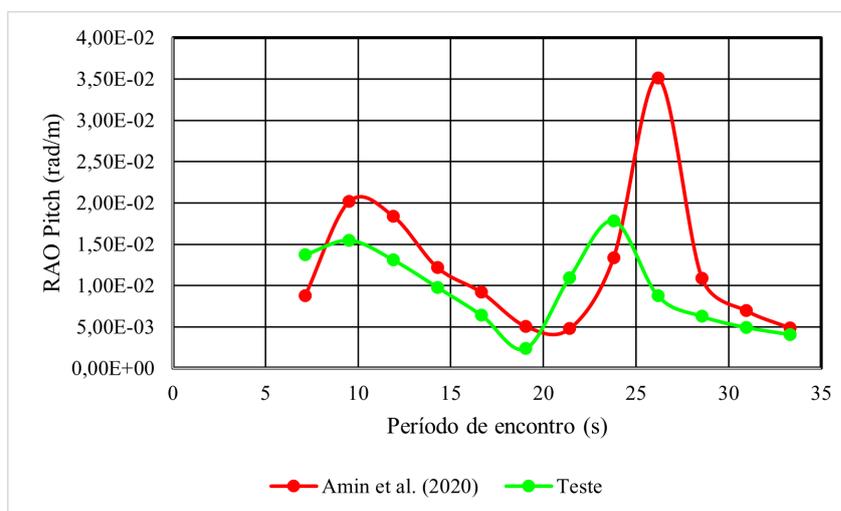
Figura 24 – Comparação dos resultados numéricos (teste) e experimentais (Amin *et al.* (2020)) do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *heave*.



Fonte: Autor (2023).

De maneira similar, na Figura 25 são mostrados os resultados para o movimento de *pitch*, onde pode ser observado um comportamento similar ao RAO da figura anterior. Embora existam diferenças na coincidência das amplitudes, ambas as curvas seguem tendências similares. Percebe-se que no período de encontro inicial é evidenciado uma diferença de valores tais que $y_{teste} = 0,01375 \text{ rad/m}$ e $y_{amin} = 0,0088 \text{ rad/m}$.

Figura 25 – Comparação dos resultados numéricos (teste) e experimentais (Amin *et al.* (2020)) do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *pitch*.



Fonte: Autor (2023).

4.2 TESTE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA PARA O CASO 1

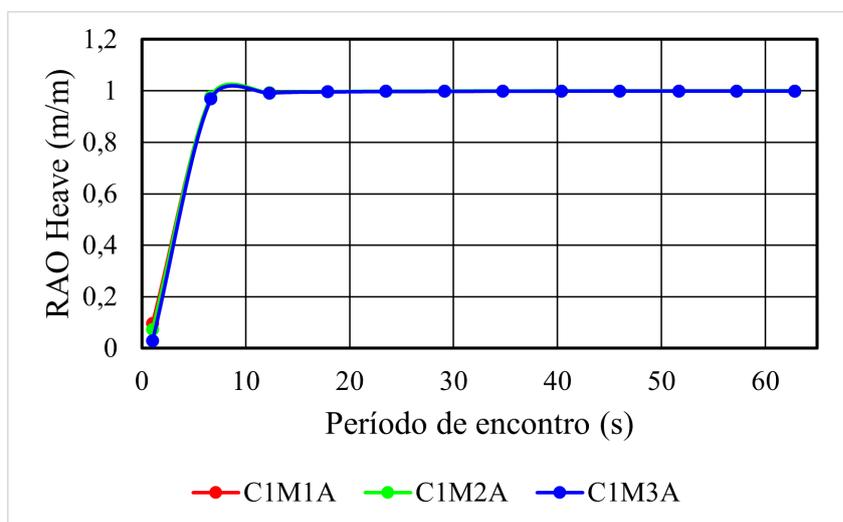
As representações gráficas a seguir consubstanciarão um padrão consistente de eixos, em que o eixo das abscissas denotará o período temporal de interação das ondas, expresso em segundos. O eixo das ordenadas, por sua vez, apresentará variações específicas para cada um dos gráficos em questão, abrangendo os domínios de Resposta em Amplitude em Oscilação Vertical (RAO *heave*, expresso em m/m), Resposta em Amplitude em Oscilação Angular em Arfagem (RAO *pitch*, expresso em graus por metro), coeficiente de amortecimento (expresso em newton por metros por segundo) e incremento de massa adicionada (expressa em quilos).

Cada uma das curvas delineadas nos gráficos ilustrará de modo abalizado o comportamento inerente a tais parâmetros, corroborando com as premissas abordadas previamente no que tange às suas respectivas oscilações e variações características.

Na Figura 26 é possível constatar que os resultados derivados da manipulação da estrutura de malha para a variável *heave* revelam uma notória proximidade entre os valores iniciais. Ao examinarmos a trajetória subsequente das curvas, evidencia-se de maneira manifesta a sua conformidade, com uma sobreposição notável entre as mesmas. Ademais, é digno de nota que os ápices das curvas também ostentam valores próximos entre si. Dessarte, deduz-se que, independentemente da configuração de malha empregada para monitorar as flutuações no *heave*, a obtenção de resultados otimizados é uma perspectiva factível, dado que a ausência de discrepâncias nos desfechos se manifesta de maneira proeminente.

Na Figura 27 emerge de maneira patente a discrepância entre os picos identificados

Figura 26 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *heave* para o caso 1.



Fonte: Autor (2023)

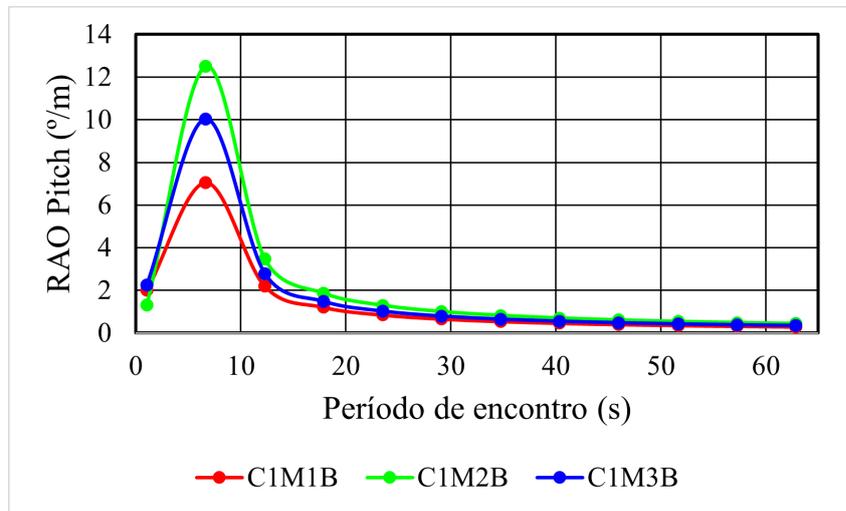
no contexto dos valores de *pitch*, os quais se apresentam distintamente sob os auspícios das diferentes configurações de malha. Para a primeira malha, verifica-se um valor máximo de $7,04174 \text{ } \circ/m$, enquanto a segunda malha culmina em um pico de $12,51442 \text{ } \circ/m$, e, por fim, a terceira malha exhibe um pico de $10,04052 \text{ } \circ/m$. É notável, adicionalmente, que todos esses ápices são registrados no mesmo intervalo temporal de $x=6,65$ segundos.

Mediante a meticulosa comparação das trajetórias dessas curvas, emerge a inferência de que a adoção de uma malha menos refinada resultou na atenuação do pico máximo de inclinação angular *pitch*. Ademais, é possível discernir que, a partir de um ponto aproximado em $x=12$ segundos, as tendências comportamentais das curvas passam a convergir, nivelando-se de forma análoga em todos os casos investigados.

