

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DAS OSCILAÇÕES NO DESEMPENHO
DE DISPOSITIVO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR TIPO
PLACA HORIZONTAL SUBMERSA**

por

Rodrigo Costa Batista

Tese apresentada para obtenção do título de
Doutor em Modelagem Computacional

Orientador: Mateus das Neves Gomes

Coorientador: Liércio André Isoldi

Rio Grande – RS

2025.

Rodrigo Costa Batista

ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DAS OSCILAÇÕES NO DESEMPENHO DE
DISPOSITIVO CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR TIPO PLACA
HORIZONTAL SUBMERSA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Modelagem Computacional da Universidade Federal do
Rio Grande – FURG, como requisito parcial para obtenção
do título de Doutor em Modelagem Computacional.

Aprovado em 01/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



MATEUS DAS NEVES GOMES

Data: 08/12/2025 16:09:18-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes (Orientador - FURG)

Documento assinado digitalmente



LIERCIO ANDRE ISOLDI

Data: 10/12/2025 08:06:39-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Liércio André Isoldi (CO-Orientador - FURG)

Documento assinado digitalmente



BIANCA NEVES MACHADO

Data: 08/12/2025 20:16:45-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Bianca Neves Machado (UFRGS)

Documento assinado digitalmente



DANIELA BUSKE

Data: 08/12/2025 16:35:27-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Daniela Buske (UFPeI)

Documento assinado digitalmente



ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS

Data: 10/12/2025 07:44:11-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Elizaldo Domingo dos Santos (FURG)

Rio Grande – RS, dezembro, 2025.

ATA DE DEFESA DE TESE**ATA Nº 06/2025**

Ao primeiro dia do mês de dezembro de dois mil e vinte e cinco, por meio de videoconferência, realizou-se a 45ª sessão de defesa de tese do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional. O doutorando **Rodrigo Costa Batista** apresentou e defendeu a tese “**ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DAS OSCILAÇÕES NO DESEMPENHO DE DISPOSITIVO CONVERSOR DE ENERGIA DA ONDA DO MAR TIPO PLACA HORIZONTAL SUBMERSA**” como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Modelagem Computacional. A sessão foi aberta às quatorze horas pelo Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes, orientador da tese e presidente da Comissão de Avaliação. A referida Comissão esteve integrada, além do presidente e orientador, pelo Prof. Dr. Liércio André Isoldi (Coorientador - FURG), pela Profa. Dra. Bianca Neves Machado (UFRGS), pela Profa. Dra. Daniela Buske (UFPEL) e pelo Prof. Dr. Elizaldo Domingo dos Santos (FURG). Após a apresentação do trabalho, a banca arguiu a candidata e, a seguir, deliberou pela

☒ (X) aprovação da Tese.

☐ () aprovação da Tese, sugerindo modificações no texto.

☐ () reprovação da Tese.

Documento assinado digitalmente
 **MATEUS DAS NEVES GOMES**
Data: 08/12/2025 16:09:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Mateus das Neves Gomes
Orientador

Documento assinado digitalmente
 **ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS**
Data: 10/12/2025 07:44:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Elizaldo Domingo dos Santos
Membro Interno

Documento assinado digitalmente
 **BIANCA NEVES MACHADO**
Data: 08/12/2025 20:16:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Bianca Neves Machado
Membro Externo

Documento assinado digitalmente
 **DANIELA BUSKE**
Data: 08/12/2025 16:35:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Daniela Buske
Membro Externo

Documento assinado digitalmente
 **LIERCIO ANDRE ISOLDI**
Data: 10/12/2025 08:06:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Liércio André Isoldi
Coorientador

B333a	Batista,Rodrigo Costa Análise numérica da influência das oscilações no desempenho de dispositivo conversor de energia das ondas do mar tipo placa horizontal submersa / Rodrigo Costa Batista – 2025. 146f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande – Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, 2025. Orientador: Dr Mateus das Neves Gomes Coorientador: Liércio André Isoldi 1. Modelagem Computacional . 2. Placa horizontal submersa 3. Oscilação. 4. Dinâmica dos fluidos Computacional 5. Eficiência. I. Gomes, Mateus das Neves. II. Isoldi, Liércio André. III. Título. CDU 004.414.23
-------	---

*“Meu pai me deu o maior presente que alguém pode dar
a outra pessoa: ele acreditou em mim”*

(Jim Valvano)

Ao meu amado pai, Amauri Veiga Batista (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, por permitir que eu realize meus sonhos, me protegendo, me guiando e me dando capacidade para vencer cada jornada.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Mateus das Neves Gomes e Professor Doutor Liércio André Isoldi, por toda a paciência, ensinamentos e empenho com que sempre me orientaram neste trabalho. Muito obrigado por terem me corrigido quando necessário sem nunca me desmotivarem. Vocês são minha inspiração e serei sempre grato.

A Universidade Federal do Rio Grande (FURG), por meio do Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional, por possibilitar a realização deste trabalho.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), pela dedicação, competência e conhecimentos compartilhados.

Ao Instituto Federal do Paraná (IFPR), por possibilitar a realização deste trabalho ao ceder a estrutura necessária para realização das simulações e ao Instituto Federal do São Paulo (IFSP), pelo incentivo a capacitação.

Aos membros convidados das bancas de qualificação e de defesa, Professora Doutora Bianca Neves Machado, Professora Doutora Daniela Buske, Professor Doutor Elizaldo Domingo dos Santos e Professor Doutor Flavio Medeiros Seibt, pelas contribuições que trouxeram.

À minha amada esposa, Ellen, cuja força silenciosa sustentou meus dias quando os seus também pesavam. No luto, meu abrigo; na exaustão, meu alento; na dúvida, minha luz. Dividimos dores e sonhos e seguimos, lado a lado, mesmo quando o caminho parecia ruir e o chão faltava sob nossos pés.

Aos meus pais, Amauri e Marilza, por todo amor dedicado a mim, pelo apoio e encorajamento durante toda vida. Obrigado por sempre me incentivarem a estudar e abrirem mão dos seus sonhos em prol dos meus.

Ao meu Tio Aldomir Veiga Batista, sem o qual não teria sido possível essa conquista, que mesmo estando longe sempre se fez presente em cada momento que precisei.

Por fim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desta Tese, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

O crescimento populacional e industrial, aliado ao consumismo, tem elevado a demanda por energia elétrica e intensificado os impactos ambientais, com estimativas apontando um aumento de 80% no consumo global entre 2023 e 2050. Cerca de 62% da matriz energética brasileira depende de fontes hídricas, a redução dos níveis dos reservatórios, agravada pelas mudanças climáticas, pode resultar em racionamentos energéticos no país. Apesar da matriz energética do Brasil apresentar em grande parte de sua composição fontes renováveis, faz-se necessário a diminuição da dependência da energia hidroelétrica. Essa preocupação está alinhada às metas globais de sustentabilidade, especialmente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 7 e ODS 13), que enfatizam o acesso universal a fontes de energia limpa e a necessidade de ações urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos. Explorar a energia das ondas do mar para a geração de eletricidade representa uma opção promissora para o Brasil, tendo em vista seu comprometimento com o uso de fontes de energia menos agressivas ao meio ambiente e por possuir um extenso litoral. Diversos estudos têm explorado o uso de placas horizontais submersas, estruturas fixadas abaixo da superfície do mar que interagem com as ondas incidentes e podem converter parte de sua energia em eletricidade, aproveitando o escoamento alternado gerado sob a placa. Por aliarem função energética e proteção costeira, configuram uma alternativa promissora para a diversificação da matriz energética nacional, alinhada aos ODS 7 e ODS 13. A pesquisa propõe um modelo computacional para analisar os efeitos das oscilações em um conversor de energia das ondas do tipo placa horizontal submersa, avaliando suas implicações no funcionamento do dispositivo, aspecto ainda não abordado na literatura. O movimento do dispositivo é representado por um modelo de Seis Graus de Liberdade (6DOF) Para isso, empregou-se o modelo de *volume of fluid* multifásico com uma abordagem tridimensional para interação ar-água e o método dos volumes finitos para a solução das equações de conservação do transporte de massa, quantidade de movimento e fração volumétrica. Além disso, foram utilizadas malhas dinâmicas, as quais se ajustam de forma adaptativa durante a simulação e permitem uma representação mais adequada do fenômeno em estudo. Adicionalmente, foram incorporados códigos computacionais personalizados no software ANSYS Fluent, responsáveis por definir massa, momentos de inércia e restrições de movimento do dispositivo, permitindo representar adequadamente o seu comportamento. Tomados como referência, os modelos bidimensional e tridimensional em condição não oscilante (PHS-NO) foram verificados e validados, constituindo, em seguida, a base para o desenvolvimento do modelo tridimensional oscilante (PHS-O). A partir desse modelo, tornou-se possível analisar a resposta do dispositivo frente à interação onda-estrutura, permitindo avaliar o comportamento do conversor frente às condições estabelecidas. Em seguida, o modelo foi calibrado por meio de análise paramétrica com 54 simulações, evidenciando a influência dos parâmetros na eficiência do conversor. Entre os arranjos testados, destacou-se a placa alongada orientada perpendicularmente à direção de propagação das ondas, que atingiu eficiência de 67%. Por fim, essa geometria de melhor desempenho foi aplicada em um estudo de caso localizado no litoral do estado do Paraná, Brasil, alcançando eficiência de 58% e possibilitando a análise do movimento relativo entre a estrutura e as ondas. O comportamento observado foi atenuado, com valores de operador de amplitude de resposta < 1 , indicando resposta oscilatória reduzida. Com isso, três geometrias foram avaliadas sob as mesmas condições e em duas profundidades de submersão, sendo constatado o melhor desempenho da PHS-O em submersões menores e da PHS-NO em maiores profundidades.

Palavras-chave: Placa Horizontal Submersa. Modelagem Computacional. Oscilação. Dinâmica dos Fluidos Computacional. Eficiência.

ABSTRACT

Population and industrial growth, combined with consumerism, has increased electricity demand and intensified environmental impacts, with estimates indicating an 80% rise in global consumption between 2023 and 2050. Approximately 62% of the Brazilian energy matrix depends on hydropower sources, and reductions in reservoir levels, exacerbated by climate change, may result in energy rationing in the country. Although Brazil's energy matrix is largely composed of renewable sources, reducing dependence on hydropower remains necessary. This concern is aligned with global sustainability goals, particularly the Sustainable Development Goals (SDG 7 and SDG 13), which emphasize universal access to clean energy and the need for urgent actions to combat climate change and its impacts. Harnessing ocean wave energy for electricity generation represents a promising option for Brazil, given its commitment to less environmentally aggressive energy sources and its extensive coastline. Several studies have explored the use of submerged horizontal plates, structures fixed below the sea surface that interact with incident waves and can convert part of their energy into electricity by exploiting the alternating flow generated beneath the plate. By combining energy generation and coastal protection functions, these systems constitute a promising alternative for diversifying the national energy matrix, in line with SDG 7 and SDG 13. This research proposes a computational model to analyze the effects of oscillations in a submerged horizontal plate-type wave energy converter, evaluating their implications for device operation, an aspect not yet addressed in the literature. The motion of the device is represented using a Six Degrees of Freedom (6DOF) model. For this purpose, a multiphase Volume of Fluid (VOF) model with a three-dimensional approach for air-water interaction was employed, together with the finite volume method to solve the conservation equations of mass transport, momentum, and volume fraction. In addition, dynamic meshes were used, which adapt during the simulation and allow for a more accurate representation of the phenomenon under study. Additionally, customized computational codes were incorporated into ANSYS Fluent to define the mass, moments of inertia, and motion constraints of the device, enabling an accurate representation of its behavior. The two-dimensional and three-dimensional models under non-oscillating conditions (PHS-NO) were verified and validated, subsequently forming the basis for the development of the three-dimensional oscillating model (PHS-O). From this model, it was possible to analyze the response of the device to the wave structure interaction, allowing the evaluation of the converter behavior under the established conditions. The model was then calibrated through parametric analysis with 54 simulations, showing the influence of the parameters on converter efficiency. Among the tested configurations, the elongated plate oriented perpendicularly to the wave propagation direction achieved an efficiency of 67%. Finally, this best-performing geometry was applied in a case study located on the coast of the state of Paraná, Brazil, achieving an efficiency of 58% and enabling the analysis of the relative motion between the structure and the waves. The observed behavior was attenuated, with response amplitude operator values lower than 1, indicating a reduced oscillatory response. Thus, three geometries were evaluated under the same conditions and at two submergence depths, with the PHS-O showing better performance at smaller submergences and the PHS-NO at greater depths.

Keywords: Submerged Horizontal Plate. Modeling. Oscillation. CFD. Efficiency.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 Motivação	21
1.2 Justificativa.....	23
1.3 Objetivo Geral	24
1.4 Objetivos Específicos	24
1.5 Delineamento da Tese	25
2 ENERGIA DAS ONDAS DO MAR.....	27
2.1 Potencial Energético dos Oceanos.....	27
2.2 Tecnologias de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica.....	28
2.3 Princípio de Funcionamento do Dispositivo PHS	31
2.4 Caracterização da Área de Estudo	32
2.5 Sistema de PHS	34
2.5.1 PHS Utilizada como Conversor de Energia das Ondas.....	35
2.5.2 PHS Utilizada como Quebra-Mar.....	39
3 METODOLOGIA.....	45
3.1 Modelagem Matemática	46
3.1.1 Teoria das Ondas	46
3.1.2 Critério de Similaridade	52
3.1.3 Domínio Computacional	54
3.1.4 Discretização do Domínio	57
3.1.5 Parâmetros de Interesse	67
3.1.6 Modelo Multifásico <i>Volume Of Fluid</i> (VOF).....	72
3.2 Modelagem Numérica	76
3.2.1 Método dos Volumes Finitos.....	77
3.2.2 Discretização do modelo MVF em interfaces	79
3.2.3 Discretização das Funções de Interpolação	81
3.2.4 Acoplamento de Pressão – Velocidade	82
3.2.5 Esquema de Avanço no Tempo	83
3.2.6 Métricas para a Verificação e Validação do Modelo Computacional	84
3.2.1 Análise de Resposta Hidrodinâmica do Dispositivo	89
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	90
4.1 Verificação e validação do modelo computacional PHS-NO e PHS-O	90

4.1.1 Verificação da Propagação das Ondas Numéricas Simuladas no Modelo Computacional 2D	90
4.1.2 Validação do Modelo Computacional 2D PHS-NO.....	91
4.1.3 Verificação da Propagação da Ondas Numéricas Simuladas no Modelo Computacional 3D	93
4.1.4 Validação do Modelo Computacional 3D PHS-NO.....	96
4.1.5 Avaliação Numérica do Modelo 3D PHS-O: Praia de Numérica e Independência de Malha.....	99
4.1.6 Verificação do Movimento Vertical do Modelo 3D PHS-O	101
4.2 Calibração do Modelo Numérico	110
4.2.1 Análise Paramétrica: Desempenho do PHS-O sob variações geométricas, de submersão e de onda incidente.....	110
4.2.2 Estudo de caso	118
4.2.3 Normalização do movimento vertical (cz): implicações na eficiência energética.....	127
4.2.4 Efeitos da configuração geométrica e da submersão na eficiência da PHS-O e PHS-NO.....	129
5 CONCLUSÕES.....	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Composição da matriz energética nacional (%) e a representação das instalações dedicadas a geração de eletricidade mediante o aproveitamento de energia hídrica (EPE, 2023 e SNIRH, 2023).	21
Figura 1.2: Comparativo das fontes energéticas (%) nacional e mundial (EPE, 2023 e IEA, 2023).	22
Figura 2.1: Classificação dos CEOs de acordo com sua localização: <i>Onshore</i> (1ª geração); <i>Nearshore</i> (2ª geração) e <i>Offshore</i> (3ª geração).	29
Figura 2.2: Classificação dos CEOs quanto ao princípio de funcionamento: A) CAO; B) Corpos Oscilantes – Progressivos; C) Corpos Oscilantes – Absorção Pontual; D) Corpos Oscilantes – Absorção Pontual Submerso; E) Corpos Oscilantes – Conversor Oscilante de Translação das Ondas; F) Galgamento (Adaptado de Callaway, 2007).	30
Figura 2.4: Representação esquemática do dispositivo PHS indicando os parâmetros da onda (comprimento λ e altura H) e a distância livre (d) entre o PHS e o fundo marinho (Adaptado de Graw, 1994).	31
Figura 2.3: Região central da linha de costa do Estado do Paraná. Destaque nos pontos de registro de parâmetros de ondas na plataforma interna rasa P18 e P30 (Adaptado de Nemes e Marone, 2013).	33
Figura 2.5: Ilustração do domínio computacional com a PHS-NO inserida no tanque numérico (Adaptado de Seibt et al., 2019).	35
Figura 2.6: (A) - Ilustração do sistema de PHS-NO associado a uma obstrução triangular. (B) Área de abertura variável em relação às dimensões e posição do PHS-NO, bem como às dimensões da obstrução triangular (Adaptado de Kharati-Koopae e Kiali-Kooshkghazi, 2019).	37
Figura 2.7: Ação de amortecimento das ondas proporcionada pelo quebra-mar do tipo PHS-NO resultando na redução da amplitude da onda a montante (H_m) da PHS-NO e na geração de onda a jusante (H_j) da PHS-NO de menor amplitude em direção à costa.	40
Figura 2.8: Ilustração da interação da onda com PHS-NO à frente da estrutura em declive (Adaptado de Tian et al., 2023).	42
Figura 2.9: Esquema ilustrativo: (A) plataforma flutuante localizada a uma distância finita da PSP-NO ondulada, (B) plataforma flutuante posicionada acima da PSP-NO ondulada (Adaptado de Mohapatra et al., 2023).	43

Figura 3.1: Fluxograma da metodologia aplicada na simulação numérica de um dispositivo CEO tipo PHS (Adaptado de Gomes, 2014).	45
Figura 3.2: Principais características de uma onda (Adaptado Dean e Dalrymple, 1991).	47
Figura 3.3: Diferença entre o perfil de onda de Stokes de 2ª ordem e o perfil de linear (Adaptado de USACE, 1984).	48
Figura 3.4: Aplicabilidade das teorias de ondas e indicação da teoria de ondas apropriada os modelos nas configurações 2D PHS-NO, 3D PHS-NO e 3D PHS-O simulados (Adaptado de CHAKRABARTI, 2005).	51
Figura 3.5: Geometrias dos modelos: (A) 2D PHS-NO, (B) 3D PHS-NO e (C) 3D PHS-O... ..	55
Figura 3.6: Representação das condições de contorno aplicadas nos modelos: (A) 2D PHS-NO, (B) 3D PHS-NO e (C) 3D PHS-O.	56
Figura 3.7: Refinamento no entorno da PHS e na interface entre as fases água e ar – malha <i>stretched</i>	58
Figura 3.8: Esquema de refinamento de malha: (A) - Comprimentos (m) e números de divisões iniciais empregados na discretização do domínio computacional. (B) - Dimensões adotadas no processo de geração e refinamento da malha.	59
Figura 3.9: Visualização expandida do entorno da PHS-NO.	60
Figura 3.10: Ilustração da malha regular 3D de referência e seus detalhes, na condição PHS-NO.	63
Figura 3.11: Ilustração da malha tetrahédricas 3D de referência e seus detalhes, na condição PHS-O.....	64
Figura 3.12: Distribuição dos elementos da malha nas categorias A, B, C, D, E, F, G, H, I e J, conforme valores de assimetria.	65
Figura 3.13: Visualização 3D da distribuição (%) dos elementos da malha nas categorias A, B, C, D, E, F, G, H, I e J.	66
Figura 3.14: (A) – Distribuição dos monitores pontuais velocidades abaixo do dispositivo CEO PHS para os modelos 2D e 3D PHS-NO. (B) – Monitor linear empregado no monitoramento da velocidade axial no modelo 3D PHS-O.....	68
Figura 3.15: (A) – Monitor linear empregado no monitoramento da vazão mássica no modelo 2D. (B) – Monitor planar utilizado no monitoramento da vazão mássica no modelo 3D.....	70
Figura 3.16: Movimento oscilatório da PHS-O ao ser incidida por ondas do mar.....	72
Figura 3.17: Exemplo de identificação da superfície livre a partir da variação da fração de volume (Adaptado de De Brito, 2010).	74

Figura 3.18: Representação da interface: (A) posição original; (B) reconstrução geométrica (Adaptado de Gomes, 2014).....	81
Figura 3.19: Representação do deslocamento vertical (cz) da PHS-O causado pela ação das ondas e das restrições de movimento, em relação aos eixos y e x	87
Figura 4.1: Ilustração da solução numérica e analítica da elevação de superfície da onda η (m) 2D.	90
Figura 4.2: Posicionamento da sonda linear delimitada entre os pontos P1 e P2.....	91
Figura 4.3: Representação dos perfis de elevação da onda obtidos por soluções numéricas e por soluções analíticas com distintos modelos de escoamento no domínio 3D.	94
Figura 4.4: Representação da geometria do tanque numérico 3D: A) Vista tridimensional; B) Vista lateral; C) Vista superior; D) Vista frontal.....	96
Figura 4.5: Dimensões do tanque numérico (m) e da PHS-NO (m) no modelo 3D.....	97
Figura 4.6: Disposição das sondas (P1, P2, P3, P4 e P5) empregadas na medição das elevações da superfície livre ao longo do tanque.....	99
Figura 4.7: Amplitudes das ondas incidentes (m) e refletidas (m) registradas nas sondas P1, P2, P3, P4 e P5, posicionadas respectivamente a 5 m, 10 m, 271,6 m, 337 m e 397,4 m ao longo do domínio.....	100
Figura 4.8: Oscilação da PHS-O (cz) na direção do eixo z (m).....	102
Figura 4.9: Ilustração da deformação da malha nos instantes $t = 0$ s, $t = 20$ s, $t = 40$ s, $t = 60$ s, $t = 80$ s, $t = 100$ s e $t = 120$ s, com a linha de referência (LR) posicionada sobre a PHS-O em repouso ($t = 0$ s), localizada a uma distância i do limite superior do tanque.....	103
Figura 4.10: Oscilação da PHS-O (cx) na direção do eixo x (m).	103
Figura 4.11: Oscilação da PHS-O (cy) na direção do eixo y (m).	103
Figura 4.12: Variação de p (Pa) na PHS-O.	104
Figura 4.13: Variação de p_d (Pa) na PHS-O.	104
Figura 4.14: Variação de p_h (Pa) na PHS-O.	105
Figura 4.15: Resultados de pressões na condição PHS-O, obtidos por meio de duas abordagens da equação de Bernoulli: 1) Utilizando valores numéricos p (Pa), v (m/s) e cz (m); 2) Empregando valores numéricos de p (Pa), p_d (Pa), e p_h (Pa).	105
Figura 4.16: Pontos de Inflexão (m) durante a oscilação da PHS-O.....	106
Figura 4.17: Soluções numéricas e analíticas de p (Pa) obtidas para 20 ondas geradas no domínio.....	109
Figura 4.18: Soluções numéricas e analíticas de p (Pa) obtidas para 40 ondas geradas no domínio.....	109

Figura 4.19: Visualização dos vetores velocidade no modelo 3D PHS-O simulado em $t = 70$ s.	110
Figura 4.20: Valores de $\bar{\varphi}$ (%) obtidos a partir dos parâmetros P_p (W) e P_w (W).	112
Figura 4.21: Ilustração dos pontos de deslocamentos mínimos (A, B, C) e máximos (D, E, F) usados na determinação da amplitude vertical de cz para cada condição inicial de submersão.	114
Figura 4.22: PHS-O alongadas na direção x : valores de cz (m), variando conforme e , profundidade de submersão (m) e H (m).	114
Figura 4.23: PHS-O alongadas na direção x : resultados de $\bar{\varphi}$ (%) em função de cz (m) e H (m).	115
Figura 4.24: PHS-O quadradas: valores de cz (m), variando conforme e (m), profundidade de submersão e (m) H (m).	116
Figura 4.25: PHS-O quadradas: resultados de $\bar{\varphi}$ (%) em função de cz (m) e H (m).	116
Figura 4.26: PHS-O alongadas na direção y : valores de cz (m), variando conforme e (m), profundidade de submersão (m) e H (m).	117
Figura 4.27: PHS-O alongadas na direção y : resultados de $\bar{\varphi}$ (%) em função de cz (m) e H (m).	118
Figura 4.28: Variação de cz (m) em função de H (m) para configuração PHS-O, com destaque para pontos pertencentes à onda de $H = 1,75$ m.	120
Figura 4.29: Variação de cz (m) da PHS-O sob a incidência de onda com $H = 1,75$ m em diferentes instantes ao longo de 90 s da simulação.	121
Figura 4.30: Variação de u (m/s) em função de H (m) na configuração PHS-NO.	122
Figura 4.31: Variação de u (m/s) em função de H (m) na configuração PHS-O.	122
Figura 4.32: Variação de p_d (Pa) em função de H (m) na configuração PHS-NO.	123
Figura 4.33: Variação de p_d (Pa) em função de H (m) na configuração PHS-O.	124
Figura 4.34: Variação de p (Pa) em função de H (m) na configuração PHS-NO.	124
Figura 4.35: Variação de p (Pa) em função de H (m) na configuração PHS-O.	125
Figura 4.36: Variação de φ (%) em função de H (m) na configuração PHS-NO.	125
Figura 4.37: Variação de φ (%) em função de H (m) na configuração PHS-O.	126
Figura 4.38: Valores de $\bar{\varphi}$ (%) em função de H (m) nas configurações PHS-NO e PHS-O.	127
Figura 4.39: Normalização do deslocamento vertical (cz) para PHS-O.	128
Figura 4.40: Variação de $\bar{\varphi}$ (%) em função de H (m), da profundidade de submersão (m) e da geometria do dispositivo (m), para as condições PHS-O e PHS-NO.	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Características sazonais dos estados de mar identificados no ponto P18.....	34
Tabela 2. Características sazonais dos estados de mar identificados no ponto P30.....	34
Tabela 3. Classificação das ondas quanto à profundidade (USACE, 1984).....	49
Tabela 4. Características das ondas empregadas nos modelos simulados.....	51
Tabela 5. Dimensões empregadas na simulação dos modelos.	54
Tabela 6. Classificação da qualidade do elemento da malha em função da assimetria (Adaptado de Moreira, 2015).	65
Tabela 7. Distribuição dos elementos da malha conforme os intervalos de assimetria, classificando a qualidade dos elementos e a correspondente quantidade em cada categoria...	67
Tabela 8. Parâmetros de solução empregados nas simulações.....	83
Tabela 9. Comparação entre os valores numérico e experimental da velocidade u (cm/s) para a configuração 2D PHS-NO.....	92
Tabela 10 . Erros numéricos por intervalos de tempo	95
Tabela 11. Relação de casos simulados em função das características das ondas.	97
Tabela 12. Comparação entre os resultados numérico e experimental da velocidade u (cm/s) no modelo 3D.	98
Tabela 13. Valores médios das variáveis u (m/s), P (Pa) e cz (m), para diferentes malhas e respectivas taxas de convergência utilizadas na análise de sensibilidade.	101
Tabela 14. Erro relativo (%) entre as soluções estática numérica e a analítica de p	106
Tabela 15. Configurações dos casos analisados.	111
Tabela 16. Classificação das PHS-O conforme a razão L/b_p	112
Tabela 17. Classificação do comportamento da PHS-O para diferentes valores de RAO.	128
Tabela 18. Configurações geométricas avaliadas para o conversor do tipo PHS e respectivas profundidades de submersão utilizadas nas simulações.....	129

LISTA DE SIGLAS

AGNU – Assembleia Geral das Nações Unidas

CAO – Coluna de Água Oscilante

CEO – Conversor de Energia das Ondas

CFD – Dinâmica dos Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics*)

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação em Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro

DBPs – Partículas Dinâmicas de Contorno Multicamadas (*Multilayer Dynamic Boundary Particles*)

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

IEA – Agência Internacional de Energia (*International Energy Agency*)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas

MAE – Erro Absoluto Médio (*Mean Absolute Error*)

MVF – Métodos dos Volumes Finitos

NO – Não Oscilante

NA – Nível da Água

NITA – Avanço de tempo não iterativo (*Non-Iterative Time-Advancement*)

O – Oscilante

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OMM – Organização Mundial de Meteorologia

PHS – Placa Horizontal Submersa

PISO – Pressão Implícita com Divisão de Operadores (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*)

PRESTO – Opção de escalonamento de pressão (*PREssure STaggering Option*)

RAO – Operador de Amplitude de Resposta (*Response Amplitude Operator*)

RMS – Raiz Quadrática Média (*Root Mean Square*)

RMSE – Raiz Quadrática Média do Erro (*Root Mean Square Error*)

SHP – Hidrodinâmica de Partículas Suavizadas (*Smoothed Particle Hydrodynamics*)

SIMPLE – Equações Ligadas Semi-IMplicas (*Semi IMPLICIT Linked Equations*)

SIMPLEC – Equações Ligadas Semi-IMplicas Consistentes (*Semi IMPLICIT Linked Equations Consistent*)

SIX DOF – Seis Graus de Liberdade (*Six Degrees of Freedom*)

SNIRH – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

UDF – Função Definida pelo Usuário (*User-Defined Function*)

UN DESA – Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas (*United Nations Department of Economic and Social Affairs*)

USACE – Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (*U.S. Army Corps of Engineers*)

VOF – Volume de Fluido (*Volume of Fluid*)

2D – Bidimensional

3D – Tridimensional

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

a – Dimensão horizontal da célula computacional, m

A – Amplitude da onda, m

b – Dimensão vertical da célula computacional, m

b_P – Largura da PHS, m

b_c – Largura do canal de ondas, m

B – Variável comprimento, m

C_x – Oscilação em relação ao eixo x , m

C_y – Oscilação em relação ao eixo y , m

C_z – Oscilação em relação ao eixo z , m

C_1 – Coeficiente de resistência linear

C_2 – Coeficiente de resistência quadrática

d – Distância livre entre a PHS e o fundo marinho, m

D – Declividade, %

E – Erro numérico, %

E_R – Erro relativo, %

e – Espessura da PHS, m

F_r – Número de Froude, adimensional

g – Aceleração da gravidade, m/s^2

h – Profundidade da água, m

H – Altura da onda, m

H_m – Amplitude da onda a montante da PHS, m

H_j – Amplitude da onda a jusante da PHS, m

H_r – Altura relativa da onda, m

H_C – Altura do canal de ondas, m

H_{C0} – Altura do trecho central do canal, m

H_{C1} – Altura dos trechos abaixo da PHS, m

H_{C2} – Altura do trecho superior do canal, m

H_{SUP} – Altura da linha superior, m

H_{INF} – Altura da linha inferior, m

i – Altura do trecho entre face superior da PHS e o limite superior do canal, m

L – Comprimento da PHS, m

L' – Comprimento do trecho entre a PHS e a estrutura inclinada, m

L_c – Comprimento do canal de ondas, m

L_{c0} – Comprimento do trecho em torno da PHS, m

L_{c1} – Comprimento do trecho a jusante da PHS, m

L_{c2} – Comprimento do trecho final do canal, m

L_{c3} – Comprimento do trecho a montante da PHS, m

L_{ESP} – Comprimento do espaçamento em torno da PHS, m

L_{PHS} – Comprimento da PHS, m

m – Massa, kg

$\dot{m}_{RMS}$ – Média quadrática da vazão mássica; vazão mássica RMS, kg/s

N_B – Fator de escala do comprimento, adimensional

N_t – Fator de escala do tempo, adimensional

N_g – Fator de escala da gravidade, adimensional

n – Número de partículas da fase específica, m^{-3}

P_r – Profundidade relativa, m

P_d – Pressão dinâmica, Pa

p – Pressão estática, Pa

P_f – Ponto final, m

P_h – Pressão hidrostática, Pa

P_i – Ponto inicial, m

P_p – Potência disponível no escoamento sob a PHS, W

P_w – Potência média da onda, W

S_{α_q} – Termo fonte de dissipação de energia, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$

t – Tempo, s

T – Período da onda, s

u – Componente horizontal de velocidade (axial), m/s

U_r – Número de Ursell, adimensional

$u_{\text{máx}}$ – Velocidade máxima na direção horizontal, m/s

$|u_{\text{máx}}|$ – Módulo da velocidade máxima na direção horizontal, m/s

$\vec{v}$ – Vetor velocidade do escoamento, m/s

v – Variável velocidade, m/s

V – Volume da célula, m^3

x – Eixo na direção horizontal, paralelo ao escoamento, m

x_s – Ponto de início da praia numérica, m

x_s – Ponto de término da praia numérica, m

X – Altura relativa da placa, %

y – Eixo na direção horizontal, perpendicular ao escoamento, m

w – Componente vertical de velocidade, m/s

z – Eixo na direção vertical, perpendicular ao escoamento, m

z_{fs} – Coordenadas médias da superfície livre, m

z_e – Coordenadas médias fundo, m

Símbolos Gregos

α – Fração volumétrica, adimensional

$\alpha_{\text{água}}$ – Fração volumétrica da água

β – Assimetria, adimensional

η – Elevação de superfície, m

λ – Comprimento da onda, m

λ_3 – Comprimento de onda da 3ª harmônica, m

μ – Coeficiente de viscosidade dinâmica, kg/m·s

ρ – Massa específica, kg/m³

τ – Tensor de tensões (N/m²)

θ – Ângulo de fase, rad

φ – Eficiência teórica, %

ϕ_n – Solução numérica, adimensional

Φ_i – Solução analítica, adimensional

ω – Frequência angular, s⁻¹

Sub - Índices

$()_m$ – Variável em escala de laboratório

$()_r$ – Variável em escala real

Super - Índices

n – Índice de tempo do passo anterior

$n + 1$ – Índice para a etapa (atual) do novo tempo

1 INTRODUÇÃO

A conscientização sobre a importância do uso de fontes renováveis de energias intensifica-se à medida que a sociedade reconhece os desafios ambientais e a necessidade de promover a transição para fontes energéticas mais sustentáveis. Como resultado, diversas instituições governamentais em âmbito global têm empreendido iniciativas para promover essa transformação (CORRALES-GONZALES et al., 2023). Adicionalmente, é plausível argumentar que a transição não só promoverá o bem-estar para a humanidade atual, mas também assegurará a segurança e o progresso das futuras gerações (IEA et al., 2023).

O potencial das ondas do mar para geração de energia elétrica é vasto e, em grande parte, inexplorado (FOTEINIS, 2022). As ondas do mar oferecem uma alta densidade de energia, boa previsibilidade e menor variabilidade em comparação com a energia eólica (FOTEINIS et al., 2017). Isso se deve ao fato das ondas, originadas inicialmente pela força do vento, se propagarem além da extensão geográfica da tempestade em que foram geradas. Segundo Bracco (2020), embora a energia das ondas apresente a capacidade de ser utilizada como recurso renovável, a indústria nesse domínio ainda se encontra em estágio incipiente, notavelmente distante em termos de desenvolvimento em relação às fontes renováveis já consolidadas, como a energia eólica e solar (PISCOPO et al., 2018).

Oliveira et al. (2019) demonstram a existência de potencial de geração de energia elétrica proveniente das ondas do mar no Brasil. De maneira específica, as características climáticas favoráveis ao longo do litoral sul se revelam propícias à exploração da energia contida nas ondas oceânicas, conforme atestado pelas pesquisas realizadas por Assis (2010), Carvalho (2010) e Pianca et al. (2010). Destaca-se, por exemplo, o estudo conduzido por Espíndola (2017), que corrobora a viabilidade da utilização de modelos de conversão de energia associados às ondas do mar para a produção de energia elétrica.

Sheng (2019) salienta que as atuais tecnologias para o aproveitamento da energia das ondas apresentam uma notável diversidade, variando conforme os distintos princípios de conversão de energia. Nesse cenário, diversos conversores têm sido propostos, entretanto poucos atingiram níveis mais avançados de viabilidade tecnológica. Dentre essas alternativas, destacam-se os dispositivos que se baseiam na oscilação de corpos, os absorvedores pontuais, os sistemas atenuadores, os dispositivos colunas de água oscilante e os mecanismos de galgamento.

1.1 Motivação

O crescimento populacional e industrial aliado ao consumismo de bens materiais tem aumentado significativamente a demanda de energia nos últimos anos, impactando o meio ambiente em proporções cada vez maiores. O estudo realizado pela Exxonmobil (2023) destaca que o consumo de eletricidade no mundo aumentará em 80% até 2050.

De acordo com relatório da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023) a principal fonte de energia do Brasil é a hidrelétrica, que responde por 61,90% da produção de energia elétrica do país (Figura 1.1), sendo gerada a partir da força das águas em usinas hidrelétricas espalhadas em seu território. Apesar de possuir um grande potencial hidrelétrico, devido às suas bacias hidrográficas, como a bacia do rio Amazonas e a bacia do rio Paraná, o cenário torna-se preocupante na atualidade diante das alterações climáticas que podem provocar desabastecimentos de reservatórios e, consequente, racionamento de energia elétrica em algumas regiões.

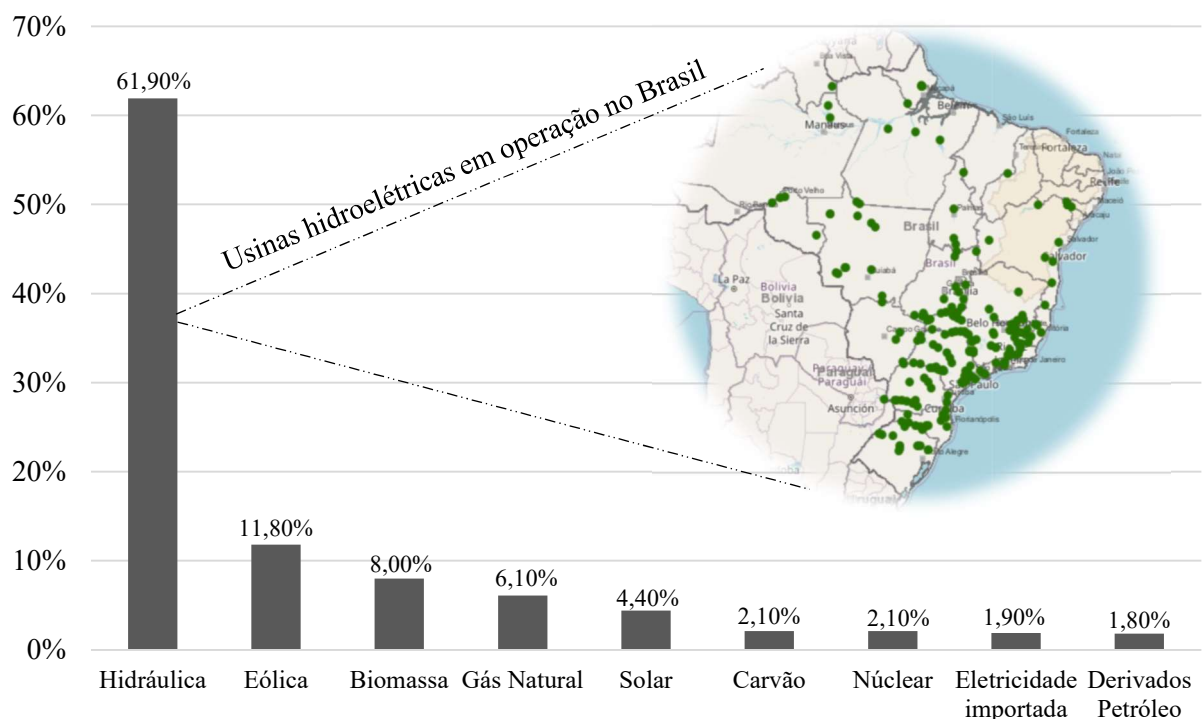


Figura 1.1: Composição da matriz energética nacional (%) e a representação das instalações dedicadas a geração de eletricidade mediante o aproveitamento de energia hídrica (EPE, 2023 e SNIRH, 2023).

De acordo com o EPE (2023), a matriz energética brasileira quando comparada a matriz energética mundial e a dos países integrantes da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) apresenta um panorama de menor impacto ao meio ambiente. Pode-se observar por meio da Figura 1.2 que apenas 12,1% da energia nacional são resultantes de fontes não renováveis. Contrariamente, a Agência Internacional de Energia (IEA- *International Energy Agency*) evidencia que tanto a matriz mundial quanto a dos países integrantes da OCDE apresentam maiores parcelas de fontes não renováveis em sua composição.

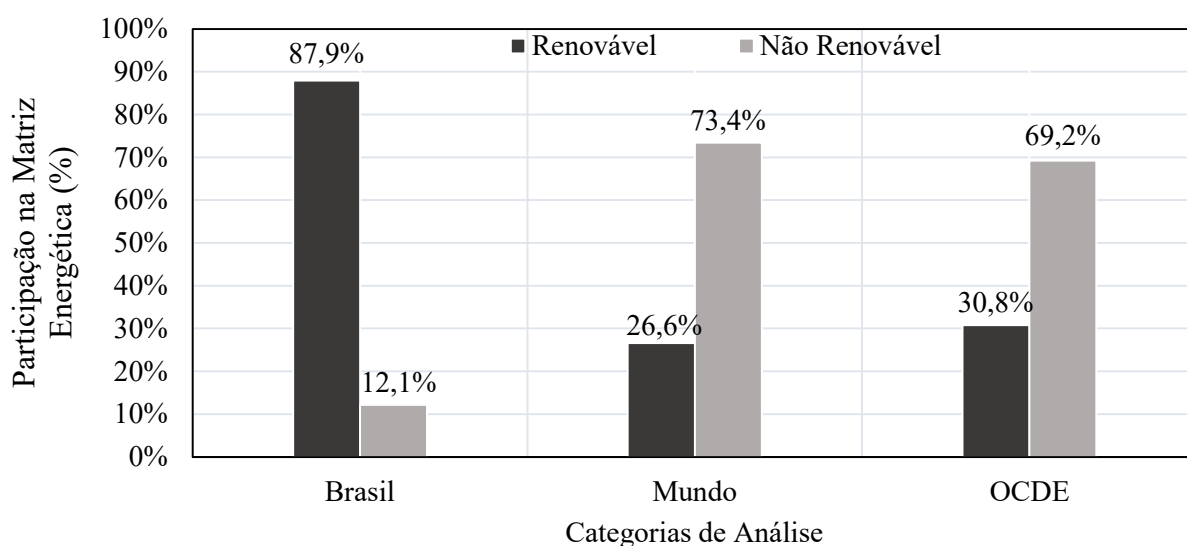


Figura 1.2: Comparativo das fontes energéticas (%) nacional e mundial (EPE, 2023 e IEA, 2023).

Apesar da matriz energética do Brasil apresentar em grande parte de sua composição fontes renováveis, faz-se necessário a busca pela diminuição da dependência da energia hidroelétrica. Diante desta problemática torna-se necessário a busca por novas alternativas de energia renovável, de modo a garantir o desenvolvimento econômico do país.

A exploração da energia das ondas do mar no Brasil destaca-se como um campo promissor de investigação. Essa tendência alinha-se à ênfase do país em fontes de energia de menor impacto ambiental, em consonância com a predominância de fontes renováveis na matriz elétrica nacional. Além disso, a extensa faixa litorânea oferece condições propícias para essa iniciativa. Segundo o IBGE (2024), o país possui 279 municípios litorâneos, abrangendo diversas comunidades isoladas com infraestrutura limitada. Nessas localidades, o uso de conversores de energia das ondas pode representar uma solução descentralizada e sustentável para o suprimento elétrico.

Falcão (2010) destaca que a energia das ondas é comumente expressa em potência por metro de frente de onda. Regiões distantes da linha do Equador apresentam médias anuais significativas de potência, situando-se entre 40 e 100 kW/m de frente de onda. No contexto brasileiro, na região Sul, estima-se uma potência de aproximadamente 30 kW/m, evidenciando o potencial para aproveitamento dessa fonte renovável. A exploração desse recurso está em alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU), que promovem o acesso universal à energia sustentável (ODS 7), a ações urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos (ODS 13) e o desenvolvimento de cidades e comunidades sustentáveis (ODS 11).

Entre algumas das possibilidades para o aproveitamento desta energia, tem-se o conversor de energia das ondas do mar (CEO) do tipo placa horizontal submersa (PHS), que ainda carece de avanços científicos e tecnológicos. Nesse sentido, os modelos numéricos podem contribuir para a evolução destes dispositivos, permitindo a superação de desafios que compreendem desde a complexidade inerente do fenômeno até os elevados esforços computacionais.

1.2 Justificativa

O aperfeiçoamento contínuo de modelos numéricos é importante no impulsionamento do progresso científico e tecnológico. Esses modelos servem de base para a compreensão e a previsão de fenômenos complexos, permitindo tomadas de decisões fundamentadas em diversas áreas do conhecimento, como por exemplo, a energética. Ao tornar esses modelos mais robustos, eleva-se sua capacidade de capturar nuances e padrões sutis, resultando em previsões mais precisas e confiáveis. Além disso, o aperfeiçoamento de modelos numéricos possibilita o desenvolvimento de novas abordagens e soluções inovadoras para desafios atuais e futuros. Os modelos numéricos desempenham um papel fundamental no desenvolvimento e aperfeiçoamento de conversores de energia do mar, permitindo simular e analisar seu comportamento em diferentes condições oceânicas. Algo que em condições experimentais de teste seria inviável por questões econômicas.

De forma geral, os modelos numéricos atualmente empregados no desenvolvimento de conversores de energia do mar levam em consideração fatores como características do local, variações no clima e dinâmica das ondas ou correntes. No entanto, esses modelos, em sua maioria, desconsideram os efeitos das oscilações dos dispositivos. Tratando-se da PHS, por

exemplo, os estudos frequentemente adotam a configuração não oscilante (PHS-NO). Neste trabalho, no entanto, propõe-se uma abordagem que incorpora as oscilações do dispositivo no domínio computacional (PHS-O), com o objetivo de promover uma compreensão mais realística do seu comportamento dinâmico.

Por consequência, a presente tese visa contribuir com estudos que considerem as oscilações do dispositivo, e com isso, aperfeiçoar um modelo numérico que permita a análise dos efeitos destes movimentos na eficiência energética do conversor, tendo como parâmetro a velocidade do escoamento sob o dispositivo PHS-O.

1.3 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral propor um modelo computacional que considere os efeitos de oscilações em um dispositivo conversor de ondas do mar em energia elétrica do tipo PHS.

1.4 Objetivos Específicos

Com a finalidade descrever os resultados a serem alcançados por meio deste estudo, apresentam-se, a seguir, os objetivos específicos:

1. Verificar e validar modelo numérico bidimensional (2D) com dispositivo PHS fixo (PHS-NO);
2. Verificar e validar modelo numérico tridimensional (3D) com dispositivo PHS fixo (PHS-NO);
3. Desenvolver um modelo computacional 3D para a simulação de um dispositivo PHS-O;
4. Verificar o movimento vertical (cz) para configuração 3D PHS-O;
5. Realizar um estudo paramétrico para a configuração 3D PHS-O;
6. Analisar os deslocamentos do dispositivo decorrente da interação da onda com a PHS em relação ao eixo z (cz);

7. Avaliar a eficiência do dispositivo na configuração 3D PHS-O, tendo como parâmetro a velocidade média do escoamento abaixo do dispositivo;
8. Aplicar o modelo em estudo de caso, comparando o desempenho das configurações PHS-NO e PHS-O.

1.5 Delineamento da Tese

Esta tese está estruturada em cinco capítulos, os quais apresentam:

Capítulo 1 – Introdução: O panorama do desenvolvimento da tese inicia-se pela motivação que fundamenta a escolha do tema, seguido da justificativa que ressalta sua relevância científica. Na sequência, são apresentados os objetivos gerais e específicos que orientam a pesquisa e, por fim, descreve-se o delineamento adotado para a estruturação e condução do trabalho.

Capítulo 2 – Energia das Ondas do Mar: Demonstração do potencial energético presente nas ondas do mar. Posteriormente, apresentam-se as tecnologias existentes para explorar esse recurso e a caracterização da área de estudo. Em seguida, discute-se o estado da arte referente ao dispositivo estudado nesta tese, a PHS. Abordando os princípios de funcionamento da PHS, destacando sua atuação como CEO e também como uma estrutura de proteção costeira do tipo quebra-mar.

Capítulo 3 – Metodologia: A metodologia da pesquisa divide-se em duas fases. Inicia-se com a modelagem matemática, abordando a teoria das ondas, critérios de similaridade, domínio computacional, parâmetros de interesse e conceitos do modelo multifásico *Volume of Fluid* (VOF). Na sequência, a modelagem numérica, elucidando conceitos do Método dos Volumes Finitos, a discretização das funções de interpolação, o acoplamento de pressão-velocidade, o esquema de avanço no tempo, a discretização do domínio computacional. Por fim, apresentam-se os conceitos de verificação e validação aplicados ao modelo computacional.

Capítulo 4 – Neste capítulo são apresentados os resultados da modelagem numérica e sua respectiva análise. A primeira parte dedica-se à verificação e validação do modelo computacional, abrangendo a propagação de ondas e a resposta do dispositivo nas configurações 2D e 3D PHS-NO, bem como a análise do comportamento 3D PHS-O, incluindo a avaliação do modelo numérico e a verificação do movimento vertical do dispositivo. A segunda parte dedica-se à calibração do modelo numérico, realizada por meio de uma análise

paramétrica que contempla variações na geometria da PHS, no nível de submersão e nas características das ondas incidentes, com o objetivo de avaliar o desempenho da PHS em diferentes condições de operação. Por fim, apresenta-se a aplicação em um estudo de caso que integra e evidencia o potencial prático do modelo desenvolvido.