Na Figura 28 no tocante à variação de massa suplementar, relativa à frequência inicial de $x=1,03$ segundos, torna-se evidente a discrepância entre os valores de massa correspondentes aos três procedimentos de refinamento de malha investigados. No contexto do refinamento de malha mais exaustivo, constata-se que a massa atinge $y=95,52132 \text{ kg}$. Contrastando com tal resultado, no cenário da malha padrão estipulada pelo sistema, a massa se estabelece em $y=-242,46219 \text{ kg}$, ao passo que, para o grau inferior de refinamento de malha, a massa adquire o valor $y=-363,92322 \text{ kg}$. Importa ressaltar, ademais, uma convergência de padrões no comportamento das trajetórias a partir de uma frequência de $x=6,65$ segundos, o qual perdura até o desfecho das análises empreendidas.

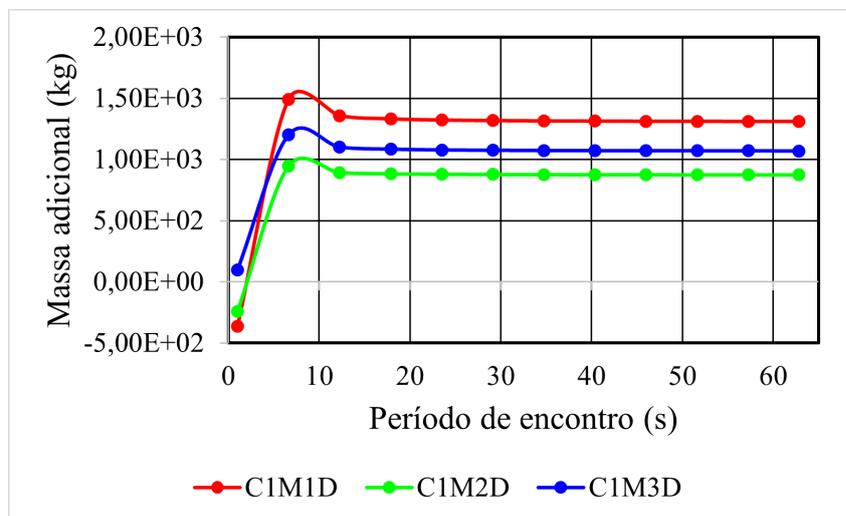
Na Figura 29 é discernível, ainda que sob discrepâncias sutis, que durante a fase inicial do movimento, os coeficientes de amortecimento associados às três distintas estruturas de malha manifestam valores divergentes para um mesmo período de análise. Explicitamente, a malha mais densamente refinada apresenta um coeficiente de amortecimento

Figura 27 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *pitch* para o caso 1.



Fonte: Autor (2023)

Figura 28 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha da massa adicional o caso 1.

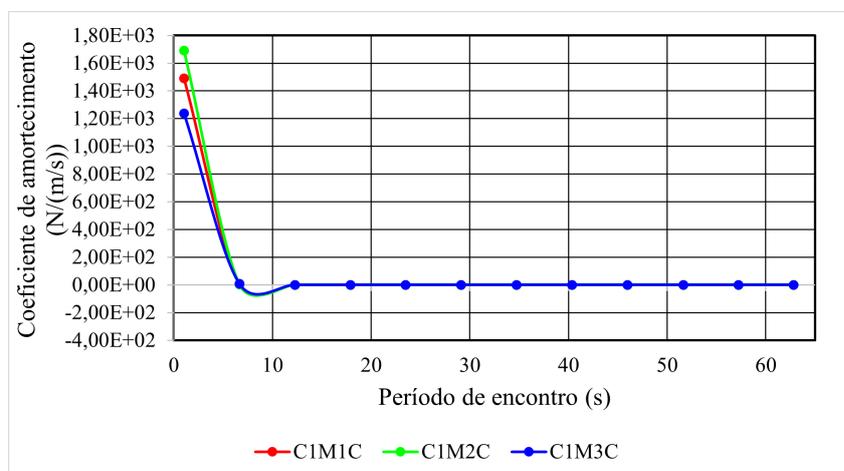


Fonte: Autor (2023)

correspondente a $y=1236,5885$, ao passo que a malha de padrão intermediário denota um valor de $y=1690,71741$ e, por fim, a malha menos refinada se traduz em um coeficiente de $y=1490,49402$. Entretanto, após a transcorrer do intervalo temporal de aproximadamente 6,65 segundos, torna-se notório que as trajetórias destas curvas convergem para um comportamento comunal, superando as nuances diferenciadas identificadas nos estágios iniciais do fenômeno.

A partir da minuciosa avaliação dos diversos parâmetros inerentes ao estudo, é

Figura 29 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do coeficiente de amortecimento para o caso 1.



Fonte: Autor (2023)

possível inferir que a malha mais ótima para adoção reside naquela que se encontra submetida ao mais elevado grau de refinamento. Essa conclusão é sustentada pelos desfechos constatados durante a análise do comportamento das curvas relativas à massa adicional.

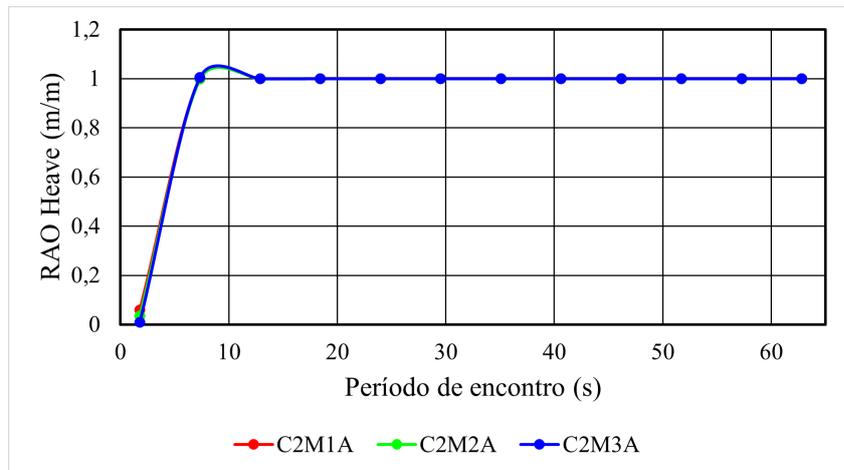
4.3 TESTE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA PARA O CASO 2

Na Figura 30 em relação aos desfechos obtidos para esta instância, constata-se uma correspondência similar àquela observada na análise do cenário precedente. As trajetórias das Respostas de Amplitude em Função da Onda (RAO) para o movimento de *heave* exibem uma consistência de padrão ao longo de todo o gráfico, manifestando uma sobreposição notável a partir do segundo intervalo de frequência de onda. Divergências entre as curvas se manifestam apenas nos valores mínimos presentes no primeiro intervalo de período, aproximadamente na marca de $x=1,78$ segundos.

Na Figura 31 as representações gráficas das Respostas de Amplitude em Função da Onda (RAO) associadas ao ângulo de *pitch*, no contexto atual, exibiram variações de notável interesse ao se introduzir modificações no grau de refinamento da malha. Os valores iniciais correspondentes para uma frequência de onda comum de $x=1,78$ segundos foram observados sequencialmente como $y=3,94391$ para a malha menos refinada, $y=2,40278$ para a malha padrão e $y=0,70626$ para a malha mais refinada. No entanto, é apenas a partir do período de $x=12,8$ segundos que se torna possível identificar uma convergência de padrões no comportamento dessas curvas.

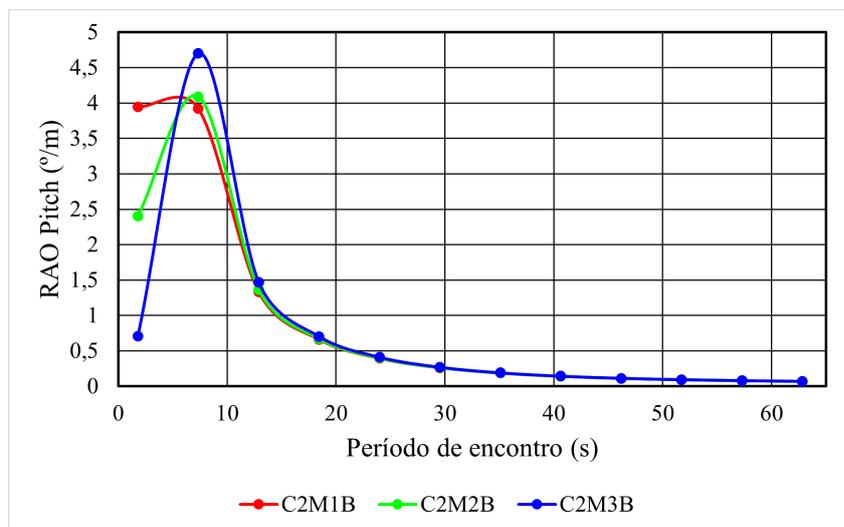
Na Figura 32 no tocante à consideração da massa adicional, a influência do refinamento da malha se torna evidente no comportamento inicial das trajetórias. No que concerne à malha mais criteriosamente refinada, é possível observar um valor de $y=50$ kg,

Figura 30 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *heave* para o caso 2.



Fonte: Autor (2023)

Figura 31 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *pitch* para o caso 2.

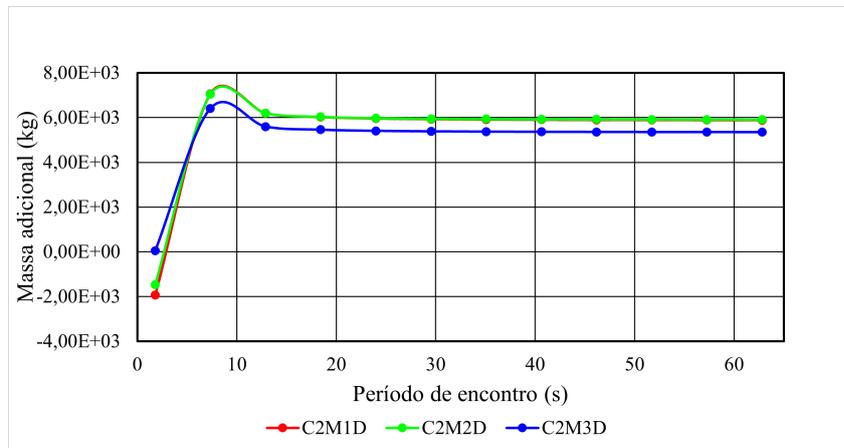


Fonte: Autor (2023)

em contraposição aos demais resultados, que se manifestam como $y=-1465$ kg e $y=-1934$ kg, respectivamente. No ponto subsequente de frequência, caracterizado por aproximadamente $x=7$ segundos, as curvas iniciam um processo de convergência comportamental, embora somente os resultados obtidos por meio da malha padrão e da malha menos refinada apresentem uma sobreposição significativa.

Na Figura 33 é perceptível que, para a configuração de malha mais minuciosamente refinada, os desfechos associados aos coeficientes de amortecimento se distinguem nota-

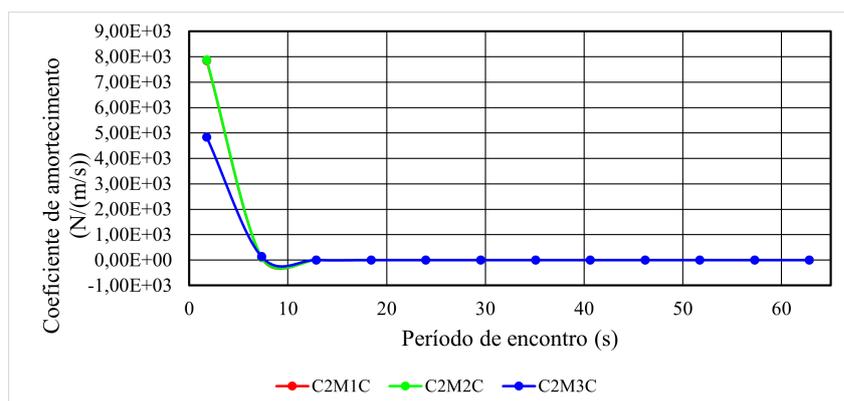
Figura 32 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha da massa adicional para o caso 2.



Fonte: Autor (2023)

velmente das correspondentes análises em malhas de granulação diversa. Especificamente, os valores atingem aproximadamente $y=4842 \text{ N}/(\text{m}/\text{s})$. Destaca-se, adicionalmente, que a partir de uma frequência aproximada de $x=7$ segundos, emerge uma conformidade de padrões comportamentais entre as curvas em consideração.

Figura 33 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do coeficiente de amortecimento para o caso 2.



Fonte: Autor (2023)

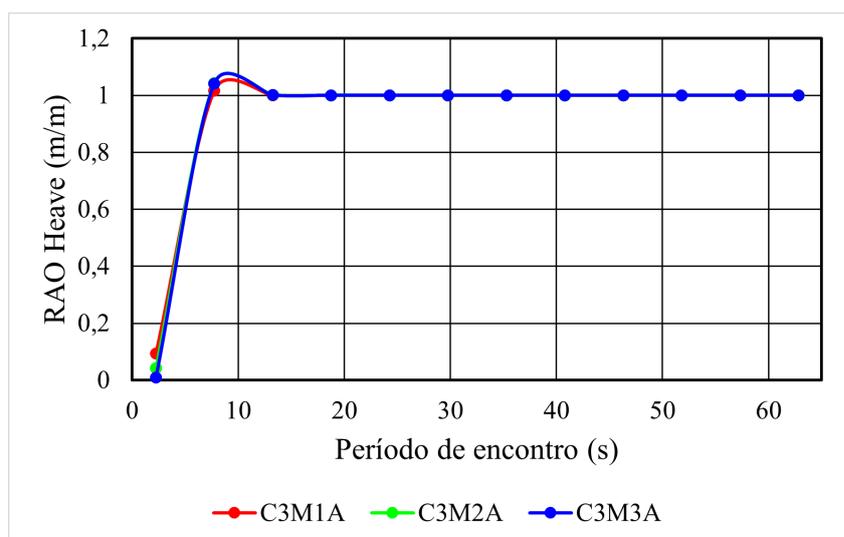
A partir desta análise minuciosa, embasada principalmente na preponderante influência dos desfechos referentes às Respostas de Amplitude em Função da Onda (RAO) de *pitch* e à massa adicional, foi deliberadamente estabelecido que, para empreendimentos analíticos ulteriores, a opção preferencial recairá sobre a malha de maior refinamento. Essa determinação é substanciada pela marcante influência constatada desses fatores na to-

mada de decisão, justificando, assim, a escolha da malha mais minuciosa para investigações futuras.

4.4 TESTE DE CONVERGÊNCIA DE MALHA PARA O CASO 3

Na Figura 34 nesta instância específica, torna-se evidente que os desfechos obtidos guardam notável similaridade com aqueles previamente registrados no contexto do caso 2, no que tange às Respostas de Amplitude em Função da Onda (RAO) de *heave*. Contudo, algumas discrepâncias são discerníveis no que diz respeito às análises do RAO *pitch* na Figura 35. É válido observar que tanto a malha padrão quanto a malha menos refinada manifestam um grau de semelhança mais expressivo em seus comportamentos. Além disso, em relação ao início de uma convergência de padrões, verifica-se que todas as curvas passam a se sobrepor aproximadamente a partir do ponto $x=13$ segundos.

Figura 34 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *heave* para o caso 3.