Capítulo 5 – Reúne as principais conclusões do estudo, com ênfase nos resultados alcançados na verificação e validação dos modelos 2D e 3D PHS-NO, na verificação do movimento do dispositivo 3D PHS-O, na calibração do modelo 3D PHS-O por meio de análises paramétricas e, por fim, na aplicação em estudo de caso, que permitiu avaliar de forma abrangente o desempenho do sistema. O capítulo também apresenta as contribuições práticas e científicas da pesquisa e finaliza com sugestões para trabalhos futuros, que indicam caminhos de aprofundamento e ampliação dos resultados obtidos.

Referências Bibliográficas – Ao final são apresentadas as referências bibliográficas que serviram como embasamento teórico para o desenvolvimento desta tese.

2 ENERGIA DAS ONDAS DO MAR

2.1 Potencial Energético dos Oceanos

As ODS aprovadas pela Assembleia Geral das Nações Unidas (AGNU) em 2015, estabelecem uma estrutura significativa de cooperação internacional visando um futuro sustentável do planeta. No âmbito da meta global de energia, denominado ODS 7, são delineados três objetivos fundamentais: assegurar acesso universal e confiável a serviços energéticos modernos; aumentar substancialmente a parcela de fontes renováveis de energia na matriz energética global e dobrar a taxa de eficiência energética (UN DESA, 2015).

Nezhad et al. (2018) destacam que a energia presente nos oceanos pode ser aproveitada por meio da exploração de diferentes fenômenos físicos, destacando-se as ondas, marés, gradientes térmicos e gradientes de salinidade. Sheng (2019) cita que a energia das ondas é uma das fontes renováveis mais concentradas, superando outras alternativas energéticas, com recursos abundantes em diversos países ao redor do mundo.

De acordo com a Agência Internacional de Energias Renováveis (IRENA, 2023), o potencial teórico global da energia dos oceanos é da ordem de 76.000,00 TWh/ano. Desse total, cerca de 29.500,00 TWh/ano correspondem à energia das ondas, 44.000,00 TWh/ano à energia térmica oceânica, aproximadamente 1.200,00 TWh/ano às correntes de maré e cerca de 1.650,00 TWh/ano aos gradientes de salinidade.

Jusoh et al. (2019) acrescentam que as ondas do mar podem gerar mais de 100 kW/m de densidade de potência de energia, valor este superior à intensidade gerada por fontes solares e eólicas. No entanto, devido à sua irregularidade e às restrições físicas para a instalação dos CEOs, apenas 25% do potencial disponível, pode ser aproveitado (CRUZ, 2007). Nesse contexto, Phillips (2019) destaca que as ondas geradas pelo vento são classificadas como ondas de superfície, que ocorrem na interface livre de corpos d'água, incluindo oceanos, lagos, rios, canais, poças ou lagoas. As ondas formam-se a partir do atrito entre as moléculas de ar e de água, por meio do qual a energia do vento é transferida para a água. Essa energia de superfície constitui o recurso disponível para aproveitamento e conversão em eletricidade por sistemas especializados.

A regularidade da potência das ondas ao longo do ano é um fator que deve ser considerado quando se trata da geração de energia por meio de ondas oceânicas. De acordo com

Lisboa et al. (2017) a disponibilidade de energia, ao longo da plataforma continental sul-sudeste do Brasil, pode variar de 6,00 a 22,30 kW/m.

Espíndola (2017) apresenta uma maneira para identificar áreas com potencial para geração de energia elétrica a partir da energia das ondas no litoral brasileiro. Utilizando uma análise multicritério, o estudo avaliou e classificou os locais com base em critérios técnicos, ambientais e econômicos, levando em consideração fatores como profundidade, distância da costa, correntes marítimas e proximidade de áreas preservadas. Os resultados revelaram uma densidade de potência média de até 24 kW/m, indicando o potencial significativo dessas áreas para a produção de energia a partir das ondas.

Herrera et al. (2021) ressaltam que a identificação das áreas onde as ondas de maiores magnitudes são geradas é crucial ao planejar e implementar dispositivos CEO. Levando em consideração que a formação das ondas está intimamente relacionada aos ventos de superfície, as regiões com potencial promissor para aproveitamento da energia das ondas estão entre 40° e 60° de latitude em ambos os hemisférios (BERNARDONI et al., 2019).

De acordo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) o litoral do Brasil se estende ao longo das latitudes de 04° 30'31" N até -33° 44' 38" S, abrangendo 17 estados em uma extensão total de 10.900,00 km (IBGE, 2021). Embora esteja localizado fora da faixa de latitude considerada promissora, sua vasta extensão também pode ser um fator favorável para a exploração dessa fonte de energia, contribuindo para diversificar a matriz energética nacional.

2.2 Tecnologias de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica

Para tornar a energia das ondas economicamente competitiva em relação a outras fontes renováveis ou à produção convencional de energia não renovável, é fundamental enfrentar o desafio central de aprimorar a eficiência na conversão dessa forma de energia. O avanço nesse sentido é crucial, uma vez que a eficiência em cada etapa de conversão deve ser maximizada para reduzir as perdas existentes. Esse aprimoramento está intrinsecamente ligado à redução do custo global para produção dessa alternativa energética (SHENG, 2019).

Oliveira et al. (2019) abordam iniciativas relevantes no contexto brasileiro relacionadas aos dispositivos de conversão de energia das ondas. No estudo, destaca-se o protótipo submetido a testes no porto do Pecém, no Ceará, além de pesquisas que exploram um CEO, caracterizado por uma configuração piramidal associada a uma plataforma flutuante. O

objetivo do projeto proposto pelos autores é a otimização dos custos associados aos processos de instalação, geração e transmissão de energia. Ambas as propostas foram desenvolvidas pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação em Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE).

O critério de classificação adotado para estes dispositivos relaciona-se com sua profundidade de instalação (CRUZ e SARMENTO, 2004). Desta forma, os dispositivos classificam-se em costeiros (*onshore*), com acesso por terra em profundidades de até 20 m; dispositivos próximos da costa (*nearshore*), instalados em profundidades entre 20 a 50 m; e dispositivos afastados da costa (*offshore*), localizados em profundidades acima de 50 m, conforme Figura 2.1 (CRUZ, 2008).



Figura 2.1: Classificação dos CEOs de acordo com sua localização: *Onshore* (1ª geração); *Nearshore* (2ª geração) e *Offshore* (3ª geração).

A localização está intrinsecamente associada à evolução histórica dos CEO. As unidades estáticas implantadas nas proximidades da costa representaram os primeiros dispositivos comerciais a captar a energia das ondas do mar, sendo frequentemente reconhecidas como a primeira geração dessa tecnologia. A viabilidade da instalação de CEO em águas abertas devido à alta densidade de potência de energia das ondas nessa localidade impulsionou o desenvolvimento da segunda geração de CEO. Estes são ancorados no fundo do mar e instalados em proximidade à costa, incorporando a experiência adquirida no desenvolvimento da primeira geração desses dispositivos (HARRIS et al., 2004).

Os CEO de terceira geração são comumente unidades flutuantes ancoradas, frequentemente baseadas em distintas tecnologias de design, mas também aplicam princípios e conceitos derivados dos dispositivos de primeira e segunda geração (ver Figura 2.1). Esses dispositivos foram vistos historicamente como não comercialmente viáveis devido aos altos custos de instalação. No entanto, a perspectiva de alta energia das ondas, o desenvolvimento contínuo em tecnologias *offshore* e a necessidade política e social de mais energia de fontes

renováveis fez com que o desenvolvimento comercial da terceira geração desses dispositivos atualmente se tornassem mais atraentes (HARRIS et al., 2004).

Uma outra classificação possível apresentada por Callaway (2007) associa-se ao modo de conversão de energia das ondas em energia elétrica (Figura 2.2), isto é, ao tipo de dispositivo. Assim, existem fundamentalmente três classes principais de conversores de energia das ondas que são: coluna de água oscilante (CAO) (Figura 2.2 A); corpos oscilantes, podendo ser de dispositivos oscilantes progressivos (*surging devices*) (Figura 2.2 B) ou absorção pontual (*point absorbers*) (Figura 2.2 C); e o galgamento (Figura 2.2 F).

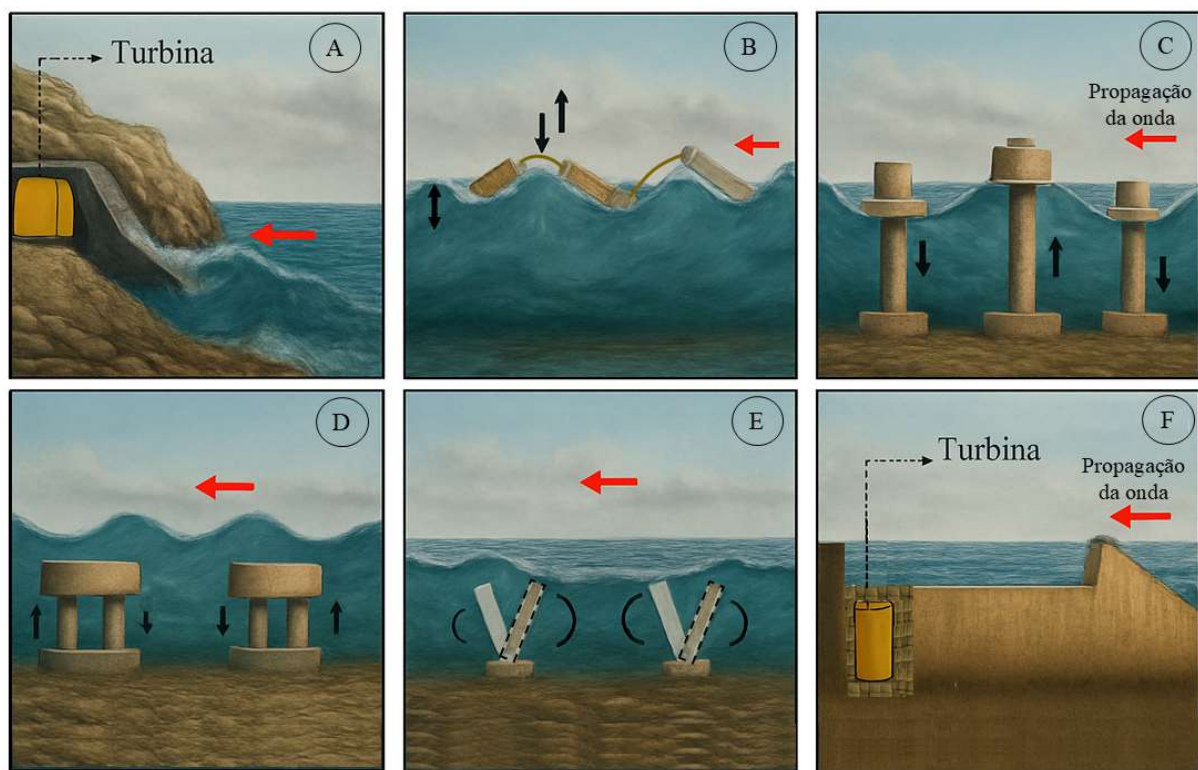


Figura 2.2: Classificação dos CEOs quanto ao princípio de funcionamento: A) CAO; B) Corpos Oscilantes – Progressivos; C) Corpos Oscilantes – Absorção Pontual; D) Corpos Oscilantes – Absorção Pontual Submerso; E) Corpos Oscilantes – Conversor Oscilante de Translação das Ondas; F) Galgamento (Adaptado de Callaway, 2007).

Esta classificação não encerra a possibilidade de existirem outros tipos de dispositivos que não se enquadrem nestas categorias de conversores. Um exemplo é o dispositivo PHS que utiliza uma placa horizontal associado a uma turbina, ambos submersos, para aproveitamento da energia das ondas do mar.

2.3 Princípio de Funcionamento do Dispositivo PHS

O dispositivo de PHS consiste em uma placa plana submersa horizontalmente no mar (GRAW, 1993a). A passagem das ondas pelo dispositivo cria um escoamento sob a PHS que muda periodicamente de sentido, absorvendo a energia das ondas incidentes (WANG et al., 2016). Assim, o equipamento pode ser usado tanto como CEO (Figura 2.3), utilizando esse escoamento alternado para acionar a turbina, quanto como quebra-mar, atenuando a energia das ondas que atingem as regiões costeiras (NING et al., 2015).

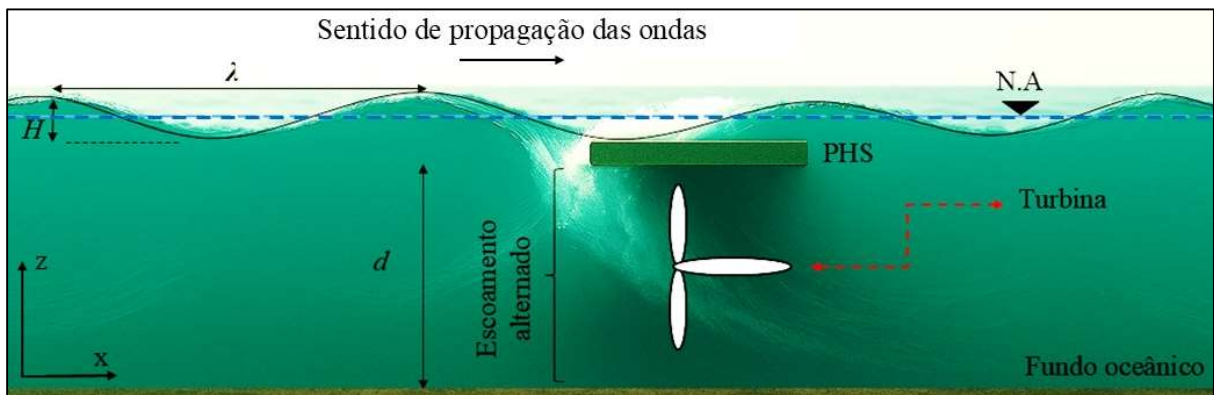


Figura 2.3: Representação esquemática do dispositivo PHS indicando os parâmetros da onda (comprimento λ e altura H) e a distância livre (d) entre o PHS e o fundo marinho (Adaptado de Graw, 1994).

Graw (1993b) descreve os processos que compõem o princípio físico de funcionamento destes dispositivos. De acordo com o autor, ao atingir a PHS, a onda que se propaga divide-se em duas partes: uma onda de superfície, na qual a gravidade atua como força restauradora visando restabelecer a condição de equilíbrio, localizada acima da PHS; e uma perturbação de pressão situada abaixo da PHS. O fluxo de energia, próximo à superfície, passa sobre a PHS com a velocidade da onda, influenciada pela redução da profundidade da água nessa região. Por outro lado, a outra parte, abaixo da PHS, se propaga mais devagar, com a velocidade da distorção de pressão.

Desta maneira, a onda de gravidade (menor) passa a PHS e atinge a região a jusante do dispositivo, onde uma nova onda é formada, a qual segue com mesmo sentido de deslocamento e mesmo comprimento de onda original, porém com menos energia. Além disso, uma parte da energia, devido ao galgamento da onda sobre a PHS, também se propaga na região abaixo da PHS, seguindo na direção a montante. Origina-se então um forte escoamento pulsante no sentido contrário ao da propagação das ondas, a depender do comprimento da PHS e da distribuição original do fluxo de energia na região próxima à superfície (GRAW, 1993a).

Na etapa final do processo, a energia transferida por este escoamento, volta para a montante da PHS, em função das distorções de pressões causadas, propiciando que as ondas seguintes se propaguem na região abaixo da PHS e o escoamento torne-se intenso. Este escoamento é a razão pela qual a energia é refletida por esta estrutura. Como ele depende do equilíbrio de energia entre a região a jusante e montante da PHS, na região abaixo da PHS, o dispositivo comporta-se como um filtro de ondas (GRAW, 1993a).

Yu (2002) complementa que a PHS pode ser utilizada para proteção costeira, uma vez que, o movimento da onda pode ser analisado como a propagação de uma perturbação forçada, governada por diferentes mecanismos em um escoamento com superfície livre e em um escoamento de pressão. Nesta condição, a velocidade de fase do transporte de momento sobre e sob a PHS tende a apresentar valores distintos.

Dessa maneira é possível, escolhendo adequadamente o comprimento da PHS, criar uma situação tal que o escoamento sobre e sob a PHS fique fora de fase na extremidade da onda descendente, resultando em uma inversão da energia cinética da onda. Como consequência, a quantidade de energia das ondas que será transmitida para baixo da PHS será consideravelmente reduzida, portanto, a PHS torna-se obstrutiva às ondas incidentes e pode ser usada para controle de ondas (YU, 2002).

2.4 Caracterização da Área de Estudo

A área de estudo corresponde à região central da plataforma continental interna rasa do Estado do Paraná, situada no litoral sul do Brasil, entre as isóbatas de 18 m e 30 m (curvas de nível do relevo submarino). Essa faixa está inserida no arco praial que se estende de Pontal do Sul (25°34'S, 48°20'W) até a Ponta de Caiobá (25°50'S, 48°31'W), com aproximadamente 35 km de extensão e orientação NE–SW. Trata-se de um trecho representativo do litoral paranaense, com influência significativa de sistemas meteorológicos de grande escala e relevância para estudos costeiros e oceanográficos (Figura 2.4).

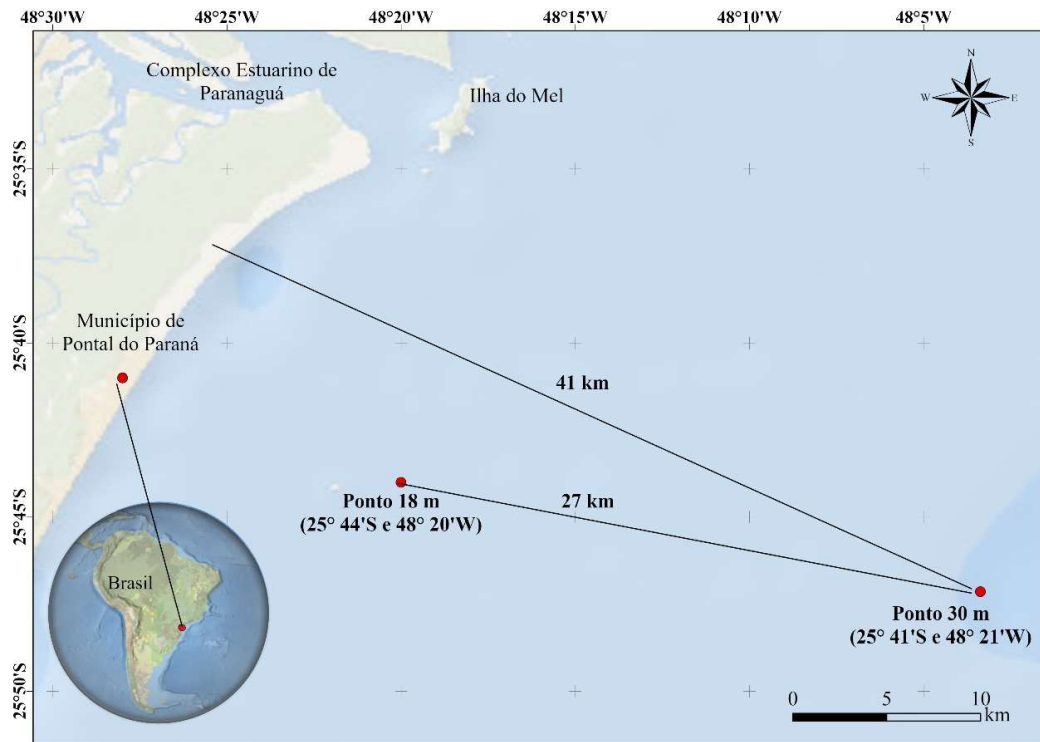


Figura 2.4: Região central da linha de costa do Estado do Paraná. Destaque nos pontos de registro de parâmetros de ondas na plataforma interna rasa P18 e P30 (Adaptado de Nemes e Marone, 2013).

A caracterização do clima de ondas da região, apresentada por Nemes e Marone (2013), foi realizada a partir de fundeios oceanográficos utilizando dispositivos S4 ADW InterOcean, ancorados a 18 m (P18) e 30 m (P30) de profundidade, no período de julho de 2009 a novembro de 2010. Ao longo de 488 dias em P18 e 408 dias no P30, foram registradas mais de 5.000 amostras de dados de ondas, abrangendo todas as estações do ano no Hemisfério Sul: inverno (junho, julho e agosto), primavera (setembro, outubro e novembro), verão (dezembro, janeiro e fevereiro) e outono (março, abril e maio), o que permitiu identificar variações sazonais, intra-anuais e eventos extremos.

Com base nesses registros, constatou-se que o período de pico (T_p) variou de 4 s a 18 s, sendo as classes mais frequentes de 7 a 9 s em ambos os pontos. Com base em T_p , foram identificados dois estados de mar: Vagas, caracterizadas por ondas geradas localmente ou próximas à costa ($T_p < 10$ s), e Swell, formado por ondas geradas distantes à costa ou remotas ($T_p \geq 10$ s). Além de T_p , a altura significativa das ondas (H_s) também apresentou variações sazonais, com valores típicos entre 0,75 m e 2,25 m, refletindo as condições de energia do mar em cada estado.

Entre os resultados obtidos, os estados de mar do tipo vagas mostraram-se predominantes ao longo do período de observação tanto no ponto P18 quanto no ponto P30,

conforme indicado na Tabela 1 e na Tabela 2. Os estados do mar tipo Swell foram mais expressivos no outono e primavera, estações que também concentraram a maior ocorrência de eventos extremos (definidos como $H_{m\acute{a}x} \geq 4$ m), sendo os ciclones subtropicais os principais sistemas meteorológicos associados a esses eventos.

Tabela 1. Características sazonais dos estados de mar identificados no ponto P18.

Estações	Ponto	Vagas			Swell		
		(%)	H_s (m)	T_p (s)	(%)	H_s (m)	T_p (s)
Primavera	P18	63,97	1,00 – 1,25	8 – 9	36,03	1,00 – 1,75	10 – 12
Verão		85,67	0,75 – 1,00	7 – 8	14,33	–	–
Outono		59,92	0,75 – 1,50	8 – 9	40,08	1,75 – 2,25	10 – 11
Inverno		61,06	1,00 – 1,50	7 – 9	38,94	1,00 – 1,25	10

Tabela 2. Características sazonais dos estados de mar identificados no ponto P30.

Estações	Ponto	Vagas			Swell		
		(%)	H_s (m)	T_p (s)	(%)	H_s (m)	T_p (s)
Primavera	P30	60,81	1,25 – 1,75	8 – 9	39,19	1,5 – 2,00	11 – 13
Verão		74,76	1,25 – 1,50	8	25,24	–	–
Outono		56,83	1,00	8	43,17	1,75 – 2,25	10 – 12
Inverno		63,97	1,50	7 – 8	36,03	1,25 – 1,75	11 – 12

O estudo realizado fornece parâmetros realistas para definir as condições oceânicas na costa paranaense. Assim, constitui um referencial científico sólido para análises hidrodinâmicas mais confiáveis, aprofundando o entendimento dos processos costeiros regionais e permitindo a validação de modelos numéricos voltados à dinâmica das ondas e à sua interação com estruturas costeiras.

2.5 Sistema de PHS

Historicamente, as PHS foram inicialmente concebidas como estruturas de proteção costeira (YU, 1995; YU, 2002; EVANS e WANG e SHEN, 1999). Posteriormente, estudos experimentais e numéricos demonstraram que o escoamento alternado sob a placa poderia ser aproveitado para geração de energia elétrica, permitindo que a PHS evoluísse de quebra-mar, atuando apenas como barreira de dissipação de ondas, para um CEO (ORER e OZDAMAR, 2007; GRAW, 1993a). Trabalhos recentes analisam seu desempenho combinado em ambas as funções (ZHENG, 2021; MOTTA et al., 2025). Com o intuito de fundamentar teoricamente o

sistema PHS, esta seção apresenta o referencial que reúne as contribuições dos principais autores quanto ao seu funcionamento e aplicação tanto como CEO quanto como dispositivo de proteção costeira do tipo quebra-mar, enfatizando que o foco central deste trabalho está na sua atuação como CEO.

2.5.1 PHS Utilizada como Conversor de Energia das Ondas

Uma das alternativas no contexto dos CEOs, ainda pouco conhecido, refere-se à PHS. O desenvolvimento dessa tecnologia requer uma compreensão aprofundada do comportamento das ondas nas proximidades da PHS, bem como as forças e os momentos atuantes sobre o dispositivo (YADAV, 2022).

Neste sentido, Seibt et al. (2014b) contribuíram para o entendimento da PHS-NO como CEO, por meio da avaliação de um modelo numérico que aplica o MVF e VOF. Além disso, realizaram uma investigação inovadora sobre como a distância da placa em relação ao fundo do mar (submersão) afeta o desempenho do CEO, implementando o modelo multifásico VOF para modelar a superfície livre e sua interação com a PHS-NO.

Os resultados deste estudo oferecem uma recomendação teórica sobre o impacto da distância (d) no desempenho do conversor. Para alcançar esse objetivo, foram realizadas diversas simulações com diferentes valores de d : 0,46 m, 0,48 m, 0,50 m, 0,51 m, 0,52 m e 0,53 m. Em cada caso, foram registradas as velocidades em vários pontos (P) igualmente distribuídos no domínio computacional ao longo da linha tracejada sob a PHS-NO (Figura 2.5). Os pesquisadores também obtiveram a vazão mássica *Root Mean Square* (RMS) e a pressão da água nos mesmos pontos onde as velocidades foram monitoradas, possibilitando o cálculo da eficiência do dispositivo. Todos os resultados dessas simulações foram registrados para o intervalo de tempo e utilizados no processo de verificação e validação do modelo computacional.

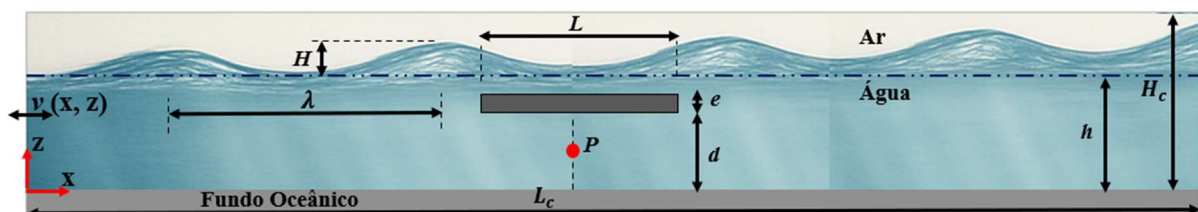


Figura 2.5: Ilustração do domínio computacional com a PHS-NO inserida no tanque numérico (Adaptado de Seibt et al., 2019).

Gomes et al. (2015) realizaram um estudo numérico do escoamento de ondas em um canal e o funcionamento de três tipos de CEO: CAO, galgamento e placa submersa (PHS-NO), em escalas laboratorial e real. Utilizando o MVF com o modelo VOF, foram resolvidas as equações de conservação de massa, momento e fração volumétrica para simular a interação entre as ondas e os dispositivos. A Teoria Construtal foi aplicada para avaliar o efeito de diferentes parâmetros geométricos, como proporções de altura e comprimento das câmaras e distâncias ao fundo do canal, sobre o desempenho energético. Os resultados indicaram que a forma geométrica exerce grande influência sobre a eficiência dos dispositivos, embora não exista uma configuração universalmente ótima. Além disso, foram analisados os efeitos de variáveis como período de onda e profundidade relativa sobre o desempenho hidrodinâmico, reforçando a importância do ajuste conjunto entre geometria e condições de onda.

Seibt et al. (2019) realizaram uma análise numérica de um CEO do tipo PHS-NO com o objetivo de avaliar sua eficiência teórica para diversas alturas relativas das placas e diferentes períodos de onda que se propagam pela estrutura, sem a presença da turbina sob a placa. Os resultados obtidos forneceram recomendações teóricas acerca do desempenho do dispositivo, indicando que a placa posicionada mais próxima à superfície livre (submersão reduzida) apresenta maior eficiência de conversão, especialmente para ondas de períodos longos.

Com o intuito de aprofundar a compreensão sobre o dispositivo, Kharati-Koopae e Kiali-Kooshkghazi (2019) investigaram numericamente o efeito do comprimento da PHS (L) de uma PHS-NO, utilizada como CEO, na potência absorvida. A eficiência da PHS-NO foi analisada para diferentes áreas de abertura sob a placa (Figura 2.6 B), considerando variados períodos e alturas de onda (H), assim como diferentes distâncias (d) entre a placa e o fundo do mar (Figura 2.6 A). A verificação e a validação foram realizadas ao comparar os resultados deste trabalho com abordagens teóricas e experimentais, revelando concordâncias significativas. Os resultados indicaram que, com uma área de abertura reduzida, obteve-se maior eficiência da PHS-NO, notando-se um impacto notável na eficiência ao variar o comprimento da placa.

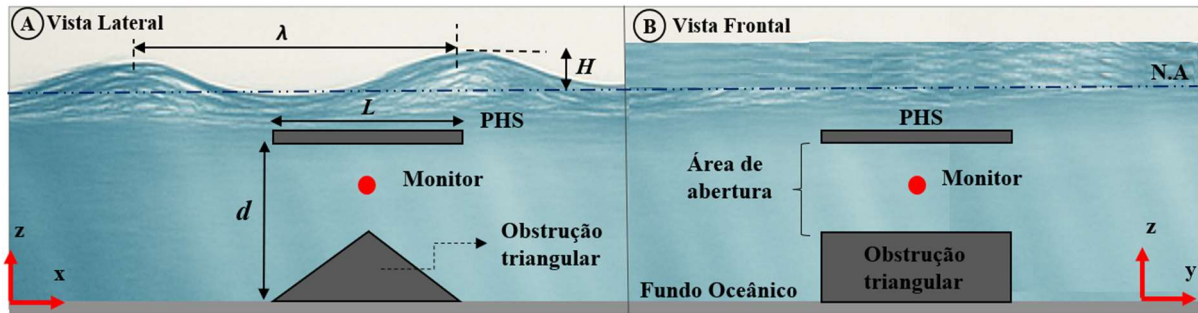


Figura 2.6: (A) - Ilustração do sistema de PHS-NO associado a uma obstrução triangular. (B) Área de abertura variável em relação às dimensões e posição do PHS-NO, bem como às dimensões da obstrução triangular (Adaptado de Kharati-Koopae e Kiali-Kooshkghazi, 2019).

As descobertas numéricas de Kharati-Koopae e Kiali-Kooshkghazi (2019) sugerem que, em áreas de abertura e períodos de onda baixos, é possível estabelecer um critério baseado na relação entre λ e L para identificar o ponto em que a eficiência da placa se atenua. Observou-se que, quando a área de abertura é reduzida, o aumento da altura e do período da onda, bem como da distância da placa em relação ao fundo do mar, exerce efeito positivo sobre a eficiência da estrutura. Constatou-se, ainda, que a relação entre a área de abertura sob a placa e sua eficiência apresenta caráter não linear.

He et al. (2019) discorrem sobre a possibilidade da combinação das funções de CEO e proteção costeira. Para isto, desenvolveram um modelo numérico 2D onde analisaram a interação entre as ondas e a PHS-NO, empregando o método hidrodinâmico de partículas suavizadas fracamente compressíveis (*weakly compressible smoothed particle hydrodynamics method* - WCSPH). Os cálculos relativos aos perfis de onda e às velocidades do escoamento foram verificados mediante comparações com experimentos disponíveis que tratam de interações entre ondas solitárias e regulares com a PHS-NO.

Dong et al. (2020) analisaram as forças geradas por ondas monocromáticas e solitárias sobre uma PHS-NO em um canal de ondas, considerando fundo plano e inclinado (1:10). Os resultados mostraram que ondas monocromáticas não apresentaram diferenças significativas entre os dois fundos, enquanto as ondas solitárias geraram menores forças verticais e momentos de tombamento com fundo inclinado. As forças medidas divergiram dos resultados da teoria linear, evidenciando efeitos não lineares. Também foram analisadas as influências do comprimento e altura das ondas e da profundidade de submersão nas cargas exercidas sobre a placa.

Cummins et al. (2022) investigaram a interação de ondas regulares com placas inclinadas emergindo na superfície, destacando o impacto de fenômenos de ressonância na

geração de grandes forças hidrodinâmicas sobre a estrutura. Utilizando o método dos elementos de contorno e dinâmica dos fluidos computacional (CFD), o estudo revelou que a inclinação da placa influencia significativamente as forças de excitação atuantes. Os principais resultados indicaram que: (i) as forças geradas pelas ondas são predominantemente determinadas pela altura da onda no canal, exceto em condições de ressonância, quando essas forças podem se aproximar de zero; (ii) em pequenos ângulos de inclinação, a ressonância exerce maior influência sobre a altura da onda, enquanto ângulos maiores atenuam esse efeito; e (iii) para maximizar a captação de energia, é necessário cautela ao aplicar a teoria de escoamento potencial linear na estimativa de potência.

Neste contexto, Seibt et al. (2023) desenvolveram uma análise numérica com o objetivo de otimizar a geometria e maximizar o desempenho de um dispositivo PHS-NO em escala real. O estudo utilizou os princípios do Constructal Design para definir os parâmetros geométricos e as restrições do problema, aplicando o método de busca exaustiva como procedimento de otimização. Por meio de um canal 2D de ondas numéricas, inicialmente modelado em escala de laboratório e posteriormente ajustado a escala real com base em critérios de similaridade de Froude, foram avaliados o desempenho hidrodinâmico e a concordância entre os resultados do modelo numérico e os de escala real. Os autores identificaram melhor eficiência para altura relativa $X = 90\%$, alcançando 37,15% de rendimento e um ganho de 35,61% em relação à configuração menos eficiente, com diferença média de apenas 1,15% entre os resultados em escala modelada e real.

Hayatdavoodi et al. (2023) conduziram estudos para analisar as oscilações geradas por ondas em PHS-O, utilizando tanto experimentos quanto modelos computacionais. Foram utilizados modelos lineares baseados na função de Green, além de abordagens não lineares que envolveram equações de Green-Naghdi e CFD. A oscilação vertical da PHS-O foi identificada como resultado das forças ondulatórias e regulada por um sistema composto por mola e amortecedor. Além disso, os autores apresentam uma discussão abrangente sobre as aplicações da PHS-O na geração de energia elétrica, descrevendo como a altura e a velocidade das oscilações variam conforme a profundidade inicial de submersão, a rigidez da mola conectada e a resistência do amortecedor viscoso.

Thum et al. (2024) investigam numericamente uma PHS-NO submetida a ondas regulares e irregulares, com aplicação como quebra-mar ou CEO. Utilizando a metodologia WaveMIMO, a qual permite gerar e propagar numericamente ondas irregulares realísticas a partir de séries temporais de elevação da superfície livre ou de espectros obtidos por softwares

como o TOMAWAC, associada ao MVF e ao modelo VOF, analisaram-se cinco comprimentos da placa (L_p). Os resultados mostram que a resposta hidrodinâmica varia conforme o tipo de onda, sendo o uso exclusivo de ondas regulares insuficiente. A PHS apresentou melhor desempenho como quebra-mar para o comprimento horizontal de $3L_p$ e maior eficiência como CEO quando foi de $2L_p$, ambos sob ondas irregulares. Desta forma, o estudo contribui para preencher a lacuna existente sobre o comportamento de PHS sob ação de ondas irregulares realística.

Motta et al. (2025) investigaram a influência da inclinação de placas submersas (SP) atuando simultaneamente como quebra-mar e CEO, sob a ação de ondas regulares representativas e irregulares realísticas representativas de um estado de mar. Foram avaliados onze ângulos de inclinação, mantendo constantes a espessura e o volume de material da placa. As simulações numéricas foram conduzidas no ANSYS Fluent, utilizando o MVF para a solução das equações de transporte e o modelo VOF para representar a interação água-ar. As ondas regulares foram geradas com base na teoria de segunda ordem de Stokes, enquanto o método WaveMIMO foi aplicado para a geração das ondas irregulares. O desempenho da placa como quebra-mar foi avaliado a partir da elevação da superfície livre a montante e a jusante, e como CEO, por meio da velocidade axial abaixo da placa. Os resultados demonstraram que a inclinação desempenha papel determinante na eficiência do dispositivo, com certas configurações aumentando a eficiência de conversão em mais de 50%, sem comprometer o desempenho como quebra-mar, mesmo sob condições de mar irregulares.

2.5.2 PHS Utilizada como Quebra-Mar

Vicinanza et al. (2014) definem quebra-mar como uma estrutura artificial construída para resistir à energia das ondas, protegendo áreas desejadas, como portos, cais e assentamentos humanos. O projeto de quebra-mares é focado principalmente em reduzir a quantidade de energia das ondas transportada por meio de combinação de vários princípios, incluindo; quebra de onda, escoamento poroso, reflexão de ondas, transmissão e galgamento. O autor cita dois tipos de configurações de quebra-mar existente atualmente, estruturas fixas e quebra-mar flutuantes.

Yueh et al. (2018) relatam que, no contexto mundial, há diversos tipos de estruturas denominadas quebra-mares em utilização. Essas estruturas têm como objetivo a formação de áreas de águas calmas que proporcionem abrigo às embarcações contra as forças das ondas.

Adicionalmente, relatam o surgimento recente de várias propostas e de estudos aprofundados sobre novos tipos de quebra-mares, os quais buscam eficácia no controle das ondas oceânicas, com destaque para a utilização de estruturas submersas, uma vez que estas não afetam visualmente a paisagem marinha.

Diferente de um quebra-mar convencional, a PHS-NO conta com a interação fluido-fluido para bloquear ondas, como pode ser visualizado na Figura 2.7.

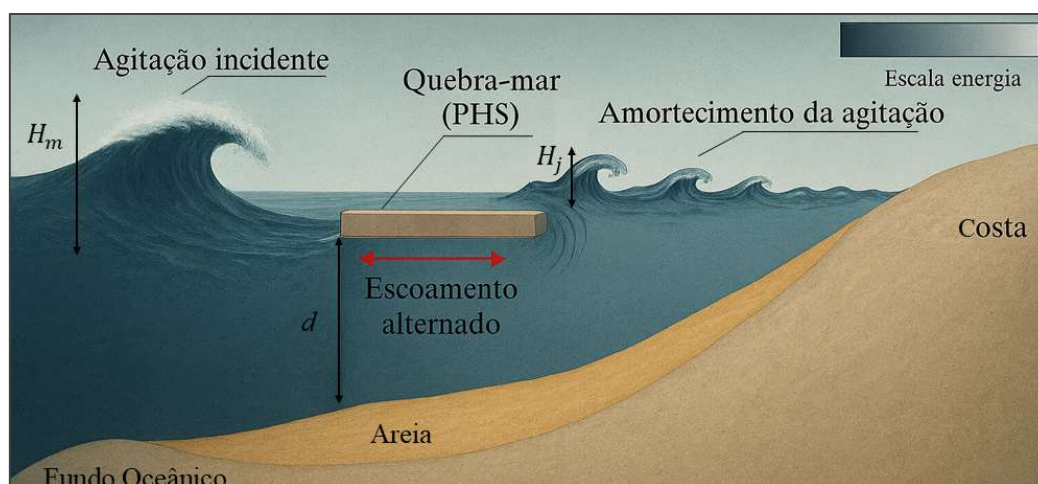


Figura 2.7: Ação de amortecimento das ondas proporcionada pelo quebra-mar do tipo PHS-NO resultando na redução da amplitude da onda a montante (H_m) da PHS-NO e na geração de onda a jusante (H_j) da PHS-NO de menor amplitude em direção à costa.

A estrutura em si funciona principalmente para alterar o curso do escoamento em vez de resistir passivamente às ações das ondas como faz um quebra-mar convencional. A PHS-NO absorve parte da energia das ondas incidentes de amplitude (H_m) a montante da PHS-NO, resultando na redução da amplitude das ondas (H_j) a jusante da PHS-NO. Como resultado, essas ondas atenuadas se propagam em direção à costa, contribuindo de maneira significativa para a proteção contra a erosão (Figura 2.7). Além disso, cria um ambiente mais seguro para o desenvolvimento de atividades marítimas, como navegação e pesca (YU, 2002).

Neste contexto, Fang et al. (2018) propuseram um quebra-mar do tipo PHS-NO composto por quatro placas horizontais porosas distribuídas em diferentes profundidades, formando um arranjo multicamadas capaz de dissipar energia de uma ampla gama de frequências de ondas incidentes, especialmente ondas longas.

He et al. (2018) destacam que a PHS-NO é sensível à variação do nível das marés, enquanto a maior parte dos estudos a considera operando em nível de água constante, condição que não representa fielmente o ambiente real. O estudo analisou a influência da variação do

nível das marés no projeto da PHS-NO, utilizando o Método de Hidrodinâmica de Partículas Suavizadas (SHP - *Smoothed Particle Hydrodynamics*). Adicionalmente foi apresentada uma nova técnica, chamada de Partículas Dinâmicas de Contorno Multicamadas (DBPs - *Multilayer Dynamic Boundary Particles*), para lidar com a condição de contorno da placa, juntamente com o cálculo da força das ondas.

De acordo com Mohapatra et al. (2020), a aplicação de PHS-NO porosa flexível exerce um impacto significativo no projeto de quebra-mares e de dispositivos de absorção de energia das ondas para proteção costeira, sendo mais econômico em comparação com uma estrutura do tipo rígido. Para ampliar a influência das deformações estruturais nos parâmetros de projeto foi realizada uma análise hidroelástica da estrutura, apresentando uma fórmula de expansão generalizada para o referido problema com base na função de Green para águas de profundidade finita e infinita.

A interação entre as ondas de gravidade superficiais e estruturas flutuantes horizontais flexíveis, junto com PHS-NO porosas, foi investigada por Mahapatra et al. (2021) usando a teoria linear. O estudo também analisou as características das ondas hidroelásticas em modos flutuantes e submersos de flexão, em cenários específicos, e demonstrou a eficácia da fórmula de expansão através da análise de um problema físico real. Concluiu-se que essa análise pode contribuir para um melhor entendimento no dimensionamento de sistemas de placas porosas flexíveis, tanto PHS-O quanto PHS-NO, para utilização como quebra-mares.

Li et al. (2021) apresentaram novas soluções analíticas para o espalhamento de ondas oblíquas por poros ou furos em estruturas submersas. Os autores abordaram dois cenários, um envolvendo um quebra-mar poroso (amontado de detritos) e outro com uma PHS-NO perfurada. A inovação das soluções reside na introdução de uma técnica de integração de contorno, que elimina a necessidade de determinar raízes das equações de dispersão complexas associadas a ondas que se movem sobre estruturas porosas ou perfuradas.

Huang et al. (2022) desenvolveram uma nova abordagem combinando CFD com mecânica dos sólidos computacional para simular dinamicamente a interação hidroelástica totalmente acoplada entre ondas oceânicas não lineares e um quebra-mar tipo PHS-NO. A partir de uma série de simulações, observou-se que a eficácia na redução das ondas pela PHS-NO pode ser aprimorada ao aumentar sua deformação. Esse aprimoramento pode ser obtido ajustando o grau de flexibilidade estrutural da PHS-NO. O estudo relatou ainda que o efeito de atenuação da onda foi maximizado quando a PHS-NO apresentou uma amplitude de deformação próxima à amplitude da onda incidente.

Tian et al. (2023) propuseram a instalação de uma PHS-NO à frente de uma estrutura costeira de declive acentuado, visando reduzir o impacto das ondas. Ambas são consideradas como elementos integrados em um sistema unificado de proteção costeira (Figura 2.8).

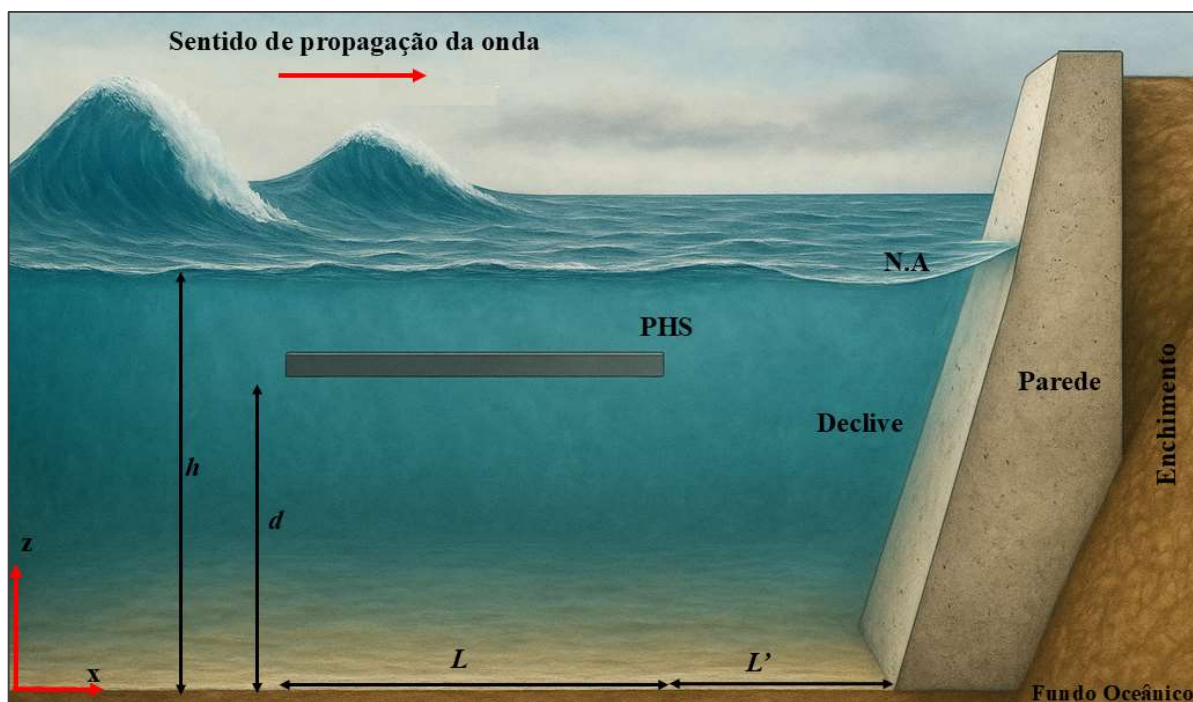


Figura 2.8: Ilustração da interação da onda com PHS-NO à frente da estrutura em declive (Adaptado de Tian et al., 2023).

Utilizando o pacote de software de código aberto OpenFOAM, as características hidrodinâmicas dessa estrutura integrada são investigadas de maneira abrangente. O modelo validado é, então, aplicado para simular a interação de ondas com a PHS localizada à frente da estrutura inclinada. Os efeitos da profundidade de submersão da placa e da distância entre a PHS-NO e a base da estrutura são discutidos em diferentes condições de ondas. Além disso, são examinadas as distribuições típicas de pressão na PHS-NO. Para uma análise mais aprofundada das distribuições de intensidade de dissipação de energia das ondas, são apresentadas as estruturas de vórtice nas imediações da PHS-NO e da estrutura. Os resultados previstos indicam que a instalação de uma PHS-NO à frente da estrutura é uma estratégia eficaz para proteção costeira.

Mohapatra et al. (2023) realizaram uma análise numérica empregando o método de contorno multi-domínio para explorar a interação entre ondas de gravidade e uma plataforma flutuante finita. Foi considerada a presença de uma placa porosa submersa (PSP)-NO ondulada em um modelo numérico bidimensional (Figura 2.9).

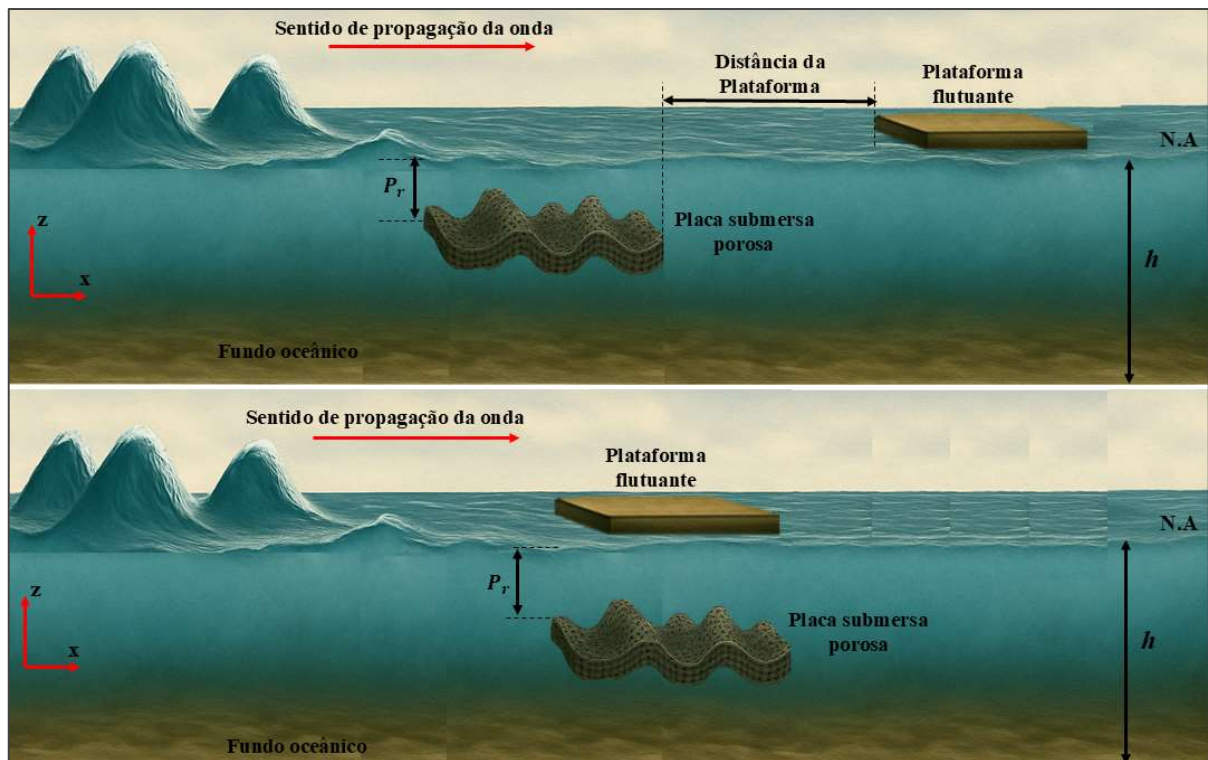


Figura 2.9: Esquema ilustrativo: (A) plataforma flutuante localizada a uma distância finita da PSP-NO ondulada, (B) plataforma flutuante posicionada acima da PSP-NO ondulada (Adaptado de Mohapatra et al., 2023).