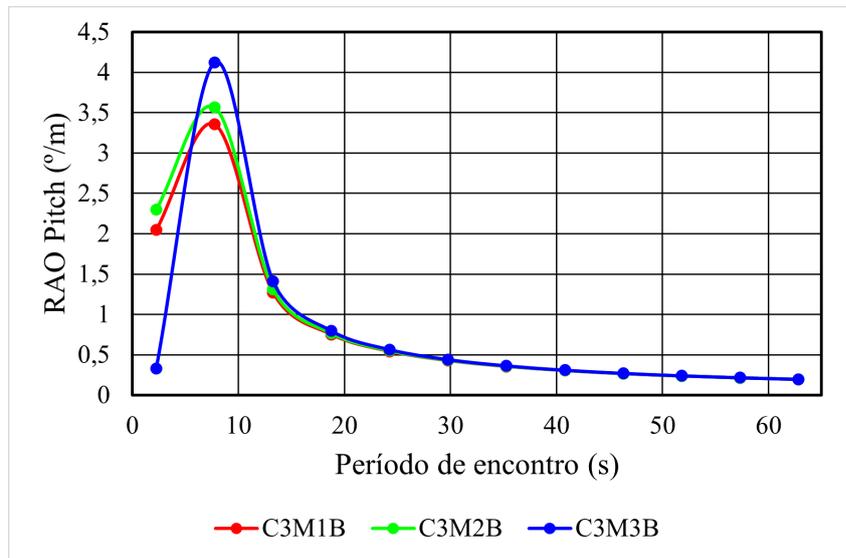


Fonte: Autor (2023)

Na Figura 36 é possível constatar uma discrepância nos resultados iniciais da análise, onde, para a malha submetida ao mais elevado refinamento, obtém-se um valor de $y=1543$ kg, enquanto para as malhas de padrão e menor refinamento, os valores são, respectivamente, $y=-3611$ kg e $y=-5587$ kg. Apesar dessas disparidades nos resultados, é notável que as curvas passam a apresentar um grau de similaridade a partir de seus picos, que ocorrem em $x=7$ segundos.

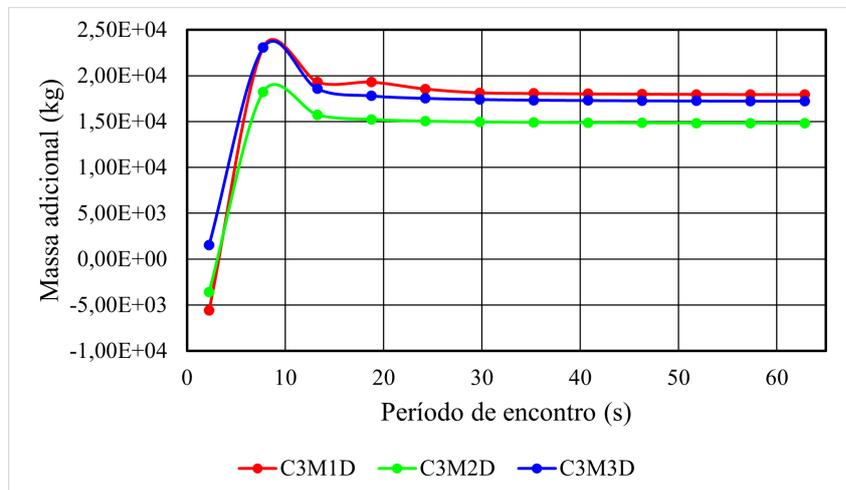
Na Figura 37 é perceptível que as trajetórias exibem uma notável congruência de padrões e passam a se superpor a partir de um limiar aproximado de $x=13$ segundos. É digno de nota que, antecedendo esse ponto, é possível discernir uma discrepância nos resultados, ainda que de magnitude reduzida.

Figura 35 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *pitch* para o caso 3.



Fonte: Autor (2023)

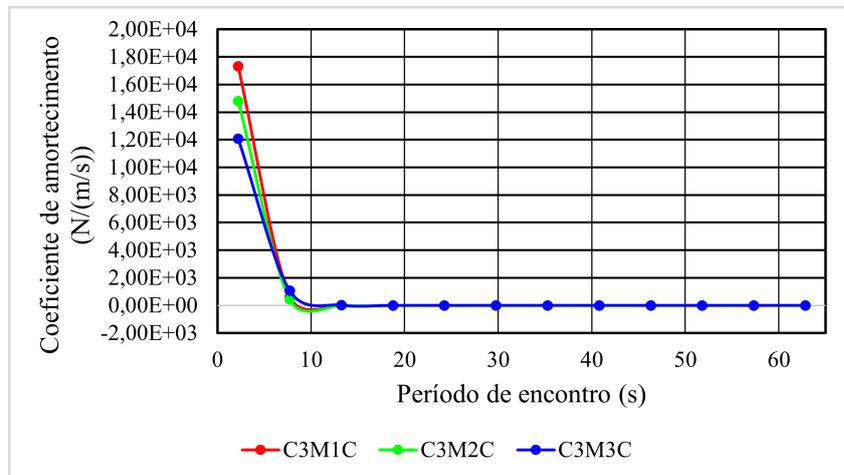
Figura 36 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha da massa adicional para o caso 3.



Fonte: Autor (2023)

Após a minuciosa análise efetuada, foi verificado que a malha que se caracteriza pelo mais elevado grau de refinamento emerge, igualmente, como a opção mais otimizada e idônea para a prospecção de análises posteriores.

Figura 37 – Comparação dos resultados de teste de convergência de malha do coeficiente de amortecimento para o caso 3.

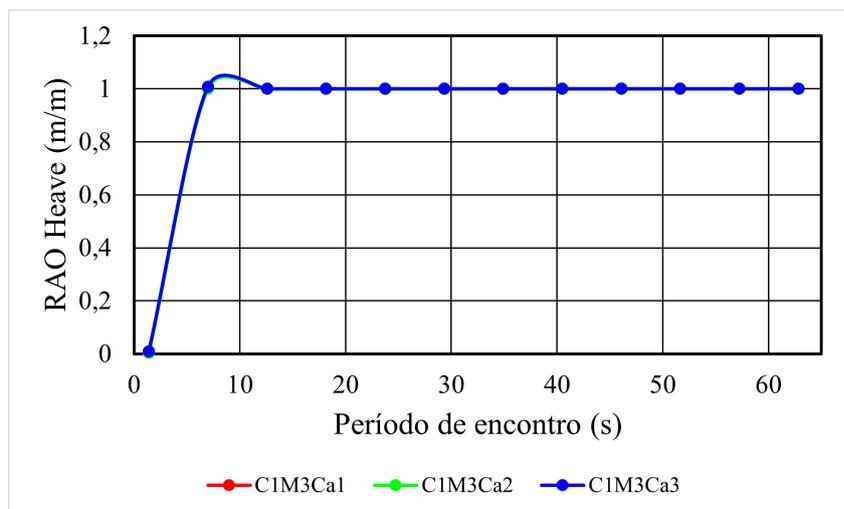


Fonte: Autor (2023)

4.5 EFEITOS DA VARIAÇÃO DO CALADO PARA CASO 1

Na Figura 38 evidencia-se, mediante uma breve avaliação, que a alteração do calado não exerce influência apreciável nas Respostas de Amplitude em Função da Onda (RAO) associadas ao movimento *heave* desta estrutura.

Figura 38 – Comparação dos resultados de variação de calado do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *heave* para o caso 1.

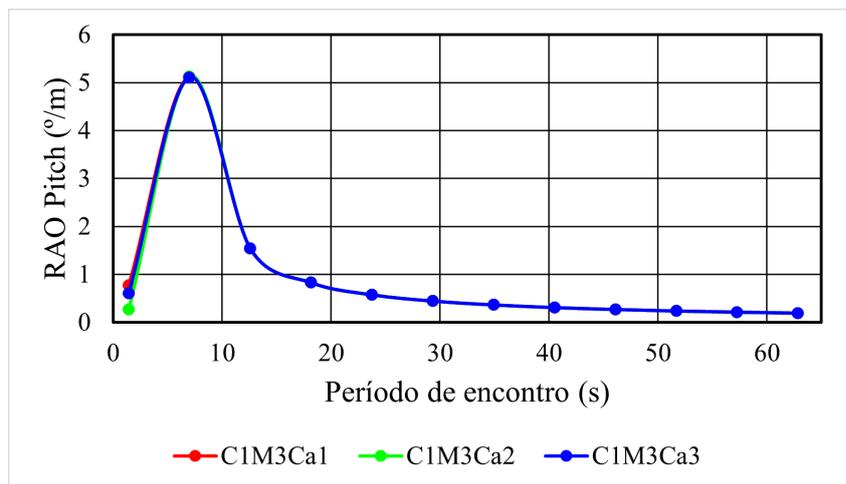


Fonte: Autor (2023)

O mesmo comportamento observado na análise anterior, é observado na análise para o Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *pitch* na Figura 39 onde

quase não se evidencia diferença no comportamento da curva, apenas nos primeiros valores do período de encontro onde $y_{Ca1}=0,77461 \text{ } \circ/m$, $y_{Ca2}=0,0,27292 \text{ } \circ/m$ e $y_{Ca3}=0,0,61184 \text{ } \circ/m$.

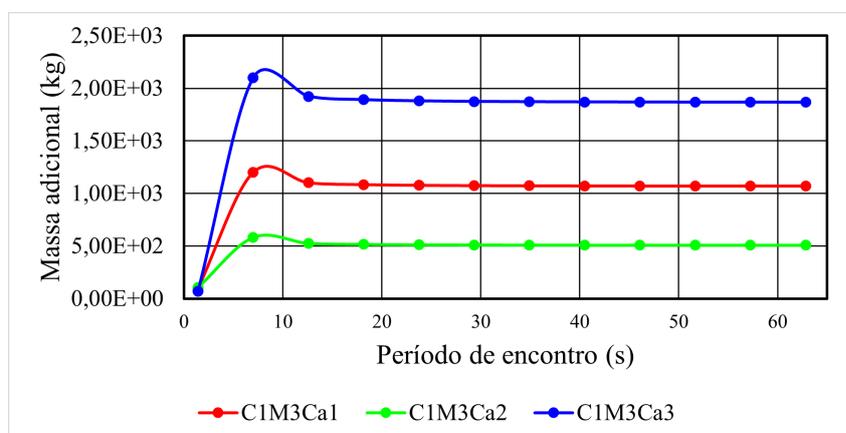
Figura 39 – Comparação dos resultados de variação de calado do Operador de Amplitude de Resposta do moimento de *pitch* para o caso 1.



Fonte: Autor (2023)

Na Figura 40 ao considerar os resultados obtidos na análise da massa adicional, torna-se evidente que, mesmo diante da variação nos calados, as trajetórias têm origem no mesmo valor e manifestam um comportamento notavelmente congruente, diferindo apenas na quantidade de massa implicada.

Figura 40 – Comparação dos resultados de variação de calado da massa adicional para o caso 1.

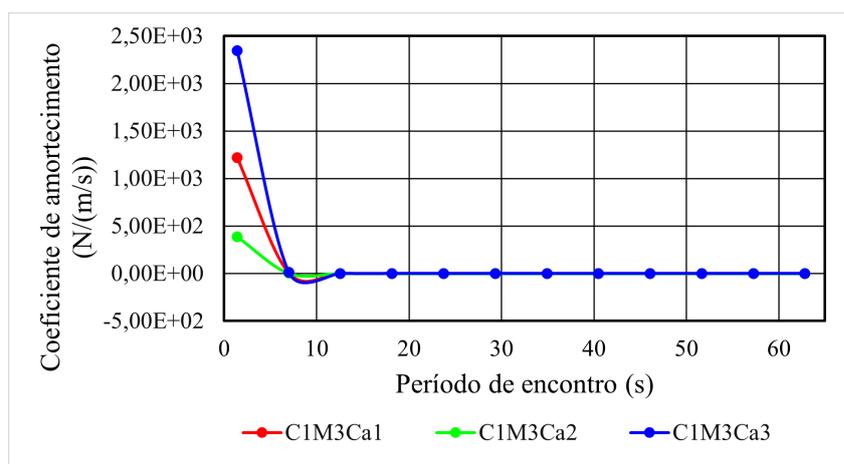


Fonte: Autor (2023)

Em relação ao coeficiente de amortecimento, conforme ilustrado na Figura 41,

observa-se que nos registros referentes à primeira frequência de encontro, os valores exibem disparidades. Concretamente, para a configuração de calado padronizada da estrutura, o coeficiente assume o valor $y=386 \text{ N}/(\text{m/s})$, ao passo que para o calado máximo, tal valor se estabelece em $y=2347 \text{ N}/(\text{m/s})$, e para o calado mínimo, o coeficiente é avaliado em $y=1218 \text{ N}/(\text{m/s})$.

Figura 41 – Comparação dos resultados de variação de calado do coeficiente de amortecimento para o caso 1.



Fonte: Autor (2023)

4.6 EFEITOS DA VARIAÇÃO DO CALADO PARA CASO 2

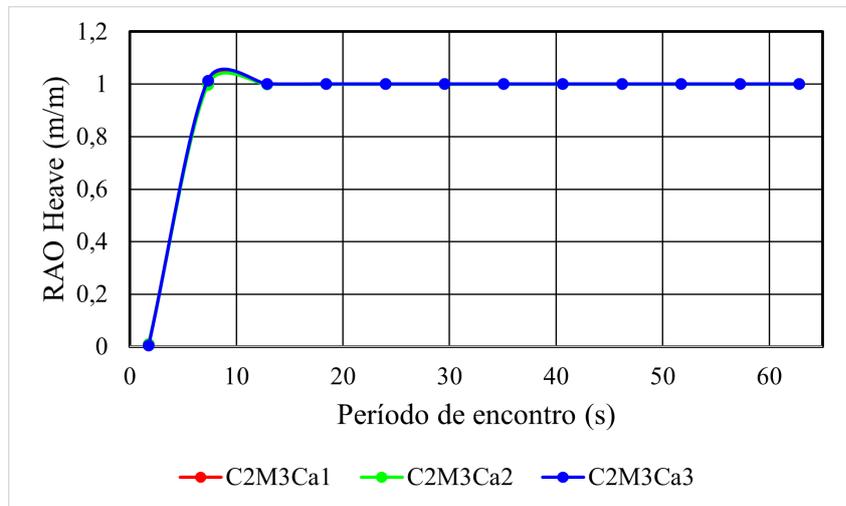
Para a Figura 42 apresentam-se uma conclusão análoga àquela derivada da análise anterior, sustentando que a variação dos calados não exerce influência discernível nas Respostas de Amplitude em Função da Onda (RAO) para o movimento *heave*.

Para a Figura 43 apresentam-se uma conclusão análoga àquela derivada da análise anterior, sustentando que a variação dos calados não exerce influência discernível nas Respostas de Amplitude em Função da Onda (RAO) para o movimento *pitch*. Quase não se evidencia diferença no comportamento da curva, apenas nos primeiros valores do período de encontro onde $y_{Ca1}=0,70626 \text{ o}/m$, $y_{Ca2}=0,39744 \text{ o}/m$ e $y_{Ca3}=0,14075 \text{ o}/m$.

Essa constatação é replicada na análise da massa adicional na Figura 44, onde os desfechos demonstram uma semelhança notável com aqueles obtidos no caso anterior, o caso 1, onde as três curvas se iniciam no mesmo ponto, e difere-se apenas a quantidade de massa implicada.