Os resultados destacaram que a atuação da PSP-NO ondulada resulta em uma notável redução na força das ondas junto à plataforma. Além disso, o estudo demonstrou que o posicionamento da PSP-NO ondulada a uma distância finita da plataforma flutuante desempenha um papel significativo na dissipação da energia das ondas incidentes, em comparação com a configuração em que a placa submersa está localizada diretamente abaixo da plataforma.

Zheng et al. (2023) demonstraram que PHS-NO, tanto sólidas quanto porosas, apresentam potencial significativo na dissipação de energia das ondas. Placas sólidas são mais eficazes em profundidades rasas, mas perdem desempenho à medida que a submersão aumenta. Já nas placas porosas, a razão de abertura se mostra um parâmetro essencial: aberturas moderadas maximizam a dissipação, enquanto valores extremos reduzem sua eficácia. Sob ondas irregulares, o escoamento sob a placa tende a ser uniforme, com pouca influência da profundidade relativa. Aumentos na altura das ondas e na quantidade de furos elevam a velocidade do escoamento próximo ao fundo, embora a variação da razão de abertura tenha impacto limitado sobre essa velocidade. Também foi observada correlação entre o coeficiente

de transmissão das placas porosas e a velocidade máxima do escoamento, reforçando sua importância em projetos de estruturas dissipadoras de energia em ambientes costeiros.

Sun et al. (2025) conduziram uma simulação numérica utilizando o software Simcenter STAR-CCM+ para investigar a dissipação de ondas por um quebra-mar composto por PHS-NO dispostas em dupla fileira. Foram avaliados os efeitos do espaçamento entre as PHS-NO, sua posição, seu comprimento, a submersão relativa e a altura das ondas. Os resultados indicaram que a formação de vórtices no espaço entre as PHS-NO intensifica a dissipação de energia e reduz a transmissão das ondas. O melhor desempenho foi alcançado com espaçamento centralizado, equivalente a 1% – 2% do comprimento de onda incidente, e submerso a uma profundidade próxima de 1,5 vezes a cava da onda.

Diversos avanços ocorreram no sentido de compreender os fenômenos, a eficiência e os custos relacionados ao dispositivo quebra-mar tipo placa submersa, porém quando se trata da associação com conversores de energia ainda não se tem nada efetivamente implantado. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar análises sobre as oscilações geradas pela incidência de ondas nesses dispositivos (PHS-O), visando aprofundar o entendimento sobre os impactos na eficiência do dispositivo atuando como conversão de energia das ondas do mar. Ao fornecer subsídios para futuras implementações, o estudo busca promover o uso integrado projetos de infraestrutura costeira multifuncionais, que atendam simultaneamente à segurança e à geração de energia renovável.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, descrevem-se os procedimentos adotados, contemplando os fundamentos da teoria das ondas e do critério de similaridade, assim como o domínio computacional, parâmetros de interesse e os fundamentos que sustentam o modelo VOF aplicado em escoamentos com superfície livre. Posteriormente, são apresentados a modelagem numérica, abordando os conceitos de Método dos Volumes Finitos (MVF), discretização do VOF, discretização das funções de interpolação, acoplamento de pressão-velocidade, esquema de avanço tempo, discretização do domínio computacional e, por fim, o processo de verificação e validação do modelo computacional.

O percurso metodológico foi estruturado em quatro etapas principais: pré-processamento, processamento, pós-processamento e a verificação e validação do modelo (Figura 3.1). No pré-processamento, realiza-se a representação da geometria do problema, a definição das condições de contorno, das propriedades do fluido e a geração das malhas. Na etapa de processamento, as equações de escoamento são resolvidas numericamente obtendo-se as propriedades do fluido em cada célula da malha. No pós-processamento, realiza-se a análise e visualização dos resultados através de gráficos, contornos e outras ferramentas, com o intuito de extrair informações relevantes para verificar e validar o modelo numérico (VERSTEEG e MALALASEKERA, 1999).

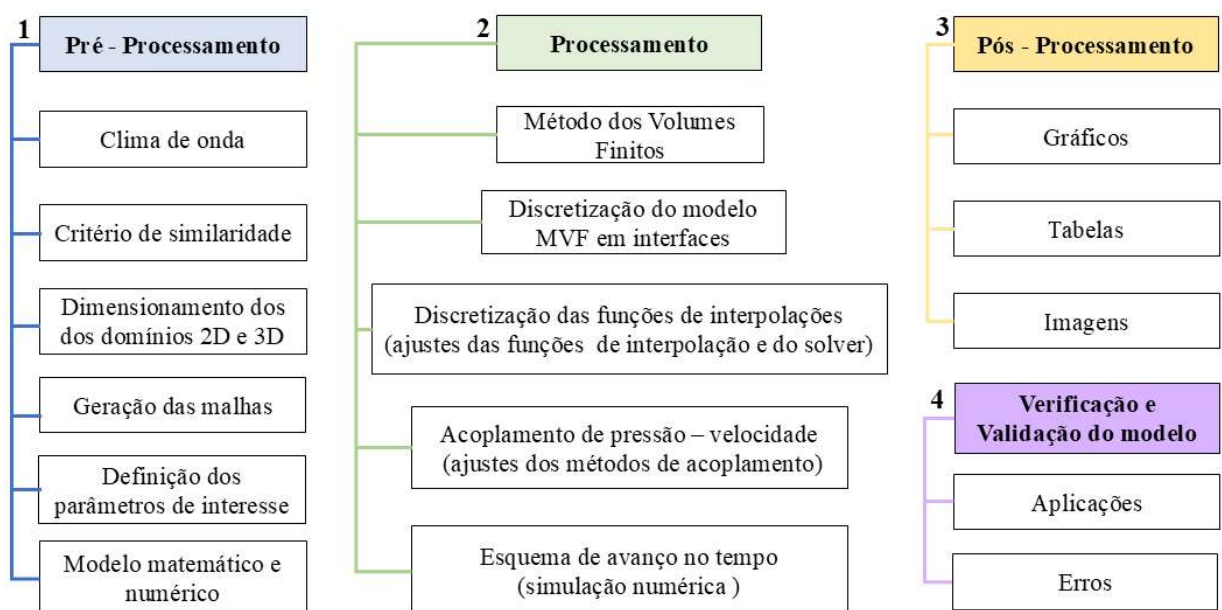


Figura 3.1: Fluxograma da metodologia aplicada na simulação numérica de um dispositivo CEO tipo PHS (Adaptado de Gomes, 2014).

3.1 Modelagem Matemática

3.1.1 Teoria das Ondas

Dean e Dalrymple (1991) ressaltam que as ondas do mar são influenciadas por diversos fatores que resultam em diferentes formas e tamanhos de ondas, dependendo da intensidade de atuação dos mesmos sobre a água. Destacando como os principais, o movimento de corpos na superfície, a ação dos ventos, os abalos sísmicos e as forças gravitacionais exercidas pelo sol e pela lua, cada um ocasionando diferentes movimentações da superfície marítima (MCCORMICK, 1981).

A descrição matemática aumenta sua complexidade na medida que ocorrem sobreposições desses diferentes fenômenos, sobretudo, em função de não linearidades envolvidas, características tridimensionais e aleatoriedades das interações.

Para a Organização Mundial de Meteorologia (OMM, 1998) os princípios fundamentais que regem a mecânica das ondas podem ser delineados considerando que estas são regulares e bidimensionais. Essa simplificação é evidente na teoria de ondas conhecida como linear, de primeira ordem, teoria sinusoidal, teoria de ondas pequenas amplitudes ou teoria de Airy. Nessa perspectiva teórica, as ondas são tratadas como possuindo amplitudes pequenas e um comportamento sinusoidal, sendo descritas em termos de altura e período em uma profundidade específica.

A partir desta teoria, é possível estimar o movimento e o deslocamento das ondas, compreendendo a cinemática (velocidade e aceleração), assim como a dinâmica (pressões, forças resultantes e momentos). Esta teoria não é adequada em casos em que a altura da onda tende a aumentar, ou seja, quando a onda desvia-se da forma sinusoidal pura. Isto acontece devido ao fato de a teoria linear não explicar por que as cristas e cavas das ondas estão acima e abaixo da linha média de água, conforme descrito no manual de engenharia oceânica (USACE, 2006).

Consequentemente, a teoria linear para descrever processos mais complexos necessita de ajustes matemáticos, e desta forma, surgem as teorias não lineares e de ordem superior. Este fenômeno ocorre quando as ondas se elevam, especialmente próximo à costa em águas rasas, resultando numa tendência ao aumento devido ao efeito do fundo (USACE, 2006).

Contudo, a teoria linear adota algumas simplificações: fluido homogêneo e incompressível; tensão superficial nula; efeito de Coriolis insignificante; pressão constante e

uniforme na superfície livre; fluido não viscoso; escoamento irrotacional; fundo horizontal, fixo e impermeável; amplitude da onda pequena com forma inalterada no tempo e no espaço; e ondas bidimensionais. Essas condições possibilitam a representação das ondas como oscilações regulares (USACE, 1984).

Desta forma, baseado na teoria linear, as ondas do mar podem ser representadas como um perfil sinusoidal que se propaga ao longo da superfície do mar (Figura 3.2). Entre suas principais características destacam-se: a distância horizontal entre duas cristas ou cavas consecutivas (comprimento de onda, λ); a distância vertical entre a crista e a cava (altura de onda: H); a distância entre o nível da superfície da água em repouso (NA) e o fundo do mar (profundidade da água, h). Além disso, são consideradas a distância instantânea da superfície livre até o NA (elevação da superfície livre, η); a altura máxima da crista (parte superior) em relação ao NA (amplitude de onda, $A = H/2$); e o tempo decorrido entre o surgimento de duas cristas consecutivas (período da onda, T), conforme ilustrado na Figura 3.2.

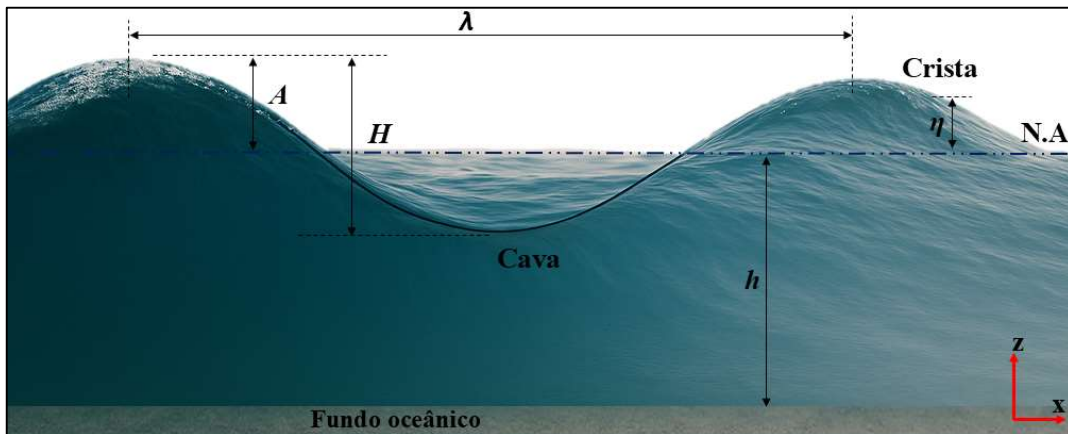


Figura 3.2: Principais características de uma onda (Adaptado Dean e Dalrymple, 1991).

Gomes (2014) cita que a teoria das ondas abrange diferentes comportamentos de acordo com as condições do meio onde estão inseridas. Dessa forma, para determinar a correta teoria a ser aplicada, é necessário o conhecimento de três parâmetros básicos: H , λ e h . Por meio destes parâmetros, determinam-se os parâmetros adimensionais que servem para determinar a teoria das ondas a ser aplicada, como a declividade (D), a profundidade relativa (P_r), a altura da relativa da onda (H_r) e o número de Ursell (U_r).

$$D = H/\lambda \quad (01)$$

$$P_r = h/\lambda \quad (02)$$

$$H_r = H/h \quad (03)$$

$$Ur = \frac{H \lambda^2}{h^3} \quad (04)$$

Conforme apresentado por McCormick (1981), em 1847, a teoria desenvolvida por Stokes para modelar ondas não regulares estabeleceu condições cruciais para sua representação matemática. Nessa abordagem, considerou-se que o escoamento é irrotacional e incompressível, levando à formulação das equações fundamentais. Foi assumido, também, que as propriedades da onda podem ser representadas por uma série de perturbações, resultando em uma onda não-linear composta pela superposição de ondas lineares. A precisão da aproximação das propriedades da onda aumenta à medida que mais termos são incorporados na série

Dean e Dalrymple (1991) complementam que a teoria de Stokes é aplicável a ondas mais altas em águas relativamente profundas. Desta forma, a representação de ondas regulares pela teoria de 2ª ordem de Stokes pode ser realizada, apresentando ondas com cristas mais altas e cavas achatadas, conforme evidenciado na Figura 3.3 . Adicionalmente, devido ao caminho das partículas não formar uma órbita fechada, torna-se possível representar o fenômeno de transporte de massa na direção de propagação das ondas (LE MEHAUTE, 1976; GOMES, 2014).

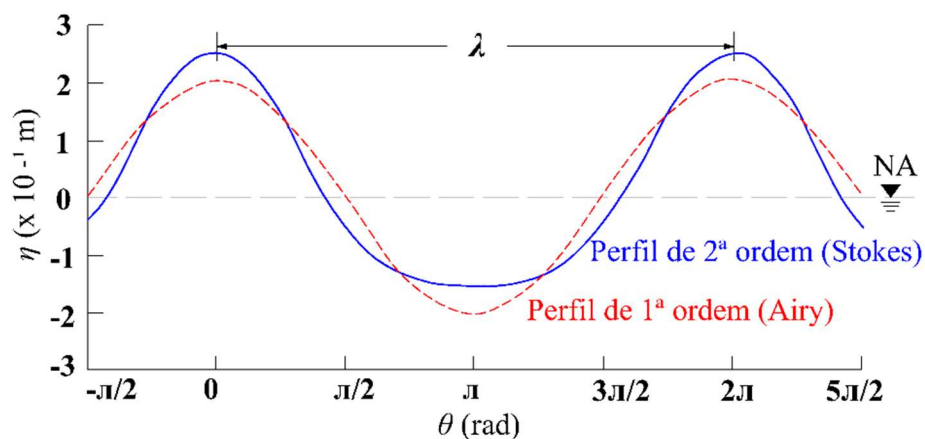


Figura 3.3: Diferença entre o perfil de onda de Stokes de 2ª ordem e o perfil de linear (Adaptado de USACE, 1984).

Sendo a solução de Stokes considerada válida para o número de Ursell $U_r < 26$ (DEAN e DALRYMPLE, 1991).

A equação (05) conhecida como equação de dispersão, é escrita como (DEAN e DALRYMPLE, 1991):

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (05)$$

onde g representa a aceleração da gravidade (m/s^2), k o número de onda (m^{-1}) e ω a frequência angular (s^{-1}). Podendo k e ω equacionados em função de λ e de T , respectivamente:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (06)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (07)$$

Por meio da manipulação algébrica, substituindo as Eq. (06) e (07) na Eq. (05) e isolando λ , obtém-se a seguinte equação:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh(kh) \quad (08)$$

Destaca-se que o conjunto formado por essas quatro equações anteriores descrevem a maneira com a qual um campo de ondas com diferentes frequências se dispersa sobre os oceanos formando os grupos de ondas.

Em razão do processo de solução de equações ocorrer de maneira iterativa, Eq. (08), a teoria linear apresenta uma simplificação para o processo de iteração por meio de uma classificação em função das características da onda (h/λ), conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Classificação das ondas quanto à profundidade (USACE, 1984).

Classificação	Critério	$\tanh(kh)$
Águas profundas	$0,50 \leq h/\lambda$	$\cong 1$
Águas intermediárias	$0,05 < h/\lambda < 0,50$	$\tanh(kh)$
Águas rasas	$h/\lambda \leq 0,05$	$\cong kh$

Considerando a teoria de Stokes de 2ª ordem, as expressões que representam a elevação da superfície η (m) e as componentes horizontal u (m/s) e vertical w (m/s) da velocidade de propagação das ondas são apresentadas como (DEAN e DALRYMPLE, 1991):

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh(kh)}{\sinh^3(kh)} [2 + \cosh(2kh)] \cos(2kx - 2\omega t) \quad (09)$$

$$u = \frac{H}{2} gk \frac{\cosh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \omega k \frac{\cosh 2k(h + z)}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (10)$$

$$w = \frac{H}{2} gk \frac{\sinh(kz + kh)}{\omega \cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \left(\frac{H}{2}\right)^2 \omega k \frac{\sinh 2k(h + z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (11)$$

Sendo z a coordenada na direção vertical (m), considerada a partir do fundo de um canal plano e constante, x uma variável espacial que representa a direção horizontal (m), e t o tempo (s).

As ondas se propagam sobre a superfície do oceano, sendo que a energia da onda é transportada horizontalmente durante a propagação das ondas. A taxa média de transporte da energia das ondas através de um plano de largura unitária, paralelo a uma crista de onda, é chamada de potência das ondas ou fluxo de energia das ondas. McCormick (1981) define para ondas de 2ª ordem a potência média P_w (W), sendo ρ a massa específica (kg/m³), como:

$$P_w = \left(\frac{1}{16} \rho g H^2\right) \frac{\omega}{k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right) \left[1 + \frac{9}{64} \frac{H^2}{k^4 h^6}\right] \quad (12)$$

No presente estudo, para o procedimento de verificação e validação dos modelos numéricos, adotou-se λ correspondente a um dos cenários analisados por Orer e Ozdamar (2007), aplicado tanto no modelo 2D PHS-NO quanto no modelo 3D PHS-NO. Por sua vez, para o modelo 3D PHS-O, o valor de λ foi definido com base nas características representativas das ondas observadas na região Sul do Brasil (Tabela 4).

Tabela 4. Características das ondas empregadas nos modelos simulados.

Modelo	λ (m)	H (m)	h (m)	T (s)
2D PHS-NO	2,9904	0,060	0,600	1,500
3D PHS-NO	2,9904	0,060	0,600	1,500
3D PHS-O	65,400	1,000	10,00	7,500

Utilizou-se no processo de verificação e validação do modelo 2D e 3D PHS-NO o λ determinado por Seibt (2019) a partir da Eq. (08), uma vez que a mesma é validada, de acordo com Le Méhauté (1976). Empregou-se no presente trabalho, para o modelo 2D PHS-NO, 3D PHS-NO e 3D PHS-O, a teoria de Stokes de 2ª ordem, uma vez que, as ondas regulares utilizadas apresentam características que se enquadram nesta teoria de acordo com o parâmetro de Ursell (Figura 3.4). Para determinar a teoria das ondas a ser aplicada, é comum utilizar o gráfico apresentado na Figura 3.4, desde que sejam conhecidas as características da onda.

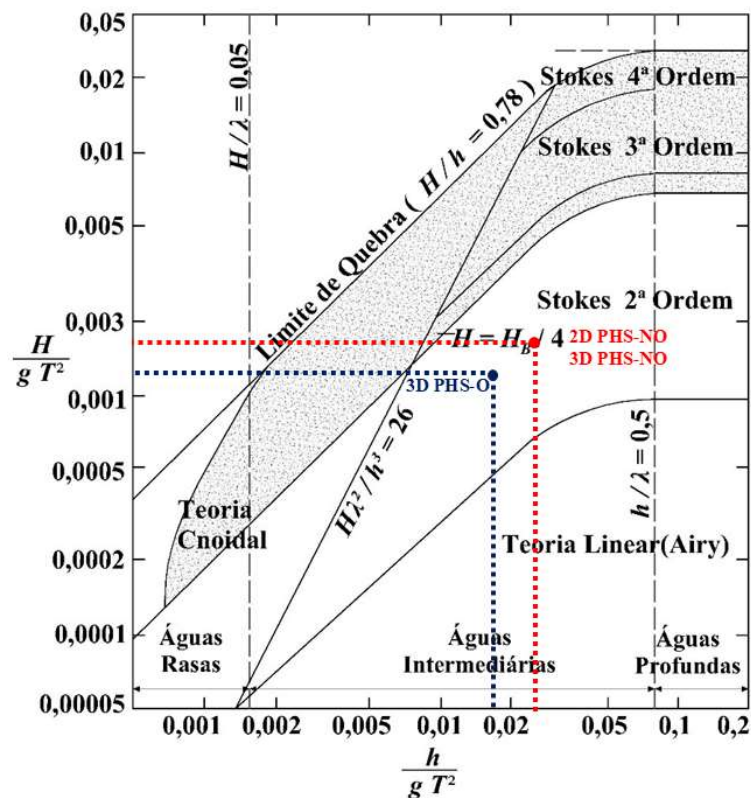


Figura 3.4: Aplicabilidade das teorias de ondas e indicação da teoria de ondas apropriada os modelos nas configurações 2D PHS-NO, 3D PHS-NO e 3D PHS-O simulados (Adaptado de CHAKRABARTI, 2005).

Com base nessas definições, e com o objetivo de assegurar a consistência física do modelo numérico, foi conduzida, antes de cada simulação, uma análise automática dos parâmetros de entrada de ondas no software ANSYS FLUENT R2 2022. Esse procedimento é aplicado de forma sistemática em todos os casos e avalia a conformidade de parâmetros essenciais. As checagens compararão os valores definidos com os limites teóricos de estabilidade, considerando as restrições de quebra de ondas ($H_r \leq 0,78$), inclinação máxima admissível ($D \leq 0,142$), número de Ursell ($U_r \leq 26$) e regime de propagação ($P_r \geq 0,06$). As simulações somente serão executadas após a aprovação em todas as checagens, garantindo a validade física das ondas geradas e a estabilidade numérica necessária para o desenvolvimento confiável das análises.

Destaca-se que as características das ondas utilizadas neste estudo foram baseadas em Seibt (2014) e originalmente definidas para um modelo em escala de laboratório. No entanto, ao serem ampliadas para a escala real (1:16), essas ondas apresentam propriedades compatíveis com as que ocorrem naturalmente na região Sul do Brasil. Garantindo a representatividade física dos resultados da simulação.

3.1.2 Critério de Similaridade

Aplicado para estabelecer um fator de escala que represente uma relação entre as características de um modelo reduzido com aspectos reais do escoamento, o critério de similaridade, em estudos numéricos, auxilia na escolha da escala apropriada considerando custo computacional e precisão dos resultados (SEIBT et al., 2017). Em análises experimentais Hughes (1993) demonstra a utilização do mesmo com a finalidade de estimar o comportamento de modelos experimentais em escala real com a vantagem de redução dos custos envolvidos na construção de um protótipo.

Hughes (1993) informa que o número de Froude (Fr) relaciona as forças de inércia com as forças de gravidade em um escoamento, sendo amplamente utilizado em estudos de engenharia costeira. É definido pela razão entre a velocidade (v) (m/s) e a raiz quadrada do produto de g (m/s²) com a variável de comprimento B (m), a qual representa um comprimento de referência utilizado exclusivamente para estabelecer a escala geométrica do problema no critério de similaridade. O número de Froude é adimensional.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gB}} \quad (13)$$

Para estabelecer uma escala relacionando as dimensões do modelo numérico de laboratório (m) com o caso real (r), Hughes (1993), por meio de manipulação algébrica estabeleceu que:

$$\left(\frac{v^2}{gB}\right)_r = \left(\frac{v^2}{gB}\right)_m \quad (14)$$

reordenando os termos, tem-se que:

$$\left(\frac{v_r^2}{v_m^2}\right) = \left(\frac{g_r}{g_m}\right) \cdot \left(\frac{B_r}{B_m}\right) \quad (15)$$

Com isso pode-se alterar as grandezas físicas equacionadas acima por um fator de escala N próprio:

$$N_v^2 = N_g \cdot N_B \quad (16)$$

Por último assumindo que a ação da gravidade é a mesma para ambos os modelos ($N_g = 1$) e decompondo a escala da velocidade como a razão entre o fator de escala tempo (N_t) e o fator de escala comprimento (N_B), obtém-se a relação entre as escalas das grandezas básicas:

$$N_t = \sqrt{N_B} \quad (17)$$

Considerando o fator de escala de comprimento de 1:16, em outros termos, a um fator de escala $N_B = 16,0$. Com isso, valendo-se da Eq. (17), determinou-se o fator de escala de tempo $N_t = 4,0$. Isso significa que, no modelo em escala reduzida, as ondas são 16 vezes menores (em comprimento) e 4 vezes mais rápidas (em tempo) do que seriam na realidade.

Preliminarmente no modelo em escala de laboratório, o fator de escala N_B , serviu para ajustar o domínio computacional (dimensões do modelo) e também a malha utilizada. Posteriormente, da mesma maneira, os fatores de escala N_B e N_t , foram usados para ajustar as características das ondas simuladas. Destaca-se que o comprimento da onda (λ) não foi definido por meio da utilização do fator de escala de comprimento N_B , mas calculado por meio da Eq. (08) depois que as demais características da onda (período, altura e profundidade da água) fossem ajustadas.

3.1.3 Domínio Computacional

As dimensões dos domínios computacionais considerados (comprimento L_c , largura do canal b_c e altura H_c), bem como dos dispositivos PHS (comprimento L , largura b_p e espessura e) utilizados nos modelos 2D e 3D PHS-NO, foram definidas com base nos estudos de Orer e Ozdamar (2007) e Seibt (2014). No caso do modelo 3D PHS-O, as dimensões do tanque foram adaptadas a partir do estudo de Martins et al. (2018), permitindo a simulação de ondas características da região Sul do Brasil. Já as dimensões do dispositivo PHS foram ajustadas com referência aos trabalhos de Guo et al. (2022), Cheng et al. (2022) e Motta et al. (2025), conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5. Dimensões empregadas na simulação dos modelos.

Modelo	Canal / Tanques			PHS		
	L_c (m)	b_c (m)	H_c (m)	L (m)	b_p (m)	e (m)
2D PHS-NO	40,00	–	1,00	1,00	–	0,02
3D PHS-NO	40,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,02
3D PHS-O	402,40	20,00	20,0	10,00	8,00	0,32

As dimensões apresentadas na Tabela 5 correspondem àquelas representadas esquematicamente na Figura 3.5. No presente estudo, preliminarmente foram analisadas as condições para o modelo 2D e 3D PHS-NO sem a presença da praia numérica (Figura 3.5 A e Figura 3.5 B), em abordagem semelhante à adotada por Orer e Ozdamar (2007). Para isso, o domínio computacional foi construído a partir da representação 2D de um canal numérico de ondas e da representação 3D de um tanque numérico, com a presença da PHS. A Figura 3.5 (A) apresenta a geometria 2D do domínio, onde pode ser observado que algumas das dimensões foram definidas com base nas características da onda simulada.

Conforme mencionado no trabalho desenvolvido por Seibt (2014), são mantidas as seguintes características do modelo: distância mínima de dois comprimentos de onda (2λ), entre o gerador de ondas e a aresta frontal da PHS (trecho a montante da PHS), e quatro comprimentos de onda (4λ) a partir da aresta posterior da PHS até a parede final do canal de ondas. O domínio do modelo 3D PHS-NO reproduz as condições do experimento de Orer e Ozdamar (2007), sem a inclusão da praia numérica. Já o modelo 3D PHS-O difere por incorporar uma praia numérica ao final do tanque, com extensão de dois comprimentos de onda (2λ) (Figura 3.5 C).

Na mesma Figura 3.5, observa-se h , representando a profundidade da água, assim como a posição da PHS. O dispositivo foi disposto de forma centralizada na largura do domínio e mantido a uma distância d em relação ao fundo do tanque numérico.

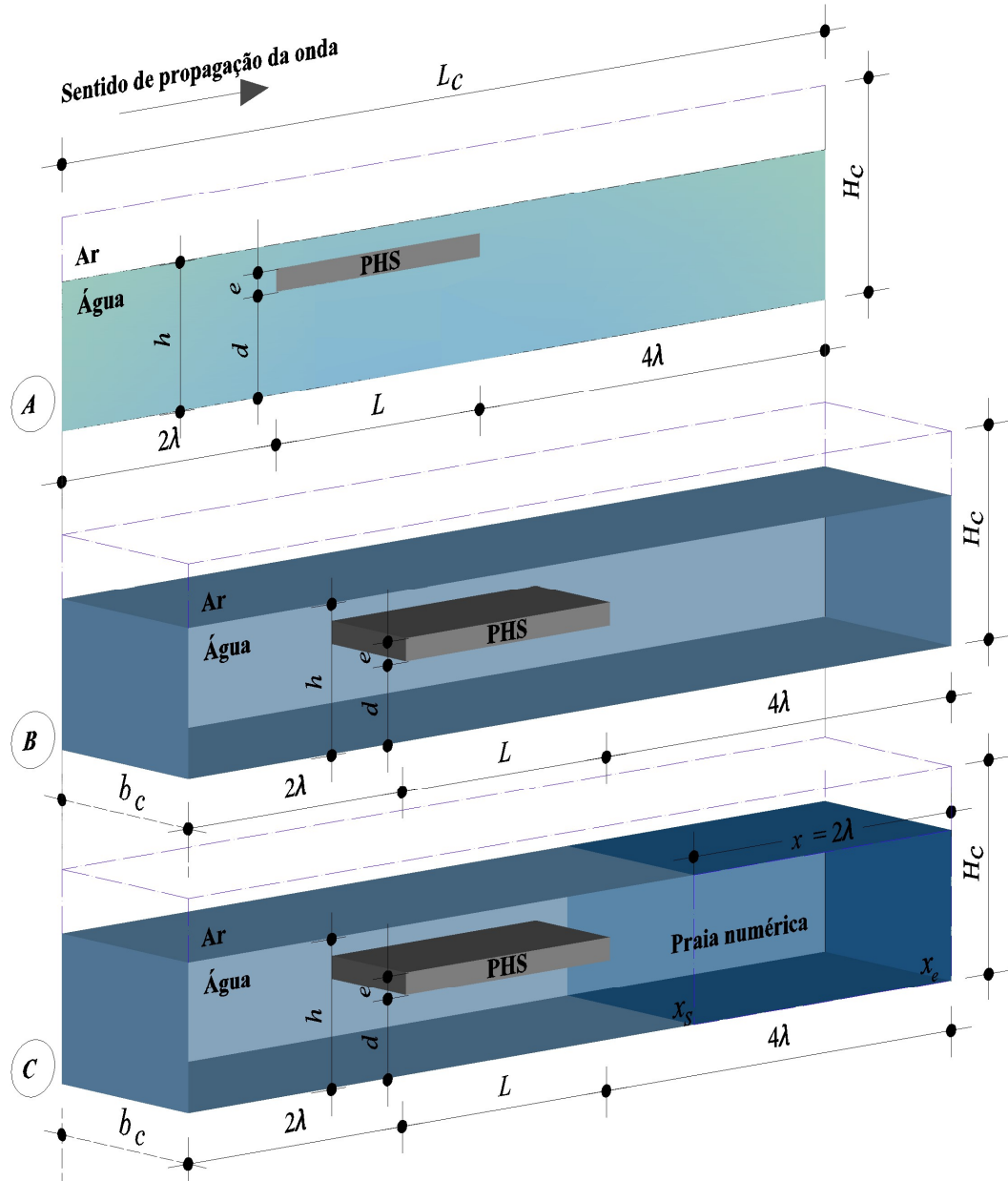


Figura 3.5: Geometrias dos modelos: (A) 2D PHS-NO, (B) 3D PHS-NO e (C) 3D PHS-O.

Essas dimensões foram estabelecidas para garantir condições ideais de geração de ondas antes de atingirem a placa e a obtenção de dados suficientes para análise durante o tempo de escoamento simulado. A praia numérica considerada, localizada na extremidade direita do domínio computacional, funciona como uma zona especial onde as ondas são absorvidas

gradualmente para evitar reflexões nas bordas do tanque. Esta medida é crucial, pois a ausência de uma praia numérica apropriada pode resultar em distorções nos resultados da simulação.

As condições de contorno aplicadas são apresentadas na Figura 3.6 (A), Figura 3.6 (B) e Figura 3.6 (C), onde tem-se a representação do tanque numérico 2D e 3D com a PHS, sendo mantidas essas mesmas condições para o tanque sem placa. Aos limites sólidos, nomeados de parede, do canal 2D e do tanque 3D PHS-NO foram atribuídos as condições de não deslizamento $u(x, z, t) = w(x, z, t) = 0$, representados pelo fundo, extremidade final e as quatro arestas que delimitam a PHS (Figura 3.6 A e Figura 3.6 B). Esta condição de contorno indica que nestes limites a componente de velocidade normal é nula e que não ocorre transporte de massa através das mesmas (impermeabilidade).

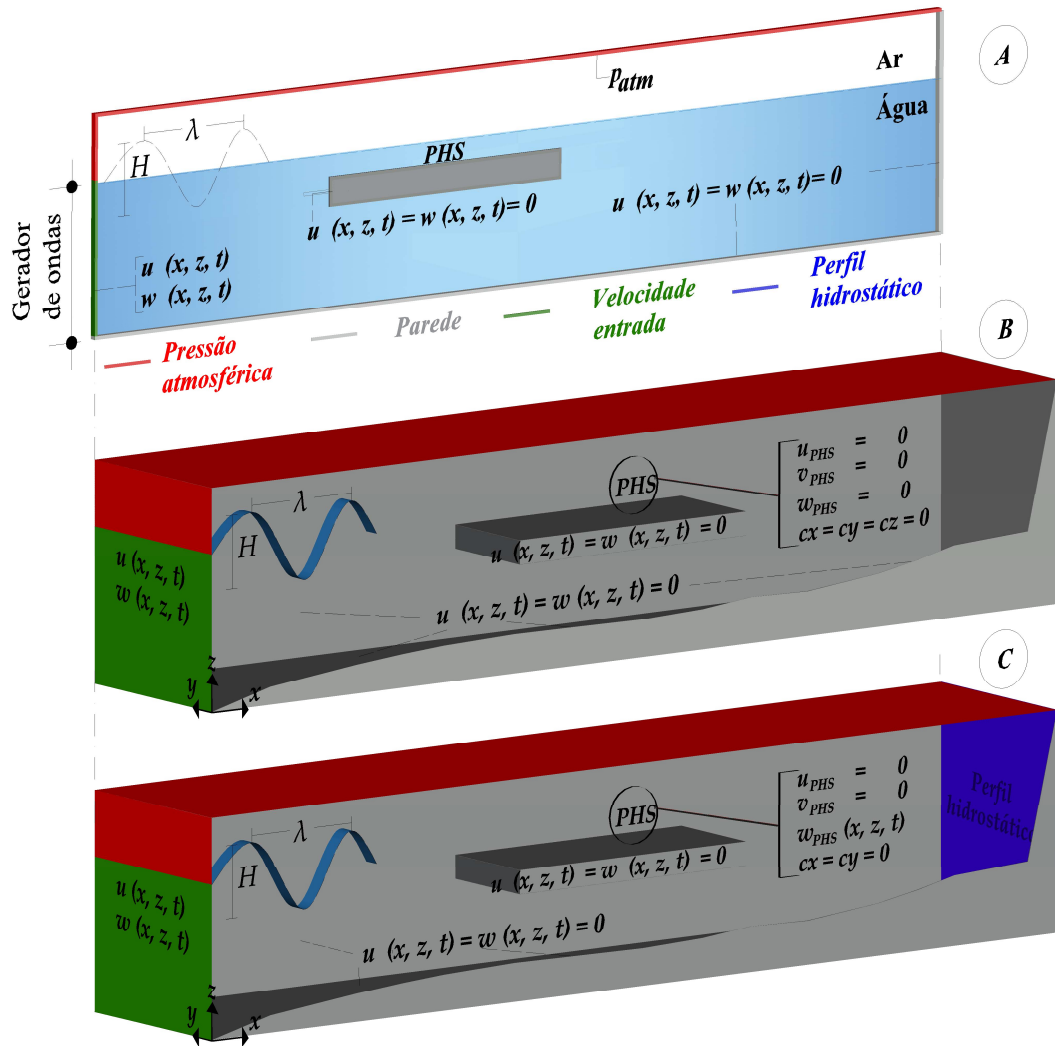


Figura 3.6: Representação das condições de contorno aplicadas nos modelos: (A) 2D PHS-NO, (B) 3D PHS-NO e (C) 3D PHS-O.

No modelo 3D PHS-O as condições de não deslizamento foram mantidas nas fronteiras sólidas (paredes), tanto no fundo do tanque quanto nas extremidades laterais direita e esquerda, bem como nas quatro arestas que delimitam a PHS. Na região da extremidade direita do tanque, após o dispositivo PHS, é empregado um método de praia numérica, juntamente com um perfil hidrostático, que mantém a altura da água corresponde à profundidade do tanque (indicado pelo plano azul na Figura 3.6 C). Essa configuração tem por objetivo manter o equilíbrio de pressão na fronteira de saída, evitando o vazamento numérico de fluido e reduzindo a reflexão de ondas, condizente com o comportamento esperado para escoamentos subcríticos ($Fr < 1$), conforme recomendado no ANSYS FLUENT (2021).

Para representar a condição de um tanque como uma estrutura aberta superiormente no domínio computacional, aplicou-se a condição de contorno de pressão atmosférica (p_{atm}), sendo a mesma composta pela aresta superior e parte superior da aresta esquerda acima do gerador de ondas e aresta direita na parte final do tanque numérico. A simulação do movimento de propagação das ondas aplicou-se, na aresta correspondente ao gerador de ondas a condição de contorno conforme Eq. (10) e Eq. (11) dependente do tempo (indicado pela linha verde na Figura 3.6 A e pelos planos verdes nas Figura 3.6 B e Figura 3.6 C).

Após a delimitação dos contornos do tanque numérico, outra etapa importante é a definição das regiões que deverão estar preenchidas por cada uma das fases, essa região corresponde a profundidade (h) do tanque numérico. Com isso devidamente definido, a condição que simula o gerador de ondas (velocidade de prescrita) foi aplicada somente na fase água da aresta esquerda do tanque, estabelecendo componentes de velocidade da onda somente para esta fase.

A velocidade varia em função do tempo e do espaço (DEAN e DALRYMPLE, 1991; MCCORMICK, 1973; CHAKRABARTI, 2005), sua aplicação como condição de contorno de geração de ondas regulares (velocidade de entrada) foi implementada por meio do software de dinâmica dos fluidos computacional ANSYS FLUENT.

3.1.4 Discretização do Domínio

A discretização do domínio computacional é uma etapa crucial tratando-se de CFD, pois influencia não apenas a estabilidade numérica do modelo analisado, mas também a concordância dos resultados obtidos com os dados reais. As malhas discretizadas foram geradas no WORKBENCH R2 2022, utilizando a ferramenta *mesh*. Para o modelo 2D PHS-NO

utilizou-se a malha do tipo *stretched*, uma vez que a mesma permite o refinamento da malha em regiões de interesse como o entorno da PHS e a interface entre as fases água e ar, sendo possível análises mais minuciosas (ver Figura 3.7).

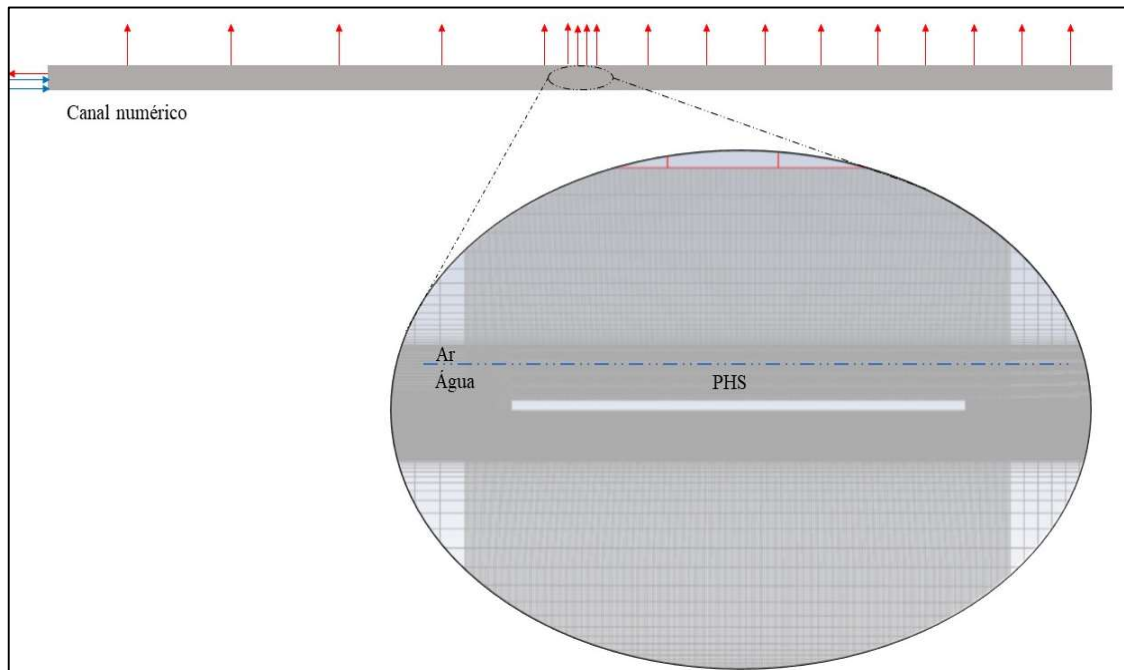


Figura 3.7: Refinamento no entorno da PHS e na interface entre as fases água e ar – malha *stretched*.

Essa técnica consiste em adotar malhas refinadas em regiões de interesse e malhas mais grosseiras nas demais regiões do domínio (Figura 3.8), com isso possíveis efeitos hidrodinâmicos causados pela dissipação de energia das ondas no entorno da PHS podem ser considerados na discretização, e desta forma, melhorar a qualidade dos resultados e a reduzir o tempo de processamento da simulação numérica no software ANSYS FLUENT (GOMES et al., 2015).

De acordo com Ramalhais (2011), para assegurar a propagação das ondas sem perdas de amplitude ou alteração de período, a região do domínio computacional (interface entre as fases) deve ser discretizada considerando o mínimo de 20 elementos por altura de onda e, ao longo do comprimento da onda 60 elementos no mínimo.

Para esta etapa, o modelo 2D PHS-NO (ver Tabela 5), foi considerado a profundidade da água de 0,6 m com a PHS centralizada no canal numérico. Na Figura 3.8 (B), são apresentados os valores iniciais de divisões e os comprimentos de cada região discretizada. Posteriormente, durante o estudo de refinamento da malha para o modelo em análise, os números de divisões foram ajustados no software utilizado.

As dimensões e o número de divisões necessários para a discretização da malha numérica foram determinados a partir da adaptação dos critérios apresentado por Seibt (2019). A Figura 3.8 (A) apresenta os parâmetros empregado para cada faixa do domínio computacional.

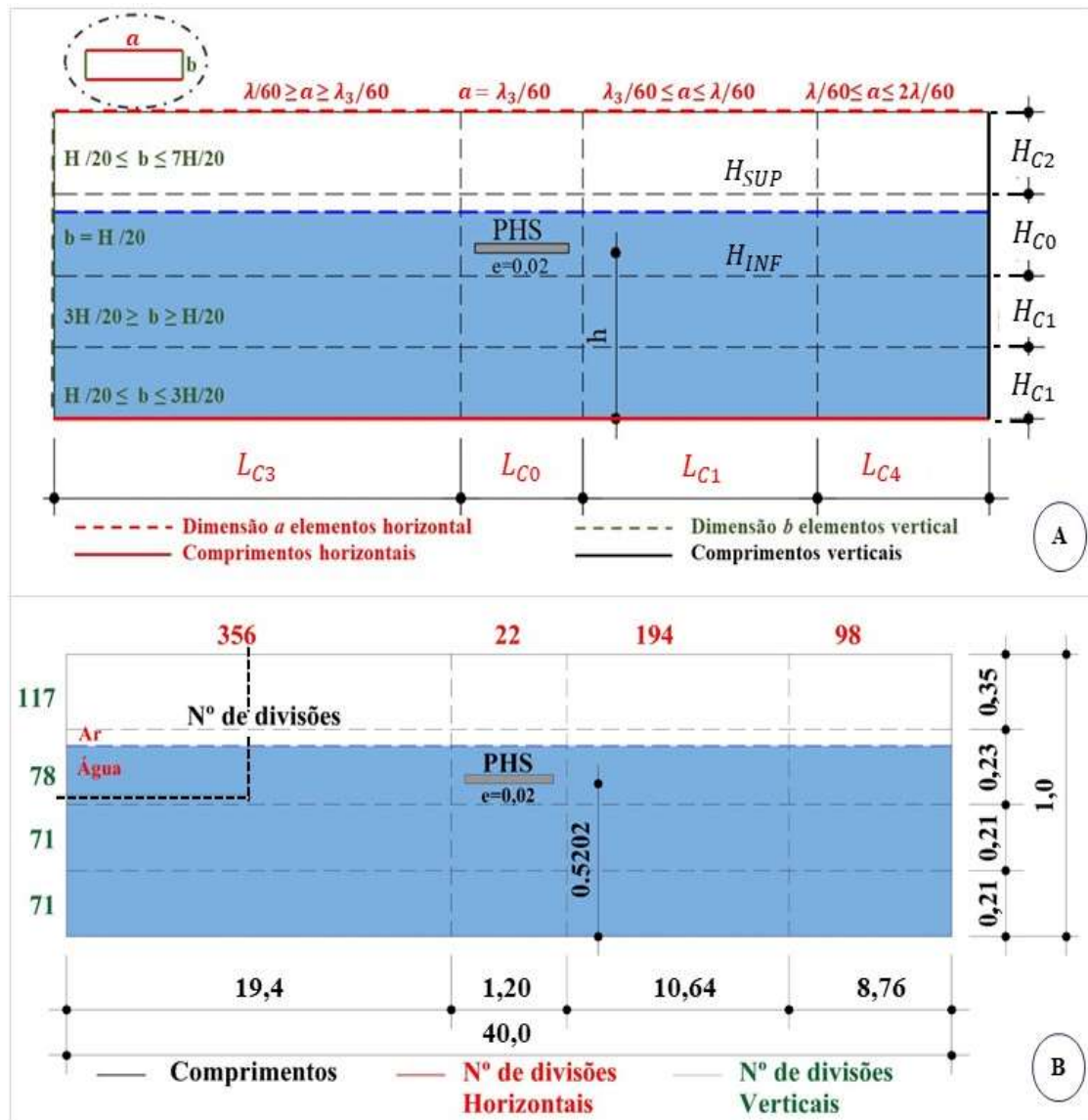


Figura 3.8: Esquema de refinamento de malha: (A) - Comprimentos (m) e números de divisões iniciais empregados na discretização do domínio computacional. (B) - Dimensões adotadas no processo de geração e refinamento da malha.

Após a finalização dos estudos de refinamento e geração da malha, na Figura 3.9, podem ser observadas detalhes das regiões discretizadas próximas à placa e na interface entre as fases (água e ar) do problema bifásico.

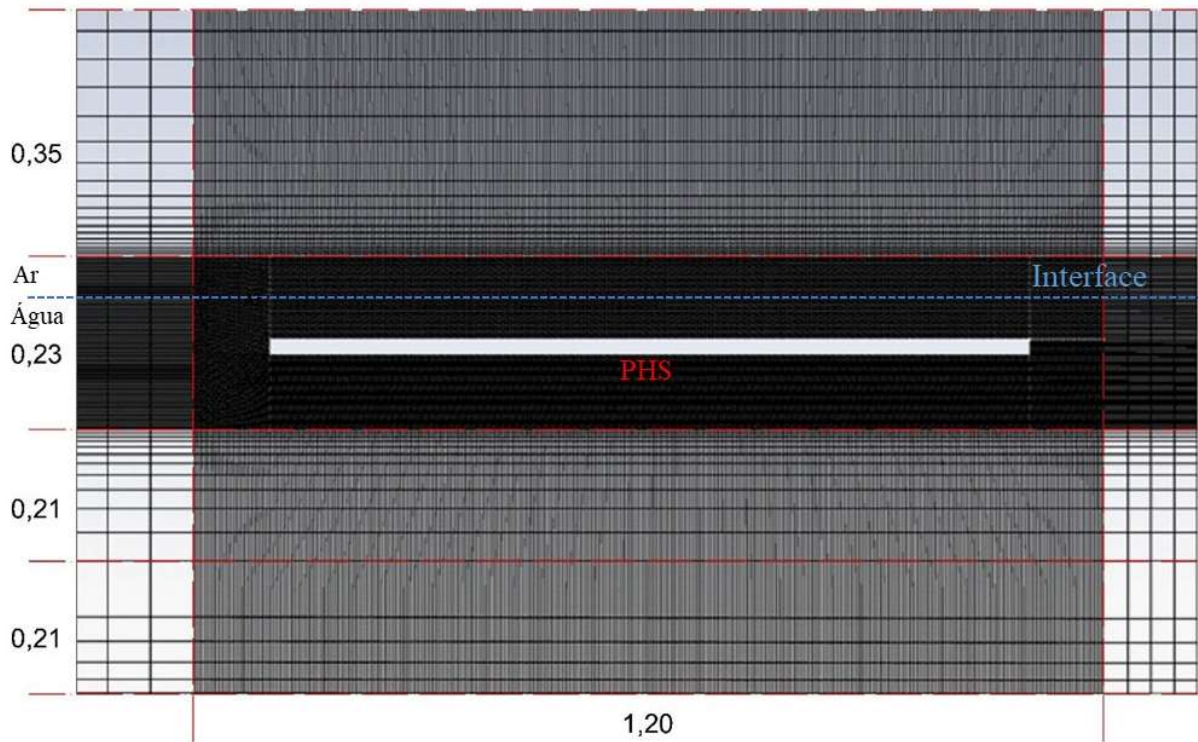


Figura 3.9: Visualização expandida do entorno da 2D PHS-NO.