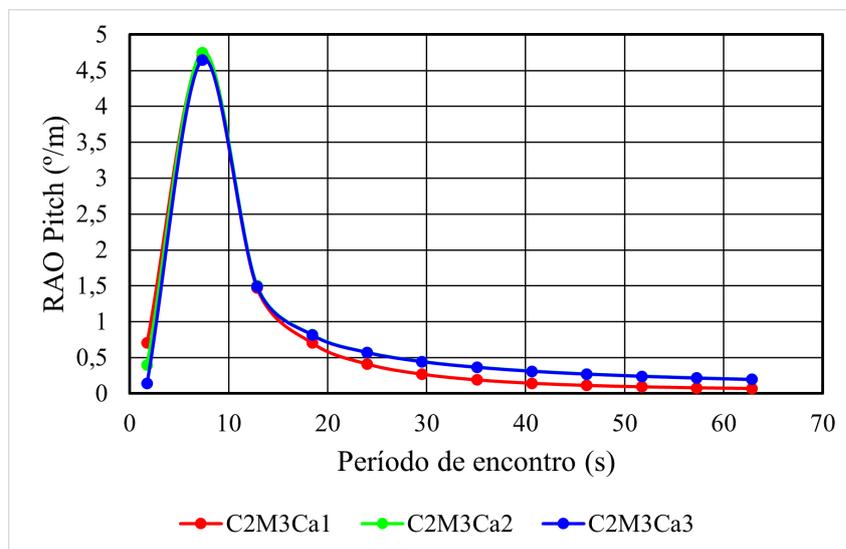
Em relação ao coeficiente de amortecimento, conforme ilustrado na Figura 45, observa-se que nos registros referentes à primeira frequência de encontro, os valores exibem disparidades. Concretamente, para a configuração de calado padronizada da estrutura, o coeficiente assume o valor $y=485 \text{ N}/(\text{m/s})$, ao passo que para o calado máximo, tal valor

Figura 42 – Comparação dos resultados de variação de calado do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *heave* para o caso 2.



Fonte: Autor (2023)

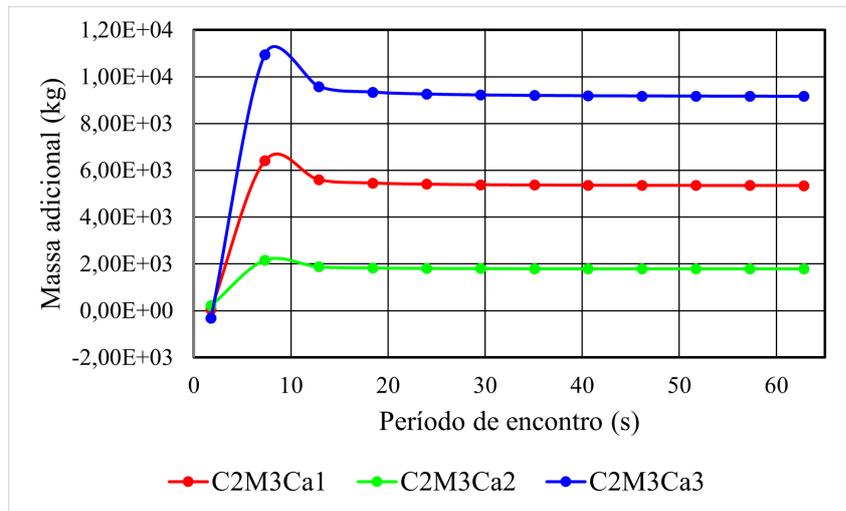
Figura 43 – Comparação dos resultados de variação de calado do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *pitch* para o caso 2.



Fonte: Autor (2023)

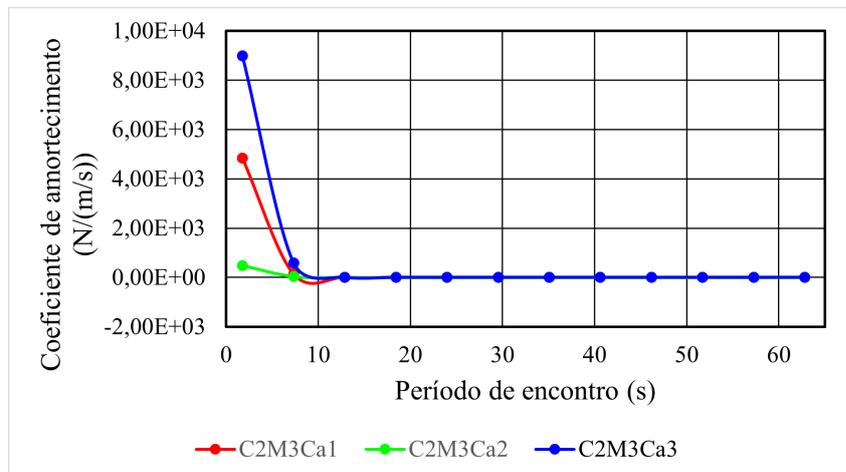
se estabelece em $y=8985 \text{ N}/(\text{m}/\text{s})$, e para o calado mínimo, o coeficiente é avaliado em $y=4842 \text{ N}/(\text{m}/\text{s})$.

Figura 44 – Comparação dos resultados de variação de calado da massa adicional para o caso 2.



Fonte: Autor (2023)

Figura 45 – Comparação dos resultados de variação de calado do coeficiente de amortecimento para o caso 2.



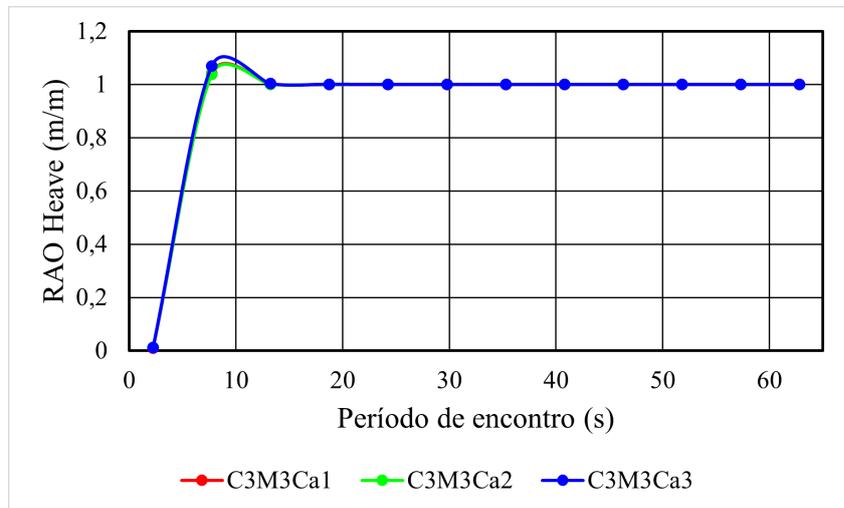
Fonte: Autor (2023)

4.7 EFEITOS DA VARIAÇÃO DO CALADO PARA CASO 3

Uma vez mais, é possível discernir a reiteração desse padrão de comportamento em relação ao calado, que exerce influência de modo análogo nos movimentos de RAO *heave* Figura 46.

Para a Figura 47 apresentam-se uma conclusão análoga àquela derivada da análise anterior, sustentando que a variação dos calados não exerce influência discernível nas Respostas de Amplitude em Função da Onda (RAO) para o movimento *pitch*. Quase

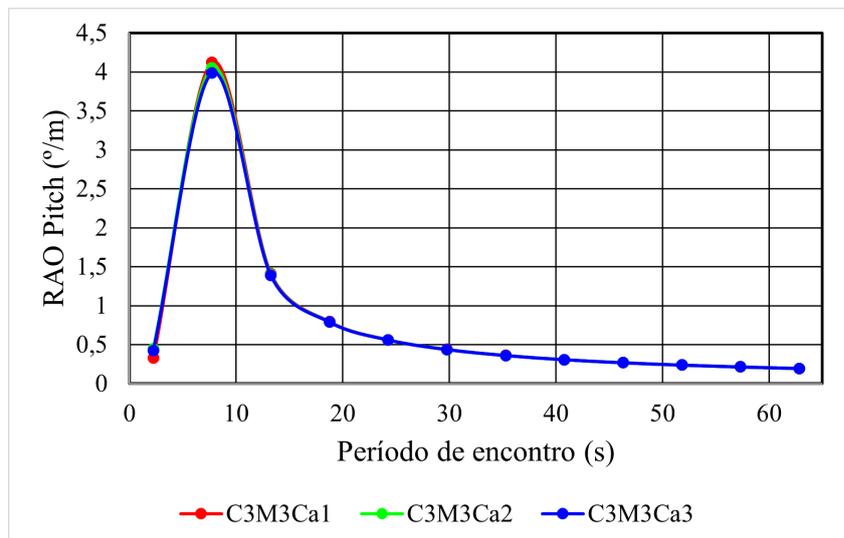
Figura 46 – Comparação dos resultados de variação de calado do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *heave* para o caso 3.



Fonte: Autor (2023)

não se evidencia diferença no comportamento da curva, apenas nos primeiros valores do período de encontro onde $y_{Ca1}=0,33094 \text{ o}/m$, $y_{Ca2}=0,44867 \text{ o}/m$ e $y_{Ca3}=0,42579 \text{ o}/m$.

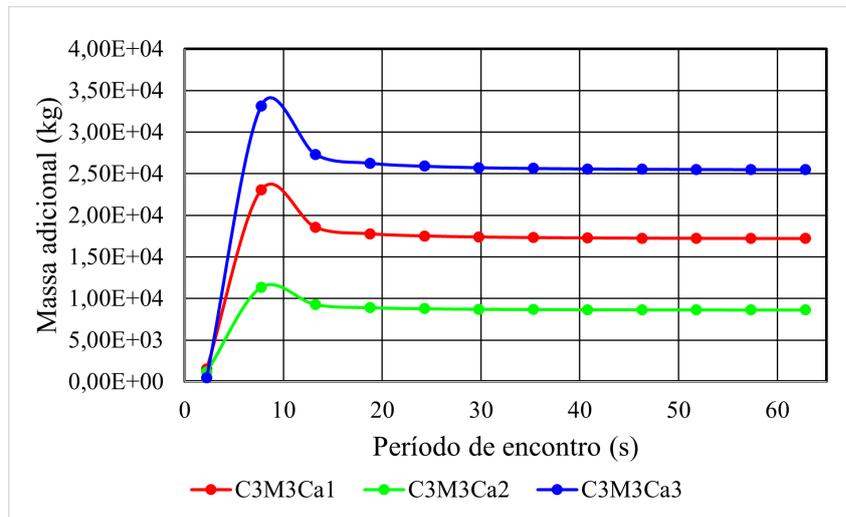
Figura 47 – Comparação dos resultados de variação de calado do Operador de Amplitude de Resposta do movimento de *heave* para o caso 3.



Fonte: Autor (2023)

Essa constatação é replicada na análise da massa adicional na Figura 48, onde os desfechos demonstram uma semelhança notável com aqueles obtidos no caso anterior, o caso 1 e 2, onde as três curvas se iniciam no mesmo ponto, e difere-se apenas a quantidade de massa implicada.

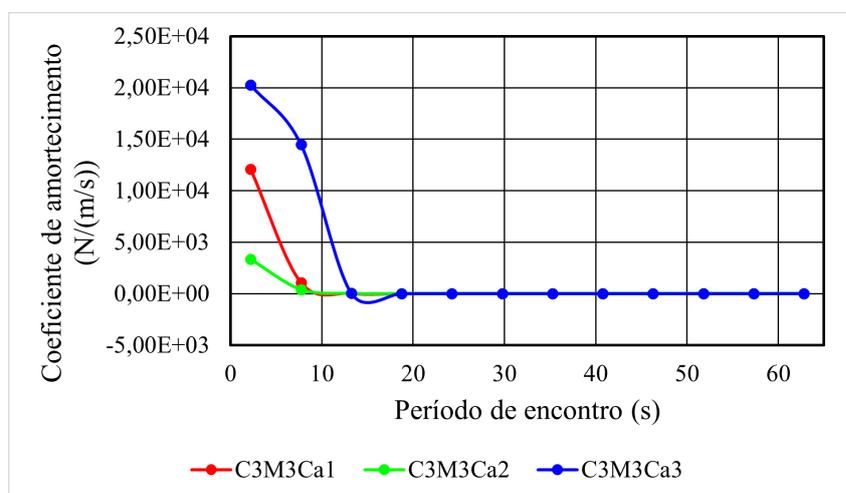
Figura 48 – Comparação dos resultados de variação de calado da massa adicional para o caso 3.



Fonte: Autor (2023)

Em relação ao coeficiente de amortecimento, conforme ilustrado na Figura 49, observa-se que nos registros referentes à primeira frequência de encontro, os valores exibem disparidades. Concretamente, para a configuração de calado padronizada da estrutura, o coeficiente assume o valor $y=3327 \text{ N}/(\text{m}/\text{s})$, ao passo que para o calado máximo, tal valor se estabelece em $y=20239 \text{ N}/(\text{m}/\text{s})$, e para o calado mínimo, o coeficiente é avaliado em $y=12056 \text{ N}/(\text{m}/\text{s})$.

Figura 49 – Comparação dos resultados de variação de calado do coeficiente de amortecimento para o caso 3.



Fonte: Autor (2023)

5 CONCLUSÕES

No presente estudo, foram avaliados os movimentos de *heave* e *pitch* de uma estrutura flutuante do tipo monocoluna com *heave plate*, visando demonstrar um procedimento de análise que possa ser estendido no futuro para desenvolver estruturas similares com geometrias variadas para uso em regiões em desenvolvimento, como a região amazônica. Foi utilizada a teoria de escoamento potencial para avaliar o problema. O estudo considerou a geometria proposta recentemente por Amin *et al.* (2020). A análise apresentada no presente trabalho utilizou dados experimentais disponíveis na literatura para realizar uma validação preliminar. Posteriormente, foram pesquisados os efeitos da variação do refinamento da malha e do calado nos movimentos e coeficientes hidrodinâmicos.

Durante a comparação de resultados numéricos com os experimentais foi demonstrada uma aproximação aceitável nas tendências gerais e ordem de grandeza dos resultados, com algumas discrepâncias singulares nos resultados. Essas diferenças podem estar relacionadas com o refinamento da malha e com a desconsideração dos efeitos viscosos por parte do método potencial. Cabe mencionar que, a avaliação foi feita de maneira simplificada por meio de uma licença acadêmica do software *Ansys Aqwa*, com limitação para o refinamento da malha. Sugere-se que estudos futuros verifiquem com maior detalhe os efeitos dos refinamentos da malha na comparação dos dados experimentais de Amin *et al.* (2020).

Ao efetuar a avaliação das flutuações das propriedades de malha concernentes ao primeiro cenário de estudo (0,480 m, 0,38104 m e 0,205 m), sobressaem-se as diferenças obtidas associados à malha mais densificada, especificamente no exame do RAO de arfagem e no contexto da massa adicional. No tocante à massa adicional, emerge uma peculiaridade de interesse, uma vez que, quando empreendidas malhas não otimizadas, manifestam-se diferenças de natureza adversa. Torna-se imperativo reconhecer a necessidade de empregar uma malha cuja discretização alcance o patamar máximo viável.

As conclusões derivadas das análises conduzidas sobre as distintas variações de calado aplicadas às três configurações estruturais investigadas denotaram uma manifesta relevância no que concerne aos parâmetros da massa adicional e do coeficiente de amortecimento. Essa observação advém da tendência identificada em todos os casos, na qual o incremento do calado se associou ao aumento dos referidos coeficientes, estabelecendo assim uma relação diretamente proporcional entre eles.