A implementação da malha *stretched*, associada aos critérios, forneceu malhas com valores médios de 210.000 células para o modelo 2D PHS-NO analisado. Para isso, as dimensões dos elementos da malha no sentido horizontal (dimensão a) do canal numérico foram discretizados obedecendo os seguintes critérios:

1. L_{c0} (entorno da PHS) dividido com base no comprimento da onda equivalente à terceira harmônica (λ_3) da onda incidente em conformidade com a razão de $\lambda_3/60$. O cálculo é fundamentado na terça parte do período da onda ($T/3$) e na profundidade (h) da onda original, conforme detalhado por Seibt (2019);
2. L_{c3} e L_{c1} (montante e a jusante da PHS) divididos de acordo com o estiramento da malha segundo o intervalo de $\lambda/60$ até $2\lambda/60$, ambos iniciando no entorno da PHS;
3. L_{c4} (final do canal) dividido de acordo com o estiramento da malha segundo o intervalo de $\lambda_3/60$ até $\lambda/60$, uma vez que, esse trecho se encontra na zona de dissipação de energia da onda.

Verticalmente as dimensões dos elementos da malha (dimensão b) do canal numérico foram discretizados respeitando os seguintes critérios:

1. H_{c0} (entorno da PHS) dividido com base na altura da onda incidente, seguindo a razão de $H/20$;
2. H_{c1} (abaixo da PHS) buscando o maior refinamento nas regiões de interesse, entorno da placa e fundo do canal, foi dividido com base no estiramento da malha desde $H/20$ até $2H/20$;
3. H_{c2} (acima da região de propagação e da interface das fases ar-líquido), definido com base no estiramento da malha seguindo o intervalo compreendido entre $H/20$ até $7H/20$. Considerando que essa região é composta apenas pela fase ar, foram respeitados de acordo com Barreiro (2009) o número mínimo de 35 elementos.

O conjunto de equações empregadas por Seibt (2019) para a determinação dos comprimentos (horizontais e verticais), Figura 3.8 (A), para cada trecho que compõem o canal numérico apresentam-se a seguir, sendo L_{ESP} o comprimento do espaçamento no entorno da PHS:

$$L_{ESP} = \left(\frac{5}{3}\right) \cdot H \quad (18)$$

$$L_{c0} = L + L_{ESP} \quad (19)$$

$$L_{c1} = 2\lambda + L_{ESP} \quad (20)$$

$$L_{c4} = 2\lambda \quad (21)$$

$$L_{c3} = \frac{L_c}{2} - \frac{L_{c0}}{2} \quad (22)$$

Tratando-se L_c do comprimento total do canal numérico, L_{c0} o trecho que compreende o entorno da PHS, L_{c1} e L_{c3} os trechos a montante e jusante da PHS e L_{c4} o trecho final do canal numérico onde ocorrem os processos de dissipação da onda.

Com relação às dimensões dos trechos (verticais) Figura 3.8 (A), observa-se que H_{c0} representa a altura do trecho central do canal, estendendo-se desde acima da zona de propagação das ondas até logo abaixo da PHS. Os trechos H_{c1} referem-se às alturas dos trechos abaixo da PHS, que dividem o estiramento da malha nessa região, enquanto H_{c2} refere-se altura do trecho superior do canal. Por sua vez, H_{SUP} representa a altura da linha superior, que limita H_{c0} acima da interface água-ar, enquanto H_{INF} é a altura da linha inferior, que limita H_{c0} logo abaixo da PHS.

$$H_{c0} = H_{SUP} - H_{INF} \quad (23)$$

$$H_{c1} = \frac{H_{INF}}{2} \quad (24)$$

$$H_{c2} = H_C - H_{SUP} \quad (25)$$

Considerando que H_{c0} é delimitada superiormente acima da interface entre as fases pela altura da linha superior (H_{SUP}), e inferiormente abaixo da placa pela altura da linha inferior (H_{INF}) sendo a altura da linha que limita H_{c0} abaixo da PHS.

$$H_{SUP} = d + \left(\frac{5}{6}\right) \cdot H \quad (26)$$

$$H_{INF} = h - L_{ESP} \quad (27)$$

Destaca-se que os modelos 2D e 3D PHS-NO seguiram as diretrizes estabelecidas na pesquisa conduzida por Orer e Ozdamar (2007). Neste estudo, investigou-se a PHS em diferentes configurações de altura relativa (X), considerando a ausência de estruturas abaixo da PHS.

$$X = \frac{h}{d} (100) \quad (28)$$

Ressalta-se que para o modelo 3D PHS-NO mantiveram-se as dimensões do canal empregado no modelo 2D PHS-NO (ver Tabela 5). Nesse caso foram empregadas malhas regulares com dimensões de 0,1 x 0,1 x 0,1 metros, sem a aplicação de refinamentos específicos nas proximidades da PHS e das superfícies livres e das paredes. A aplicação das malhas

Ressalta-se que, nesta etapa, utilizam-se ondas de Rio Grande (RS) apenas para verificação do modelo 3D PHS-O, a aplicação final é conduzida para o caso real no litoral do Paraná. Por meio da Figura 3.11, é possível visualizar a malha final gerada, considerando que a PHS se encontra centralizada no tanque, a uma profundidade de 7,84 m, abaixo 2,16 m da superfície livre.

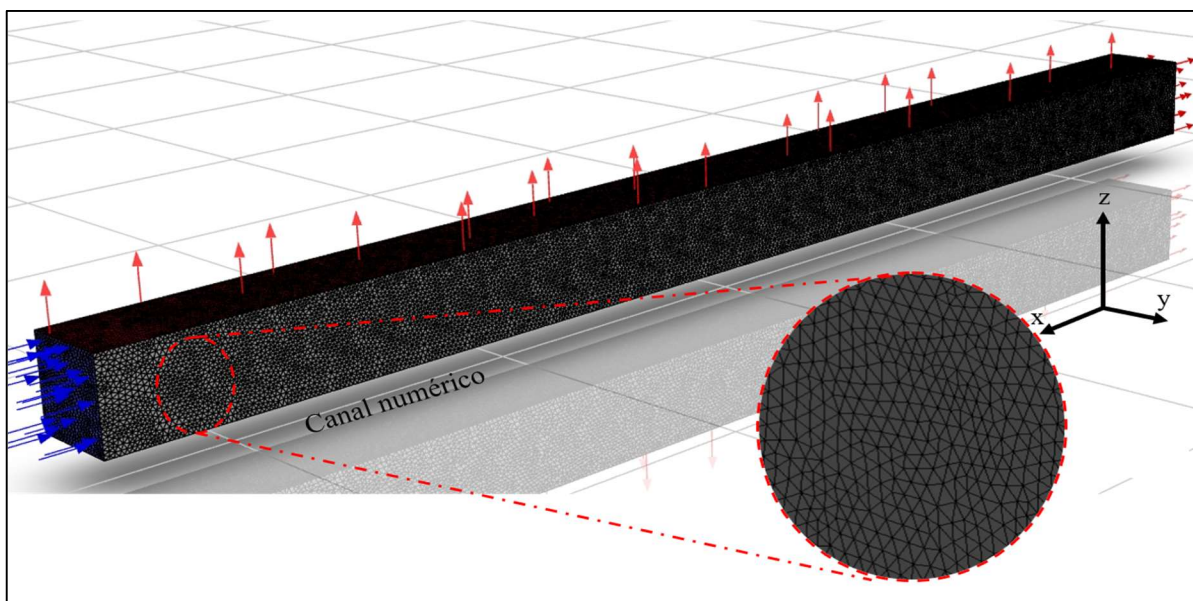


Figura 3.11: Ilustração da malha tetrahédrica 3D de referência e seus detalhes, na condição PHS-O.

O software ANSYS possui ferramentas para análise de dados estatísticos, como a média, o desvio padrão e a assimetria (*skewness*). Em análises numéricas, a assimetria (β) é um critério útil para verificar a qualidade da malha gerada, ajudando na avaliação da precisão e da confiabilidade dos resultados, além de detectar anomalias ou tendências nos dados.

De acordo com Moreira (2015) o parâmetro de assimetria é um dos principais métodos para a verificação da qualidade da malha numérica, empregado para avaliar o grau de conformidade da face ou do elemento em relação ao formato ideal. Como definição de assimetria, o valor 0 indica um elemento equilátero (melhor), o valor 1 indica um elemento completamente degenerado (pior) e valores compreendidos entre 0 e 1 são classificados e apresentados na Tabela 6 .

Tabela 6. Classificação da qualidade do elemento da malha em função da assimetria (Adaptado de Moreira, 2015).

Assimetria	Qualidade do elemento
1	Degenerado
$0,9 < \beta < 1$	Mau
$0,75 < \beta \leq 0,9$	Fraco
$0,5 < \beta \leq 0,75$	Aceitável
$0,25 < \beta \leq 0,5$	Bom
$0 < \beta \leq 0,25$	Excelente
0	Equilateral

A análise da qualidade da malha gerada no presente estudo foi realizada por meio da análise de assimetria. Conforme mostrado na Figura 3.12, a malha gerada apresenta valores máximo e mínimo de assimetria igual 0,8361 e de 0,000149 respectivamente.

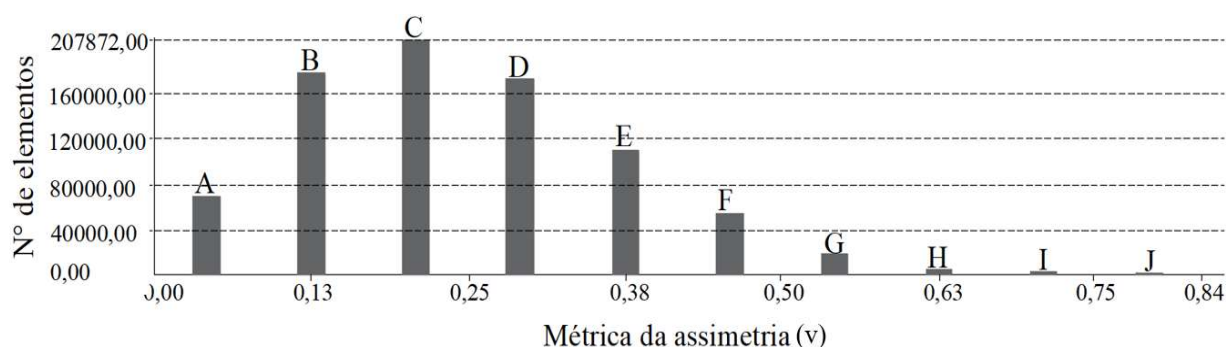


Figura 3.12: Distribuição dos elementos da malha nas categorias A, B, C, D, E, F, G, H, I e J, conforme valores de assimetria.

Ressalta-se que, quanto mais próximo a zero, melhor é a qualidade da malha, enquanto que valores iguais ou superiores a 1 indicam a necessidade de reavaliação da mesma. O modelo proposto, composto por 808.048 elementos, permaneceu dentro de intervalos aceitáveis de qualidade, com elementos distribuídos em 10 categorias (Figura 3.12).

Complementando a visualização da qualidade da malha, a Figura 3.13 evidencia que apenas as categorias G, H, I e J apresentam valores de assimetria superiores a 0,50, indicando menor refinamento desses elementos, o que corresponde a 2,73% malha total (Figura 3.13). Em contrapartida, as categorias A, B, C, D, E e F (Figura 3.12) apresentaram valores de assimetria inferiores a 0,50, representando a maior parte da malha, com 97,27% elementos (Figura 3.13).

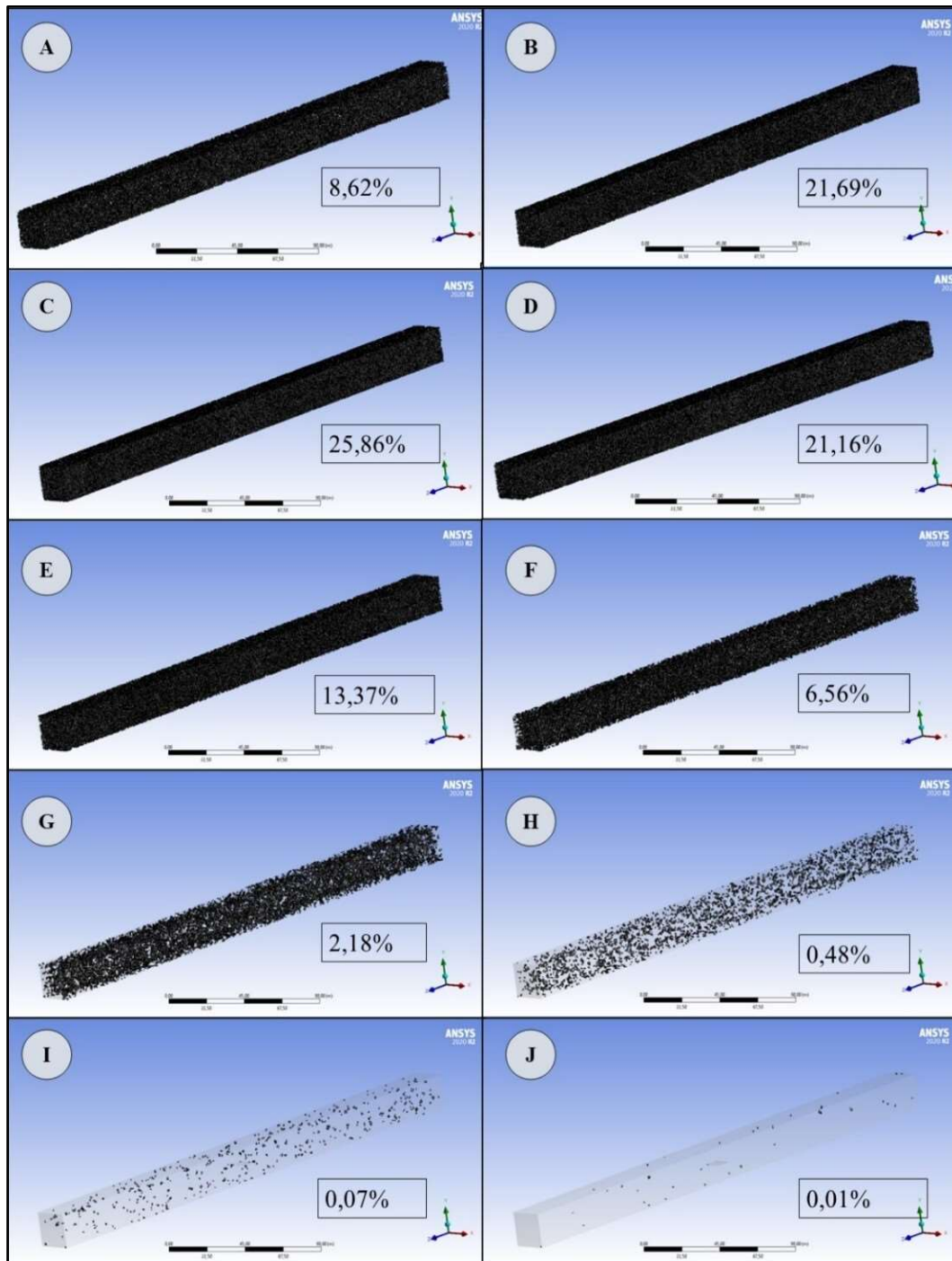


Figura 3.13: Visualização 3D da distribuição (%) dos elementos da malha nas categorias A, B, C, D, E, F, G, H, I e J.

A Tabela 7 ilustra a distribuição dos elementos da malha conforme os intervalos de assimetria, categorizando a qualidade dos elementos e a quantidade correspondente em cada categoria. Com isso, oferece uma visão clara da qualidade da malha, permitindo a análise dos elementos integrantes do modelo em questão, evidenciando a predominância dos elementos nas categorias "Bom" e "Excelente".

Tabela 7. Distribuição dos elementos da malha conforme os intervalos de assimetria, classificando a qualidade dos elementos e a correspondente quantidade em cada categoria.

Assimetria	Qualidade do elemento	Categoria	Nº Elementos
1	Degenerado	–	–
$0,9 < \beta < 1$	Mau	–	–
$0,75 < \beta \leq 0,9$	Fraco	J	95,00
$0,5 < \beta \leq 0,75$	Aceitável	G / H / I	22.003,00
$0,25 < \beta \leq 0,5$	Bom	D / E / F	332.000,00
$0 < \beta \leq 0,25$	Excelente	A / B / C	453.950,00
0	Equilateral	–	–

Por fim, para avaliar a sensibilidade da solução numérica com relação a discretização espacial, realizou-se uma análise de refinamento de malha estruturada para o domínio 3D na condição PHS-NO e PHS-O. Três configurações de malha foram testadas: uma versão grosseira, com aproximadamente 30% menos elementos; uma malha de referência, adotada por apresentar menos de um milhão de elementos, limite adotado para assegurar custo computacional adequado e desempenho numérico consistente; e uma versão refinada, com cerca de 30% mais elementos. Todas as simulações foram conduzidas sob as mesmas condições de contorno, formulação matemática e critérios de convergência. As variáveis de interesse, velocidade, pressão e deslocamento, foram monitoradas e comparadas entre as diferentes configurações, a fim de garantir a independência de malha da solução numérica.

3.1.5 Parâmetros de Interesse

Compreender o correto funcionamento do dispositivo PHS requer o conhecimento dos parâmetros de eficiência teórica do conversor, velocidade axial máxima ($u_{m\acute{a}x}$), a vazão mássica RMS ($\dot{m}_{RMS}$) e o deslocamento vertical (cz), sendo a eficiência teórica do dispositivo o mais significativo para o estudo. O detalhamento sobre a forma de obtenção destes parâmetros e as análises realizadas durante o pós-processamentos são elencadas a seguir.

1) Velocidade Axial Máxima sob o Dispositivo

A determinação da velocidade axial (u) para os modelos 2D e 3D PHS-NO foi realizada conforme recomendado por Seibt (2019). Para isso, criaram-se 11 pontos de monitoramento dispostos no centro, abaixo do dispositivo de PHS, e distribuídos ao longo da

altura d para o monitoramento e registros de valores específicos de velocidade em pontos selecionados dentro do domínio da simulação, conforme Figura 3.14 (A).

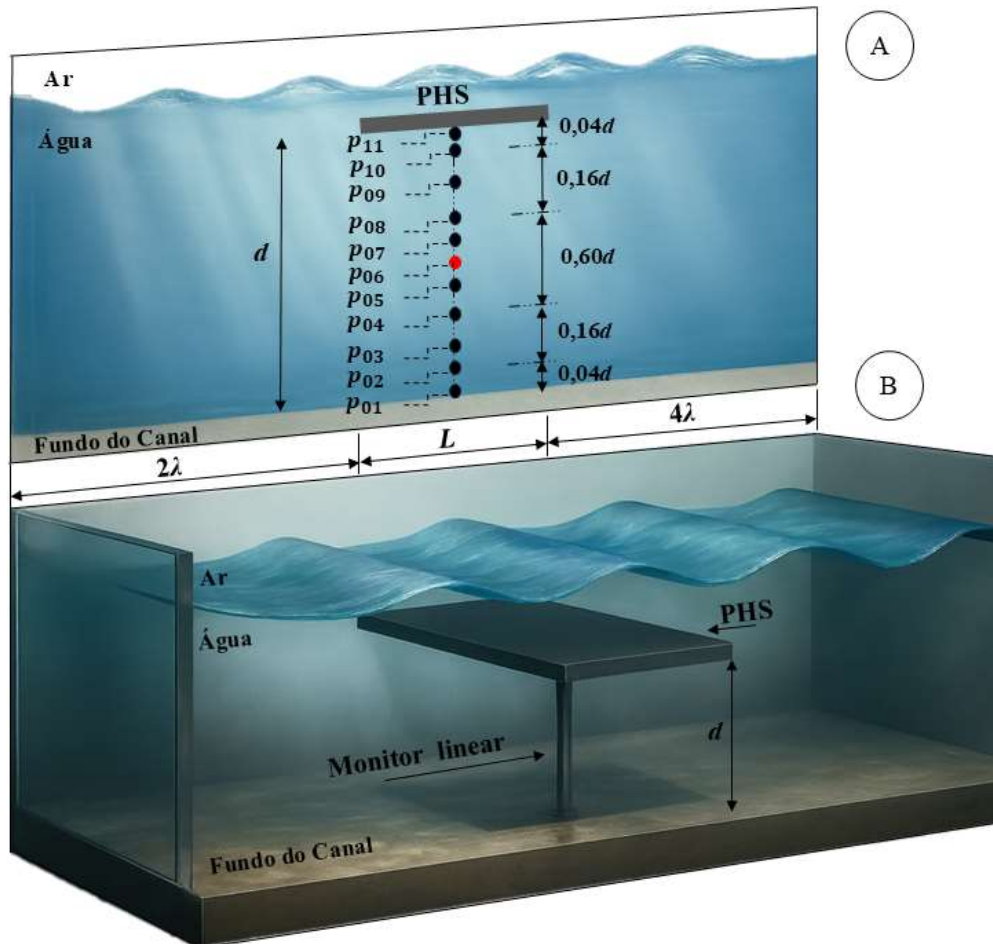


Figura 3.14: (A) – Distribuição dos monitores pontuais velocidades abaixo do dispositivo CEO PHS para os modelos 2D e 3D PHS-NO. (B) – Monitor linear empregado no monitoramento da velocidade axial no modelo 3D PHS-O.

Com relação ao modelo 3D PHS-O, o monitoramento de u foi realizado por meio de um monitor linear, com altura d , conforme ilustrado na Figura 3.14 (B). O monitor linear permite determinar a velocidade média ao longo de uma linha específica dentro do domínio da simulação. A criação e configuração de pontos e linhas de monitoramento são essenciais para acompanhar e coletar dados sobre diferentes parâmetros em um fenômeno estudado. No contexto mencionado, um dos parâmetros monitorados é a velocidade axial.

Cabe destacar que o presente trabalho seguiu a distribuição e organização dos pontos de monitoramento apresentados por Seibt (2019). Para isso, o autor lista, os passos seguidos na alocação dos pontos:

- a) Os pontos $p1$ e $p11$ foram colocados junto ao fundo do canal e a superfície inferior da PHS, respectivamente. Devido a isso, conforme condições de contorno da placa e do fundo do canal, retornam sempre valores nulos;
- b) A soma das distâncias entre os pontos $p1$ e $p2$ e entre $p10$ e $p11$ corresponde a 8% da altura d da placa;
- c) A soma das distâncias entre os pontos $p2$ e $p4$ e entre $p8$ e $p10$ corresponde a 32% de d ;
- d) Distância entre os pontos $p4$ e $p8$ corresponde a 60% de d ;
- e) A partir dos dados obtidos destes monitores, adotou-se como critério de comparação a velocidade axial máxima ($u_{m\acute{a}x}$) registrada no ponto central $p6$, situado na metade da altura da PHS (d).

Quanto às análises realizadas, da mesma forma, Seibt (2019) apresenta os seguintes critérios:

- 1) Excluir os dados fora do intervalo de tempo compreendido entre $3T$ e $11T$;
- 2) Localizar o maior valor de “ $+u$ ” e menor de “ $-u$ ”;
- 3) Determinar o instante de tempo em que estes valores ocorreram;
- 4) Determinar a maior magnitude da velocidade axial encontrada, ou seja, o maior valor de velocidade em módulo: $|+u_{m\acute{a}x}|$ e $|-u_{m\acute{a}x}|$.

Para os dispositivos PHS, em razão de suas características de funcionamento, a maior magnitude de velocidade axial ocorre no sentido oposto ao de propagação das ondas (SEIBT, 2019). Desta forma os resultados dos casos analisados no presente trabalho são apresentados como $|-u_{m\acute{a}x}|$.

Seguindo o proposto por Gomes (2010), para os modelos 2D e 3D PHS-NO, realizou-se a eliminação dos dados coletados anteriormente a $3T$ como forma de eliminar o tempo de formação da onda no início do canal e do tanque, a começar do gerador de ondas. No caso do fenômeno de reflexão da onda, no trecho final do canal e do tanque, as informações monitoradas após $11T$ foram excluídas a fim de impedir distorções nos dados coletados (GOMES, 2010). Para o modelo 3D PHS-O, apenas os dados anteriores a $3T$ foram desconsiderados, pois a presença da praia numérica, evita a reflexão da onda no final do tanque.

2) Vazão Mássica RMS

A Figura 3.15 (A) mostra o uso de um monitor linear, no modelo 2D, para acompanhar os valores de vazão mássica (kg/s) ao longo de todo o comprimento d . Nesse caso, tanto o tanque numérico quanto a PHS foram considerados com larguras unitárias. Por outro lado, na Figura 3.15 (B), é apresentado o monitor planar utilizado para o monitoramento de valores médios do mesmo parâmetro em uma superfície específica dentro do domínio computacional no modelo 3D PHS-NO e 3D PHS-O.

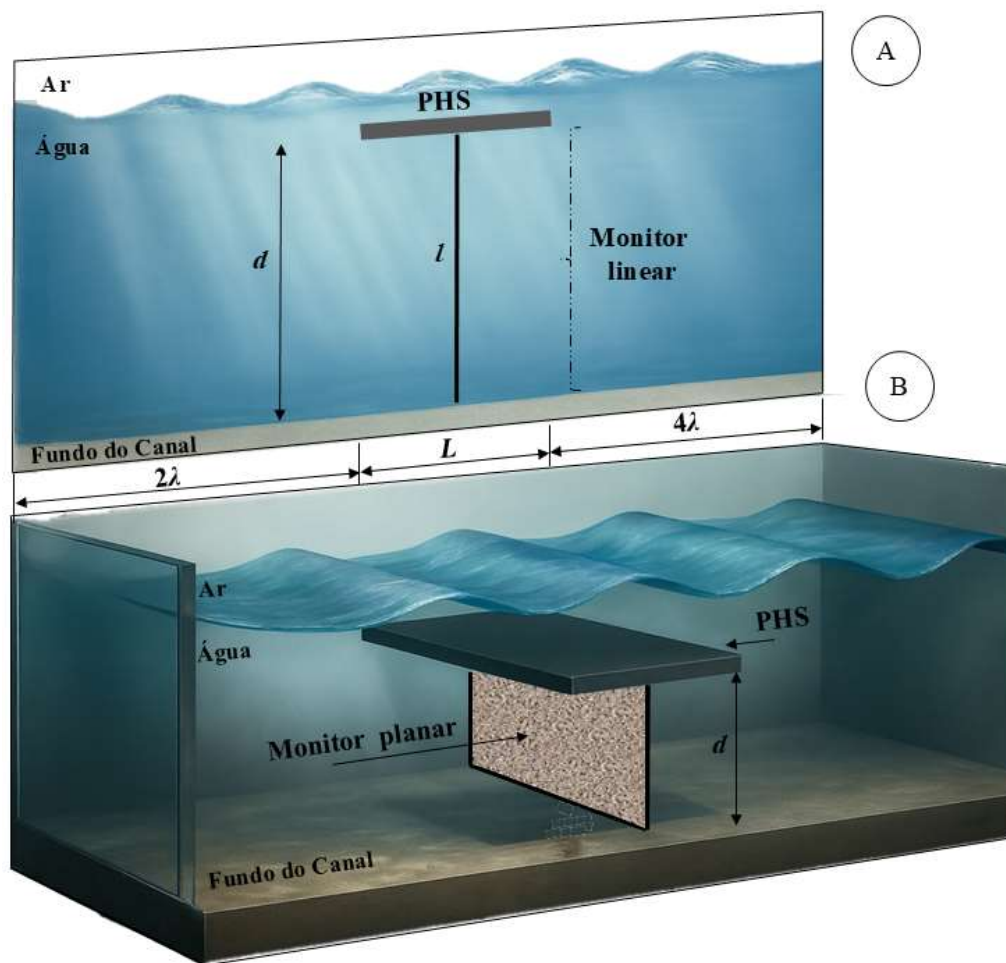


Figura 3.15: (A) – Monitor linear empregado no monitoramento da vazão mássica no modelo 2D. (B) – Monitor planar utilizado no monitoramento da vazão mássica no modelo 3D.

Os dados coletados pelos monitores no intervalo de $3T$ a $11T$ para os modelos 2D e 3D PHS-NO, e a partir de $3T$ para o modelo 3D PHS-O, foram analisados por meio RMS, permitindo estabelecer a vazão mássica, um parâmetro necessário para a compreensão do funcionamento do dispositivo. Outra consideração relevante diz respeito a verificação da

propagação das ondas numéricas e validação dos modelos 2D e 3D PHS-NO. Nestes casos, as larguras do canal, do tanque e da PHS foram consideradas unitárias, e a vazão foi expressa em kg/s.

3) Eficiência Teórica do Conversor

Orer e Ozdamar (2007) destaca em seus respectivos trabalhos que a eficiência teórica (φ) do dispositivo conversor do tipo PHS pode ser estabelecida por meio da razão entre a potência média disponível no escoamento (P_p) e a potência média da onda (P_w).

$$\varphi = \frac{P_p}{P_w} \quad (29)$$

onde P_w é calculado considerando a potência de uma onda (W) incidente no conversor, sendo obtida por meio da Eq. (12) com o uso da teoria de Stokes de 2ª ordem (MCCORMICK, 1981).

A potência média disponível sob o dispositivo (P_p) pode ser calculada por meio da Eq. (30) (Carter, 2005; Dizadji e Sajadian, 2011):

$$P_p = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{-(h-d)} \left(p + \frac{1}{2} \rho u^2 \right) u \cdot b_p \cdot dz \cdot dt \quad (30)$$

nesta equação p representa a pressão estática (Pa) sob a PHS, o termo $(\rho u^2/2)$ representa a pressão dinâmica (Pa), T refere-se ao período da onda (s), t o tempo (s), d a altura da PHS, h a profundidade da água(m) e b_p é largura da PHS (m).

4) Deslocamentos (cz) e Variações de Pressão (p) no Conversor

A determinação do deslocamento do conversor (cz), provocado pelo escoamento incidente, foi implementada por meio de códigos adicionais inseridos via Função Definida pelo Usuário (UDF – *User Defined Function*) associada ao uso da malha dinâmica (*Dynamic Mesh*). A malha dinâmica no ANSYS FLUENT é uma técnica utilizada em simulações de CFD para lidar com a movimentação de geometrias complexas. Consiste em atualizar a malha do CFD à medida que a geometria se move ou deforma durante a simulação, permitindo para o presente

estudo, a análise do movimento da PHS na direção dos eixos de interesse quando incidida pela onda.

Com a PHS em movimento, seu deslocamento foi monitorado tendo como ponto de referência o centro do dispositivo. Dessa forma as oscilações (cz) foram acompanhadas em função de seu tempo (t) ao ser incidida pelas ondas, conforme apresentado Figura 3.16.

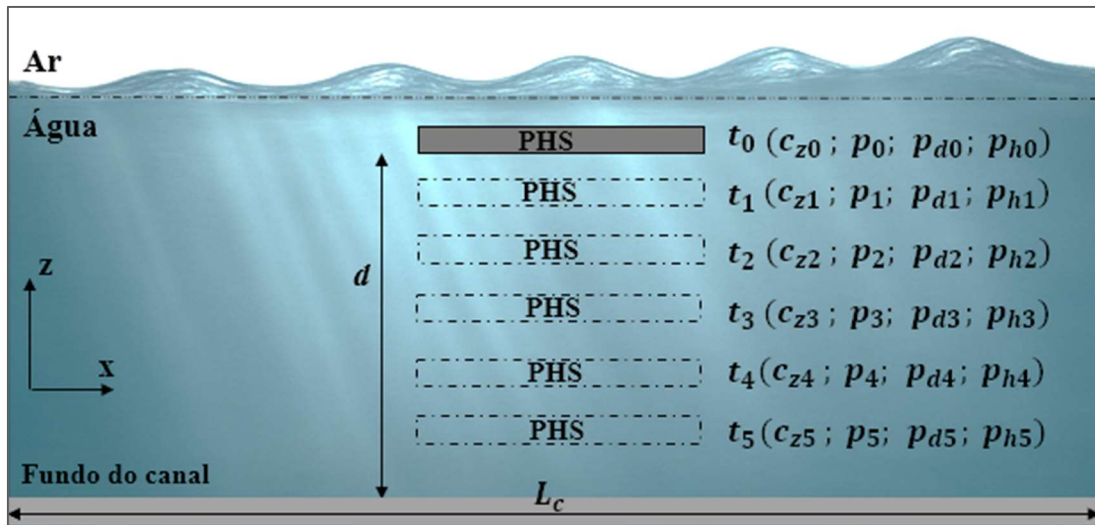


Figura 3.16: Movimento oscilatório da PHS-O ao ser incidida por ondas do mar.

Destacando-se que para cada tempo (t) também foram realizadas medições de p , pressão dinâmica (p_d) e de pressão hidrodinâmica (p_h) aplicando a mesma técnica.

3.1.6 Modelo Multifásico *Volume Of Fluid* (VOF)

O modelo matemático e computacional adotado considera o escoamento como laminar, assim como os estudos desenvolvidos por Gomes et al. (2018), Seibt et al. (2019) e Nemes e Marone. (2023), o que permite uma representação simplificada da dinâmica real do escoamento. Essa escolha é justificada pelo fato de que, na propagação de ondas oceânicas, a transição entre os regimes laminar e turbulento não apresenta um limite claramente definido. Estudos destacam a complexidade dessa transição, particularmente em escoamentos ondulatórios em canais, nos quais a distinção entre os regimes laminar e turbulento ainda não se encontra totalmente consolidada na literatura (SANO e TAMAI, 2016; KASHYAP et al., 2020; OPAKU et al., 2023).

O número de Reynolds (Re) é comumente utilizado como indicador de mudanças no regime de escoamento. De modo geral, o escoamento em tubulações é considerado laminar quando $Re < 2000$ e turbulento quando $Re > 2000 - 2300$, havendo uma faixa intermediária de transição, cujos limites não são rígidos e podem variar em função das condições do escoamento e das abordagens adotadas na literatura (SCHLICHTING, 1961; HILLEBRANDT e KUPKA, 2008). Assim, a ausência de um valor crítico universalmente aceito para esse parâmetro em simulações de escoamento ondulatório representa uma limitação para a captura precisa do comportamento turbulento nesses modelos (HIRT e NICHOLS, 1981). Essa incerteza, aliada ao elevado custo computacional dos modelos de turbulência, justifica a adoção da hipótese de escoamento laminar no presente estudo.

Para a simulação de escoamentos de superfície livre, como um canal de ondas numérico, onde há interação água-ar, é necessário o uso de alguma técnica de identificação da posição da superfície livre. O modelo VOF desenvolvido por Hirt e Nichols (1981) é amplamente utilizado em análise de escoamento com superfície livre, possibilitando a modelagem de dois ou mais fluidos imiscíveis resolvendo as equações de conservação de massa, momento e energia como um único conjunto.

O VOF é um modelo multifásico, e nesta formulação, todas as fases são definidas e o volume ocupado por uma fase não pode ser ocupado por outra fase. Assim, para representar as fases contidas em cada volume de controle é necessário o conceito da fração de volume (α), o qual possibilita a determinação da evolução e posição das interfaces (GOMES, 2014). Sendo sua formulação baseada na suposição de que os fluidos que fazem parte do problema em estudo não são interpenetrados (SRINIVASAN et al., 2011).

O principal problema do VOF é o cálculo das interfaces que delimitam cada uma das fases existentes dentro do domínio computacional, sendo que cada destas fases inclui sua fração de volume para o elemento de cálculo, devendo apresentar o valor igual a 1 como resultado da soma de suas respectivas frações de volume (DE BRITO, 2010). Neste trabalho, somente duas fases são consideradas: a água e o ar (Figura 3.17). Com isso, as células com valores de $\alpha_{\text{água}}$ entre 0 e 1 contêm a interface entre água e ar, neste caso:

$$\alpha_{ar} = 1 - \alpha_{\text{água}} \quad (31)$$

As que possuem $\alpha_{\text{água}} = 0$ estão sem água e completas de ar ($\alpha_{ar} = 1$); e, por sua vez, as que apresentam $\alpha_{ar} = 0$; estão cheias de água ($\alpha_{\text{água}} = 1$). Assim, os valores

intermediários de $\alpha_{\text{água}}$ ($0 < \alpha_{\text{água}} < 1$) correspondem à posição da superfície livre do escoamento.

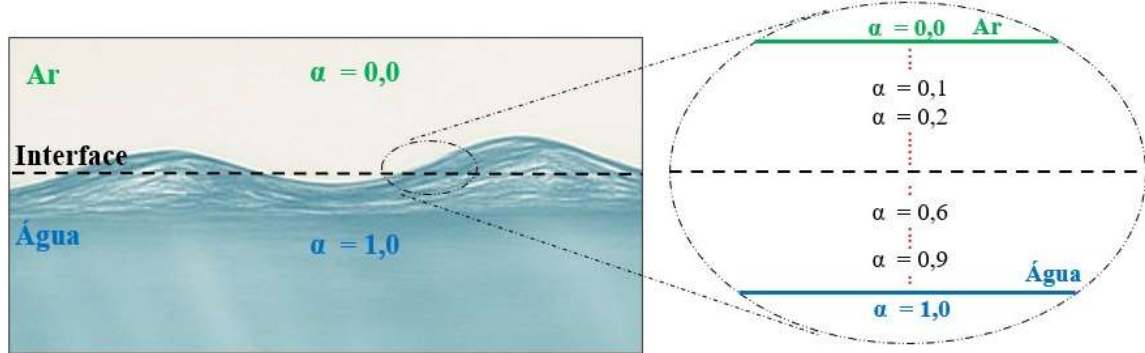


Figura 3.17: Exemplo de identificação da superfície livre a partir da variação da fração de volume (Adaptado de De Brito, 2010).

Gomes (2014) cita que ao empregar o método VOF apenas um único conjunto de equações formado pelas equações de quantidade de movimento e da continuidade, é aplicado a todos os fluidos componentes do escoamento. Com isso, a fração de volume de cada fluido em cada célula (volume de controle) é considerada em todo o domínio computacional através da equação de transporte para a fração de volume. Desta forma, o modelo é composto pela equação de continuidade (WHITE, 2011; MUNSON et al., 2013):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (32)$$

referindo-se ρ a massa específica da mistura de fases (kg/m^3) e $\vec{v}$ ao vetor velocidade compartilhado pelas fases (m/s). Aplicando a equação da fração de volume para uma fase (q) com número de partículas desta fase específica (n) tem-se (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007):

$$\frac{\partial(\rho \alpha q)}{\partial t} + \nabla(\rho n q \vec{v}) = 0 \quad (33)$$

Para duas fases pode-se rescrever a Eq. (33) como (WHITE, 2011; VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007):

$$\frac{1}{\rho q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} \quad (34)$$

O termo fonte S_{α_q} está associado à variação da fração volumétrica e é responsável por incorporar os efeitos das interações entre as fases, como transferência de massa, forças interfaciais ou outras especificidades do modelo, como a presença de praia numérica.

Essa abordagem tem como objetivo eliminar os efeitos de reflexão da onda (GOMES et al., 2018). O método de praia numérica envolve a inclusão de termos de sorvedouro nas equações de quantidade de movimento em uma região específica do domínio. A equação relacionada a essa grandeza é expressa como descrito por Lisboa et al. (2016).

$$S_{\alpha_q} = - \left[C_1 \rho v + \frac{1}{2} C_2 \rho |v| v \right] \left(1 - \frac{z - z_{fs}}{z_e - z_{fs}} \right) \left(\frac{x - x_s}{x_e - x_s} \right) \quad (35)$$

onde C_1 é o coeficiente de amortecimento linear; C_2 é o coeficiente de amortecimento quadrática; x é a coordenada horizontal e z é a vertical; z_{fs} e z_e são as coordenadas médias da superfície livre e do fundo, respectivamente; x_s e x_e indicam os pontos de início e término da praia numérica; e S_{α_q} é um termo fonte que caracteriza a absorção da quantidade de movimento.

Essa região foi dimensionada com comprimento equivalente a 2λ , adotando-se os coeficientes de amortecimento linear e quadrático iguais a $C_1 = 22,37 \text{ s}^{-1}$ e $C_2 = 4,15 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Esses valores foram atribuídos automaticamente pelo modelo de praia numérica do software ANSYS FLUENT com base nas propriedades do fluido e nos parâmetros do modelo de praia.

A equação de fração volumétrica será resolvida na fase primária, apenas computada com base na restrição (VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007):

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (36)$$

No modelo VOF, resolve-se um único campo de velocidades para todas as fases, ou seja, um mesmo conjunto de equações de quantidade de movimento é aplicado a todo o domínio computacional. As equações de quantidade de movimento nas direções x , y e z podem ser escritas, em forma conservativa, como (WHITE, 2011; VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho u \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + (\nabla \cdot \tau)_x + S_x \quad (37)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho v \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + (\nabla \cdot \tau)_y + S_y \quad (38)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w) + \nabla \cdot (\rho w \vec{v}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + (\nabla \cdot \tau)_z + \rho \bar{g} + S_z \quad (39)$$

onde p representa a pressão (Pa), μ a viscosidade (kg/ms) e τ o tensor de tensões (N/m²).

Srinivasan et al. (2011) ressalta que, após resolver as equações de conservação de massa e quantidade de movimento para a mistura de ar e água, é essencial calcular os valores médios da massa específica e da viscosidade, respectivamente:

$$\rho = \alpha \rho_{\text{água}} + (1 - \alpha) \rho_{\text{ar}} \quad (40)$$

$$\mu = \alpha \mu_{\text{água}} + (1 - \alpha) \mu_{\text{ar}} \quad (41)$$

Conforme destacado por De Brito (1998) os tipos mais comuns de escoamento de fluidos sintetizam-se em quatro grupos fundamentais, uma vez que, os mesmos podem ser classificados como compressíveis ou incompressíveis, assim como podem ser considerados viscosos ou não viscosos. Para a representação do fenômeno estudado considerou-se, no presente estudo, o escoamento como incompressível.

3.2 Modelagem Numérica

Para a realização da simulação numérica empregou-se a plataforma WORKBENCH R2 2022, a qual permite integração e fluxo de trabalho conectando o conjunto de softwares ANSYS, proporcionando um ambiente no qual vários tipos de simulações podem ser realizados, por meio de uma gama de tecnologias, tais como CFD e ferramentas de otimização de design. O pacote organiza-se usando guias e etapas para deixar a interface mais familiar ao usuário, fornecendo-lhe acesso às ferramentas necessárias para ler ou criar geometrias, criar as

condições de contorno (cargas, restrições, materiais), resolver o problema específico, obter de visualização de resultados (imagens e animações) e relatórios sobre os resultados.

Entre os recursos presentes na plataforma, empregou-se *Fluid Flow* (ANSYS FLUENT) o qual permite a criação das geometrias por meio do *geometry*, a geração das condições de contorno e da malha com o auxílio do *mesh* (pré-processamento), configurar os parâmetros necessários para a solução adequada do problema *setup-fluent* (solução), e por último, analisar e visualizar os resultados *results* (pós-processamento).

O software ANSYS FLUENT é baseado no MVF (Patankar, 1980; Versteeg e Malalasekera, 2007), o qual permite a modelagem de escoamentos de fluidos e transferência de calor para variadas geometrias. Os estudos preliminares iniciaram-se com a adoção de um modelo computacional semelhante ao desenvolvido por Seibt (2019), distinguindo-se apenas na configuração da malha empregada. Este modelo caracterizava-se por um domínio 2D representativo de um canal de ondas, com uma PHS centralizada no domínio computacional (PHS-NO). Em seguida, foi desenvolvido um modelo computacional 3D PHS-NO, culminando na elaboração de um modelo 3D PHS-O.

3.2.1 Método dos Volumes Finitos

O MVF é um método numérico utilizado para discretizar Equações Diferenciais Parciais (EDP's). Distingue-se de outros métodos ao se alicerçar em uma abordagem física inerente ao problema expresso pela EDP. O desenvolvimento do MVF está intimamente vinculado ao conceito de fluxo entre regiões ou volumes adjacentes, onde a quantidade de uma determinada grandeza física, como massa ou energia, que atravessa a fronteira é considerada como o fluxo dessa grandeza (BORTOLI, 2000; FORTUNA, 2000).

Fortuna (2020) salienta que a quantidade líquida de uma grandeza física que atravessa um determinado volume de controle por unidade de tempo é obtida por meio da integração, ao longo das fronteiras desse volume, da diferença entre os fluxos que entram e saem. Essa abordagem geral é alcançada por meio da integração das EDPs.

Maliska (2004) esclarece que a finalidade de um método numérico é capacidade de resolução de uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas existentes por expressões algébricas que envolvem a incógnita. Quando a obtenção de uma solução analítica se mostra inviável, opta-se por uma abordagem numérica da equação diferencial, na qual a solução é obtida para um conjunto discreto de pontos, aceitando um determinado nível de erro.

Espera-se que o refinamento da malha resulte em soluções mais próximas do comportamento real, desde que respeitados os limites de precisão numérica do modelo. Malhas excessivamente refinadas podem introduzir erros de arredondamento e afetar a estabilidade dos resultados. Um método analítico com capacidade para resolver tais equações forneceria a solução em uma forma fechada, possibilitando o cálculo dos valores das variáveis dependentes em nível infinitesimal, isto é, para um número finito de pontos.

De acordo com Cardiff e Demirdžić (2021) o MVF tem se mostrado adequado para diferentes tipos de análises. Atualmente, existem várias configurações para o método, as quais podem ser abordados de diversas maneiras, incluindo forma e volume da malha (centrado no volume e volume no vértice), algoritmo de solução (implícito, explícito) e estratégia de estabilização (*Rhie–Chow*, *Jameson–Schmidt–Turkel*, *Godunov upwinding*).

A precisão da discretização espacial relaciona-se ao esquema específico usado para avaliar os fluxos, existindo diversas possibilidades para definir a forma e a posição dos volumes na malha. De acordo com Patankar (1980) e Versteeg e Malalasekera (2007), duas aproximações básicas podem ser destacadas:

- Esquema do volume centrado: Nesta abordagem, as quantidades de fluxo são armazenadas no centro dos volumes na malha, tornando os volumes de controle idênticos aos volumes da malha.
- Esquema do volume no vértice: Neste caso, as variáveis de fluxo são armazenadas nos vértices da malha. O volume de controle pode ser formado pela união de todos os volumes que compartilham o vértice da malha, ou pode ser algum volume centrado ao redor do vértice da malha. No primeiro caso, ocorre a sobreposição de volumes de controle, enquanto no segundo caso, são utilizados volumes de controle duais.

Independentemente do arranjo de grade escolhido, a integração das equações governantes pode adotar um algoritmo de solução implícita ou explícita, sendo os algoritmos implícitos caracterizados como a solução de um sistema linear de equações que são incondicionalmente estáveis em relação ao tempo e tamanho do incremento. Em contraste, algoritmos explícitos ou livres de matrizes, evitam a necessidade de construir tal sistema de equações lineares, mas o tamanho do incremento de tempo é restrito (COURANT et al., 1928).

A escolha do algoritmo de solução muitas vezes depende do problema de interesse, com métodos implícitos favorecidos para problemas elípticos e parabólicos (estado estacionário e quase-estado estacionário) e métodos explícitos para problemas hiperbólicos (taxas altas, propagação de ondas). Uma vez que o arranjo de grade e algoritmo de solução são definidos, o cuidado deve ser tomado na construção de uma discretização estável que não sofra instabilidades não físicas no processo de solução.

Para Maliska (2004) todo método que assegura a conservação de uma propriedade em relação aos volumes elementares durante o processo de discretização das equações diferenciais é classificado como MVF. No âmbito do MVF, existem duas abordagens para obter as equações discretizadas. A primeira consiste em realizar balanços da propriedade em questão nos volumes elementares, também conhecidos como volumes finitos. A segunda abordagem é a integração, no espaço e no tempo, das equações na forma conservativa sobre o volume elementar.

3.2.2 Discretização do modelo MVF em interfaces

A discretização do MVF para a modelagem da interação de interfaces, conhecido como VOF, envolve dividir o domínio de interesse em volumes finitos e aplicar equações que descrevem a conservação de massa, momento e outras propriedades físicas em cada uma dessas células. Especificamente para o VOF, a discretização refere-se ao processo de representar numericamente a interface entre dois fluidos (por exemplo, líquido e ar) dentro das células do domínio.

A discretização da equação da fração volumétrica, Eq. (34), realizada pelo software pode ser feita no tempo na forma explícita ou implícita, conforme proposto por Hirt e Nichols (1981) no método VOF. No método implícito de discretização deve ser empregado esquemas de interpolação de diferenças finitas para obtenção dos fluxos em todos os volumes, Eq. (42), inclusive os próximos a interface (PATANKAR, 1980; VERSTEEG & MALALASEKERA, 2007).

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_F (\rho_q^{n+1} U_f^{n+1} \alpha_{q,f}^{n+1}) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha q} \right] V \quad (42)$$

Devido à necessidade dos valores da fração de volume no tempo atual (diferente do esquema explícito, que utiliza valores da etapa anterior), é preciso resolver iterativamente uma

equação de transporte escalar para cada uma das fases secundárias em cada volume em cada passo de tempo, conforme Eq. (42). Destaca-se ainda que $n + 1$ refere-se ao índice para etapa (atual) do novo tempo, n o índice de tempo do passo anterior, $\alpha_{q,f}$ o valor nominal da fração da q -ésima fração de volume que pode ser calculada a partir de um *upwind* de primeira ou segunda ordem, V o volume da célula e U_f o escoamento de volume através da face, com base na velocidade normal.

Na abordagem explícita, são utilizados esquemas de interpolação de diferenças finitas aplicados aos valores da fração volumétrica que foram calculados no passo de tempo anterior (HIRT e NICHOLS, 1981).

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_F (\rho_q^{n+1} U_f^n \alpha_{q,f}^n) = \left[\sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_{\alpha q} \right] V \quad (43)$$

De acordo com Hirt e Nichols (1981) essa formulação não requer uma solução iterativa da equação de transporte a cada etapa de tempo, ao contrário do esquema implícito, requerendo menor esforço computacional. Considerando a aplicação do esquema explícito para a discretização temporal, os fluxos na interface podem ser interpolados utilizando um esquema de reconstrução ou um esquema de discretização como *upwind* de primeira ou segunda ordem (YOUNGS, 1982; UBBINK, 1997; MALISKA, 2004).

A formulação dos volumes de controle demanda o cálculo e o equilíbrio do fluxo de convecção e difusão nas faces do volume de controle, levando em consideração as condições do termo fonte dentro do próprio volume de controle (HIRT e NICHOLS, 1981). No software ANSYS FLUENT, são disponibilizados dois esquemas de reconstrução para calcular o fluxo na face referente ao modelo VOF: *donor-acceptor*, originalmente proposto por Hirt e Nichols (1981), e o reconstrução geométrica, desenvolvido por Youngs (1982). No presente estudo, foi empregado apenas o esquema de reconstrução geométrica, por proporcionar uma representação mais precisa e menos difusa da interface entre as fases.

De acordo com Hirt e Nichols (1981) e Youngs (1982), no ANSYS FLUENT, os esquemas de interpolação padrão são utilizados para calcular o fluxo nas faces quando um volume é totalmente ocupado por uma das fases, enquanto o esquema de reconstrução geométrica é empregado quando o escoamento ocorre entre as fases. Este último, baseado na aproximação *piecewise-linear*, é considerado o mais preciso para malhas em geral, incluindo malhas não estruturadas, e determina a posição da interface entre os fluidos. Essa abordagem

presume que a interface entre as fases apresenta uma inclinação linear dentro de cada volume, permitindo o cálculo da advecção do fluido através das faces do volume.

O processo da reconstrução geométrica, bem como a determinação da posição da interface linear em relação ao centro de cada volume parcial cheio (Figura 3.18), inicia-se a partir de informações sobre a fração de volume e suas derivadas na célula. Seguidamente, por meio da representação de cada interface computadorizada, linearizada, e dos dados acerca da distribuição de velocidades normal e tangencial na face, determina-se o movimento de massa em cada uma das fases. Por fim, a fração de volume em cada célula é determinada a partir do balanço dos fluxos obtidos na etapa anterior (HIRT e NICHOLS, 1981; YOUNGS, 1982).

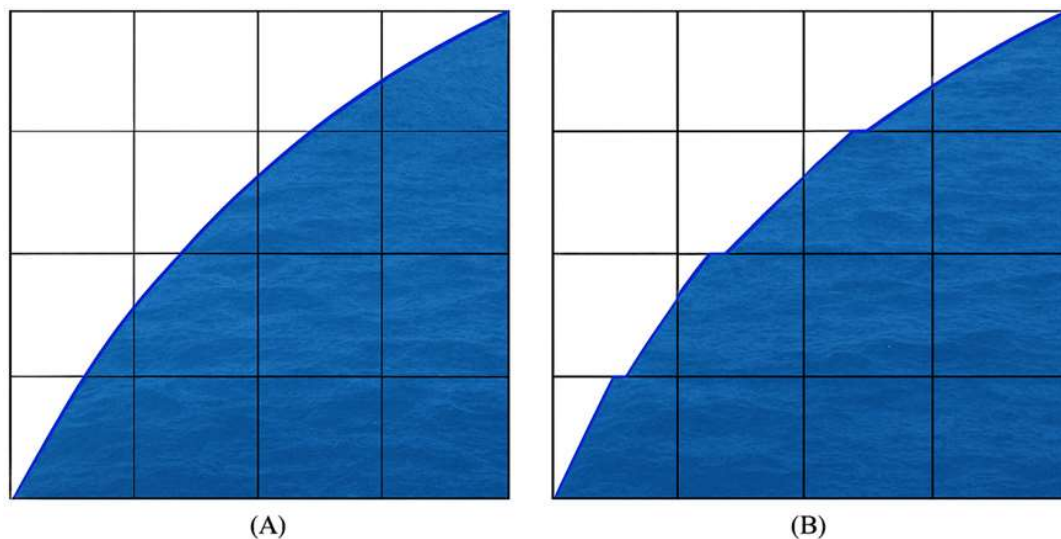


Figura 3.18: Representação da interface: (A) posição original; (B) reconstrução geométrica (Adaptado de Gomes, 2014).

3.2.3 Discretização das Funções de Interpolação

As equações governantes foram resolvidas pelo método dos volumes de controle, que converte as equações diferenciais em equações algébricas resolvíveis numericamente. Essa técnica integra as equações em cada volume de controle, resultando em expressões discretas que garantem a conservação das quantidades avaliadas. No presente estudo, essas formulações foram implementadas no ANSYS FLUENT, que armazena os valores discretos das variáveis no centro dos volumes de controle e disponibiliza diferentes esquemas de interpolação: *upwind* de primeira ordem, *upwind* de segunda ordem, *power law* e *QUICK*. Utilizou-se neste trabalho

o esquema *upwind* de primeira ordem, adotado por sua estabilidade numérica e adequação às condições simuladas (SEIBT et al., 2019; BATISTA et al., 2025).

De acordo com Gomes (2014) na solução das equações de transporte deve ser empregada a formulação transiente segundo o esquema *upwind* de primeira ordem. Desta forma as quantidades em todas as faces dos volumes são calculadas considerando que o centro do volume de controle, para um campo variável, equivale a um valor médio ao longo de todo o volume, com isso todas as características são mantidas ao longo do mesmo. Devido a não linearidades das equações de conservação da massa e quantidade de movimento, é necessário a utilização de fatores de sub-relaxação, sendo assim, foram empregados os fatores de sub-relaxação da solução de 0,3 e 0,7, respectivamente.

Na abordagem numérica para resolver a equação da quantidade de movimento, Eq. (39), tanto o campo de pressões quanto o fluxo de massa na face não são inicialmente conhecidos e, portanto, devem ser determinados como parte do processo de solução. No entanto, o armazenamento da pressão e a discretização do gradiente de pressão são questões cruciais que requerem atenção especial. A escolha adequada dessas técnicas é de fundamental importância para garantir a eficiência e precisão do método utilizado (GOMES, 2014).

No centro dos volumes, são determinadas a pressão e a velocidade, mas para calcular a pressão nas faces desses volumes, é necessário realizar uma interpolação. Neste estudo, adotou-se o esquema *PREssure STaggering Option* (PRESTO), o qual utiliza um balanço discreto da continuidade para escalonar o volume de controle. Esse esquema é especialmente adequado para a modelagem de escoamentos com superfície livre, pois proporciona uma determinação precisa da pressão nas faces relevantes (RAMALHAIS, 2011).

3.2.4 Acoplamento de Pressão – Velocidade

De acordo com Ramalhais (2011) para a determinação da pressão e da velocidade no centro dos volumes existe a necessidade de interpolar os valores de pressão para as suas faces. O ANSYS FLUENT oferece cinco algoritmos de acoplamento pressão-velocidade: SIMPLE, SIMPLEC, PISO, *Coupled* e *Fractional Step*. Todos esses métodos utilizam a solução segregada para os sistemas de equações que devem ser resolvidos, exceto o esquema *Coupled*, que emprega a solução acoplada (ANSYS FLUENT R2, 2022).

Maliska (2004) acrescenta que a solução segregada dos sistemas de equações consiste em resolver cada sistema linear individualmente, onde os coeficientes são atualizados a cada

passo iterativo. Por outro lado, a solução acoplada dos sistemas de equações algébricas adota uma abordagem integrada, formando uma única matriz que engloba todos os coeficientes e permitindo a resolução simultânea de todas as incógnitas.

Neste trabalho empregou-se o esquema de acoplamento da pressão-velocidade *Pressure-Implicit with Splitting of Operators* (PISO) pertencente à família do algoritmo SIMPLE, fundamentando-se na utilização do grau mais elevado da relação de aproximação entre as correções para a pressão e velocidade. O PISO se distingue por adotar duas correções suplementares para aprimorar a eficiência do cálculo: correção das vizinhanças e correção de *skewness*. Essas correções são implementadas para solucionar as limitações encontradas nos métodos SIMPLE e SIMPLEC, onde as novas velocidades e fluxos não atendem completamente ao balanço da quantidade de movimento após a resolução da equação de correção da pressão.

3.2.5 Esquema de Avanço no Tempo

Com relação a forma de aproximação para o avanço do tempo, discretização temporal, as abordagens possíveis são a iterativo e não iterativo. Visando preservar a precisão total no tempo, ao contrário de reduzir o erro a zero, empregou-se o esquema de avanço não iterativo – *Non-Iterative Time-Advancement* (NITA). O esquema NITA executa apenas uma iteração externa por passo de tempo, desta forma reduz significativamente o tempo computacional de simulações transientes, ao contrário do método iterativo, o qual carece de um grande número de iterações a cada passo de tempo (GOMES, 2014).

Visando facilitar a compreensão a Tabela 8 apresenta todos os parâmetros e arranjos numéricos aplicados nas simulações desenvolvidos neste trabalho.

Tabela 8. Parâmetros de solução empregados nas simulações.

Formulação	Parâmetro utilizado
Solução no tempo	Transiente Formulação implícita de 1ª ordem Baseado na pressão NITA
Modelo VOF	Formulação explícita
Controle da solução	Método de acoplamento pressão-velocidade: PISO Controle da solução Método de discretização da pressão: PRESTO Formulação da quantidade de movimento: Upwind de 1ª ordem Esquema de discretização da fração geométrica: Geo-reconstruct

Barreiro (2009) cita que para ter resultados precisos nas simulações numéricas deve-se ter o cuidado na definição do passo tempo, uma vez que, valores inadequados podem ocasionar perdas de informações e a não convergência das soluções. O tamanho do passo de tempo adotado nas simulações foi de 0,001 s para os modelos 2D PHS-NO e 3D PHS-NO, e de 0,0075 s para o modelo 3D PHS-O. No caso da PHS-NO, essa escolha segue o padrão empregado por Seibt (2019), sendo considerada adequada para garantir a independência dos resultados em relação à discretização temporal, conforme destacado por Gomes (2014). Já para a PHS-O, o passo de tempo foi ampliado com o objetivo de reduzir o esforço computacional. O aumento do passo de tempo na PHS-O foi adotado após testes preliminares que confirmaram estabilidade numérica e ausência de impacto significativo na onda simulada.

O tempo médio de simulação foi de 48h, para a simulação de um tempo de escoamento de 11T em um computador com processador 8ª geração Intel® Core™ i7 e 2 Terabytes de memória de trabalho.

3.2.6 Métricas para a Verificação e Validação do Modelo Computacional

Na aplicação de métodos numéricos, a verificação e validação do modelo são essenciais. A verificação quantifica o erro numérico e avalia a resolução do modelo matemático sem considerar diretamente o fenômeno real. Já a validação determina o quão bem o modelo reflete a realidade, comparando-o aos fenômenos observados.

Para a validação e a verificação do modelo VOF aplicado à energia das ondas do mar devem ser conduzidas em duas etapas, considerando que na ausência de resultados experimentais, esse procedimento permite assegurar a consistência numérica e física do modelo implementado. Inicialmente, é necessário realizar a verificação da geração da onda numérica e, posteriormente, proceder com a validação do modelo considerando o escoamento com a presença da PHS no fluido de propagação. Informações mais detalhadas podem ser encontradas em GOMES et al. (2009), GOMES et al. (2012), GOMES (2010), RAMALHAIS (2011) e SEIBT (2019).

A verificação dos modelos numéricos nas configurações 2D PHS-NO e 3D PHS-NO foi realizada mediante a comparação entre os resultados simulados e os valores analíticos de elevação de onda previstos pela teoria Stokes de 2ª ordem Eq. (09), assegurando a coerência das soluções implementadas. Por sua vez, a validação foi conduzida por meio da comparação dos resultados numéricos de velocidade sob o dispositivo com os dados experimentais de Orer

e Ozdamar (2007), bem como com valores obtidos por Seibt (2019) na validação do mesmo experimento, permitindo confirmar a confiabilidade dos modelos na reprodução do comportamento hidrodinâmico observado.

A verificação do movimento vertical do dispositivo 3D PHS-O foi realizada por meio da comparação entre os valores de pressão obtidos numericamente no dispositivo e aqueles calculados analiticamente pela equação de Bernoulli, considerando os componentes hidrostático, dependente de sua profundidade, e dinâmico, associado às variações de velocidade do escoamento. Para isso, as variações de pressão foram monitoradas ao longo do deslocamento do dispositivo durante a incidência das ondas, assegurando a consistência entre os resultados numéricos e a solução analítica.

Conforme destacado por Carneiro (2020), a equação de Bernoulli pode ser aplicada para a determinação da pressão, velocidade ou altura de um fluido em diferentes pontos de um escoamento, descrevendo a conservação de energia em um fluido incompressível, não viscoso e sem perdas (WHITE, 2011; MUNSON et al., 2013):

$$p + \frac{1}{2}\rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h = \text{constante} \quad (44)$$

A constante no lado direito da equação representa a energia total do fluido, que permanece constante ao longo de uma linha de corrente. Em termos físicos, isso significa que, em um ponto fixo do escoamento, a energia total é conservada em qualquer instante e pode ser expressa como a soma das pressões p , p_d e p_h .

$$p + p_d + p_h = \text{constante} \quad (45)$$

No entanto, neste estudo, adotou-se a forma simplificada, apropriada para situações em que a contribuição dinâmica da velocidade é desprezível, permitindo calcular a pressão exclusivamente em função da coluna de água. Tal simplificação é coerente com as condições analisadas e com o objetivo de verificar o movimento vertical do dispositivo a partir da pressão hidrostática resultante (WHITE, 2011; MUNSON et al., 2013).

$$p = \rho \cdot g \cdot h \quad (46)$$

Na sequência, mantiveram-se todas as configurações empregadas na verificação da propagação das ondas numéricas, foram incluídas as configurações de malhas dinâmicas (*dynamic mesh*) utilizadas para análises de problemas dinâmicos, como vibrações ou

deslocamentos. Nesta etapa, foram aplicados critérios de refinamento (*smoothing*) e, inicialmente, realizado o refinamento da malha (*remeshing*). Em seguida, utilizado o método *Six Degrees of Freedom* (Six DOF), que permite a simulação de movimentos de rotação e translação em todas as direções em um sistema mecânico. Por fim, empregou-se a atualização implícita (*Implicit update*), uma ferramenta que permite a resolução da equação de movimento de forma iterativa em cada incremento de tempo.

Conforme demonstrado por Coimbra et al. (2021) a formulação implícita é mais estável do que a formulação explícita, porém exige maior esforço computacional, pois requer a solução simultânea de um grande sistema de equações lineares em cada etapa de tempo. Desta forma é importante escolher a formulação adequada para cada problema, com base em sua complexidade, tempo de simulação e requisitos de precisão. A formulação implícita é comumente utilizada em simulações de problemas complexos, como turbulência, transferência de calor e escoamentos de fluidos não newtonianos.

Seguidamente, antes do início da simulação numérica, desenvolveu-se códigos adicionais inseridos por meio de uma UDF, que corresponde a uma função personalizada que pode ser criada em linguagem C++ e inserida no ANSYS FLUENT, software de simulação de fluidos da ANSYS, tornando possível modelar situações mais complexas e personalizadas (BATISTA et al, 2025). No presente trabalho o desenvolvimento e a aplicação dos códigos possibilitaram a análise das oscilações da PHS-O ao ser atingida por ondas do mar.

Para implementação da UDF desenvolveu-se um código de implementação que define as propriedades de um sistema de grau de liberdade único (SDOF) em uma simulação. Hou e Li (2023) destacam que o SDOF é um modelo simplificado amplamente utilizado em engenharia e análise de sistemas dinâmicos, que descreve sistemas físicos com apenas um grau de movimento.

Neste código, o sistema é representado por identificador, e suas propriedades são definidas dentro da função `DEFINE_SDOF_PROPERTIES`. As principais propriedades configuradas incluem a massa do sistema, os momentos de inércia em relação aos eixos principais, restrições de translação nas direções x , y , além de restrições de rotação nas direções x , y e z (Figura 3.19). A definição dessas propriedades são fundamentais para a correta modelagem e análise do comportamento dinâmico do sistema na simulação, permitindo uma compreensão mais precisa de sua resposta em relação às forças externas aplicadas.

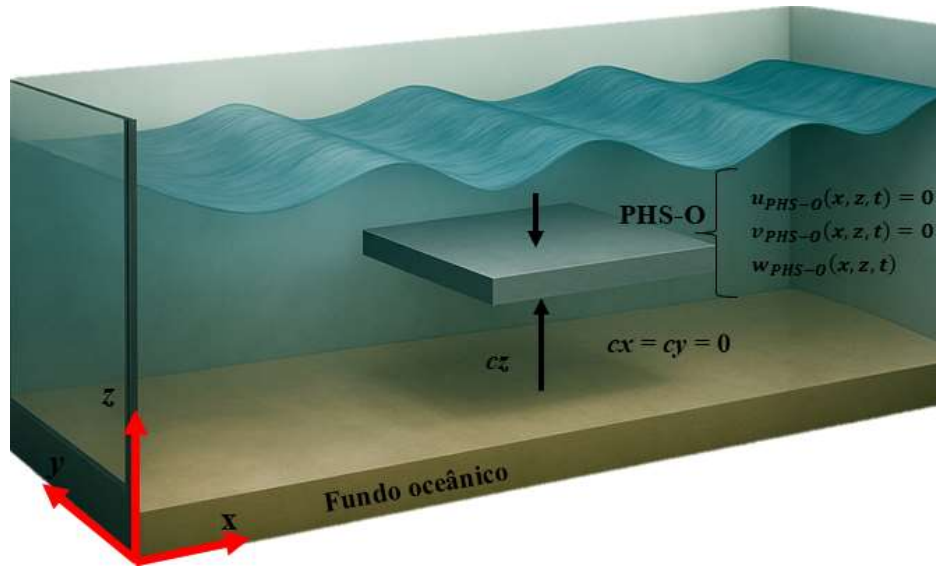


Figura 3.19: Representação do deslocamento vertical (cz) da PHS-O causado pela ação das ondas e das restrições de movimento, em relação aos eixos y e x .

Nesse sentido, no código, os momentos de inércia são definidos como nulos, desta forma a distribuição da massa do sistema não torna suscetível a rotação em torno de seus eixos principais ao ser submetido a forças externas. A translação da PHS é permitida apenas ao longo do eixo z , enquanto os movimentos de rotação nos eixos x , y e z são restringidos. Essa formulação indica que os deslocamentos u (na direção x) e v (na direção y) são desprezíveis, enquanto w (na direção z) pode variar com t e depende de x e z (Figura 3.19).

Uma vez estabelecido os procedimentos de verificação e validação dos modelos, torna-se necessário avaliar a qualidade numérica das simulações. Neste contexto, é necessário analisar os erros inerentes ao processo computacional, tais como os de discretização, iteração e arredondamento, sendo o erro de discretização reconhecido como o de maior relevância (VERSTEEG e MALALASEKERA, 2007).

Ferziger e Peric (1997) definem o erro numérico (E) como a diferença entre a solução analítica exata (Φ_i) de uma variável de interesse e a solução numérica (ϕ_n) obtida através de um modelo computacional. Em resumo, o erro numérico representa a divergência entre a solução teórica e a solução aproximada pelo método numérico.

$$E = \Phi_i - \phi_n \quad (47)$$

A seleção da métrica do erro desempenha um papel crucial na determinação das conclusões obtidas por meio das análises dos modelos. O RMSE e a Média do Erro Absoluto

(MAE - *Mean Absolute Error*) são métricas amplamente utilizadas para avaliar a qualidade em modelos (HODSON, 2022).

O RMSE, calculado pela raiz quadrada da média dos erros ao quadrado entre os valores previstos e os observados, funciona como uma medida de dispersão que atribui maior peso a erros de maior magnitude:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Phi_i - \phi_n)^2} \quad (48)$$

O MAE corresponde à média das diferenças absolutas entre os valores previstos e os observados:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Phi_i - \phi_n| \quad (49)$$

sendo n é o número de amostras, Φ_i o valor obtido analiticamente para a amostra i e ϕ_n o valor previsto pelo modelo numérico para amostra i .

Da mesma forma, a Raiz Quadrada da Média dos Quadrados (RMS - *Root Mean Square*) e a Norma infinito também são empregadas em avaliações de modelos (ASPRONE et al., 2010; ZOLLANVARI et al., 2014). Rattanapitikon et al. (2019) destacam que, devido à complexidade do mecanismo de quebra das ondas, a maioria dos modelos de dissipação de energia foi desenvolvida com base em abordagens empíricas ou semi-empíricas ajustadas com o uso da métrica RMS.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\phi_n)_i^2} \quad (50)$$

$$\|N\|_{\infty} = \max (|\phi_1 - \phi_n|, |\phi_2 - \phi_n| \dots |\phi_n - \phi_n|) \quad (51)$$

Outra possibilidade é o emprego do erro relativo (E_R), conceito fundamental na área da engenharia, que está diretamente relacionado à precisão e exatidão das medidas e cálculos realizados (ZEYMER et al., 2021).

$$E_R(\%) = \frac{(\Phi_i - \phi_n) \times 100}{\Phi_i} \quad (52)$$

3.2.1 Análise de Resposta Hidrodinâmica do Dispositivo

Após a verificação e validação do modelo computacional, tornou-se necessário avaliar a resposta hidrodinâmica do dispositivo frente à ação das ondas incidentes. Para isso foi necessário adotar parâmetros adimensionais que possibilitassem comparar diferentes cenários de forma padronizada, reduzindo a influência direta das condições de contorno. Para isso, o deslocamento vertical da PHS-O foi normalizado pela altura da onda incidente, resultando na resposta relativa:

$$\frac{cz}{H} \quad (53)$$

A partir dessa normalização, o Operador de Amplitude de Resposta (RAO) foi obtido por meio da diferença entre a média aritmética dos valores nas cristas e a média aritmética dos valores nas cavas da resposta relativa Eq. 53, considerando 4 ciclos de ondas em regime permanente:

$$RAO = \left[\frac{cz}{H} \right]_{crista} - \left[\frac{cz}{H} \right]_{cava} \quad (54)$$

Assim como as métricas de erro fornecem uma medida quantitativa da divergência entre soluções teórica e numérica, Ramachandran et al. (2013) destacam que o RAO atua como uma função de resposta, representando a relação linear entre a ação das ondas e o movimento do corpo flutuante. De acordo com os valores obtidos, o comportamento do PHS-O pode ser classificado como:

- Atenuado: $RAO < 1$, o movimento do dispositivo é menor que a amplitude da onda incidente;
- Linear: $RAO \approx 1$, o movimento do dispositivo é proporcional à altura da onda;
- Amplificado: $RAO > 1$, o movimento do dispositivo é superior à amplitude da onda incidente, indicando efeito de amplificação.

Dessa forma, o RAO complementa a análise hidrodinâmica, fornecendo uma estimativa da resposta do dispositivo às ondas incidentes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com os modelos numéricos desenvolvidos para a análise do desempenho da PHS. Inicialmente, realiza-se a verificação e validação dos modelos na configuração 2D e 3D PHS-NO, com avaliação do erro numérico e da consistência dos resultados obtidos em relação às soluções de referência. Em seguida, é conduzida a verificação do movimento do dispositivo na configuração PHS-O, caracterizando o deslocamento vertical (cz) da PHS sob a ação das ondas incidentes. Após essa etapa, procede-se à calibração do modelo por meio de uma análise paramétrica, na qual são testadas diferentes condições de geometria da PHS, profundidade de submersão e características das ondas. Por fim, o modelo calibrado é aplicado a um estudo de caso, no qual as configurações PHS-NO e PHS-O são testadas, permitindo a avaliação comparativa da eficiência entre as soluções.

4.1 Verificação e validação do modelo computacional PHS-NO e PHS-O

4.1.1 Verificação da Propagação das Ondas Numéricas Simuladas no Modelo Computacional 2D

Como mencionado, o procedimento de verificação da onda foi realizado similarmente ao apresentado por Seibt (2019), com mesmas dimensões de tanque numérico e características da onda, diferenciando-se apenas quanto ao uso do refinamento da malha no trecho de interface fluido-ar (Figura 4.1). A simulação numérica foi realizada sem a presença da placa no domínio computacional e utilizando onda com $H = 0,06$ m, comprimento $\lambda = 2,9904$ m calculado pela Eq. (08), período $T = 1,5$ s e profundidade $h = 0,6$ m para 16.500 passos de tempo, com tamanho de 0,001s.

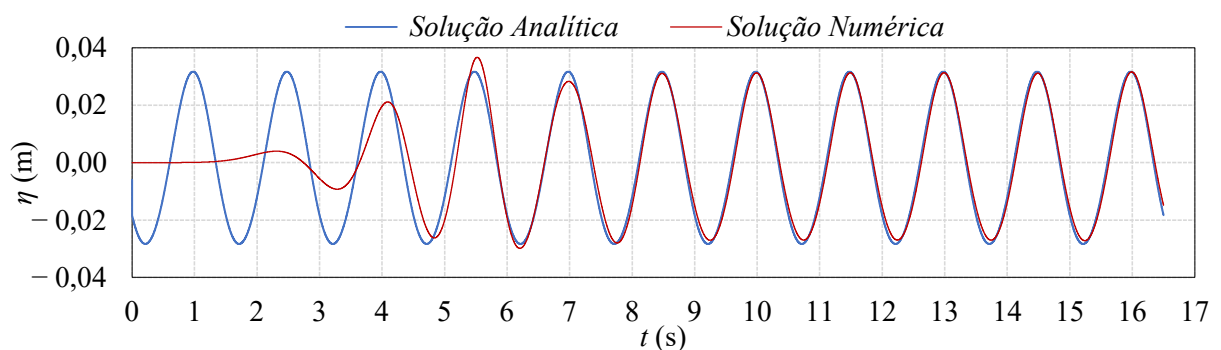


Figura 4.1: Ilustração da solução numérica e analítica da elevação de superfície da onda η (m) 2D.

A Figura 4.1 apresenta os resultados numéricos obtidos na sonda linear com ponto inicial no fundo do canal em P1(5,0; -0,6) m e ponto final na superfície superior do canal em P2 (5,0; 0,4) m, conforme ilustrado na Figura 4.2 . Além disso, são apresentados os resultados da série temporal calculada analiticamente pela Eq. (09) com ajuste de fase necessário para a avaliação da concordância entre os dois perfis de elevação de superfícies da onda.

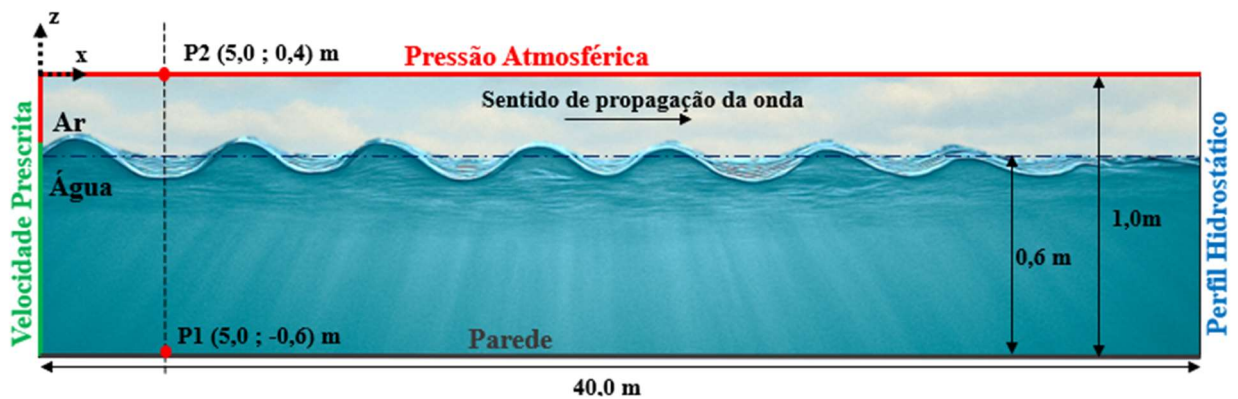


Figura 4.2: Posicionamento da sonda linear delimitada entre os pontos P1 e P2.

Os dados apresentados correspondem a um tempo de simulação de $t = 16,5$ s, equivalente a propagação de 11 comprimentos de ondas, no qual é demonstrado o processo de formação e estabilização da onda. Nos instantes iniciais, o fluido encontra-se em repouso como condição inicial do problema, resultando em um tempo de aproximadamente $t = 7$ s necessário para que a onda atinja a estabilização.

A diferença média entre os perfis analíticos e numéricos de η foi de 1,0% no intervalo de seis períodos de onda e foi calculada por meio do RMSE, Eq. (48), verificando o modelo computacional adotado. Sendo assim, é possível considerar que a verificação do modelo numérico foi bem sucedida para a simulação da propagação das ondas no canal numérico 2D.

4.1.2 Validação do Modelo Computacional 2D PHS-NO

A validação do modelo numérico foi realizada norteando-se pelo trabalho desenvolvido por Orer e Ozdamar (2007) e validado por Seibt (2019). Neste estudo, os autores analisam diversos arranjos geométricos da PHS-NO, submetida a uma ampla faixa de períodos e alturas de onda, a fim de validar experimentalmente a eficiência do CEO do tipo PHS-NO.

Dentre os casos investigados experimentalmente por Orer e Ozdamar (2007), selecionou-se o mesmo caso adotado por Seibt (2019) para a validação do seu modelo computacional, cuja altura relativa da placa (X) foi $X = 86,7\%$. Esse modelo foi submetido a duas ondas de diferentes períodos ($T = 1,50$ s e $T = 1,87$ s), ambas com altura $H = 0,06$ m. O canal de ondas reproduzido possui 40,00 m de comprimento e 1,00 m de altura, com profundidade da água $h = 0,60$ m, com a PHS-NO centralizada no canal.

Destaca-se, no estudo de Orer e Ozdamar (2007), que os resultados experimentais apresentaram incerteza de $\approx 2,00\%$. As comparações basearam-se nos resultados obtidos experimentalmente, que consistiam em medir a velocidade máxima do escoamento sob a PHS-NO, no sentido oposto à propagação das ondas ($-x$), no ponto médio entre a PHS-NO e o fundo do canal (Tabela 9).

Tabela 9. Comparação entre os valores numérico e experimental da velocidade u (cm/s) para a configuração 2D PHS-NO.

Caso	T (s)	H (cm)	$u_{Orer\ e\ Ozdamar}$ (cm/s)	u_{Seibt} (cm/s)	$u_{Pesquisa}$ (cm/s)	E_{RSeibt} (%)	$E_{RPesquisa}$ (%)
1	1,50	6,00	-9,44	-8,34	-8,13	-11,67	-13,87
2	1,87	6,00	-11,39	-12,72	-11,21	11,74	-1,64

A Tabela 9 reúne os resultados de velocidade máxima do escoamento, abaixo da placa na direção $-x$, permitindo a comparação entre os valores obtidos nos modelos numérico e experimental apresentados por diferentes autores. No Caso 1, as ondas curtas fazem a velocidade sob o dispositivo variar muito rapidamente, e qualquer pequena diferença no escoamento gera uma variação proporcionalmente maior na velocidade, elevando o E_R . No Caso 2, as ondas são mais longas e a velocidade varia de forma mais gradual, de modo que pequenas diferenças no escoamento têm impacto menor na velocidade máxima, reduzindo E_R .

As diferenças entre os valores obtidos na presente pesquisa podem ser explicadas pelas limitações inerentes à reprodução exata do experimento descrito por Orer e Ozdamar (2007), uma vez que, no modelo numérico, as ondas foram geradas a partir das equações de Stokes de 2ª ordem, com parâmetros previamente definidos para inserção no domínio computacional.

Já nos experimentos, as ondas foram produzidas por geradores mecânicos, ajustando-se T e H , enquanto o comprimento de onda (λ) foi medido durante os ensaios, apresentando valores ligeiramente diferentes dos previstos pela teoria de ondas, o que contribui para as

diferenças observadas. Aspecto também relatado por Seibt (2019), ao utilizar os resultados experimentais Orer e Ozdamar (2007) na validação de seu modelo numérico. Ainda assim, as velocidades determinadas numericamente e experimentalmente mostraram concordância razoável e, adicionalmente, o procedimento de geração de ondas numéricas demonstrou concordância do modelo com a teoria de ondas.

4.1.3 Verificação da Propagação da Ondas Numéricas Simuladas no Modelo Computacional 3D

A verificação da onda, conduzida com um modelo 3D, mostrou-se essencial para a análise dos deslocamentos da PHS-O. Essa abordagem permitiu avaliar o equilíbrio entre o empuxo, o peso do dispositivo e os deslocamentos induzidos pelas ondas. Além disso, ao possibilitar a comparação com o modelo 2D, o uso do modelo 3D forneceu uma caracterização mais detalhada e abrangente do sistema, evidenciando possíveis distorções entre as representações.

A metodologia empregada na verificação do modelo 3D PHS-NO seguiu o procedimento semelhante ao adotado por Seibt (2019) no modelo 2D PHS-NO, diferenciando-se apenas quanto à abordagem 3D, às dimensões do tanque e às características da onda simulada. A simulação numérica foi conduzida conforme o estudo realizado de Orer e Ozdamar (2007), sem a presença da placa no domínio computacional. Empregou-se uma onda com $H = 0,06$ m, $\lambda = 3,46$ m, $T = 1,5$ s, em um tanque com $h = 0,6$ m, simulada por 20.000 passos de tempo com tamanho de 0,001s.

A Figura 4.3 ilustra os resultados numéricos obtidos na sonda planar, definida por quatro pontos: P3 (5,0; -0,5; -0,5) m e P4 (5,0; 0,5; -0,5) m, localizados no fundo do tanque, e P5 (5,0; -0,5; 0,5) m e P6 (5,0; 0,5; 0,5) m, posicionados na superfície. Esses pontos delimitam as extremidades do tanque numérico. Inclui-se também a solução analítica obtida pela Eq. (09), ajustada em fase para avaliar a concordância entre os perfis de elevação. Foram comparados dois perfis, todos baseados na teoria de Stokes de 2ª ordem: o analítico, o numérico com escoamento laminar.

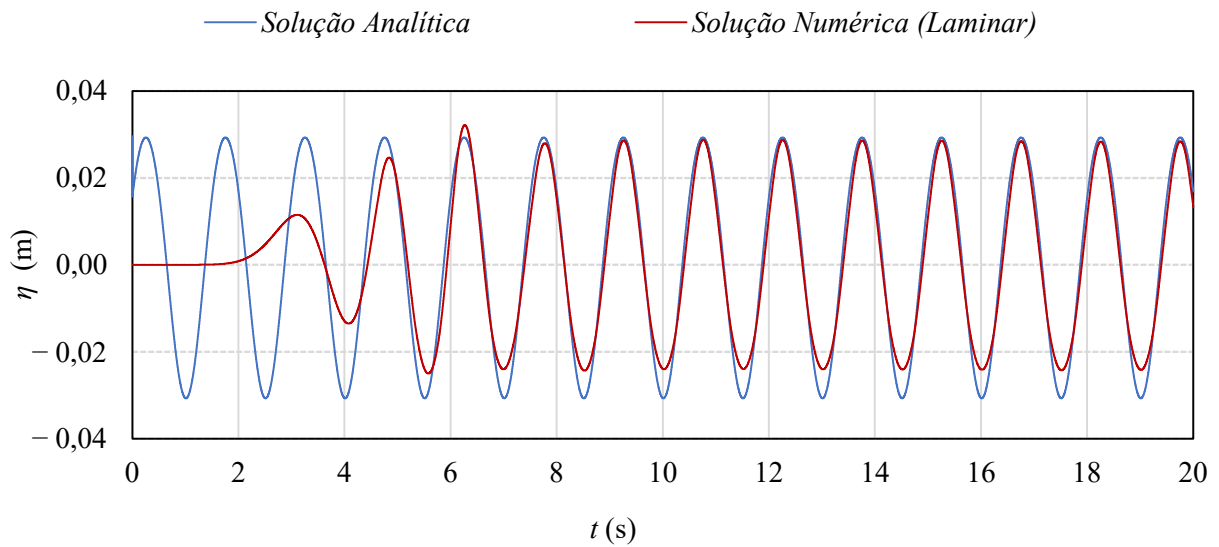


Figura 4.3: Representação dos perfis de elevação da onda obtidos por soluções numéricas e por soluções analíticas com distintos modelos de escoamento no domínio 3D.

Os dados apresentados referem-se a um intervalo de 20 s de simulação, que inclui os instantes iniciais, nos quais ainda há influência da condição inicial de repouso dos fluidos e do processo de formação da onda, de modo que esta não se encontra totalmente estabilizada. A diferença observada entre as cavas pode ser atribuída à interferência das paredes laterais do tanque numérico 3D, que, em contato com as ondas, podem induzir distúrbios adicionais à sua propagação. Como consequência, surgem diferenças entre os resultados numéricos e a solução analítica, a qual considera condições ideais, sem tais interferências.

A diferença média entre os resultados numéricos e analíticos (Figura 4.3) obtidos a partir da teoria de Stokes de 2ª ordem, foi avaliada ao longo de 13 s de simulação, excluindo os 7 s iniciais da onda não estabilizada. O cálculo do RMSE (Eq. 48), normalizado pela altura da onda simulada, resultou em 5,83% para o modelo, considerando um intervalo equivalente a 8,5 períodos de onda.

Portanto, por apresentar RMSE menor, para verificação da propagação das ondas no modelo 3D o presente estudo empregou a teoria de Stokes de 2ª ordem em regime de escoamento laminar. Para avaliar a precisão dos resultados, os erros obtidos no modelo foram determinados e estão organizados na Tabela 10.

Tabela 10 . Erros numéricos por intervalos de tempo .

Erro	Valores (m)			
	7 a 10 (s)	10 a 15 (s)	15 a 20 (s)	7 a 20 (s)
MAE (analítica)	0,00294	0,00303	0,00293	0,00297
RMSE (analítica)	0,00354	0,00358	0,00339	0,00350
Diferença das normas infinito (analítica)	-0,00206	-0,00191	-0,00210	-0,00191
RMS do erro numérico	0,00354	0,00358	0,00339	0,003507

Os valores menores de MAE indicam maior precisão da previsão. No intervalo de 7 a 10 s, por exemplo, o valor obtido mostra que, em média, as previsões se afastaram apenas 0,00294 m dos valores observados nesse período.

De modo análogo, menores valores de RMSE também refletem maior precisão da previsão. De acordo com a Eq. (48), para o intervalo de 7 a 20 s, apontam que, em média, os valores previstos diferiram dos observados em aproximadamente 0,0035 m nesse período.

Os valores próximos de zero na diferença das normas infinito indicam uma boa concordância entre a solução numérica e analítica. Por sua vez, o RMS do erro numérico que reflete a qualidade interna da solução numérica, apresentou valores idênticos aos do RMSE, confirmando a boa correspondência do modelo com a solução analítica e a consistência dos resultados obtidos.

A comparação com o modelo 2D PHS-NO desenvolvido por Seibt (2019) reforça a coerência dos resultados obtidos no modelo 3D PHS-NO. Ambos apresentaram boa concordância com a solução analítica de Stokes de 2ª ordem, ainda que o modelo 3D PHS-NO tenha registrado RMSE ligeiramente superior, com 5,83 %, em comparação aos 2,5 % obtidos por Seibt (2019). Essa diferença é explicada pelas condições 3D do tanque numérico, nas quais ocorrem interferências das paredes laterais e perdas de energia resultantes de reflexões nas paredes e de variações de velocidade ao longo da largura do domínio, efeitos ausentes no domínio 2D.

Esse resultado demonstra a confiabilidade do modelo computacional adotado e confirma a verificação bem sucedida do modelo numérico 3D para a simulação da propagação das ondas no tanque numérico de ondas.

4.1.4 Validação do Modelo Computacional 3D PHS-NO

Nesta seção são apresentados os princípios e técnicas utilizados na validação do modelo 3D PHS-NO (Figura 4.4), com o objetivo de garantir a confiabilidade e a precisão das simulações realizadas. A validação fundamenta-se no experimento conduzido por Orer e Ozdamar (2007), no qual foram testados diferentes arranjos geométricos da PHS-NO, submetidos a uma ampla faixa de períodos e alturas de onda, com o objetivo de avaliar experimentalmente a eficiência do CEO.

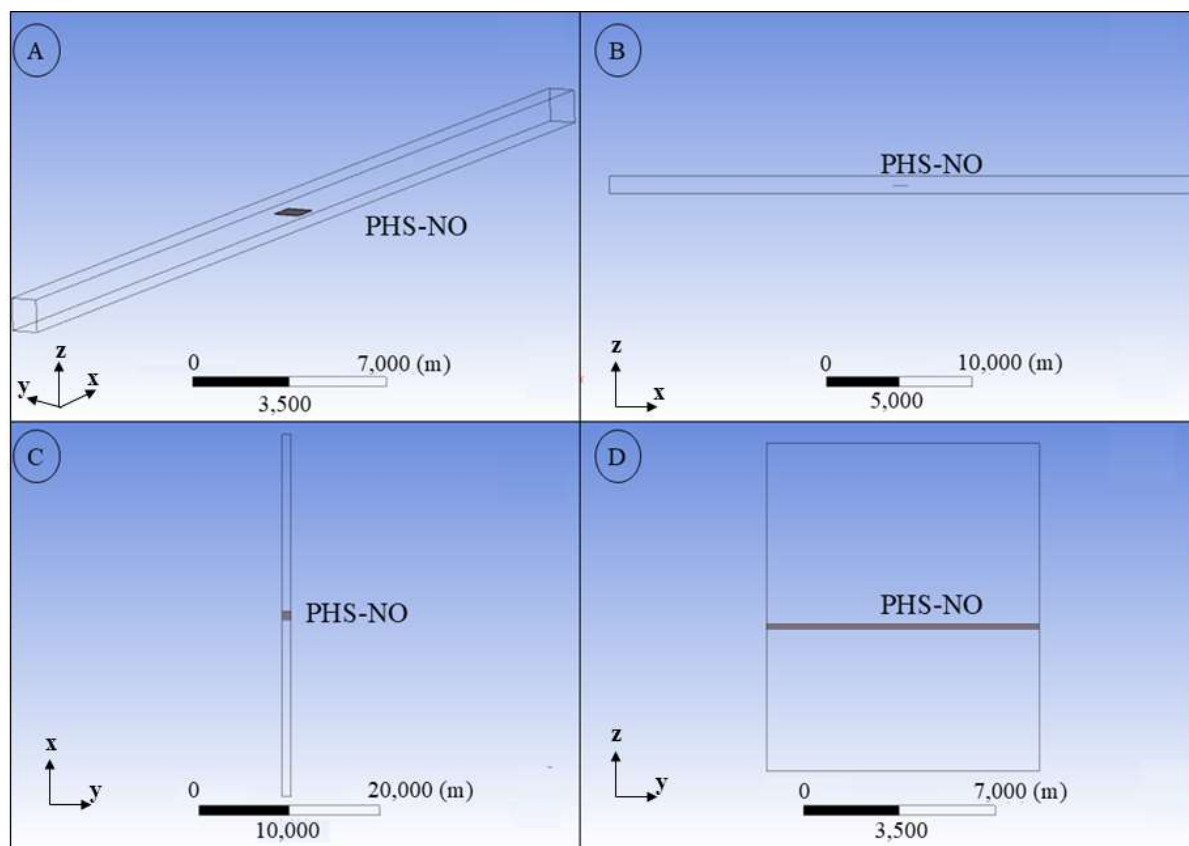


Figura 4.4: Representação da geometria do tanque numérico 3D: A) Vista tridimensional; B) Vista lateral; C) Vista superior; D) Vista frontal.

Dessa forma, foi simulado um caso com as mesmas características geométricas do modelo desenvolvido por Orer e Ozdamar (2007), representado pelas vistas 3D, lateral, superior e frontal do domínio computacional (Figura 4.4). O tanque de ondas numérico foi modelado com dimensões $L_c = 40,0$ m, $b_c = 1,0$ m e $H_c = 1,0$ m. No seu interior encontra-se a PHS-NO, com dimensões de $1,0 \times 1,0 \times 0,02$ m, centralizada no tanque e submersa a $0,06$ m, em uma profundidade de água $h = 0,60$ m, conforme ilustrado na Figura 4.5.

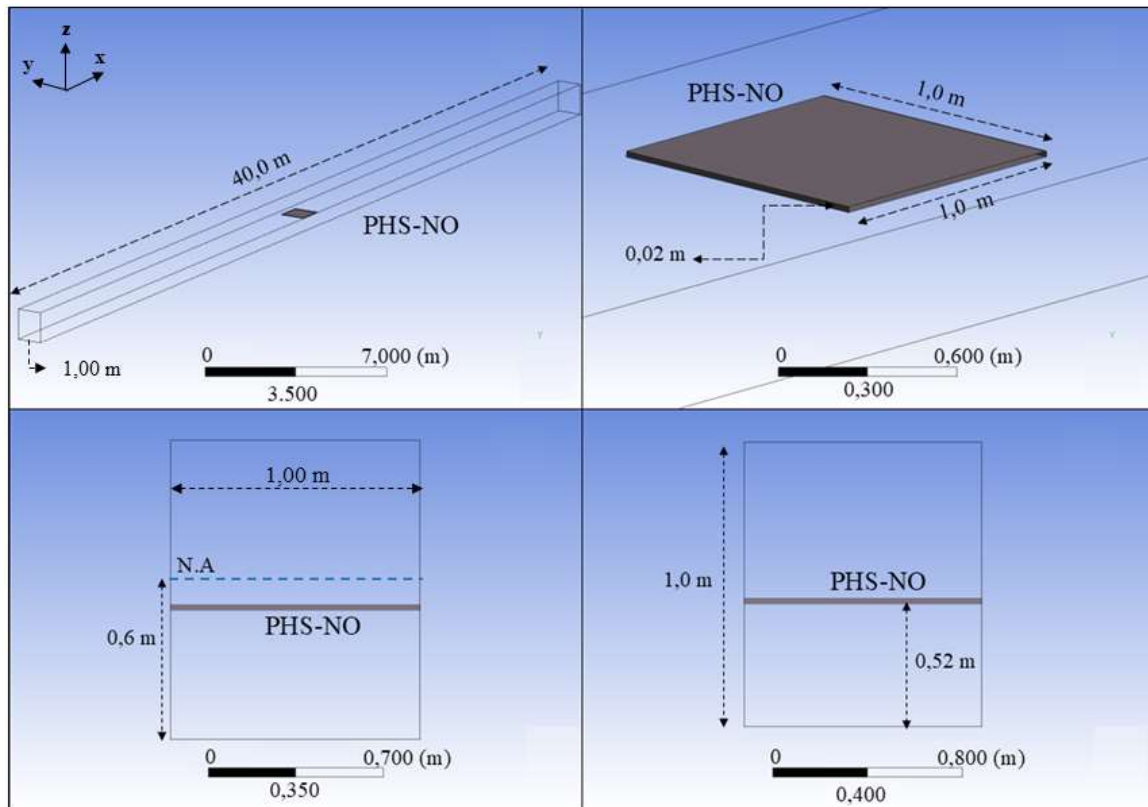


Figura 4.5: Dimensões do tanque numérico (m) e da PHS-NO (m) no modelo 3D.

A partir desse modelo, foram simulados quatro casos distintos, selecionados entre aqueles investigados experimentalmente por Ozer e Ozdamar (2007), ambos com altura relativa da placa (X) igual a 86,7% e submetidos a diferentes combinações de T e H . As características de cada caso estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11. Relação de casos simulados em função das características das ondas.