Ademais, no contexto de outras perspectivas de pesquisa que visem a empregar os achados delineados no presente estudo como embasamento para a concepção de um novo paradigma de estrutura flutuante na região amazônica, convém sublinhar que o RAO de arfagem, a massa suplementar e o coeficiente de amortecimento podem ser elementos suscetíveis a variações de calado.

Para estudos futuros que abarquem a análise de parâmetros hidrodinâmicos e a

delineação de padrões de malha, sugere-se a adoção de um procedimento metodológico similar ao apresentado neste trabalho, embora enriquecido pela inserção de variações mais notórias no contexto da área de estudo. Como exemplos de melhora, podem-se mencionar a consideração de ventos e correntezas de intensidade considerável na análise dos movimentos, avaliação de sistemas de ancoragem, e a aplicação de software de fluidodinâmica computacional que considere os efeitos viscosos do fluido.

REFERÊNCIAS

ABAZARI, Abuzar; BEHZAD, Mehdi. A review of the researches on the added mass and damping coefficients for the heave plates of the offshore platforms at translational and rotational oscillations. **Journal Of Marine Engineering**, Journal Of Marine Engineering, v. 16, n. 31, p. 65–81, 2020.

ABAZARI, Abuzar; BEHZAD, Mehdi; THIAGARAJAN, Krish P. Experimental assessment of hydrodynamic coefficients for a heave plate executing pitch oscillations. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 148, n. 1, p. 04021038, 2022.

AMAECHI, Chiemela Victor; REDA, Ahmed; BUTLER, Harrison Obed; JA'E, Idris Ahmed; AN, Chen. Review on fixed and floating offshore structures. Part I: Types of platforms with some applications. **Journal of Marine Science and Engineering**, MDPI, v. 10, n. 8, p. 1074, 2022.

AMAECHI, Chiemela Victor; WANG, Facheng; YE, Jianqiao. Experimental study on motion characterisation of CALM buoy hose system under water waves. **Journal of Marine Science and Engineering**, MDPI, v. 10, n. 2, p. 204, 2022.

AMAZONASNOTÍCIAS. **Resort Flutuante no Rio Negro oferece luxo, lazer e turismo de negócios**. [*S.l.: s.n.*], 2022. Disponível em: <https://amazonasnoticias.com.br/resort-flutuante-no-rio-negro-oferece-luxo-lazer-e-turismo-de-negocios/>.

AMIN, Islam; DAI, Saishuai; DAY, Sandy; OTERKUS, Selda; OTERKUS, Erkan. Experimental investigation on the influence of interceptor plate on the motion performance of a cylindrical FPSO. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 243, p. 110339, 2022.

AMIN, Islam; DAI, Saishuai; OTERKUS, Selda; DAY, Sandy; OTERKUS, Erkan. Experimental investigation on the motion response of a novel floating desalination plant for Egypt. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 210, p. 107535, 2020.

AMIN, Islam; ESHRA, Nadia; OTERKUS, Selda; OTERKUS, Erkan. Experimental investigation of motion behavior in irregular wave and site selection analysis of a hybrid offshore renewable power station for Egypt. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 249, p. 110858, 2022.

ANSYS, Inc. **AQWA User Manual**. [S.l.: s.n.], 2012. Disponível em: <https://www.ansys.com/training-center/course-catalog/structures/introduction-to-hydrodynamic-analysis-with-ansys-aqwa#tab1-3>.

BICUDO, Tacio Cordeiro. **Estudo da formação da bacia hidrográfica do rio Amazonas através da modelagem numérica de processos tectônicos e sedimentares**. 2017. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.

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

HAN, MM; WANG, CM. Potential flow theory-based analytical and numerical modelling of porous and perforated breakwaters: A review. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 249, p. 110897, 2022.

IBGE. **Mapa político da região norte**. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/mapas-regionais/10861-mapas-regionais.html>.

JIANG, Yichen; HU, Guanqing; ZONG, Zhi; ZOU, Li; JIN, Guoqing. Influence of an Integral Heave Plate on the Dynamic Response of Floating Offshore Wind Turbine Under Operational and Storm Conditions. **Energies**, v. 13, n. 22, 2020. ISSN 1996-1073.

JOURNÉE, JMJ; MASSIE, WW. Offshore hydromechanics. **Delft University of Technology**, 2001.

LIMA, Andrey Felipe; COSTA, Arthur Vinicius Bouth; SILVA CUNHA, Daniel da; GUERREIRO, Rodrigo Pereira; SILVA, Yuri Lorenzo Pamplona da *et al.* ESTUDO DE VIABILIDADE ECONOMICA PARA FLUTUANTE UTILIZADO PARA ALUGUEL DE DIARIA. **Revista Valore**, v. 7, p. 67–82, 2022.

LIU, Kun; LIANG, Haizhi; OU, Jingpin; YE, Jiawei; WANG, Dongjiao. Experimental Investigation of the Performance of a Tuned Heave Plate Energy Harvesting System for a Semi-Submersible Platform. **Journal of Marine Science and Engineering**, MDPI, v. 10, n. 1, p. 45, 2022.

NETO, E C; FONTES, J V H; MAIA, H W S. Estruturas Flutuantes Como Alternativas de Aproveitamento de Energia Renovavel Na Regiao Amazonica. **TERRA DO MAR**

DOCE: CONTRIBUICOES DA ACADEMIA PARA A NAVEGACAO NA AMAZONIA, Editora Cientifica Digital, v. 2, n. 1, p. 63–82, 2023.

NEWMAN, John Nicholas. **Marine hydrodynamics**. [S.l.]: The MIT press, 2018.

NOBLESSE, Francis; HENDRIX, Dane. On the theory of potential flow about a ship advancing in waves. **Journal of ship research**, SNAME, v. 36, n. 01, p. 17–29, 1992.

PAPILLON, Louis; COSTELLO, Ronan; RINGWOOD, John V. Boundary element and integral methods in potential flow theory: A review with a focus on wave energy applications. **Journal of Ocean Engineering and Marine Energy**, Springer, v. 6, p. 303–337, 2020.

PARK, Jeong Cheol; WANG, Chien Ming. Hydrodynamic behaviour of floating polygonal platforms under wave action. **Journal of Marine Science and Engineering**, MDPI, v. 9, n. 9, p. 923, 2021.

PETROBRAS. **Tipos de plataformas**. [S.l.: s.n.], 2014. Disponível em: <https://petrobras.com.br/infographics/types-of-platform/desktop/index.html>.

SOLAR, Portal. **Usina solar fotovoltaica flutuante começa a ser produzida na região do Amazonas**. [S.l.: s.n.], 2017. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/projetos/usina-solar-fotovoltaica-flutuante-comeca-a-ser-produzida-na-regiao-do-amazonas>.

THIAGARAJAN, Krish; MORENO, Javier. Wave induced effects on the hydrodynamic coefficients of an oscillating heave plate in offshore wind turbines. **Journal of Marine Science and Engineering**, MDPI, v. 8, n. 8, p. 622, 2020.

WANG, Weizhi; PÁKOZDI, Csaba; KAMATH, Arun; FOUQUES, Sébastien; BIHS, Hans. A flexible fully nonlinear potential flow model for wave propagation over the complex topography of the Norwegian coast. **Applied Ocean Research**, Elsevier, v. 122, p. 103103, 2022.

XU, Hailiang; NENG, Peng; YANG, Fangqiong. Motion response analysis of mining vessel based on ANSYS QWA. *In*: IOP PUBLISHING, 1. JOURNAL of physics: Conference series. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1300, p. 012010.

ZHU, Lixin; LIM, Hee-Chang. Hydrodynamic characteristics of a separated heave plate mounted at a vertical circular cylinder. **Ocean Engineering**, Elsevier, v. 131, p. 213–223, 2017.