Caso	T (s)	H (m)	λ (m)
1	1,16	0,06	2,07
2	1,50	0,06	3,46
3	1,87	0,06	5,37
4	2,05	0,10	6,68

A simulação do modelo 3D PHS-NO foi realizada com malhas regulares. Para evitar elevado esforço computacional, adotaram-se elementos com dimensões de $0,10 \times 0,10 \times 0,10$ m, configuração que não comprometeu a precisão dos resultados obtidos. As demais configurações do modelo 3D PHS-NO mantiveram-se iguais às utilizadas na validação do modelo 2D PHS-NO, diferenciando-se apenas pela ausência de refinamento da malha no entorno da PHS-NO e na interface entre as fases água e ar.

As medições de velocidade seguiram o procedimento descrito por Orer e Ozdamar (2007), que consistia em registrar a velocidade máxima do fluxo abaixo do PHS-NO, no sentido oposto à propagação das ondas ($-x$), no ponto médio entre a estrutura e o fundo do tanque, com incerteza de $\approx 2,00\%$. Na sequência, os valores obtidos no modelo numérico foram comparados aos resultados experimentais, permitindo avaliar o grau de concordância entre as duas abordagens (Tabela 12).

Tabela 12. Comparação entre os resultados numérico e experimental da velocidade u (cm/s) no modelo 3D.

Caso	T (s)	H (cm)	$u_{\text{Orer e Ozdamar}}$ (cm/s)	$u_{\text{simulação}}$ (cm/s)	$E_{R\text{Simulação}}$ (%)
1	1,16	6,00	-5,56	-5,19	6,70%
2	1,50	6,00	-9,44	-10,22	-8,22%
3	1,87	6,00	-11,38	-12,10	-6,26%
4	2,05	10,0	18,41	-19,90	-8,09%

Conforme apresentado na Tabela 12, os valores de velocidade obtidos numericamente apresentam boa proximidade em relação aos resultados experimentais. Nas simulações numéricas, as ondas são geradas a partir das equações de Stokes de 2ª ordem, com características previamente definidas no modelo. Já nos experimentos, as ondas são produzidas por meio de ajustes no gerador, considerando parâmetros como T e H , enquanto λ é medido durante a execução. Esses valores medidos, entretanto, podem divergir das previsões teóricas, seja pela formulação linear, de 2ª ordem ou de 3ª ordem.

Esse resultado indica que as divergências entre as abordagens são pequenas em relação às medidas experimentais. Assim, as velocidades numérica e experimental apresentaram concordância satisfatória e, adicionalmente, o procedimento demonstrou a consistência do modelo com a teoria de ondas, confirmando a validação do modelo 3D PHS-NO.

Em síntese, as verificações e validações realizadas para os modelos PHS-NO, tanto nas configurações 2D quanto 3D, apresentadas nas seções anteriores, constituíram etapas essenciais deste trabalho. Os resultados obtidos confirmaram a precisão e a confiabilidade dos métodos numéricos empregados, assegurando a consistência do processo de modelagem. Esses resultados forneceram a base necessária para decisões mais seguras no desenvolvimento do trabalho e estabeleceram o suporte para a etapa seguinte, voltada à construção e análise do modelo 3D PHS-O.

4.1.5 Avaliação Numérica do Modelo 3D PHS-O: Praia de Numérica e Independência de Malha

4.1.5.1 Avaliação da Praia Numérica

Com o objetivo de avaliar o desempenho da praia numérica na absorção e dissipação da energia das ondas incidentes, foi considerado um domínio de $20 \times 20 \times 402,40$ m, o mesmo que será empregado posteriormente na etapa de verificação do modelo numérico 3D PHS-O. Nessa configuração, adotou-se a malha de referência sem a presença da PHS no domínio computacional, de modo a isolar os efeitos da propagação e analisar exclusivamente o comportamento da dissipação das ondas na região correspondente à praia numérica.

O comprimento da região foi definido em 2λ , considerando os coeficientes de amortecimento linear e quadrático iguais a $C_1 = 22,37 \text{ s}^{-1}$ e $C_2 = 4,15 \text{ s}^{-1}$, respectivamente, conforme apresentado na seção 3.1.6. Objetivando-se, com isso, garantir a dissipação eficiente da energia das ondas, sem comprometer o desempenho do modelo numérico nas extremidades do domínio computacional.

Essa configuração assegurou que o modelo fosse capaz de minimizar as reflexões indesejadas nas fronteiras do domínio, contribuindo para a manutenção da precisão dos resultados numéricos. As elevações da superfície livre foram registradas em cinco localizações ao longo da direção de propagação: P1 e P2, localizados no início do tanque; e P3, P4 e P5, posicionados respectivamente no início, centro e final da praia numérica (Figura 4.6).

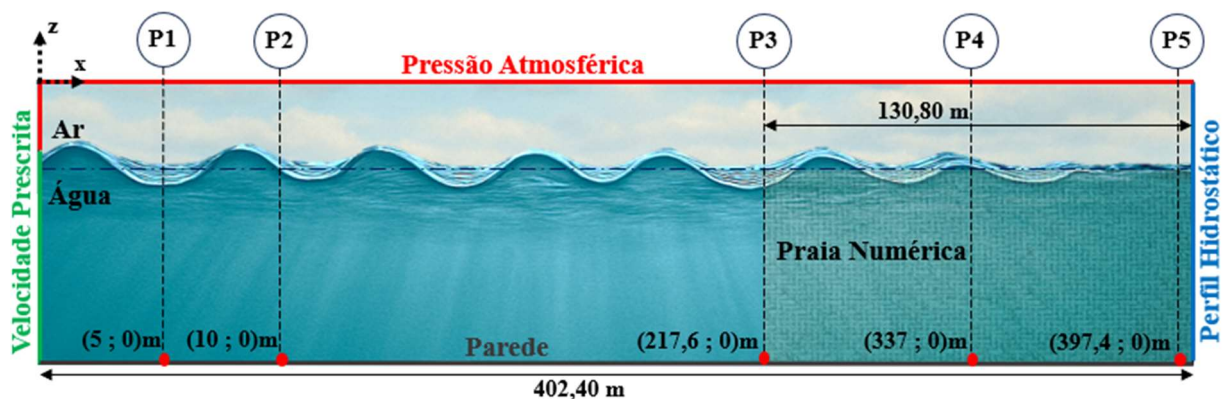


Figura 4.6: Disposição das sondas (P1, P2, P3, P4 e P5) empregadas na medição das elevações da superfície livre ao longo do tanque.

A análise dos sinais registrados permitiu observar o efeito da praia numérica na dissipação das ondas refletidas, evidenciado pela atenuação gradual da amplitude à medida que

a onda avança no domínio computacional (Figura 4.7). Esse comportamento indica a eficiência do mecanismo de amortecimento implementado, que reduz significativamente a energia das ondas refletidas. Com base nos dados obtidos foi possível estimar o coeficiente de reflexão em aproximadamente 0,0091, determinado a partir da razão entre as alturas de crista das ondas, 1,10 m e 0,01 m, registradas nas sondas P1 e P5, respectivamente.

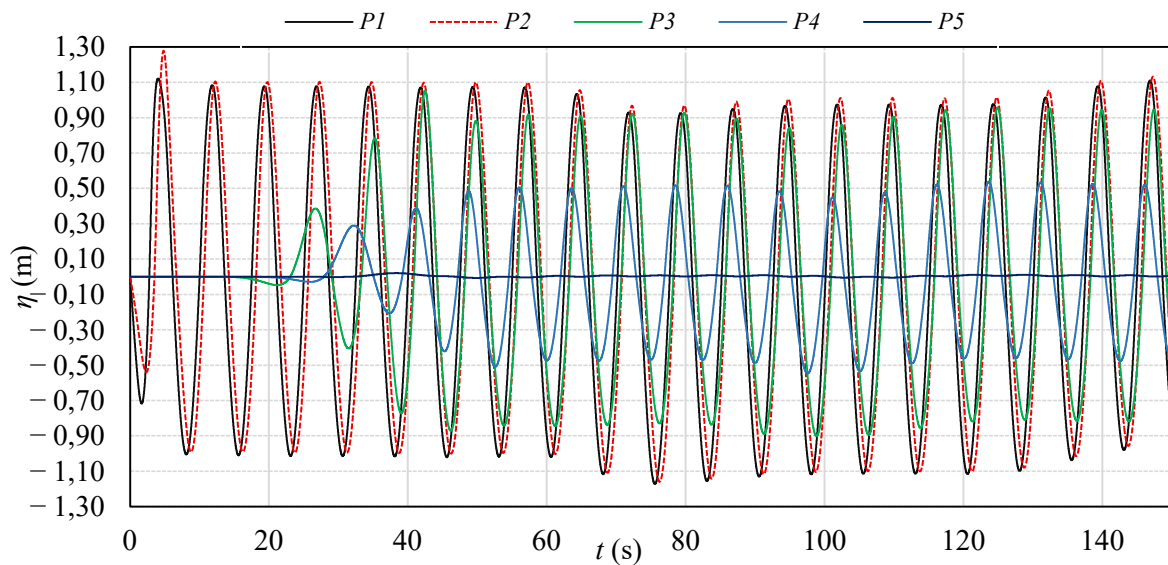


Figura 4.7: Amplitudes das ondas incidentes (m) e refletidas (m) registradas nas sondas P1, P2, P3, P4 e P5, posicionadas respectivamente a 5 m, 10 m, 271,6 m, 337 m e 397,4 m ao longo do domínio.

Esse resultado evidencia que a praia numérica cumpre de maneira eficaz seu papel na dissipação da energia das ondas, reduzindo significativamente os efeitos de reflexão e, consequentemente, as interferências nas extremidades do domínio. Tal desempenho está em consonância com os achados de Machado et al. (2021), reforçando a confiabilidade do modelo numérico adotado e assegurando maior precisão nas simulações realizadas.

4.1.5.2 Estudo sistemático de refinamento da malha

Com o objetivo de avaliar a influência da discretização espacial na solução numérica e assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos, realizou-se uma análise de sensibilidade à malha. O procedimento consistiu em um refinamento sistemático, prática comum em estudos numéricos, com a adoção de uma variação de 30% na quantidade total de elementos.

Desta forma, três configurações de malha foram consideradas. A malha grosseira composta por 565.634,00 elementos. A malha de referência com 808.048,00 elementos, sendo gerada a partir da geometria base do modelo e selecionada, inicialmente, por representar um

bom equilíbrio entre precisão numérica e esforço computacional, já que malhas acima de 1.000.000,00 de elementos resultaram em tempos de processamento significativamente mais elevados. Por fim, a malha refinada contendo 1.050.462,00 elementos.

Os valores médios das variáveis u , P e cz no dispositivo foram obtidos diretamente das simulações para cada malha. A convergência entre as malhas foi então avaliada a partir da diferença relativa entre esses valores médios em cada par de malhas, sendo o percentual de convergência definido pela média das diferenças relativas das três variáveis, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13. Valores médios das variáveis u (m/s), P (Pa) e cz (m), para diferentes malhas e respectivas taxas de convergência utilizadas na análise de sensibilidade.

Malha	$t_{\text{simulação}} (h)$	$\bar{u}$ (m/s)	$\bar{P}$ (Pa)	$\bar{cz}$ (m)	Convergência
(1) Grosseira	33	0,4681	10337,9831	1,0321	
(2) Referência	48	0,4850	10787,5150	1,0728	
(3) Refinada	71	0,4727	11002,5940	1,0944	
Convergência	—	0,0347	0,0417	0,0380	3,8121
Convergência	—	0,0253	0,0199	0,0201	2,1763

As simulações foram conduzidas para cada configuração de malha, mantendo inalteradas as condições de contorno, a formulação matemática do problema e os critérios de convergência. As variáveis de interesse foram avaliadas para todas as configurações e, em seguida, comparadas. Observou-se que a diferença entre a malha de referência e a malha refinada foi de apenas 2,18%, enquanto a variação entre a malha de referência e a malha grosseira foi de 3,81% (Tabela 13). Esses valores indicam que a solução numérica é, essencialmente, independente da malha. Portanto, a malha de referência foi considerada suficientemente refinada para os objetivos deste estudo.

4.1.6 Verificação do Movimento Vertical do Modelo 3D PHS-O

Para a verificação do movimento vertical do modelo 3D PHS-O (ver Tabela 5), realizou-se uma simulação considerando a incidência de 20 ondas, totalizando 20.000 passos de tempo, com tamanho de passo de 0,0075 s. Ao longo de 150 s de simulação foram observados

os movimentos oscilatórios da PHS-O na direção vertical (cz), componente z , conforme Figura 4.8.

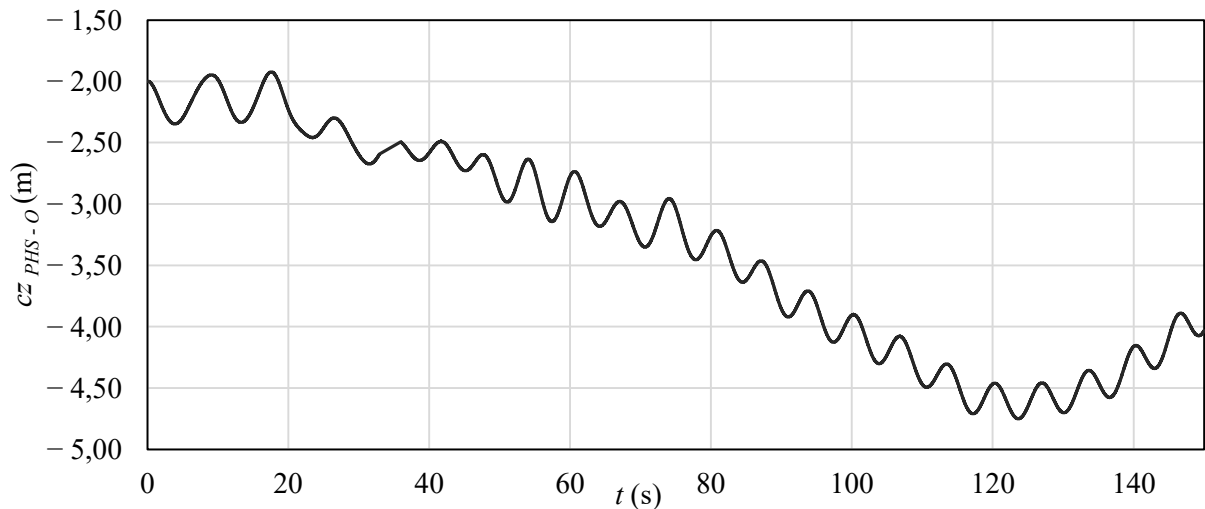


Figura 4.8: Oscilação da PHS-O (cz) na direção do eixo z (m).

O dispositivo inicia seu movimento oscilante a partir da cota $-2,16$ m. Nos primeiros 20 s, oscila entre as cotas $-2,5$ m e sua cota inicial de movimento. Posteriormente, entra em movimento de descida oscilante, atingindo as cotas de $-3,0$ m e $-4,0$ m em $t = 56$ s e $t = 96$ s, respectivamente. O movimento de descida oscilante alcança sua cota máxima de submersão de $-4,75$ m em $t = 120$ s com deslocamento total de 2,59 m, em seguida, inicia o movimento oscilante de retorno em direção ao ponto de partida do movimento, conforme evidenciado na Figura 4.8.

Complementando a análise de movimento da PHS-O, a Figura 4.9 apresenta a deformação da malha numérica ao longo do tempo, em função do deslocamento da PHS-O, em diferentes instantes da simulação: $t = 0$, $t = 20$, $t = 40$, $t = 60$, $t = 80$, $t = 100$ e $t = 120$ s. A linha de referência (LR) permite visualizar esse deslocamento de forma clara ao longo do t . Observa-se que, nos primeiros instantes, a deformação é mais acentuada próximo à superfície, acompanhando o movimento oscilante inicial da PHS-O. Com o aumento do tempo, a malha se deforma de forma mais evidente à medida que o dispositivo se aproxima de sua cota máxima de submersão em $-4,75$ m.

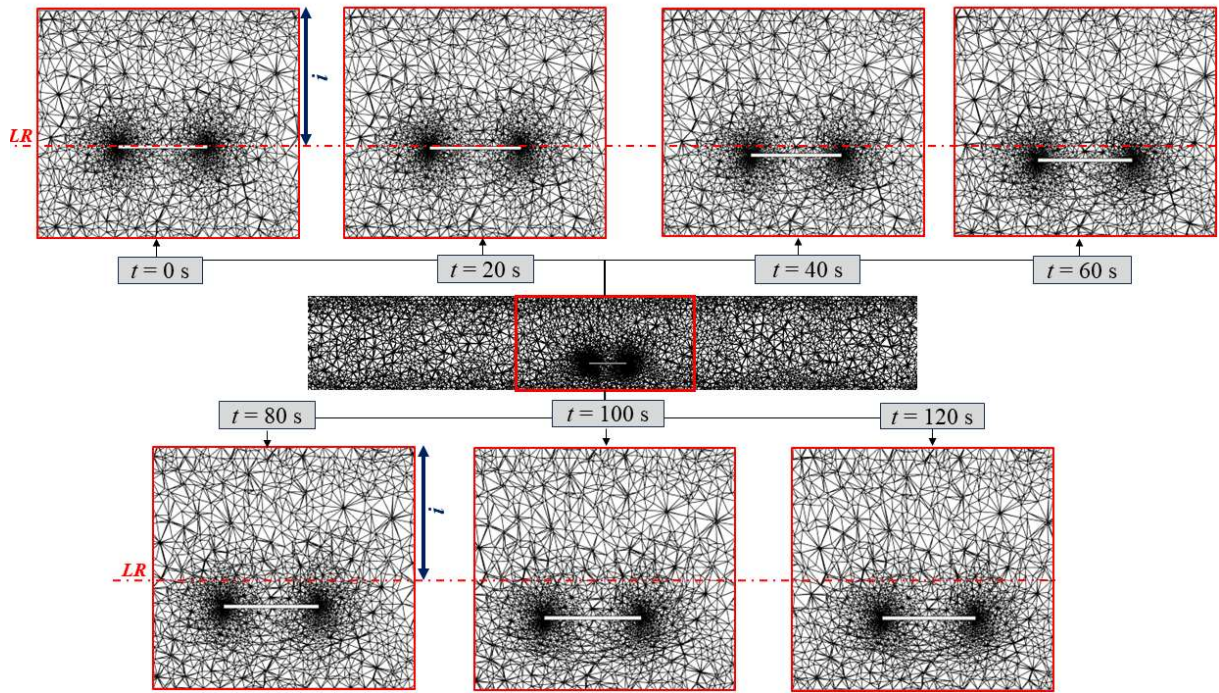


Figura 4.9: Ilustração da deformação da malha nos instantes $t = 0$ s, $t = 20$ s, $t = 40$ s, $t = 60$ s, $t = 80$ s, $t = 100$ s e $t = 120$ s, com a linha de referência (LR) posicionada sobre a PHS-O em repouso ($t = 0$ s), localizada a uma distância i do limite superior do tanque.

Em relação aos eixos x e y , onde ocorreram as restrições de movimento, não se observou movimentos significativos na componente x (cx) e componente y (cy), conforme ilustrado na Figura 4.10 e Figura 4.11, respectivamente.

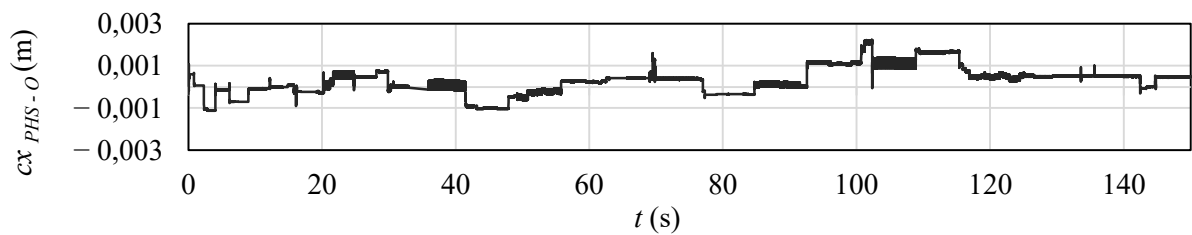


Figura 4.10: Oscilação da PHS-O (cx) na direção do eixo x (m).

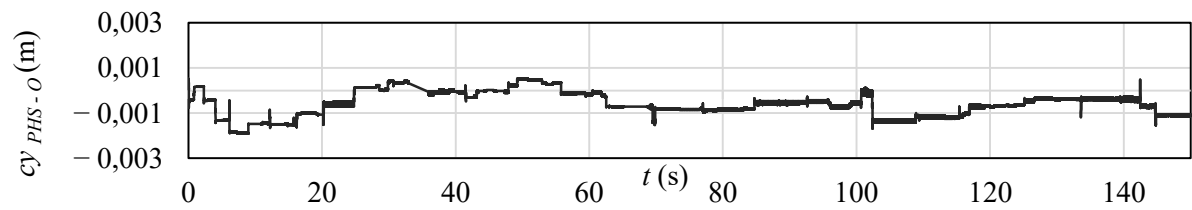


Figura 4.11: Oscilação da PHS-O (cy) na direção do eixo y (m).

Preliminarmente, antes da realização do processo de verificação do modelo 3D PHS-O, realizou-se um estudo no modelo, que consistiu em analisar se a forma de execução das medições dos parâmetros integrantes da equação de Bernoulli estava coerente. Para isso, mediram-se a velocidade do fluido sob a PHS-O, o deslocamento causado pela ação das ondas, bem como as pressões estática, dinâmica e hidrostática.

A pressão estática (p) é a pressão exercida por um fluido em repouso ou em movimento, medida em todas as direções. A pressão dinâmica (p_d) está associada ao movimento do fluido, refletindo sua energia cinética. Por fim, a pressão hidrostática (p_h) é a pressão exercida por um fluido em repouso devido à gravidade, aumentando com a profundidade.

Os resultados da medição da p agindo na placa em função do movimento oscilatório causado pela ação das ondas são ilustrados na Figura 4.12. Como esperado, p máxima ocorre no ponto mais profundo que a PHS-O atingiu em seu movimento oscilante de descida.

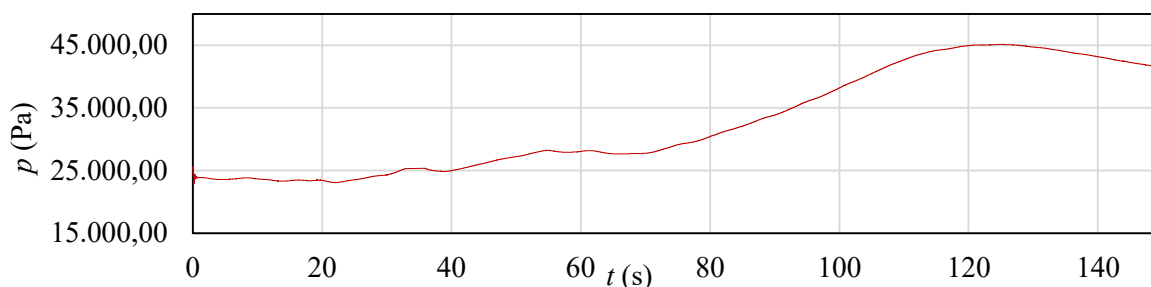


Figura 4.12: Variação de p (Pa) na PHS-O.

Com relação à p_d os resultados medidos foram inferiores, quando comparados aos de valores de p , já a p_h apresentou um pico com valor máximo próximo de 50.000,00 Pa, como pode ser visualizado na Figura 4.13 e Figura 4.14.

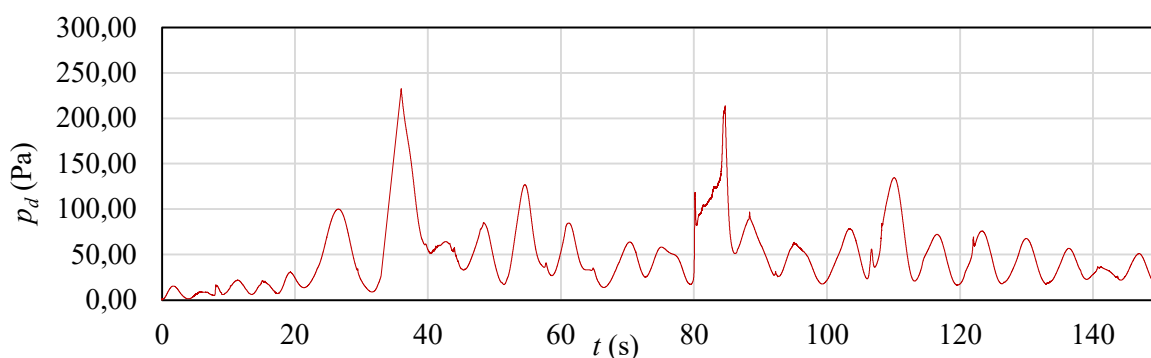


Figura 4.13: Variação de p_d (Pa) na PHS-O.

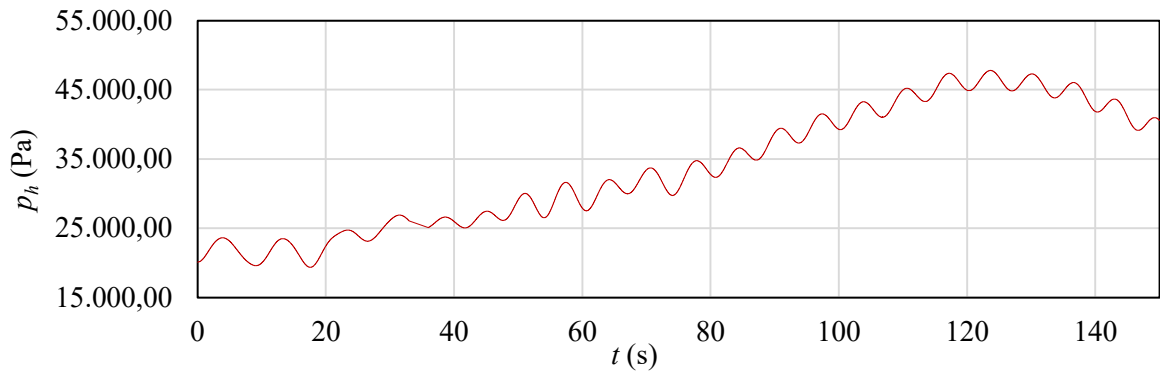


Figura 4.14: Variação de p_h (Pa) na PHS-O.

Com essas informações, buscou-se comparar os resultados numéricos obtidos por meio das Eq. (44) e Eq. (45). Ao aplicar os parâmetros medidos nessas equações, observou-se que as curvas geradas, apresentadas na Figura 4.15, exibem o mesmo comportamento, afastando-se apenas no momento em que a PHS-O atinge a profundidade máxima e inicia o movimento de subida, possivelmente em razão de pequenas variações de pressão associadas à atualização da malha durante essa etapa. Assim, conclui-se que a metodologia empregada para medir os parâmetros foi satisfatória e resultou em soluções convergentes.

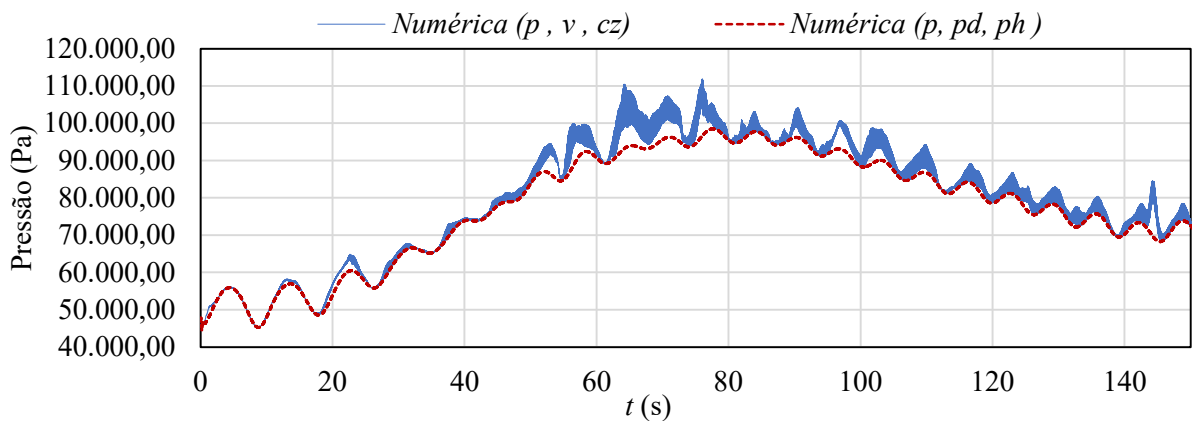


Figura 4.15: Resultados de pressões na condição PHS-O, obtidos por meio de duas abordagens da equação de Bernoulli: 1) Utilizando valores numéricos p (Pa), v (m/s) e cz (m); 2) Empregando valores numéricos de p (Pa), p_d (Pa), e p_h (Pa).

Posteriormente, procedeu-se à verificação do modelo 3D PHS-O, que consistiu em comparar os valores de p determinados analiticamente, a partir da equação de Bernoulli, e aqueles obtidos numericamente no centro de gravidade da PHS-O. Para essa análise, tomaram-se como referência os pontos de inflexão ocorridos durante o movimento de oscilação do dispositivo, conforme ilustrado na Figura 4.16.

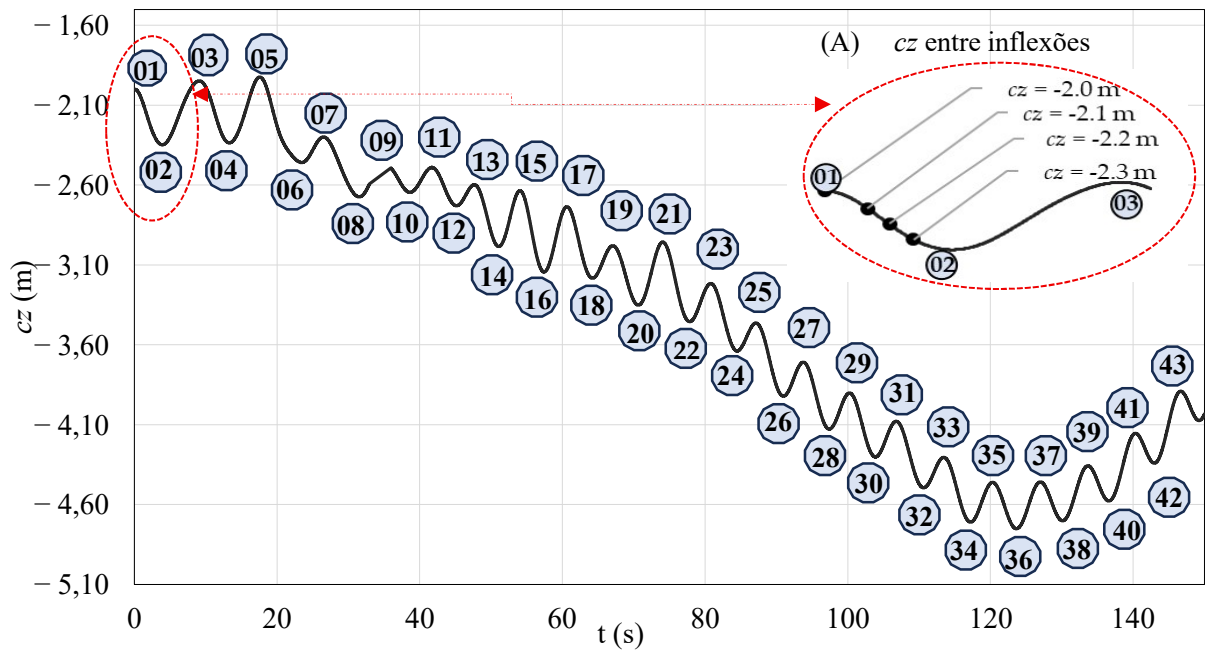


Figura 4.16: Pontos de Inflexão (m) durante a oscilação da PHS-O.

Com os pontos de inflexão definidos, variou-se intervalos de 0,1 m, conforme ilustrado no detalhe (A) da Figura 4.16, gerando um total de 134 valores de deslocamentos da PHS-O, os quais possibilitaram a obtenção dos valores analíticos de p . Seguidamente determinou-se o erro numérico por meio da Eq. (52), os quais encontram-se organizados na Tabela 14.

Tabela 14. Erro relativo (%) entre as soluções estática numérica e a analítica de p .

(continua)

t (s)	Analítica (Pa)	Numérica (Pa)	Erro (%)	t (s)	Analítica (Pa)	Numérica (Pa)	Erro (%)
0,00	20110,50	24346,61359	-21,06	14,56	21116,03	23318,10558	-10,43
1,12	21116,03	23876,76672	-13,07	15,68	22121,55	23434,38255	-5,93
2,24	22121,55	23773,2695	-7,47	16,80	23127,08	23452,98901	-1,41
3,36	23127,08	23602,07775	-2,05	17,92	24132,60	23363,81483	3,19
4,48	22121,55	23551,05792	-6,46	19,04	23127,08	23417,96917	-1,26
5,60	21116,03	23572,77864	-11,63	20,16	24132,60	23379,52293	3,12
6,72	20110,50	23678,23489	-17,74	21,28	25138,13	23147,78391	7,92
7,84	21116,03	23798,70696	-12,70	22,40	26143,65	23072,34023	11,75
8,96	22121,55	23782,56677	-7,51	23,52	27149,18	23275,41452	14,27
10,08	23127,08	23641,42652	-2,22	24,64	26143,65	23453,06107	10,29
11,20	22121,55	23558,48197	-6,50	25,76	25138,13	23611,68522	6,07
12,32	21116,03	23439,85544	-11,01	26,88	24132,60	23835,11113	1,23
13,44	20110,50	23306,88675	-15,89	28,00	25138,13	24069,28813	4,25

Tabela 14. Erro relativo (%) entre as soluções estática numérica e a analítica de p .

(continua)

t (s)	Analítica (Pa)	Numérica (Pa)	Erro (%)	t (s)	Analítica (Pa)	Numérica (Pa)	Erro (%)
29,12	26143,65	24190,25611	7,47	75,04	33182,33	29114,9676	12,26
30,24	25138,13	24347,19159	3,15	76,16	34187,85	29332,88006	14,20
31,36	26143,65	24694,35236	5,54	77,28	35193,38	29508,44163	16,15
32,48	27149,18	25137,28078	7,41	78,40	34187,85	29810,99478	12,80
33,60	26143,65	25278,95225	3,31	79,52	33182,33	30207,91773	8,96
34,72	27149,18	25290,89658	6,84	80,64	34187,85	30637,04987	10,39
35,84	28154,70	25314,10238	10,09	81,76	35193,38	31068,31855	11,72
36,96	29160,23	25314,10238	13,19	82,88	36198,90	31411,41444	13,23
38,08	30165,75	24882,65087	17,51	84,00	35193,38	31752,3317	9,78
39,20	29160,23	24853,45492	14,77	85,12	34187,85	32109,4657	6,08
40,32	28154,70	25034,70435	11,08	86,24	35193,38	32520,25109	7,60
41,44	27149,18	25284,19231	6,87	87,36	36198,90	32986,16039	8,88
42,56	26143,65	25544,63691	2,29	88,48	37204,43	33429,28306	10,15
43,68	27149,18	25832,00352	4,85	89,60	38209,95	33727,35475	11,73
44,80	28154,70	26078,1146	7,38	90,72	39215,48	34091,87897	13,07
45,92	29160,23	26359,94454	9,60	91,84	38209,95	34570,96454	9,52
47,04	30165,75	26655,94267	11,64	92,96	37204,43	35087,82496	5,69
48,16	31171,28	26885,12871	13,75	94,08	38209,95	35615,57658	6,79
49,28	30165,75	27088,70416	10,20	95,20	39215,48	36096,06462	7,95
50,40	29160,23	27262,94927	6,51	96,32	40221,00	36486,19599	9,29
51,52	28154,70	27498,87234	2,33	97,44	41226,53	36929,92535	10,42
52,64	27149,18	27800,52147	-2,40	98,56	40221,00	37475,2661	6,83
53,76	28154,70	28044,85349	0,39	99,68	39215,48	38011,34944	3,07
54,88	29160,23	28190,23879	3,33	100,80	40221,00	38625,86664	3,97
56,00	30165,75	28079,93717	6,91	101,92	41226,53	39068,02564	5,24
57,12	31171,28	27928,86599	10,40	103,04	42232,05	39544,41546	6,36
58,24	32176,80	27911,18182	13,26	104,16	43237,58	40052,03948	7,37
59,36	31171,28	27968,30914	10,28	105,28	42232,05	40601,98995	3,86
60,48	30165,75	28105,35078	6,83	106,40	41226,53	41135,03782	0,22
61,60	31171,28	28170,83809	9,63	107,52	40221,00	41667,60803	-3,60
62,72	32176,80	28011,25972	12,95	108,64	41226,53	42130,87118	-2,19
63,84	33182,33	27789,34869	16,25	109,76	42232,05	42574,09945	-0,81
64,96	34187,85	27666,46524	19,08	110,88	43237,58	43015,48196	0,51
66,08	33182,33	27637,44511	16,71	112,00	44243,10	43415,03146	1,87
67,20	32176,80	27656,37072	14,05	113,12	45248,63	43728,66844	3,36
68,32	31171,28	27691,65623	11,16	114,24	44243,10	44016,91484	0,51
69,44	30165,75	27711,88323	8,13	115,36	43237,58	44217,60908	-2,27
70,56	29160,23	27803,67354	4,65	116,48	44243,10	44348,00295	-0,24
71,68	30165,75	28071,66025	6,94	117,60	45248,63	44553,48363	1,54
72,80	31171,28	28399,94732	8,89	118,72	46254,15	44768,07225	3,21
73,92	32176,80	28753,99107	10,64	119,84	47259,68	44914,88958	4,96

Tabela 14. Erro relativo (%) entre as soluções estática numérica e a analítica de p .

(conclusão)

t (s)	Analítica (Pa)	Numérica (Pa)	Erro (%)	t (s)	Analítica (Pa)	Numérica (Pa)	Erro (%)
120,96	46254,15	45019,39096	2,67	135,52	43237,58	43886,51638	-1,50
122,08	45248,63	45032,42879	0,48	136,64	44243,10	43692,71642	1,24
123,20	46254,15	45046,55791	2,61	137,76	45248,63	43554,85111	3,74
124,32	47259,68	45095,66888	4,58	138,88	44243,10	43365,08756	1,98
125,44	46254,15	45113,07244	2,47	140,00	43237,58	43157,64594	0,18
126,56	45248,63	45068,73595	0,40	141,12	42232,05	42976,01332	-1,76
127,68	44243,10	45006,30722	-1,73	142,24	41226,53	42736,86474	-3,66
128,80	45248,63	44854,27246	0,87	143,36	42232,05	42537,19224	-0,72
129,92	46254,15	44709,80007	3,34	144,48	43237,58	42363,4381	2,02
131,04	47259,68	44613,45701	5,60	145,60	42232,05	42155,51013	0,18
132,16	46254,15	44463,43599	3,87	146,72	41226,53	41978,83248	-1,82
133,28	45248,63	44275,25077	2,15	147,84	40221,00	41790,56378	-3,90
134,40	44243,10	44092,00945	0,34	148,96	39215,48	41547,76068	-5,95

A análise dos resultados apresentados na Tabela 14 revela uma variação significativa de E na comparação entre os valores numéricos e analíticos de p ao longo do tempo. O percentual oscila entre valores positivos e negativos, indicando que o método numérico utilizado pode tanto subestimar como superestimar resultados de p em diferentes momentos.

Além disso, observa-se que E pode ser relativamente baixo, chegando a valores próximos de zero, mas também pode atingir magnitudes mais elevadas, chegando a cerca de 19,08 %. Para analisar esse comportamento, optou-se por calcular o MAE a partir da Eq. (49). Nesse cálculo, considera-se o $|E|$ obtido entre os resultados numéricos e analíticos de p e, em seguida, determina-se a média desses valores. Ressalta-se que esse procedimento expressa a variação média entre resultados numéricos e analíticos, independentemente de se tratar de superestimação ou subestimação.

O MAE calculado, descontando os 20 s iniciais de formação e estabilização da onda, foi de aproximadamente 6,63%, indicando que os valores numéricos de p , em média, desviam em torno desse percentual dos valores teóricos ou analíticos. Por último foram plotadas as curvas de p numérica e analítica, Figura 4.17, por meio das quais percebe-se que as pressões tendem a obedecer a uma mesma curva de tendência, verificando desta forma o modelo proposto.

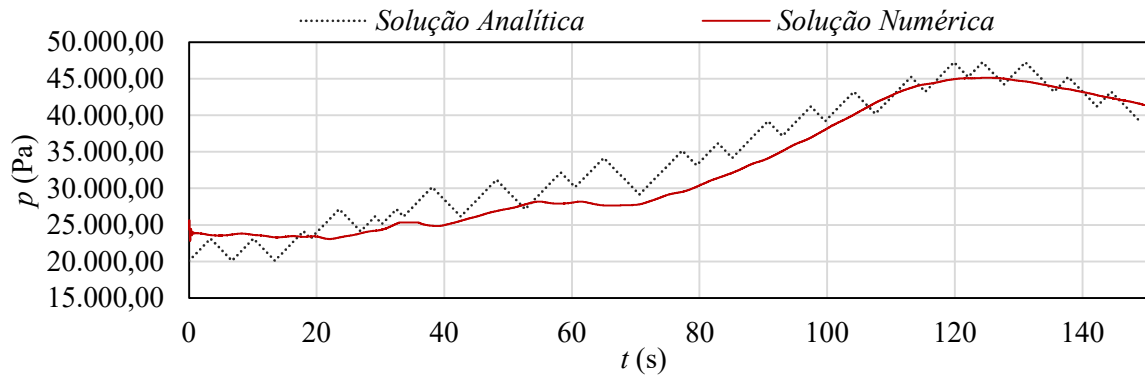


Figura 4.17: Soluções numéricas e analíticas de p (Pa) obtidas para 20 ondas geradas no domínio.

Concluída a verificação do modelo 3D PHS-O com 20 ondas de $H = 1,0$ m geradas, o mesmo procedimento foi aplicado para geração de 40 ondas de $H = 1,5$ m, mantendo-se o comprimento de onda $\lambda = 65,4$ m. A análise dos resultados, apresentados na Figura 4.18 mostra que a curva de tendência de p , obtida a partir da solução analítica, apresenta o mesmo padrão observado na curva numérica, evidenciando a consistência entre ambos os resultados.

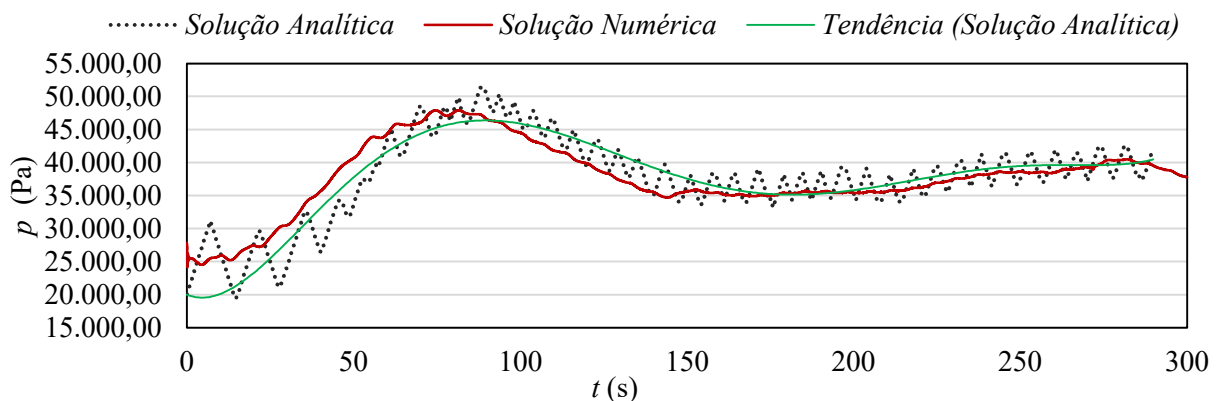


Figura 4.18: Soluções numéricas e analíticas de p (Pa) obtidas para 40 ondas geradas no domínio.

Por fim, como complemento à análise de verificação do movimento da 3D PHS-O, utilizou-se a visualização dos vetores de velocidade para examinar qualitativamente o comportamento do escoamento no entorno da estrutura. A Figura 4.19 evidencia regiões de aceleração, desaceleração, formação de vórtices e recirculações. Observa-se ainda que, para a configuração PHS-O, os vetores destacam o movimento induzido pelas ondas, evidenciando a interação entre a estrutura e o escoamento ao seu redor.

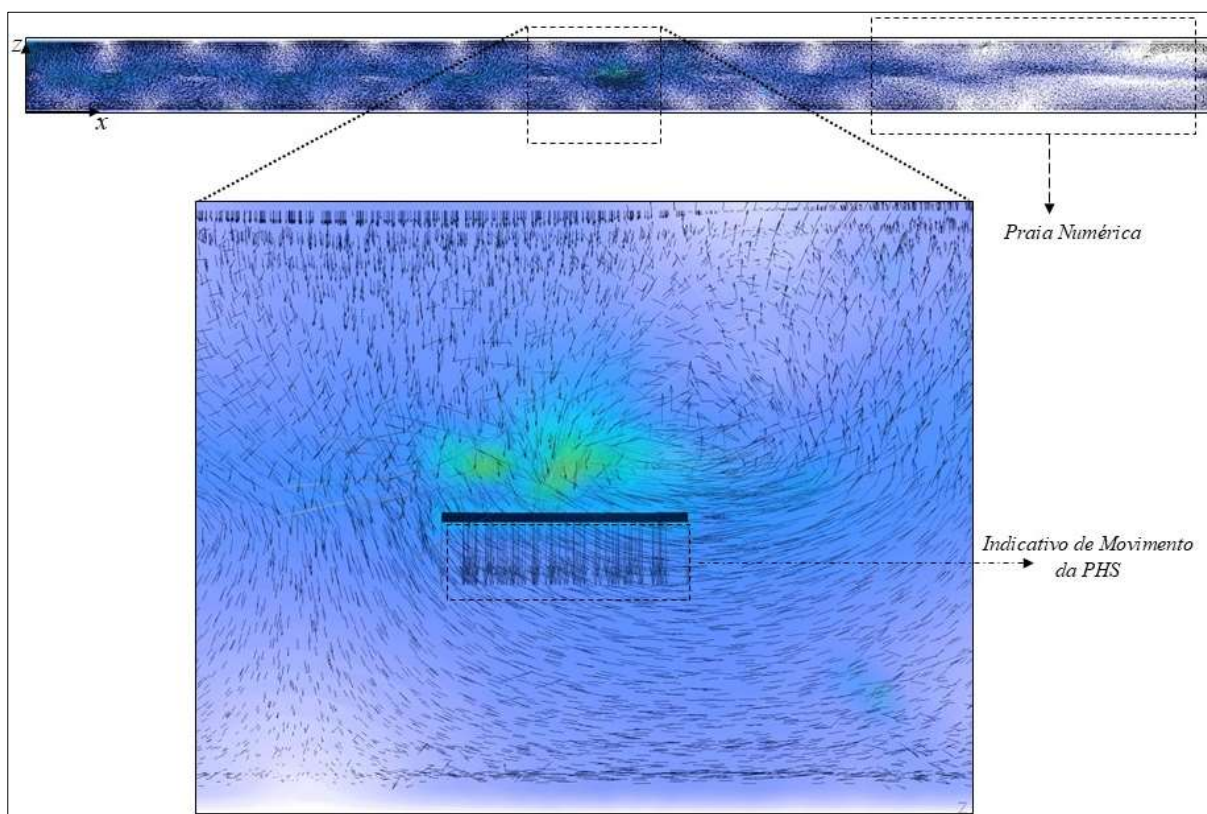


Figura 4.19: Visualização dos vetores velocidade no modelo 3D PHS-O simulado em $t = 70$ s.

Dessa forma, confirma-se a verificação do movimento da 3D PHS-O, demonstrando que o modelo é capaz de representar de forma consistente e realista a resposta da estrutura à ação das ondas incidentes.

4.2 Calibração do Modelo Numérico

4.2.1 Análise Paramétrica: Desempenho do PHS-O sob variações geométricas, de submersão e de onda incidente

Nesta etapa, desenvolve-se a calibração do modelo 3D PHS-O, considerada uma fase intermediária necessária para compreender sua resposta às ondas incidentes. Para isso, realizou-se uma análise paramétrica composta por 54 simulações numéricas (Tabela 15), voltadas à avaliação do desempenho hidrodinâmico do conversor em diferentes configurações. Os casos avaliados foram organizados a partir da variação de três parâmetros principais: geometria do dispositivo (L , b_p , e), H e a profundidade de submersão. Além disso, foram considerados dois

valores de λ (60,4 m e 70,4 m). Assim, considerando $h = 10$ m, cada configuração geométrica foi testada sob três valores de H e três diferentes submersões, combinados aos dois λ .

Tabela 15. Configurações dos casos analisados.

Casos	Geometria PHS - O			Característica da onda		Profundidade de submersão (m)		
	L (m)	b_p (m)	e (m)	H (m)	λ (m)			
1 - 9	10,0	8,0	0,32	0,5	60,4	1,0	1,5	2,0
				1,0				
				1,5				
10 - 18	10,0	8,0	0,16	0,5	60,4	1,0	1,5	2,0
				1,0				
				1,5				
19 - 27	8,0	8,0	0,32	0,5	60,4	1,0	1,5	2,0
				1,0				
				1,5				
28 - 36	8,0	8,0	0,16	0,5	60,4	1,0	1,5	2,0
				1,0				
				1,5				
37 - 45	12,0	8,0	0,32	0,5	70,4	1,0	1,5	2,0
				1,0				
				1,5				
46 - 54	8,0	12,0	0,32	0,5	70,4	1,0	1,5	2,0
				1,0				
				1,5				

Com o objetivo de sistematizar a investigação dos efeitos hidrodinâmicos sobre o dispositivo PHS-O, as geometrias analisadas foram agrupadas em três categorias, com base na razão entre L e b_p : alongadas na direção de propagação das ondas, com $L/b_p > 1,00$ (direção x), quadradas, com $L/b_p = 1,00$ e alongadas na direção perpendicular à propagação, com $L/b_p < 1,00$ (direção y).

As configurações alongadas na direção x possuem comprimento superior à largura, assumindo uma forma mais estreita, enquanto as quadradas apresentam dimensões proporcionais. Já as alongadas na direção y se caracterizam por uma largura predominante. Essa classificação geométrica facilita a comparação dos resultados obtidos, permitindo analisar de forma sistemática como diferentes proporções entre L , b_p associados à e influenciam o comportamento hidrodinâmico do dispositivo.

Com isso, foi possível avaliar o impacto da geometria da PHS-O em parâmetros como cz , p e velocidade (u) do escoamento sob o dispositivo, contribuindo para a compreensão da

eficiência do sistema em diferentes condições. A classificação para cada configuração de PHS-O em função da razão L/b_p estão organizados na Tabela 16.

Tabela 16. Classificação das PHS-O conforme a razão L/b_p .

Dimensões			L/b_p
L (m)	b_p (m)	e (m)	
10,0	8,0	0,32	1,25
10,0	8,0	0,16	1,25
8,0	8,0	0,32	1,00
8,0	8,0	0,16	1,00
12,0	8,0	0,32	1,50
8,0	12,0	0,32	0,67

A partir dessa organização geométrica, foi possível avaliar como cada configuração influencia o desempenho do dispositivo em termos de conversão de energia. A Figura 4.20 apresenta os valores da eficiência teórica média ($\bar{\varphi}$) para os 54 casos, calculada como a razão entre a potência média disponível no escoamento sob a estrutura (P_p) e a potência média da onda incidente (P_w).

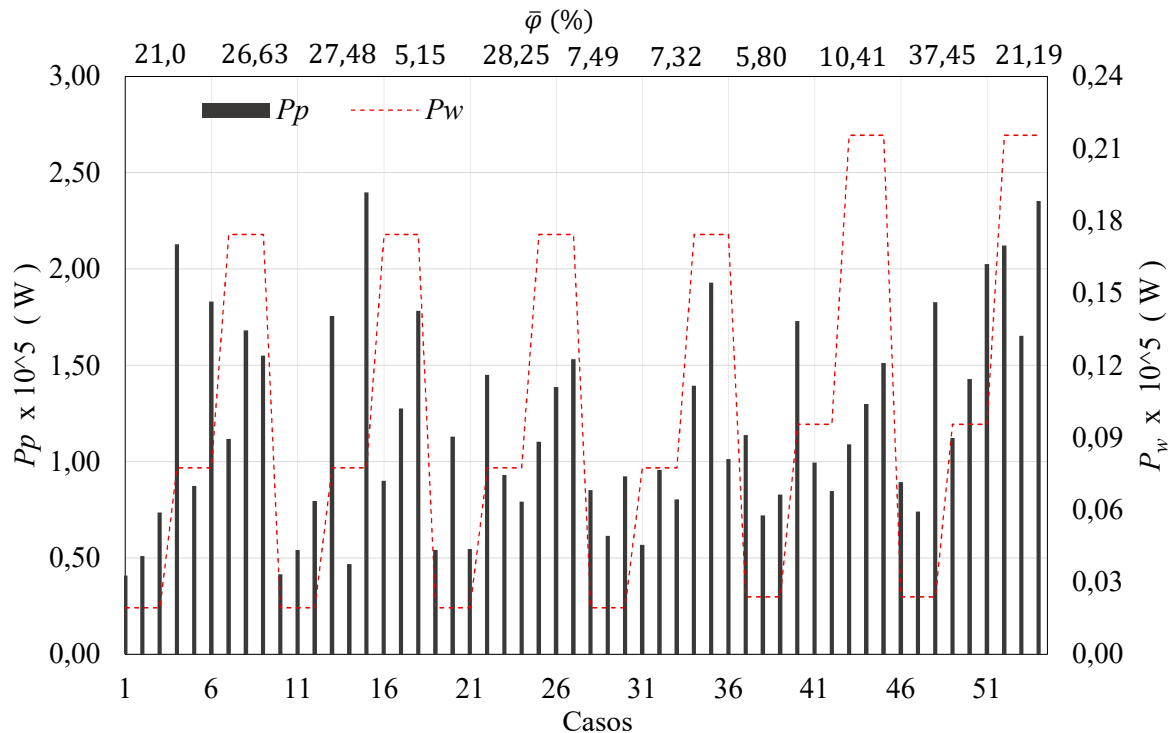


Figura 4.20: Valores de $\bar{\varphi}$ (%) obtidos a partir dos parâmetros P_p (W) e P_w (W).

Neste estudo, P_w foi obtida analiticamente por unidade de largura de crista ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$) e convertida para Watts por meio da multiplicação pela largura do dispositivo b_p (m), a qual

corresponde à largura efetiva da crista de onda que interage diretamente com o dispositivo. Por ser tratar de um cálculo analítico, P_w não apresenta erro numérico. Dessa forma, a incerteza em φ está diretamente associada apenas às variáveis utilizadas no cálculo de P_p , derivadas das pressões no escoamento. Considerando que o MAE associado a essas variáveis foi de 6,63%, esse mesmo nível de incerteza se propaga para φ , permanecendo dentro de um intervalo aceitável e sem comprometer as tendências observadas ou as conclusões do estudo.

A Figura 4.20 apresenta os valores de $\bar{\varphi}$ para os 54 casos analisados (ver Tabela 15). Observa-se uma variação acentuada de $\bar{\varphi}$, que vai de valores inferiores a 5% (Caso 43), em determinadas condições de elevada energia das ondas, até picos superiores a 70% (Caso 48), em configurações mais favoráveis. A ampla diferença de desempenho entre as configurações testadas evidencia que a geometria do PHS-O, associada às características das ondas e à profundidade de submersão, exerce influência direta sobre a eficiência de aproveitamento energético.

Observa-se na Figura 4.20 que em determinadas situações, mesmo com altos valores de P_w , P_p não aumenta na mesma proporção (Caso 45), possivelmente devido à profundidade de submersão, à interação entre o dispositivo e o campo de velocidades, ou a efeitos não lineares do escoamento. Por outro lado, há cenários em que geometrias específicas resultam em maior captação de energia, mesmo sob ondas com menor energia incidente, indicando que certos arranjos (Casos 28 e 48) favorecem a transferência de energia para a estrutura, com $\bar{\varphi}$ igual a 44% e 76%, respectivamente. Esses resultados reforçam a importância da análise paramétrica para a identificação de configurações mais eficientes e, conseqüentemente, para a otimização do desempenho do conversor.

A fim de ilustrar o comportamento característico observado nas 54 simulações, elaborou-se a Figura 4.21, que apresenta três exemplos representativos das diferentes condições de submersão inicial testadas (1,0; 1,5; 2,0) m, indicando a posição esquemática da PHS-O em relação à superfície livre. O deslocamento vertical cz foi determinado como a amplitude total de oscilação da PHS-O, medida entre os pontos mínimos e máximos (E-A; F-B, D-C) observados durante os 90 s de simulação, conforme Figura 4.21. Embora, em determinados casos, o valor de deslocamento cz seja superior à profundidade de submersão, isso não significa que a placa ultrapasse a cota zero (superfície da água). Tal resultado apenas indica que a amplitude total do movimento vertical, resultante da oscilação da PHS-O em resposta à onda incidente, é maior que a profundidade inicial de submersão. Em todas as simulações, a placa permaneceu completamente submersa, alternando movimentos descendentes e ascendentes.

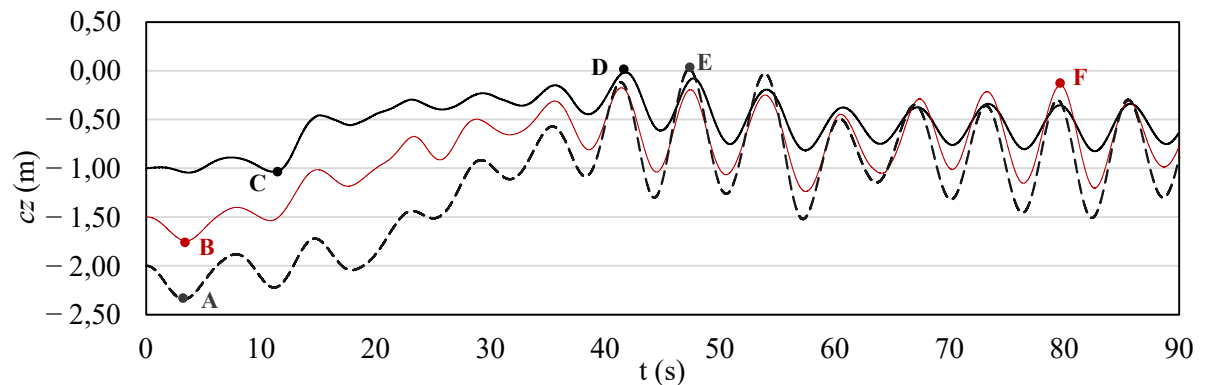


Figura 4.21: Ilustração dos pontos de deslocamentos mínimos (A, B, C) e máximos (D, E, F) usados na determinação da amplitude vertical de cz para cada condição inicial de submersão.

Iniciando a análise paramétrica pelas PHS-O alongadas na direção x , Casos 1 a 18, (ver Tabela 15), a Figura 4.22 apresenta a comparação entre cz e a profundidade inicial de submersão do dispositivo. Nos casos 1 a 9, a PHS-O possui $e = 0,32$ m, enquanto nos Casos 10 a 18 é reduzida para $e = 0,16$ m, mantendo-se constantes as demais dimensões (10×8 m). De modo geral, observa-se que cz assume valores superiores à profundidade de submersão na maioria dos casos, indicando que a PHS-O apresenta valores de cz significativos em resposta à ação das ondas incidentes. Constata-se também a tendência de aumento de cz com a elevação de H , sendo os maiores valores registrados nos casos com $H = 1,5$ ($cz = 2,4$ m). A redução de e implica em uma leve diminuição em cz ($\approx 12\%$), embora o comportamento global se mantenha semelhante entre as duas configurações geométricas.

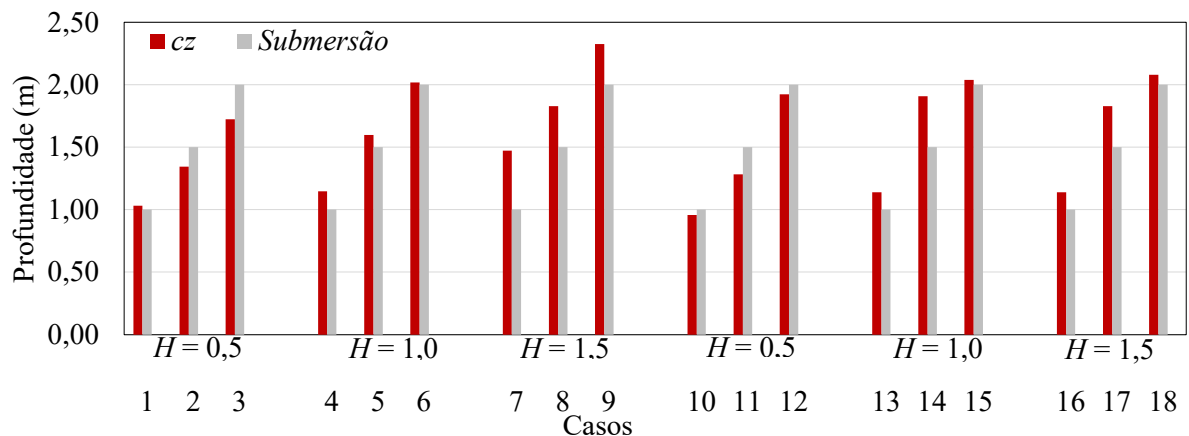


Figura 4.22: PHS-O alongadas na direção x : valores de cz (m), variando conforme e , profundidade de submersão (m) e H (m).

No que diz respeito à $\bar{\varphi}$, os maiores valores foram observados tanto nas configurações com a PHS-O de maior e quanto naquelas com e reduzida, quando submetidas à ação de ondas com $H = 0,5$ m. Destacando-se os Casos 3 e 12, que atingiram $\bar{\varphi}$ aproximadamente de 38% e 41%, respectivamente, como ilustra a Figura 4.23.

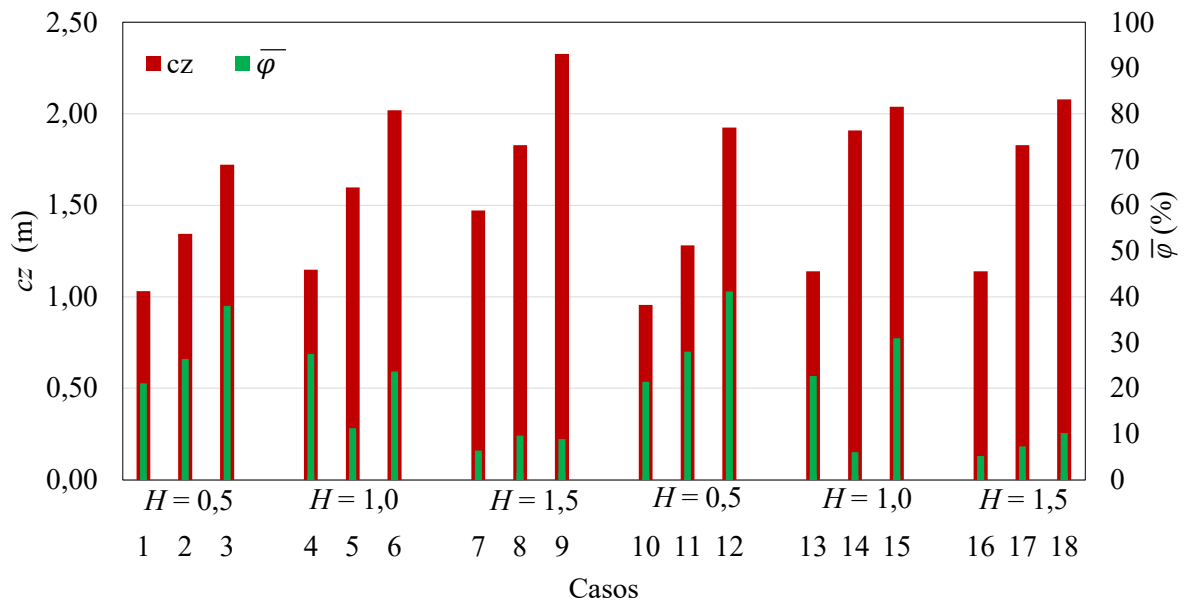


Figura 4.23: PHS-O alongadas na direção x : resultados de $\bar{\varphi}$ (%) em função de cz (m) e H (m).

Na Figura 4.23, constatou-se ainda que em PHS-O alongadas na direção x , à medida que H aumenta, cz tende a crescer, entretanto, $\bar{\varphi}$ tende a diminuir, como no Caso 7, em que $\bar{\varphi}$ foi de 6,4%. Esse comportamento está associado ao aumento das variações de p no dispositivo, que influenciam diretamente a mudança nos valores de P_p , ao mesmo tempo que, ocorre aumento de P_w . Nos casos com $H = 1,5$ m, por exemplo, $\bar{\varphi}$ não ultrapassa 10%, mesmo apresentando os maiores valores de cz ($\approx 2,3$ m).

Em seguida, ao considerar PHS-O quadradas, observa-se que cz está relacionado tanto com a profundidade de submersão inicial quanto à H nos Casos 19 a 36 (ver Tabela 15). De maneira geral, quanto maior H , maior o cz observado, especialmente nos casos com maior submersão (Figura 4.24). Por exemplo, o Caso 27 ($H = 1,5$ m) atingiu $cz = 2,2$ m. Além disso, os Casos de 19 a 27, com $e = 0,32$ m, tenderam a apresentar cz ligeiramente superiores ($\approx 15\%$) aos Casos 28 a 36, com $e = 0,16$ m. Esse comportamento também foi constatado em PHS-O alongadas na direção x , reforçando a influência de e na dinâmica do sistema. Esse comportamento indica que estruturas quadradas mais espessas, quando submetidas a ondas de

maiores H em maiores profundidades de submersão, são suscetíveis a cz significativos, possivelmente devido à maior área de interação com o campo de pressão gerado pelas ondas.

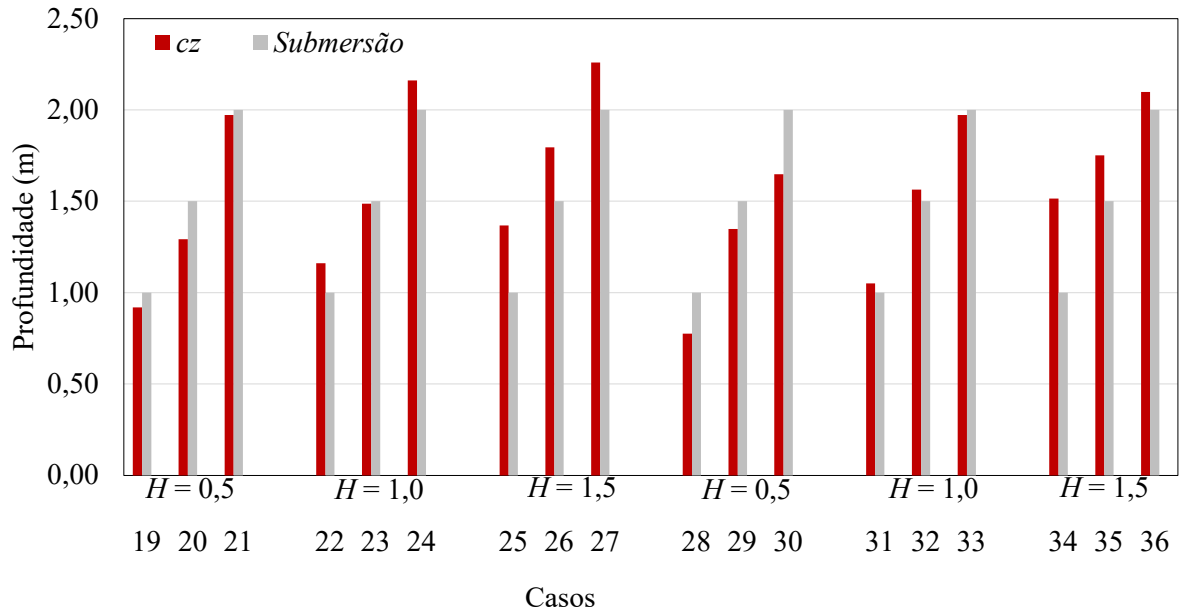


Figura 4.24: PHS-O quadradas: valores de cz (m), variando conforme e (m), profundidade de submersão e (m) H (m).

Embora os casos com maior cz estejam, em geral, associados a maiores H e profundidades de submersão, $\bar{\varphi}$ tende a ser mais elevado quando cz é relativamente menor, sob ondas com $H = 0,5$ m. Por exemplo, o Caso 28 atingiu $\bar{\varphi} = 44,01\%$ enquanto o Caso 27, apesar do elevado cz , apresentou queda para $\bar{\varphi} = 8,77\%$, sugerindo que oscilações excessivas podem comprometer o desempenho do dispositivo (Figura 4.25).

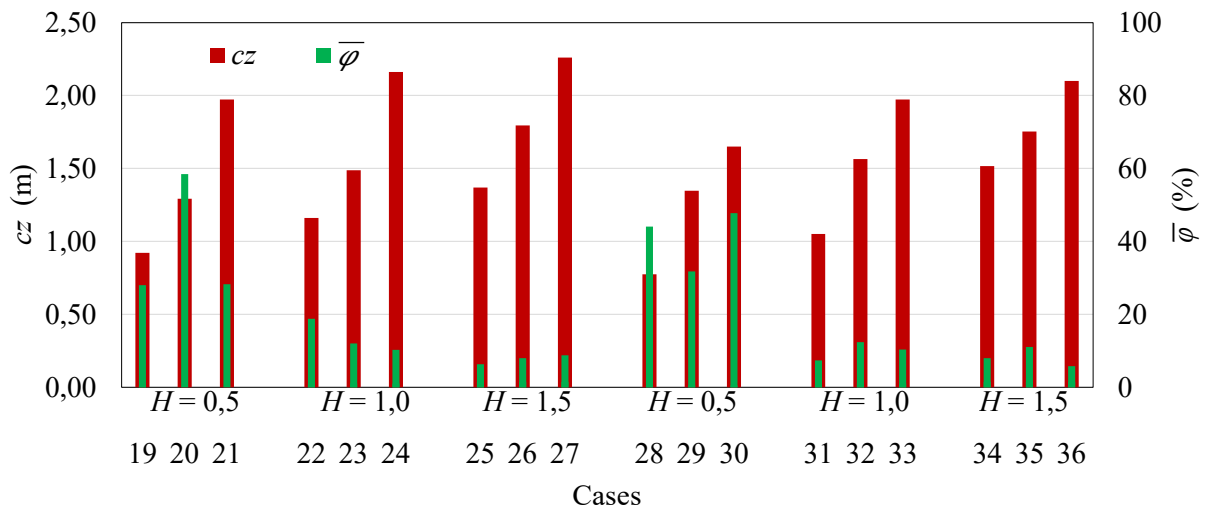


Figura 4.25: PHS-O quadradas: resultados de $\bar{\varphi}$ (%) em função de cz (m) e H (m).

Com base na Figura 4.25, nos Casos de 19 a 27 ($e = 0,32$ m) a $\bar{\varphi}$ mostrou-se, na maioria dos casos, inferior à dos casos 28 a 36 ($e = 0,16$ m), indicando que placas mais espessas, apesar de apresentarem maior cz , não necessariamente resultam em maior $\bar{\varphi}$. Os casos onde $H = 1,5$ m, $\bar{\varphi}$ cai acentuadamente, chegando a valores inferiores a 10% para as duas condições de e . Esse comportamento reforça a importância do equilíbrio entre massa e sua resposta às forças induzidas pelas ondas, a fim de maximizar o desempenho da PHS-O.

Por último, a Figura 4.26 apresenta a análise do comportamento de cz considerando diferentes orientações da PHS-O, obtidas por meio da estrutura alongada na direção y . Nos Casos 37 a 45 (ver Tabela 15), a estrutura está orientada com o comprimento de 12 m na direção da propagação das ondas, enquanto nos Casos 46 a 54 (ver Tabela 15) essa dimensão é reduzida para 8 m. A espessura é constante em $e = 0,32$ m em todas as simulações.

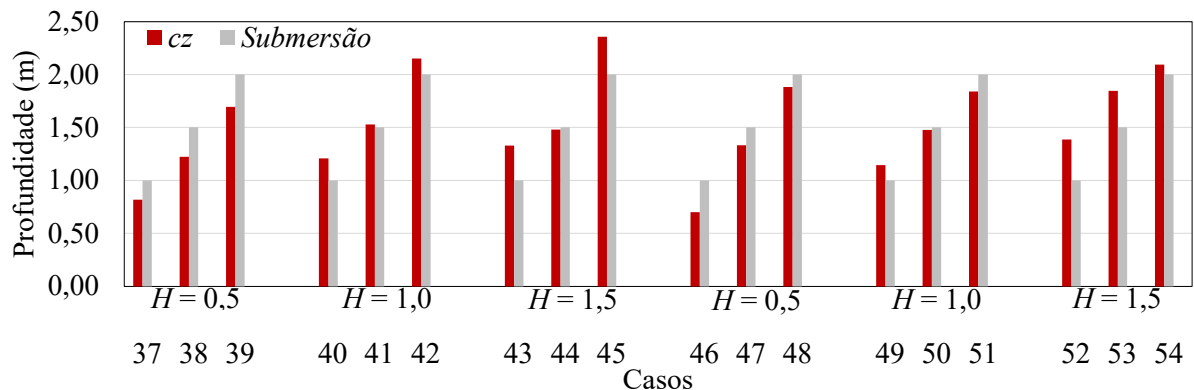


Figura 4.26: PHS-O alongadas na direção y : valores de cz (m), variando conforme e (m), profundidade de submersão (m) e H (m).

Comparando os dois grupos na Figura 4.26, observa-se que os valores de cz tendem a ser maiores quando a dimensão de 12 m está orientada no sentido da onda (Casos 37 a 45). Isso ocorre porque a área exposta à ação da onda é maior, o que amplia a interação com o campo de pressão e, consequentemente, os valores de cz . Por exemplo, para $H = 1,5$ m e submersão de 2 m, o valor de cz no Caso 45 (12 m expostos) é de 2,35 m, enquanto no Caso 54 (8 m expostos) é de 2,09 m. Esse padrão se repete para outras alturas de onda, embora com diferenças menos acentuadas. De maneira geral, um maior o comprimento da PHS-O na direção da propagação das ondas resultou, na maioria dos casos, em um aumento em cz , devido à maior superfície em contato com as variações de pressão impostas pela onda incidente.

A orientação da PHS-O teve impacto direto no aproveitamento da energia das ondas (Figura 4.27). De modo geral, os Casos 37 a 45, com a maior dimensão orientada no sentido da

propagação das ondas, apresentaram valores de $\bar{\varphi}$ mais baixos, variando entre 5% e 34%, com exceção do Caso 37 com 48%.

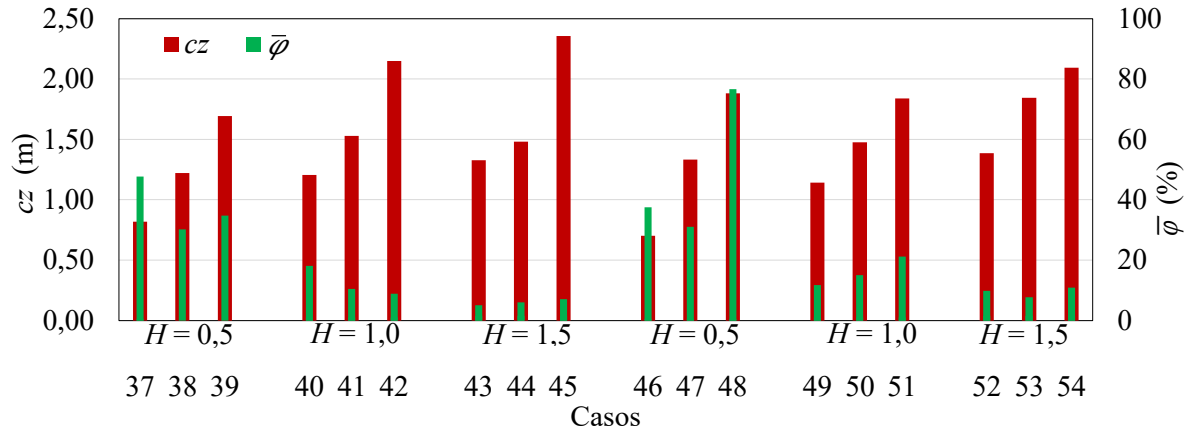


Figura 4.27: PHS-O alongadas na direção y : resultados de $\bar{\varphi}$ (%) em função de cz (m) e H (m).

Por outro lado, os Casos 46 a 54 da Figura 4.27, com menor comprimento exposto ao campo de pressão, apresentaram melhor desempenho em alguns cenários, destacando-se o Caso 48 ($H = 0,5$ m), que apresenta o maior $\bar{\varphi}$ entre todos, atingindo 76,6%, evidenciando que essa orientação é mais favorável sob ondas menores. Isso sugere que a redução da área frontal da estrutura pode favorecer a conversão de energia em determinadas condições de submersão e altura de onda, tornando o sistema mais eficiente.

Esses resultados reforçam a relevância de estudos paramétricos como uma ferramenta importante para compreender de forma mais detalhada as variáveis que afetam a eficiência do dispositivo. A avaliação de diferentes configurações geométricas, sob ação de diferentes ondas incidentes (H e λ), permitiu compreender os mecanismos de interação onda-estrutura, fornecendo subsídios técnicos relevantes para a otimização do projeto de conversores de energia das ondas tipo PHS-O. Entre os parâmetros estudados, valores de p , influenciada pelas variações em cz e a H , foram identificadas como fatores determinantes no desempenho observado.

4.2.2 Estudo de caso

Após a verificação do movimento do modelo PHS-O, bem como da avaliação da praia numérica, do teste de independência da malha e da calibração do modelo, procede-se à sua aplicação em um estudo de caso representativo. Essa etapa tem por finalidade examinar o

desempenho do modelo diante de condições reais, com característica específicas, avaliando sua capacidade de reproduzir o comportamento do sistema em uma situação prática. Ao final da análise, o modelo PHS-NO também é aplicado ao mesmo estudo de caso, permitindo a comparação direta com os resultados obtidos pelo PHS-O e avaliação das diferenças de desempenho entre as configurações.

Para isso, selecionou-se como região de aplicação uma área central da plataforma continental interna rasa do Estado do Paraná, representada pelo ponto P18, situado a 18 m de profundidade (ver Figura 2.4). A caracterização das condições de mar na região baseou-se nos dados coletados nos pontos P18 e P30 (ver Figura 2.4). Optou-se por concentrar a análise nas ondas do tipo vaga, predominantes ao longo do período observado e representativas das condições mais recorrentes na área de estudo. O ambiente oceânico apresentou T_p variando entre 4 s e 18 s, com maior concentração entre 7 s e 9 s. Os valores de H_s oscilaram, de modo geral, entre 0,75 m e 1,75 m, refletindo um regime de energia moderada dominado por ondas locais.

Com base nessas observações, adotou-se o valor intermediário de $T = 8,0$ s para as análises, com isso, por meio da Eq. (08) determinou-se $\lambda = 86,35$ m. As alturas das ondas consideradas para o estudo abrangeram valores dentro das faixas de H_s observadas, correspondendo a $H = 0,75$ m, $H = 1,0$ m, $H = 1,25$ m, $H = 1,50$ m e $H = 1,75$ m.

Considerando conjuntamente as condições do local de instalação e as características das ondas, a profundidade relativa ($h/\lambda \approx 0,21$) caracteriza um regime de águas intermediárias, enquanto os valores de os valores obtidos para U_r (entre 0,96 e 2,24) correspondem a um comportamento de onda que se enquadra nas condições em que a teoria de Stokes de 2ª ordem é considerada adequada para descrever os campos de velocidades, pressão e elevação da superfície livre.

O dispositivo PHS foi considerado na configuração geométrica correspondente ao Caso 48 (ver Tabela 15), identificada como a mais eficiente na etapa de calibração do modelo. Na sequência, foi posicionado a 0,5 m de profundidade, valor definido com base nos resultados da análise paramétrica. Observou-se que submersões maiores influenciam significativamente os parâmetros cz e p , resultando em uma redução na eficiência em grande parte dos cenários simulados. Dessa forma, a escolha por uma submersão mais rasa visa otimizar o desempenho do sistema, mantendo o dispositivo em uma posição mais favorável à conversão de energia.

Para a condição PHS-NO, cz manteve-se constante e igual à posição inicial de 0,5 m ao longo de toda a simulação, independentemente da altura das ondas. Esse comportamento

confirma a adequada imposição da restrição de movimento, assegurando a estabilidade da PHS quando mantida fixa, e evidencia que, nessa configuração, a interação onda-estrutura não induziu variações na posição do dispositivo.

Já na configuração PHS-O, o dispositivo apresentou cz periódicos em resposta direta à ação das ondas, conforme ilustrado na Figura 4.28. Inicialmente, observa-se uma fase transiente nos primeiros 15 a 25 s, caracterizada por oscilações irregulares decorrentes da adaptação do sistema às condições iniciais. Passado esse período, o movimento passa a apresentar um comportamento estável, compatível com a frequência de incidência das ondas

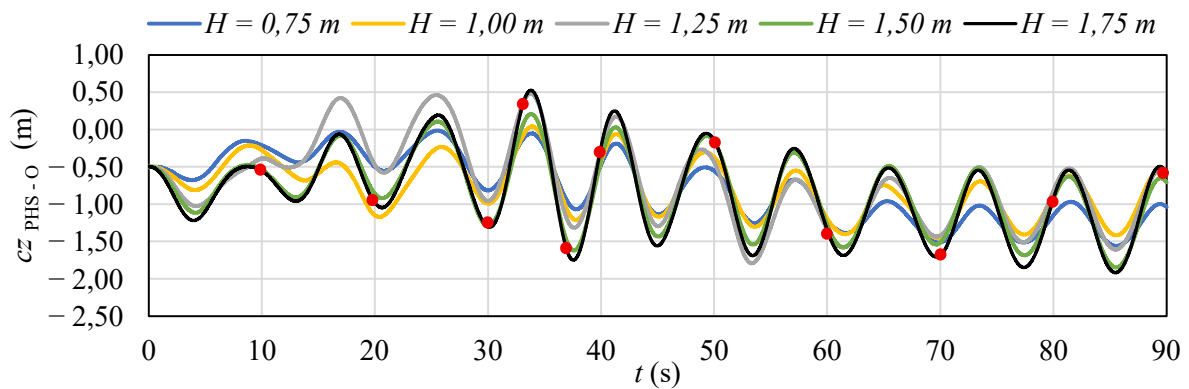


Figura 4.28: Variação de cz (m) em função de H (m) para configuração PHS-O, com destaque para pontos pertencentes à onda de $H = 1,75\text{ m}$.

A análise comparativa entre as diferentes alturas de onda incidindo no dispositivo evidencia uma relação proporcional entre a altura da onda e a amplitude de oscilação da PHS-O. Para ondas menores ($H = 0,75\text{ m}$ e $H = 1,00$), cz apresenta amplitudes mais reduzidas e variações menos acentuadas. À medida que a altura das ondas aumenta ($H = 1,25\text{ m}$, $H = 1,50\text{ m}$ e $H = 1,75\text{ m}$), a amplitude de oscilação torna-se progressivamente maior, refletindo o aumento da energia transferida pela onda ao dispositivo (Figura 4.28). Essa tendência evidencia a sensibilidade do sistema à energia incidente, alinhando-se ao comportamento esperado de corpos flutuantes submetidos a ondas de maior energia.

Como forma de complementar a análise, a Figura 4.29 ilustra o comportamento do dispositivo PHS-O sob a incidência da onda de maior H , detalhando os pontos em destaque na Figura 4.28. No instante inicial ($t = 0\text{ s}$), a estrutura encontra-se em sua posição de referência, com $cz = -0,50\text{ m}$. A partir desse ponto, o deslocamento evolui para $cz = -0,65\text{ m}$ em $t = 10\text{ s}$, reduzindo-se para $cz = -1,00\text{ m}$ em $t = 20\text{ s}$ e $cz = -1,25\text{ m}$ em $t = 30\text{ s}$. Em seguida, destacam-se o máximo positivo em $t = 33\text{ s}$, com $cz = 0,50\text{ m}$, e o mínimo em $t = 37\text{ s}$, com $cz = -1,75\text{ m}$.

Nos instantes posteriores, observam-se oscilações contínuas: $cz = -0,25$ m em $t = 40$ s, $cz = -0,20$ m em $t = 50$ s, $cz = -1,40$ m em $t = 60$ s, $cz = -1,72$ m em $t = 70$ s, $cz = -1,00$ m em $t = 80$ s e $cz = -0,60$ m em $t = 90$ s. O conjunto desses resultados evidencia a resposta oscilatória da PHS-O, caracterizada pela alternância entre máximos e mínimos sucessivos, com amplitudes elevadas condicionadas diretamente pela ação da onda incidente.

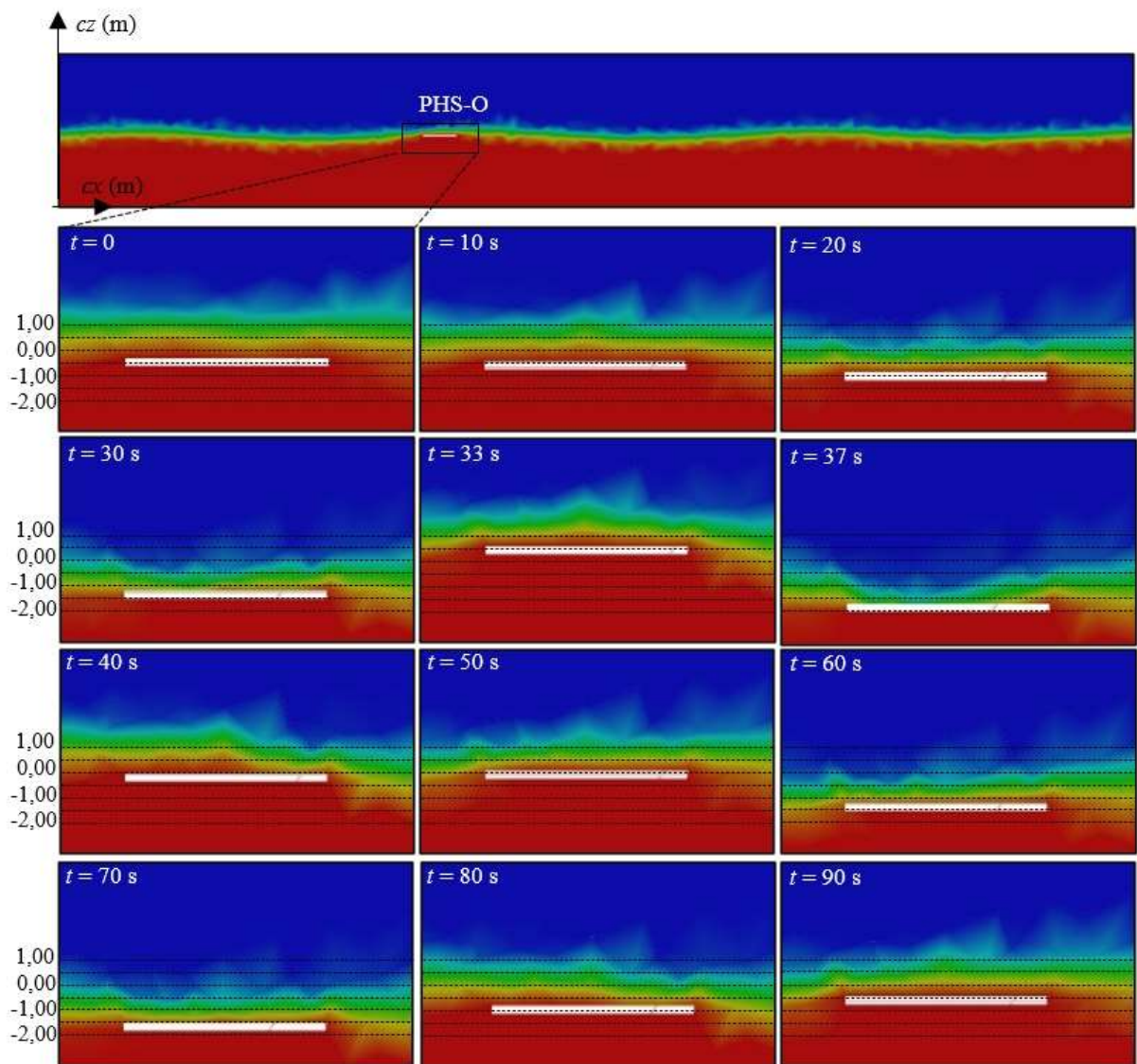


Figura 4.29: Variação de cz (m) da PHS-O sob a incidência de onda com $H = 1,75$ m em diferentes instantes ao longo de 90 s da simulação.

Na condição PHS-NO, as velocidades observadas resultam unicamente do escoamento provocado pela passagem das ondas (Figura 4.30). Durante os primeiros 20 s, observa-se uma fase transiente com pequenas flutuações, seguida pelo estabelecimento de um regime permanente de oscilação regular. Nota-se que, à medida que a altura da onda aumenta, também

crece a amplitude das velocidades: para $H = 0,75$ m, as velocidades máximas atingem cerca de $\approx 0,4$ m/s, enquanto para $H = 1,75$ m chegam a aproximadamente $\approx 0,9$ m/s. Esse comportamento está diretamente relacionado à maior energia associada às ondas mais altas, conforme também observado no comportamento dos deslocamentos da PHS-O, onde amplitudes maiores foram registradas para ondas mais energéticas (Figura 4.28).

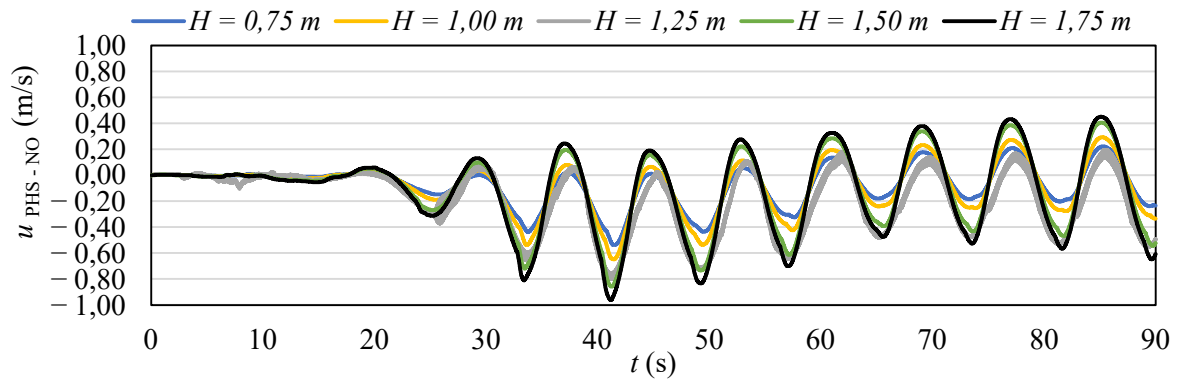


Figura 4.30: Variação de u (m/s) em função de H (m) na configuração PHS-NO.

Na condição PHS-O, o padrão inicial é mais instável devido à adaptação do sistema, mas, após aproximadamente 25 s, o comportamento passa a apresentar o mesmo padrão de oscilação, sem variações significativas (Figura 4.31). Comparando-se com a condição PHS-NO, nota-se que as velocidades sob o dispositivo são ligeiramente menores, sobretudo para ondas de maior altura. Para $H = 1,75$ m, por exemplo, enquanto a PHS-NO apresentou velocidades de $\approx 0,9$ m/s, a PHS-O registrou cerca de $\approx 0,8$ m/s. Essa redução ocorre porque o movimento vertical da PHS modifica a distribuição de pressão e interfere no escoamento horizontal induzido pelas ondas, gerando recirculações que redistribuem o fluxo e suavizam os gradientes de velocidade logo abaixo da estrutura.

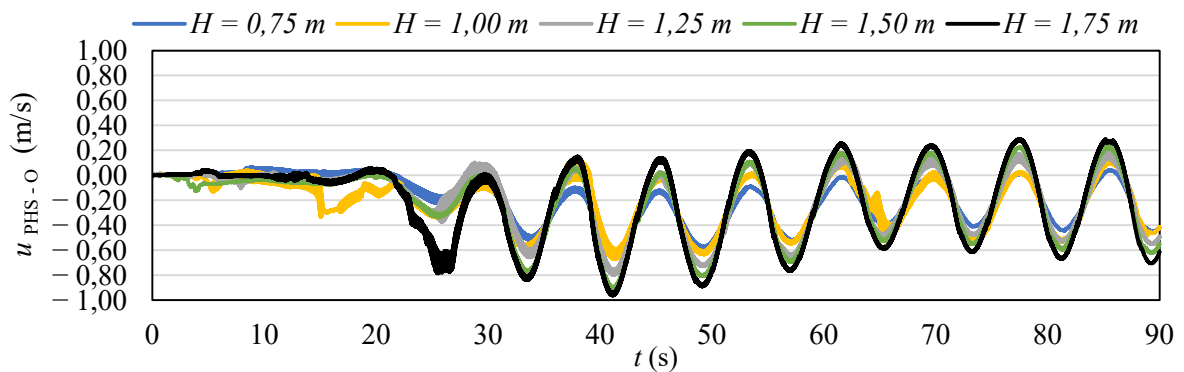


Figura 4.31: Variação de u (m/s) em função de H (m) na configuração PHS-O.

A correlação com os deslocamentos mostra que, em ondas de maior H , em que a PHS-O atinge valores mais elevados de cz , observa-se também um aumento das velocidades sob a estrutura. Já nas ondas menores ($H = 0,75$ m e $H = 1,00$ m), apesar do deslocamento reduzido da PHS-O, a diferença entre as velocidades medidas nas condições PHS-NO e PHS-O mostrou-se significativa. Como exemplo, em $t = 49$ s, a velocidade sob o dispositivo foi de $u_{PHS-NO} = -0,40$ m/s na condição PHS-NO (Figura 4.30), enquanto na condição PHS-O alcançou $u_{PHS-O} = -0,60$ m/s (Figura 4.31).

Com relação à variação de pressão, na configuração PHS-NO, observa-se na Figura 4.32 que os picos de pressão dinâmica (p_d) acompanham diretamente o ciclo das ondas, aumentando na passagem das cristas e diminuindo nas cavas, mantendo uma relação clara entre H e a magnitude de p_d . Ondas mais altas ($H = 1,50$ m e $H = 1,75$ m) geram os maiores valores de p_d , alcançando valores próximos a 450 Pa, enquanto ondas menores ($H = 0,75$ m e $H = 1,00$ m) apresentam picos menores, inferiores a 250 Pa.

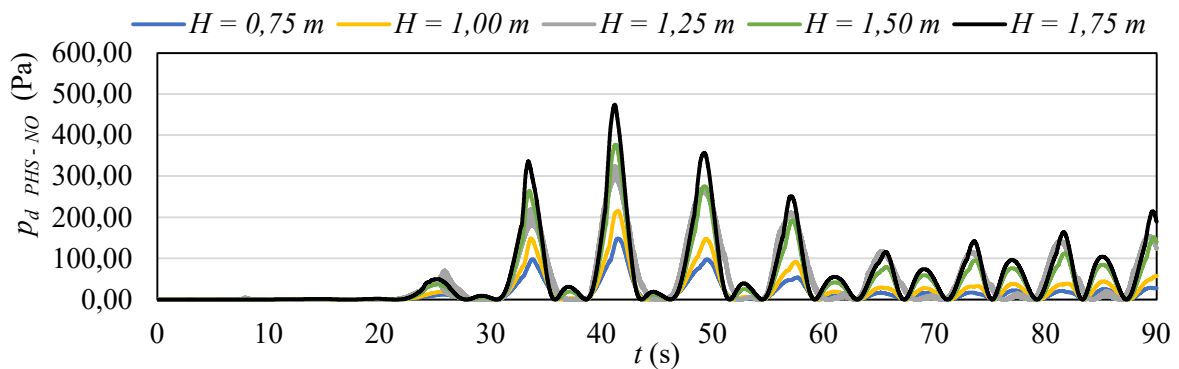


Figura 4.32: Variação de p_d (Pa) em função de H (m) na configuração PHS-NO.

Para a condição PHS-O, nota-se um comportamento de maior complexidade (Figura 4.33). Durante o intervalo inicial (~ 15 a 25 s), as pressões apresentam maior dispersão, especialmente para ondas altas ($H = 1,75$ m), em que se destacam picos elevados e mais irregulares. Após esse intervalo, p_d passa a oscilar de forma regular, com amplitudes ligeiramente superiores às da condição PHS-NO, conforme pode ser visto na Figura 4.33.

Esse aumento está relacionado ao movimento vertical da PHS-O, que altera o campo de pressões ao seu redor. Quando a PHS-O se desloca para cima ou para baixo durante sua oscilação, a PHS-O desloca a água próxima, aumentando a velocidade do escoamento local e, consequentemente, os valores de p_d . Esse efeito é mais evidente em ondas maiores ($H = 1,50$ m e $H = 1,75$ m), que provocam cz maiores da PHS-O, intensificando a interação entre a PHS-O e

o escoamento. Como resultado, os picos de p_d nessas condições atingem valores próximos de 450–480 Pa, ligeiramente superiores aos registrados na condição PHS-NO (375–478 Pa).

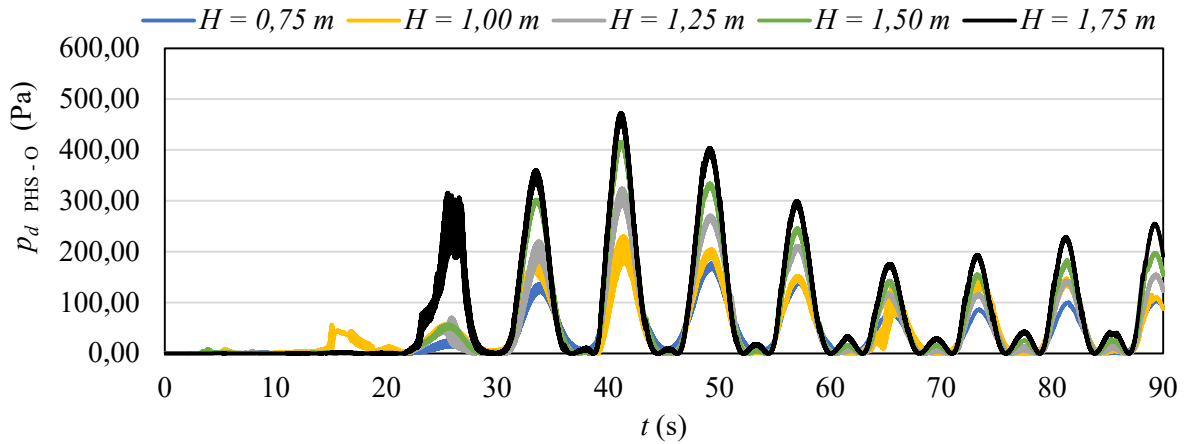


Figura 4.33: Variação de p_d (Pa) em função de H (m) na configuração PHS-O.

Considerando a configuração PHS-NO, p permanece constante durante toda a simulação, com valor de 5,0 kPa (Figura 4.34), correspondente à profundidade de submersão da PHS-NO de 0,5 m, em conformidade com a Eq. (46). Esse resultado confirma que, como a PHS-NO permanece fixa, não há variação na sua posição vertical e, portanto, os valores de p são determinados somente pela coluna de água sobre o dispositivo. Essa constância está de acordo com as análises anteriores de deslocamento e velocidade.

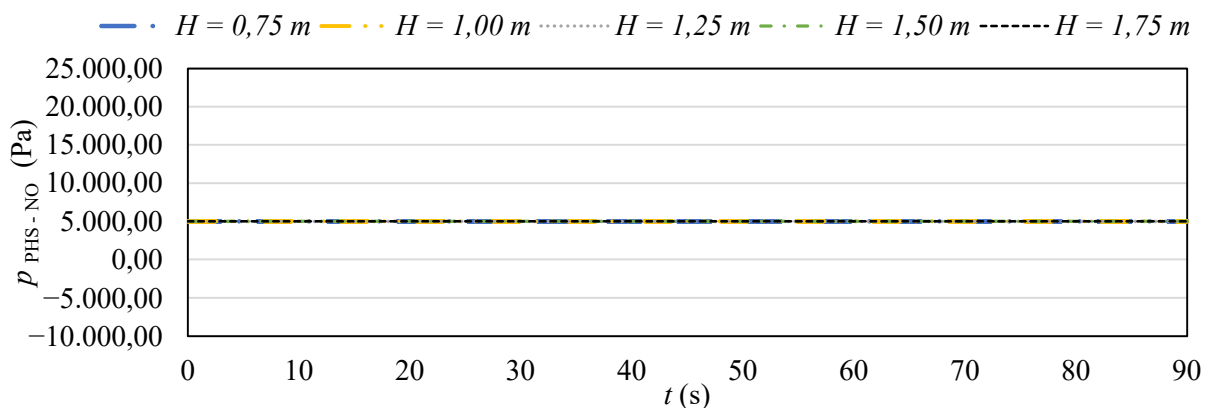


Figura 4.34: Variação de p (Pa) em função de H (m) na configuração PHS-NO.

Quanto à condição PHS-O, diferentemente da PHS-NO, observa-se uma variação de p ao longo do tempo, conforme visualizado na Figura 4.35. Essa variação está diretamente associada à cz , à medida que a PHS-O se desloca para cima ou para baixo, altera-se a profundidade local e, consequentemente, resultados de p exercida sobre sua superfície.

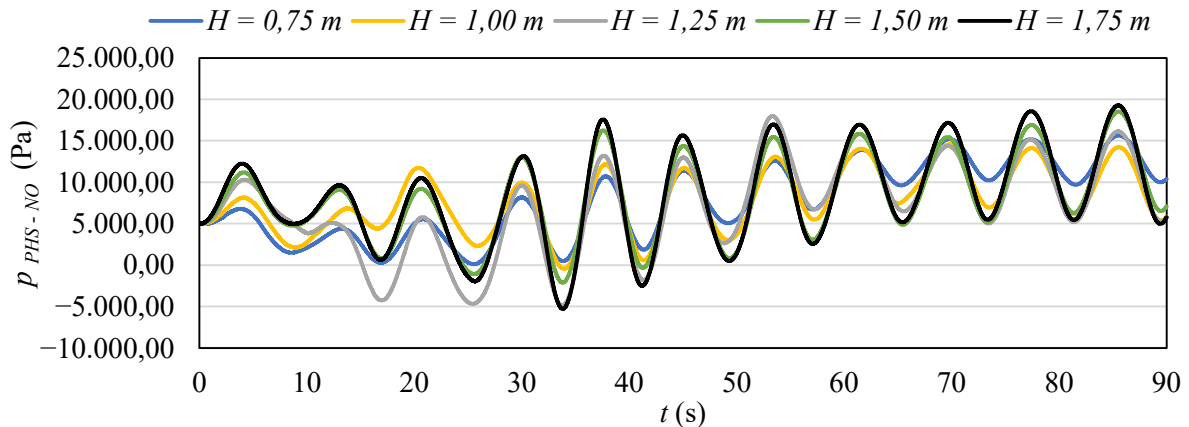


Figura 4.35: Variação de p (Pa) em função de H (m) na configuração PHS-O.

Os resultados mostram que, para ondas maiores ($H = 1,50\text{ m}$ e $H = 1,75\text{ m}$), onde a PHS-O apresenta maiores cz , a amplitude de p também é maior, atingindo picos de aproximadamente $\approx 18\text{ kPa}$. Já para ondas menores ($H = 0,75\text{ m}$ e $H = 1,00\text{ m}$), essas variações são menos expressivas, acompanhando a menor movimentação vertical da PHS-O.

Os padrões de deslocamento, velocidade e pressão identificados servem de base para avaliar a eficiência (φ) do dispositivo, permitindo compreender como esses fatores influenciam seu desempenho na conversão da energia das ondas. Na condição PHS-NO, observa-se na Figura 4.36 que φ mantém valores entre 40% e 100%, com maiores valores para ondas menores ($H = 0,75\text{ m}$) e redução progressiva para ondas maiores ($H = 1,50\text{ m}$ e $H = 1,75\text{ m}$).

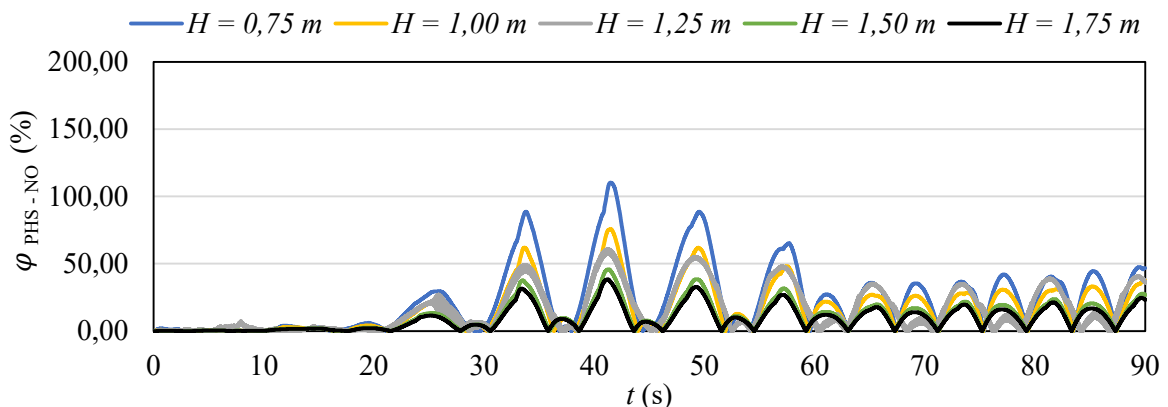


Figura 4.36: Variação de φ (%) em função de H (m) na configuração PHS-NO.

Essa tendência está diretamente ligada ao fato de p permanecer constante ao longo do t . Como a PHS-NO está fixa a $0,5\text{ m}$ de profundidade, p permanece inalterada em torno de $5,0\text{ kPa}$, não havendo contribuição adicional desse termo para a potência disponível sob o

dispositivo (P_p). Assim, P_p depende quase exclusivamente de p_d e da velocidade horizontal (u) induzida pelas ondas.

No entanto, como a potência média das ondas (P_w) varia proporcionalmente ao quadrado de H , a energia disponível aumenta mais rapidamente do que a capacidade da PHS-NO de absorvê-la, resultando em queda da eficiência para ondas maiores. Esse comportamento mostra que, na condição PHS-NO, sua eficiência é limitada por não explorar variações de pressões associadas ao movimento vertical.

Já na condição PHS-O, φ apresentou um ganho expressivo em ondas menores, com picos que atingiram cerca de 180% para $H = 0,75$ m. Esse resultado decorre das variações de p induzidas pelo movimento vertical da PHS-O, que se somam às p_d e u , influenciando diretamente P_p (Figura 4.37). Esses valores acima de 100% não indicam produção de energia superior à disponível, mas sim um efeito local de amplificação do escoamento disponível P_p , decorrente da variação cíclica de pressões sobre a PHS que, momentaneamente, superam a potência média de onda P_w .

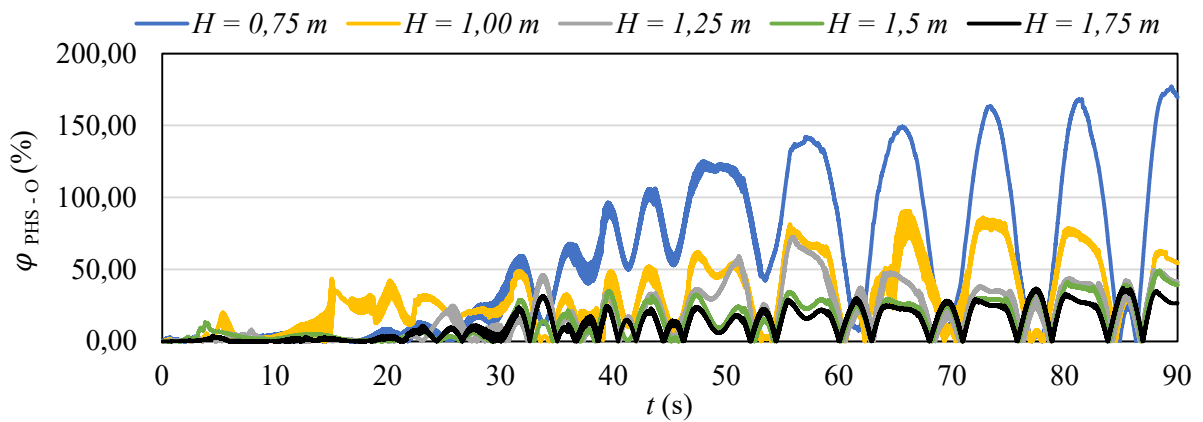


Figura 4.37: Variação de φ (%) em função de H (m) na configuração PHS-O.

Constatou-se que, com o aumento de H , P_w cresce rapidamente, enquanto a capacidade da PHS-O de extrair energia se torna limitada pelo desajuste entre seu movimento e o ciclo da onda, fazendo com que a eficiência em PHS-O se aproxime dos valores da condição PHS-NO. Portanto, observa-se que a oscilação da PHS-O é mais vantajosa em ondas menores, nas quais o dispositivo se mantém mais sincronizado com o ciclo das ondas e as variações de p contribuem de forma mais efetiva no escoamento disponível P_p .

Concluída a análise temporal da eficiência para cada altura de onda nas configurações PHS-NO e PHS-O, determinou-se a eficiência média ($\bar{\varphi}$) para cada caso. Essa grandeza foi

adotada como medida de desempenho e referência para a comparação direta entre as diferentes alturas de onda nas duas configurações, conforme ilustrado na Figura 4.38.

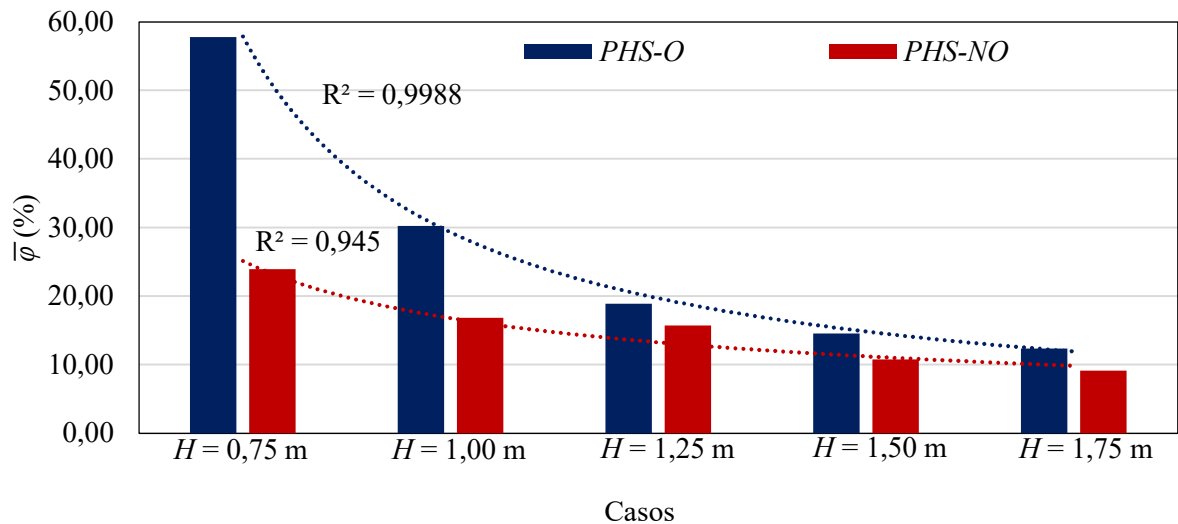


Figura 4.38: Valores de $\bar{\varphi}$ (%) em função de H (m) nas configurações PHS-NO e PHS-O.

Os resultados da Figura 4.38 demonstram que, em ondas menores ($H = 0,75$ m), $\bar{\varphi}$ na condição PHS-O atinge cerca de 58%, mais que o dobro do valor obtido na configuração PHS-NO (24%). À medida que H aumenta, observa-se uma redução gradual de $\bar{\varphi}$ em ambas as condições, chegando a 12% para a PHS-O e 9% para a PHS-NO em $H = 1,75$ m (Figura 4.38).

Assim, a análise de $\bar{\varphi}$ confirma o que foi observado na avaliação ao longo do tempo: a PHS-O apresenta melhor desempenho em ondas menores, mas, em ondas maiores, sua vantagem em relação à condição PHS-NO diminui, resultando em $\bar{\varphi}$ próximas, embora ainda superiores. Para analisar essa tendência, os valores de $\bar{\varphi}$ foram ajustados por função potencial, obtendo-se coeficientes de determinação elevados ($R^2 = 0,9988$ para a PHS-O e $R^2 = 0,9450$ para a PHS-NO), indicando que na faixa de H analisada, o ajuste explica a maior parte da variabilidade de $\bar{\varphi}$ e reforça sua redução com o aumento de H (Figura 4.38).

4.2.3 Normalização do movimento vertical (cz): implicações na eficiência energética

Com o objetivo de avaliar o grau de linearidade da resposta da PHS-O (8x12x0,32) e permitir comparações padronizadas, o deslocamento vertical (cz) foi normalizado pela altura de

onda incidente (H), resultando nas curvas cz/H apresentada na Figura 4.39. A partir dessa resposta relativa, foi calculado o Operador de Amplitude de Resposta (RAO), coeficiente adimensional utilizado em análises hidrodinâmicas de estruturas flutuantes.

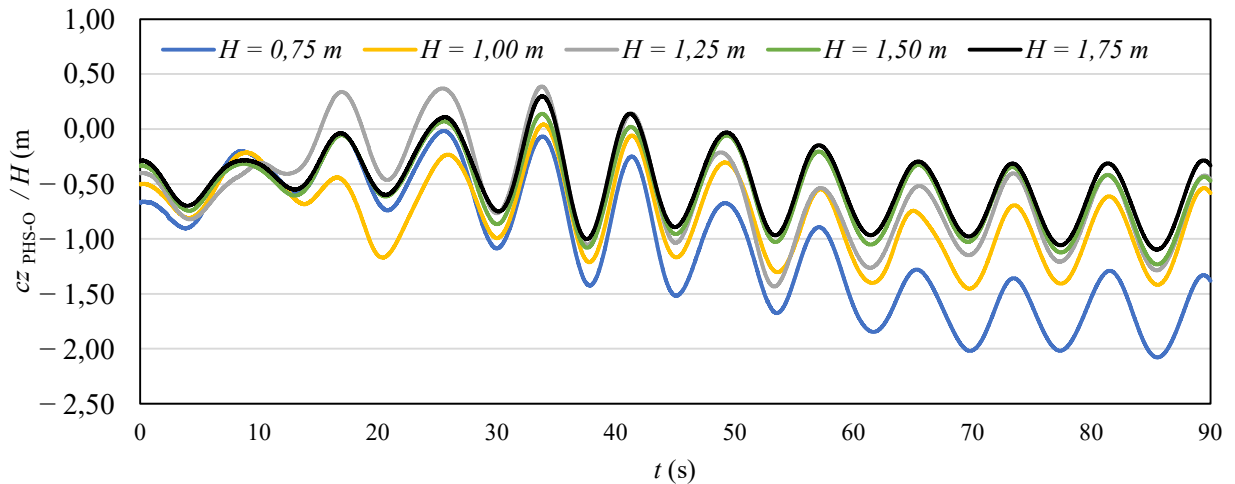


Figura 4.39: Normalização do deslocamento vertical (cz) para PHS-O.

O RAO foi calculado a partir da série adimensional cz/H , em regime permanente entre 60 e 90 s. Para cada simulação, foram obtidas as médias dos quatro picos e dos quatro vales consecutivos. Em seguida, determinou-se a diferença entre a média dos picos e a média dos vales. Essa diferença correspondeu ao valor do RAO, uma vez que representa a amplitude relativa de oscilação do dispositivo em relação à onda incidente.

Essa abordagem elimina a influência direta do tamanho da onda, destacando se a estrutura apresenta comportamento linear ($RAO = 1,0$), atenuado ($RAO < 1$) ou amplificado ($RAO > 1$), possibilitando comparações padronizadas entre diferentes condições de ondas e geometrias, conforme Tabela 17.

Tabela 17. Classificação do comportamento da PHS-O para diferentes valores de RAO.

H (m)	$\bar{\varphi}$ (%)	RAO	Classificação
0,75	57,79	0,67	Atenuada
1,00	30,21	0,77	Atenuada
1,25	18,88	0,77	Atenuada
1,50	14,53	0,71	Atenuada
1,75	12,32	0,71	Atenuada

Para a faixa de H analisada, todos os cenários simulados apresentaram $RAO < 1$, indicando que a PHS-O respondeu de forma atenuada à onda incidente. Dentro desse padrão de resposta, a maior eficiência foi registrada para ondas menores ($H = 0,75$ m). Nessas condições, as observações indicam o melhor sincronismo entre as oscilações de pressão da água e o movimento da PHS-O, o que tende a elevar a potência disponível sob o dispositivo (P_p) em relação à potência da onda (P_w).

Em ondas maiores, PHS-O e onda tendem a não atuar ao mesmo tempo (sincronismo pior), possivelmente porque as maiores velocidades da água podem aumentar as resistências ao movimento (arrasto, ondas geradas pela própria placa, vórtices nas bordas), atrasando a resposta da PHS-O; assim, embora P_w aumente em função de H^2 , P_p não cresce na mesma proporção, e a eficiência se reduz. Essa interpretação é consistente com os resultados de RAO e $\bar{\varphi}$, embora as forças não tenham sido medidas diretamente.

4.2.4 Efeitos da configuração geométrica e da submersão na eficiência da PHS-O e PHS-NO

A partir da análise de normalização, que permitiu caracterizar a resposta oscilatória da PHS-O em diferentes condições de onda por meio do RAO , avança-se para a comparação direta entre PHS-O e PHS-NO. Nesta etapa, são avaliados os efeitos da geometria e da profundidade de submersão sobre a eficiência do conversor (Tabela 18), permitindo identificar como cada arranjo responde à interação com ondas da região de estudo.

Tabela 18. Configurações geométricas avaliadas para o conversor do tipo PHS e respectivas profundidades de submersão utilizadas nas simulações.

PHS	Submersão
12 x 8 x 0,32	0,5
8 x 12 x 0,32	
8 x 8 x 0,32	2,0

Em todos os casos simulados, os valores de $RAO < 1$ indicaram que a PHS-O apresentou resposta atenuada em relação ao movimento das ondas incidentes. Mesmo com essa resposta reduzida, nas submersões de 0,5 m o dispositivo PHS-O obteve eficiência superior à da PHS-NO em todas as condições analisadas, conforme mostrado na Figura 4.40.

Em menor profundidade, as ondas chegam com maior intensidade e provocam variações expressivas no movimento da água. Nessa condição, a PHS-O atua como um pistão hidrodinâmico, movendo-se para cima e para baixo a cada passagem de onda. Esse movimento alternado comprime e descomprime a água sob a estrutura, intensificando o escoamento e concentrando energia nessa região. Como resultado, a potência disponível (P_p) aumenta em relação à potência total da onda (P_w), o que eleva a eficiência do dispositivo. Além disso, o movimento oscilante reduz a reflexão e as perdas por turbulência, permitindo que uma parcela maior da energia incidente seja convertida em potência útil.

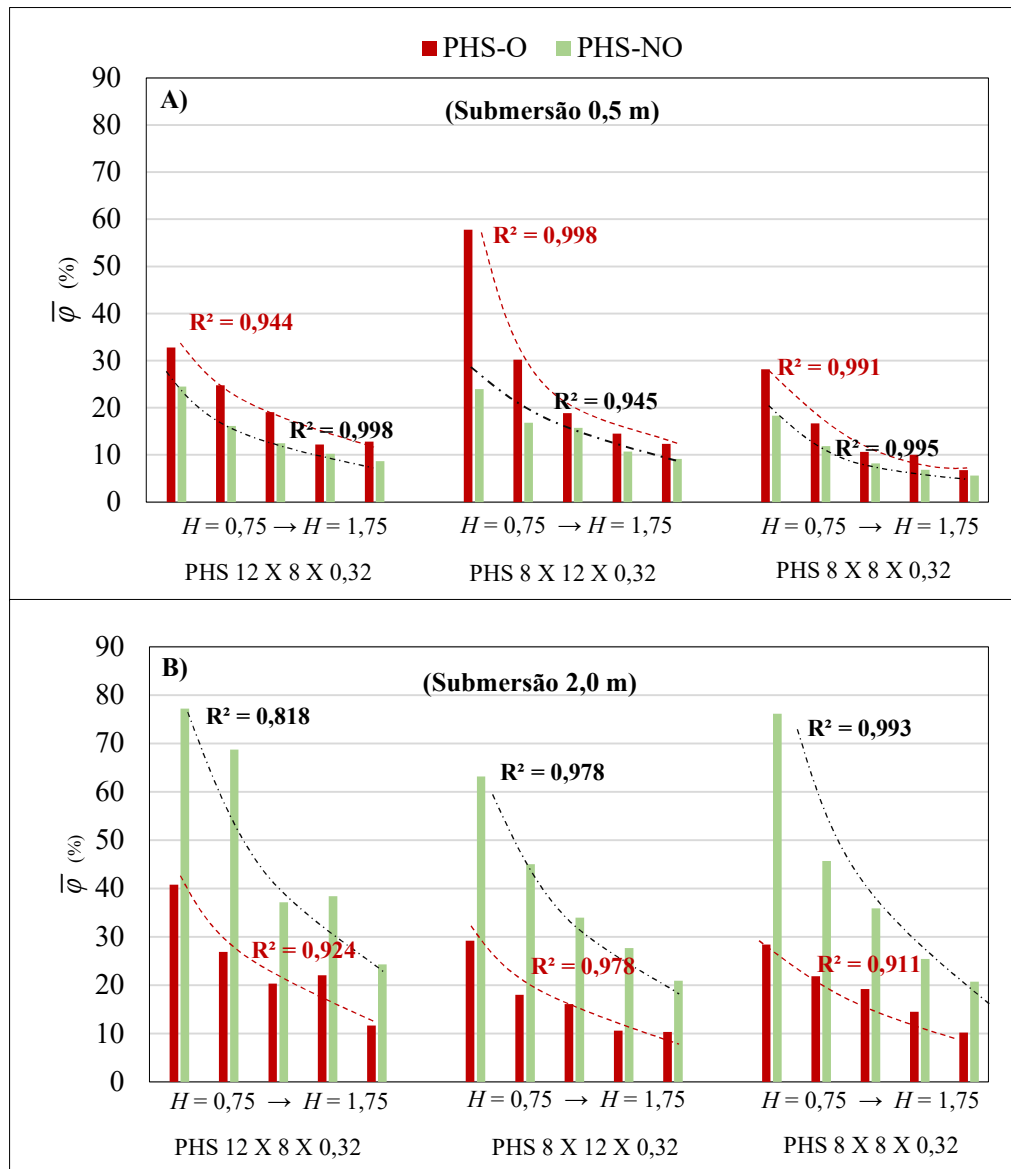


Figura 4.40: Variação de $\bar{\varphi}$ (%) em função de H (m), da profundidade de submersão (m) e da geometria do dispositivo (m), para as condições PHS-O e PHS-NO.

A PHS-NO, por outro lado, resiste totalmente ao escoamento, o que provoca reflexão de parte da energia e formação de vórtices, aumentando as perdas por dissipação e diminuição de sua eficiência. Entre as geometrias analisadas, a PHS-O alongada na direção perpendicular à propagação das ondas apresentou o melhor desempenho, atingindo $\bar{\varphi}$ de aproximadamente 58% para ondas com $H = 0,75$ m. Já as geometrias alongadas na direção de propagação das ondas e as quadradas apresentaram desempenho inferior, com $\bar{\varphi}$ de 32,79% e 28,18%, respectivamente, para a mesma condição de onda (ver Figura 4.40 A). Esse resultado possivelmente se deve à menor adaptação hidrodinâmica dessas configurações ao escoamento alternado imposto pela passagem das ondas.

Os resultados indicaram ainda que, para as geometrias testadas, a eficiência tende a decrescer com o aumento H (ver Figura 4.40 A), o que pode estar relacionado ao fato de que ondas mais energéticas intensificam as perdas por turbulência e reduzem a sincronia entre o movimento do dispositivo PHS-O e a onda incidente.

Testadas na submersão de 2,0 m (ver Figura 4.40 B), as geometrias apresentaram comportamento inverso ao observado em 0,5 m. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de que, em maior profundidade, as ondas chegam enfraquecidas e provocam variações menores no movimento da água. Nessa condição, o escoamento sob a placa é mais fraco e a PHS-O deixa de atuar como um pistão hidrodinâmico. Seu movimento passa a acompanhar lentamente o deslocamento da água, sem gerar compressões significativas na região inferior, o que reduz a concentração de energia e, conseqüentemente, a potência disponível (P_p).

Já a PHS-NO, por permanecer completamente fixa, resiste integralmente à ação das ondas. Quando onda passa sobre a estrutura, a água exerce maior força sobre a face superior, enquanto a parte inferior é menos influenciada. Como não há movimento da placa, a diferença de pressão entre as faces se mantém, e a componente estática da pressão se conserva durante a passagem da água. Isso gera um escoamento mais intenso sob a estrutura, concentrando energia na região inferior e aumentando a potência disponível (P_p) em relação à potência total da onda (P_w). Assim, a eficiência é maior do que na condição oscilante, em que parte dessa energia se dissipa com o movimento da PHS-O.

Em síntese, os resultados evidenciam que a eficiência dos conversores tipo PHS é fortemente influenciada pela interação entre geometria, profundidade e condição de movimento, que impactam na distribuição e a variação das pressões sob o dispositivo. A PHS-O apresentou melhor desempenho em profundidades menores, quando o movimento da água intensifica a componente dinâmica da pressão e favorece o ganho de energia sob a placa. Em

contrapartida, a PHS-NO apresentou maior eficiência em submersões mais elevadas, em razão da predominância da pressão estática e da diferença de pressão entre as faces da estrutura, mantida durante a passagem das ondas. As curvas de ajuste, com $R^2 > 0,9$ (ver Figura 4.40 A e Figura 4.40 B), confirmam a consistência das tendências observadas e a reprodutibilidade dos resultados.

Dessa forma, os resultados desta pesquisa ampliam a compreensão sobre o comportamento hidrodinâmico de conversores oscilantes e fixos, oferecendo uma metodologia que contribui para o aprimoramento de estudos voltados ao desenvolvimento de tecnologias para o aproveitamento da energia das ondas.

5 CONCLUSÕES

Esta tese apresentou uma análise do desempenho hidrodinâmico e energético de uma PHS operando nas condições PHS-NO e PHS-O, fundamentada em uma metodologia que integrou modelagem matemática, simulações numéricas 2D e 3D e análises paramétricas. A abordagem adotada baseou-se na teoria de Stokes de 2ª ordem, associada ao MVF e ao modelo multifásico VOF, permitindo a representação realista da propagação de ondas e da interação onda-estrutura.

A etapa de verificação demonstrou que os modelos numéricos 2D e 3D PHS-NO reproduziram com boa precisão a propagação de ondas regulares, com RMSE relativo em relação à teoria de Stokes de 2ª ordem de 1,0 % e 5,83% respectivamente. Em ambos os casos, as diferenças observadas devem ser consideradas em função da incerteza experimental de $\approx 2,00\%$ reportada por Orer e Ozdamar (2007), que influencia diretamente a comparação entre os valores numéricos e os resultados medidos. A validação do modelo 2D PHS-NO foi conduzida por meio comparação das soluções numéricas obtidas neste trabalho com: (i) dados experimentais de Orer e Ozdamar (2007) e (ii) soluções numéricas validadas por Seibt (2019). No melhor cenário, o E_r das velocidades horizontais sob o dispositivo foi de $-1,64\%$ em relação aos dados experimentais e de $11,87\%$ frente às soluções numéricas. Para o modelo 3D PHS-NO, na comparação entre resultados numéricos e medições experimentais de velocidade, o E_r variou de $-6,26\%$ a $-8,22\%$.

Quanto à verificação do movimento vertical no modelo 3D PHS-O, constatou-se boa concordância com a solução analítica baseada na equação de Bernoulli, com MAE de 6,63%. Além disso, as curvas de pressão (numérica e analítica) apresentaram tendências concordantes, reforçando a verificação e evidenciando a estabilidade e precisão da metodologia numérica empregada.

Os resultados hidrodinâmicos obtidos indicaram que a metodologia implementada foi eficaz para captar as variáveis fundamentais envolvidas no fenômeno, como deslocamentos, velocidades e pressões (estática e dinâmica), permitindo relacioná-las diretamente ao cálculo da potência disponível no escoamento (P_p) e à eficiência (φ) do dispositivo. As análises paramétricas mostraram que a condição oscilante potencializou significativamente a conversão de energia em ondas menores e intermediárias, alcançando na melhor configuração $\bar{\varphi} = 76,6\%$.

A geometria de melhor desempenho aplicada a um estudo de caso, onde $H = 0,75$ m, a PHS-O obteve $\bar{\varphi} = 58\%$, mais que o dobro da obtida na PHS-NO (24%). Para ondas

intermediárias ($H = 1,00$ m), $\bar{\varphi}$ permaneceu superior na condição PHS-O, alcançando 30% contra 18% na condição PHS-NO. Entretanto, em ondas maiores ($H = 1,75$ m), observou-se uma queda expressiva de $\bar{\varphi}$ em ambas as configurações, com valores de 12% para a PHS-O e 9% para a PHS-NO, reflexo do aumento acelerado da potência média das ondas (P_w proporcional a H^2) não acompanhado por incremento proporcional da potência disponível (P_p).

A análise do movimento do dispositivo em relação ao movimento da onda demonstrou, para a faixa de H e T considerados, um comportamento atenuado. Em síntese, os resultados demonstraram que a eficiência dos conversores tipo PHS é fortemente influenciada pela interação entre geometria, profundidade e condição de movimento, que impactam na distribuição e a variação das pressões sob o dispositivo. A PHS-O apresentou melhor desempenho em profundidades menores, quando o movimento da água intensifica a componente dinâmica da pressão e favorece o ganho de energia sob a placa. Em contrapartida, a PHS-NO apresentou maior eficiência em submersões mais elevadas, em razão da predominância da pressão estática e da diferença de pressão entre as faces da estrutura, mantida durante a passagem das ondas. As curvas de ajuste, com $R^2 > 0,9$, confirmaram a consistência das tendências observadas e a reprodutibilidade dos resultados.

Conclui-se, portanto, que a metodologia numérica adotada se mostrou adequada para a avaliação do comportamento hidrodinâmico e do desempenho energético de dispositivos do tipo PHS-O, sendo verificada e validada frente a soluções analíticas e dados experimentais. Além de reduzir custos e limitações associados a ensaios físicos, a abordagem proposta permitiu avaliar de forma integrada parâmetros hidrodinâmicos e de eficiência energética, fornecendo uma base técnica para estudos futuros. Os resultados reforçam a viabilidade da PHS-O como CEO e indicam que sua aplicação é mais promissora em locais com predominância de ondas menores e regulares. Além disso, evidenciam que o controle do movimento oscilante pode ser um fator determinante para otimizar a geometria e maximizar sua performance.

Assim, este trabalho contribui não apenas para a compreensão dos mecanismos físicos envolvidos na interação entre ondas e dispositivos submersos oscilantes, mas também para o desenvolvimento de ferramentas numéricas confiáveis aplicáveis ao dimensionamento e à otimização dessas tecnologias. Os resultados obtidos fornecem subsídios relevantes para investigações futuras, incluindo a análise de arranjos múltiplos de PHS, estudos em condições reais de mar e o desenvolvimento de estratégias de controle ativo da oscilação, ampliando seu potencial de aproveitamento energético e aplicabilidade prática como tecnologia renovável e solução híbrida de proteção costeira.

Com o propósito de dar sequência a este estudo e estimular investigações futuras referentes ao conversor PHS-O, apresentam-se as seguintes propostas:

- Considerar ondas irregulares: Utilizar modelos baseados em espectro de ondas, capazes de simular mares mais energéticos e representar com maior realismo as interações entre as ondas e a PHS.
- Considerar efeitos de turbulência no escoamento sob a PHS: Implementar modelos de turbulência (como o $k-\epsilon$) para capturar a dissipação de energia e os padrões de vórtices induzidos pela presença da PHS;
- Considerar a velocidade do escoamento na direção vertical: Investigar a influência da componente vertical no comportamento do escoamento e na transferência de energia para PHS;
- Implementar um modelo 3D PHS-OHV: Desenvolver um modelo 3D (PHS-OHV) capaz de incorporar simultaneamente as componentes horizontal e vertical de velocidade do escoamento, permitindo estimar a potência convertida pelo dispositivo a partir da contribuição integrada dessas duas componentes de energia.
- Avaliar o desempenho em arranjos múltiplos: Estudar como várias PHS-O funcionando juntas interagem entre si e com as ondas, buscando definir a melhor distância entre elas e entender como sua disposição pode aumentar a eficiência total do conjunto;
- Avaliar a possibilidade de utilizar PHS porosa: Analisar como a introdução de aberturas na PHS pode alterar o escoamento da água, reduzir as forças sobre a estrutura e melhorar a eficiência na extração de energia;
- Aplicação do Design Construtal ao modelo PHS-O;
- Aprofundar a investigação sobre a influência da submersão no desempenho dos dispositivos: Compreender de forma mais detalhada as variações identificadas;
- Incorporar a turbina ao modelo PHS-O: Investigar condições mais próxima da condição real de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, L. E. **Avaliação e Aproveitamento da Energia de Ondas Oceânicas no Litoral do Rio Grande do Sul**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ANSYS FLUENT R2 2021. **Theory Guide**. Seção 14.3.10.2. Pressure Outlet. Disponível em: <https://dl.cfdexperts.net/cfd_resources/Ansys_Documentation/Fluent/Ansys_Fluent_Theory_Guide.pdf>, 2021.

ANSYS FLUENT R2 2022. **Documentation Manual**. Disponível em: <<http://www.fluent.com/software/fluent/index.htm>>, 2022.

BARREIRO, T. G. **Estudo da interação de uma onda monocromática com um conversor de energia**. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2009.

BERNARDONI, C.; BINOTTI, M.; GIOSTRI, A. Techno-economic analysis of closed OTEC cycles for power generation. **Renewable energy**, v. 132, p. 1018-1033, 2019.

BRACCO, G.; CANALE, M.; CERONE, V. Optimizing energy production of an Inertial Sea Wave Energy Converter via Model Predictive Control. **Control Engineering Practice**, v. 96, p. 104299, 2020.

BATISTA, R. C.; OLIVEIRA, M. R. D.; SANTOS, E. D. D.; ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A.; GOMES, M. D. N. Numerical Analysis of Submerged Horizontal Plate Wave Energy Converter Device Considering Float Effects. **Fluids**, v. 10, n. 5, p. 136, 2025.

BORTOLI, A. L. **“Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional”**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 136p, 2000.

CALLAWAY, E. To Catch a Wave. **Nature**, vol. 450, n. 7167, p. 156-159, 2007.

CARDIFF, P.; DEMIRDŽIĆ, I. Thirty years of the finite volume method for solid mechanics. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 28, n. 5, p. 3721-3780, 2021.

CARNEIRO, D. M. **Sequência de ensino investigativo através da construção de um túnel de vento de baixo custo**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Oeste do Pará, 2020.

CARTER, R. W. **Wave energy converters and a submerged horizontal plate**. Dissertação de Mestrado, University of Hawai'i, 2005.

CARVALHO, J. T. **Simulação da Distribuição de Energia das Ondas Oceânicas ao Largo do Litoral Brasileiro**. INPE, São José dos Campos, 2010.

CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of offshore engineering**, vol. 1, Elsevier, Illinois, Estados Unidos, p. 661, 2005.

CHENG, Y.; DAI, S.; DAI, S.; JI, C.; COLLU, M.; YUAN, Z.; INCECIK, A. Energy conversion and hydrodynamic analysis of multi-degree-of-freedom wave energy converters integrated into a semi-submersible platform. **Energy Conversion and Management**, v. 252, p. 115075, 2022.

COIMBRA, A. L. S. C.; TELLES, W. R.; FERREIRA, F. F.; JUNIOR, J. L. Solução de um problema de transporte de contaminante em corpos hídricos utilizando o método dos volumes finitos. **Revista Cereus**, v. 13, n. 1, p. 199-216, 2021.

CORRALES-GONZALEZ, M.; LAVIDAS, G.; BESIO, G. Feasibility of Wave Energy Harvesting in the Ligurian Sea, Italy. **Sustainability**, v. 15, n. 11, p. 9113, 2023.

COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; Lewy, H. On the partial difference equations of mathematical physics. **Mathematische annalen**, v. 100, p. 32-74, 1928.

CRUZ, J. **Ocean wave energy: current status and future perspectives**. Springer Science & Business Media, 2007.

CRUZ, J. (Ed.) **Ocean wave energy: current status and future perspectives**. Springer-Verlag, Berlin, 2008.

CRUZ, J. M. B. P., SARMENTO, A. J. N. A. “**Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos**”, Econômicos e Ambientais. Ed. Instituto do Ambiente, Amadora, p. 61, 2004.

CUCHIARA, D.; FERNADES H. E.; STRAUCH C.J.; CALLIARI J. L. 2006. **Modelagem numerica do comportamento das ondas na costa do Rio Grande do Sul**, II Seminário e Workshop em Engenharia Oceanica, Rio Grande, Brasil.

CUMMINS, C. P.; SCARLETT, G. T.; WINDT, C. Numerical Analysis of Wave–Structure Interaction of Regular Waves with Surface-Piercing Inclined Plates. **Journal of Ocean Engineering and Marine Energy**, v. 8, p. 99–115, 2022.

DE BRITO, M. H. Importância e Características do Escoamento Viscoso e Incompressível, **ABENGE**, v 19 (com errata no vol.20), p.4-15,1998.

DE BRITO, M. G. **Simulação Numérica de Tomadas de Água**. Dissertacao de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, 2010.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists**. In: Liu, P. (Ed.) Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 2. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1991.

DIZADJI, N.; SAJADIAN, S. E. Modeling and optimization of the chamber of OWC system. **Energy**, vol. 36, n. 5, p. 2360-2366, 2011.

DONG, J.; ZHANG, G.; YUAN, J.; SHI, F. An experimental investigation of wave forces on a submerged horizontal plate over a simple slope. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 7, p. 507, 2020.

ESPÍNDOLA, R. L. **Mapeamento de sites com potencial para geração de energia ondomotriz por meio de análise de decisão multicritério**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Pernambuco, 2017.

EXXONMOBIL. **Global Outlook: Executive Summary 2023**. Irving, Texas: ExxonMobil, 2023. Disponível em: <https://www.ama-andros.gr/wp-content/uploads/2023/09/Exxon-2023-global-outlook-executive-summary.pdf>. Acesso em: 25 out. 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2023**: Ano base 2022. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: < https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf >. Acesso em: 05 janeiro de 2023.

FANG, Z.; XIAO, L.; KOU, Y.; LI, J. Experimental study of the wave-dissipating performance of a four-layer horizontal porous-plate breakwater. **Ocean Engineering**, v. 151, p. 222-233, 2018.

FALCÃO, A. F. O. Wave energy utilization: A review of the Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, p. 899-918, 2010.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational Methods for Fluid Dynamics**, Springer, Berlim, p.423, 1997.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos – Conceitos Básicos e Aplicações**, Edusp, São Paulo: Edusp, 426p, 2000.

FOTEINIS, S.; HANCOCK, J.; MAZARAKIS, N.; TSOUTSOS, T.; SYNOLAKIS; C. E. A comparative analysis of wave power in the nearshore by WAM estimates and in-situ (AWAC) measurements. The case study of Varkiza, Athens, Greece. **Energy**, v. 138, p. 500-508, 2017.

FOTEINIS, S. Wave energy converters in low energy seas: Current state and opportunities. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 162, p. 112448, 2022.

GOMES, M. N.; ISOLDI, L. A.; OLINTO, C. R.; ROCHA, L. A. O.; SOUZA, J. A. Computational Modeling of a Regular Wave Tank. **3rd Southern Conference on Computational Modeling**, Rio Grande, IEEE Computer Society, p. 60-65, 2009

GOMES, M. N. **Modelagem Computacional de um Dispositivo Coluna D'água Oscilante para a Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2010.

GOMES, M. N.; SANTOS, E. D; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O. Análise de malhas para geração numérica de ondas em tanques. In **Proceedings VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)**, São Luiz, 2012.

GOMES, M. N. **Constructal Design de Dispositivos Conversores de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Coluna de Água Oscilante**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande, 2014.

GOMES, M. N.; LARA, M. F. E.; IAHNKE, S. L. P.; MACHADO, B. N.; GOULART, M. M.; SEIBT, F. M.; ROCHA, L. A. O. Numerical approach of the main physical operational principle of several wave energy converters: oscillating water column, overtopping and submerged plate. In: **Defect and Diffusion Forum**. Trans Tech Publications Ltd, p. 115-171, 2015.

GOMES, M. N.; ISOLDI, L. A.; SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. Avaliação numérica de diferentes formatos geométricos quadriláteros da câmara hidropneumática de conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica do tipo coluna de água oscilante submetidos à incidência de ondas regulares. **XXI Encontro Nacional de Modelagem Computacional e IX Encontro de Ciência e Tecnologia de Materiais**, 2018.

GOMES, M. N.; LORENZINI, G.; ROCHA, L. A. O.; Dos SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. Constructal design applied to the geometric evaluation of an oscillating water column wave energy converter considering different real scale wave periods. **Journal of Engineering Thermophysics**, v. 27, n. 2, p. 173-190, 2018.

GRAW, K. U. **Shore protection and electricity by submerged plate wave energy converter**. In: Proceedings of European Wave Energy Symposium. Edinburgh, UK, pp. 379-384, 1993a.

GRAW, K. U. The submerged plate as a primary wave breaker. In: **Proceedings of the congress-international association for hydraulic research**, Beijing, China, p. 167, 1993b.

GRAW, K. U. **Is the submerged plate wave energy converter ready to act as a new coastal protection system?** In: Proceedings of XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche. Napoli, Italia, pp. 1-9, 1994.

GUO, B.; WANG, T.; JIN, S.; DUAN, S.; YANG, K.; ZHAO, Y. A review of point absorber wave energy converters. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 10, n. 10, p. 1534, 2022.

HARRIS, R. E.; JOHANNING, I.; WOLFRAM, J. **Mooring systems for wave energy converters: A review of design issues and choices**. Marec2004, 2004.

HAYATDAVOODI, M.; CHEN, Y.; ZHAO, B.; ERTEKIN, R. C. Experiments and computations of wave-induced oscillations of submerged horizontal plates. **Physics of Fluids**, v. 35, n. 1, 2023.

HE, M.; XU, W.; GAO, X.; REN, B. The layout of submerged horizontal plate breakwater (SHPB) with respect to the tidal-level variation. **Coastal Engineering Journal**, v. 60, n. 3, p. 280-298, 2018.

HE, M.; GAO, X.; XU, W.; REN, B.; WANG, H. Potential application of submerged horizontal plate as a wave energy breakwater: A 2D study using the WCSPH method. **Ocean Engineering**, v. 185, p. 27-46, 2019.

HERRERA, J.; SIERRA, S.; IBEAS, A. Ocean thermal energy conversion and other uses of deep sea water: A review. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 9, n. 4, p. 356, 2021.

HILLEBRANDT, W.; KUPKA, F. An introduction to turbulence. In: **Interdisciplinary aspects of turbulence**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. p. 1-20.

HIRT, C. W.; NICHOLS, B. D. Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. **Journal of Computational Physics**, vol. 39, n. 1, p. 201-225, 1981.

HOU, D.; LI, Q. M. Damage boundaries on shock response spectrum based on an elastic single-degree-of-freedom structural model. **International Journal of Impact Engineering**, v. 173, p. 104435, 2023.

HODSON, T. O. Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): When to use them or not. **Geoscientific Model Development**, v. 15, n. 14, p. 5481-5487, 2022.

HUANG, L.; LI, Y. Design of the submerged horizontal plate breakwater using a fully coupled hydroelastic approach. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 37, n. 7, p. 915-932, 2022.

HUGHES, S.A. **Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering**. In: Liu, P. (Ed.) *Advanced Series on Ocean Engineering*, vol. 7. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapore, 1993.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Dados geográficos**. 2021. Disponível em: < <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/34330-municipios-costeiros.html> >. Acesso em: 22 janeiro de 2024.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estruturas Territoriais**. 2021. Disponível em: < <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/31090-ibge-atualiza-municipios-de-fronteira-e-defrontantes-com-o-mar-devido-a-mudancas-de-limites> >. Acesso em: 13 agosto de 2023.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estruturas Territoriais**. 2021. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/31090-ibge-atualiza-municipios-de-fronteira-e-defrontantes-com-o-mar-devido-a-mudancas-de-limites>. Acesso em: 25 out. 2025.

IEA, Irena, UNSD, World Bank, and WHO (International Energy Agency, International Renewable Energy Agency, United Nations Statistics Division, World Bank, and World Health Organization). **Tracking SDG 7: The Energy Progress Report**. Washington, DC: World Bank, 2023.

IEA, Irena, UNSD, World Bank, and WHO (International Energy Agency, International Renewable Energy Agency, United Nations Statistics Division, World Bank, and World Health Organization). **Scaling up investment in ocean energy technologies**. 2023. Disponível em: < https://www.oceanenergy-europe.eu/wp-content/uploads/2023/03/IRENA_OEE_Scaling_up_investment_ocean_energy_2023.pdf >. Acesso em: 07 set. 2025.

JUSOH, M. A.; IBRAHIM, M. Z.; DAUD, M. Z.; ALBANI, A.; MOHD YUSOP, Z. Hydraulic power take-off concepts for wave energy conversion system: a review. **Energies**, v. 12, n. 23, p. 4510, 2019.

IAHNKE, S.L.P. **Energia das Ondas: Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2010.

KHARATI-KOOPAE, M.; KIALI-KOOSHKHAZI, M. Assessment of plate-length effect on the performance of the horizontal plate wave energy converter. **Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering**, v. 145, n. 1, p. 04018037, 2019.

KASHYAP, P. V.; DUGUET, Y.; DAUCHOT, O. Flow statistics in the transitional regime of plane channel flow. **Entropy**, v. 22, n. 9, p. 1001, 2020.

LE MÉHAUTÉ, B. **An Introduction to Hydrodynamics and Water Waves**. Springer-Verlag Inc., New York, 1976.

LI, A. J.; LIU, Y.; FANG, H. Novel analytical solutions without finding complex roots for oblique wave scattering by submerged porous/perforated structures. **Applied Ocean Research**, v. 112, p. 102685, 2021.

LISBOA, R. C.; TEIXEIRA, P. R. F.; DIDIER, E. Simulação de propagação de ondas regulares e irregulares em um canal bidimensional com praia numérica. **VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**, Rio Grande do Sul: FURG, 2016.

LISBOA, R. C.; TEIXEIRA, P. R. F.; FORTES, C. J. Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil. **Energy**, vol. 121, p. 176-184, 2017.

MACHADO, B. N. **Estudo numérico tridimensional de um dispositivo de galgamento para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica aplicando o método Constructal Design**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

MACHADO, B. N.; OLEINIK, P. H.; KIRINUS, E. D. P.; Dos SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O.; GOMES, M. D. N.; ISOLDI, L. A. WaveMIMO Methodology: Numerical Wave Generation of a Realistic Sea State. **Journal of Applied and Computational Mechanics**, v. 7, n. 4, p. 2129-2148, 2021.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. 2ª. Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2004.

MARTINS, J. C.; GOULART, M. M.; GOMES, M. D. N.; SOUZA, J. A.; ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A.; Dos SANTOS, E. D. Geometric evaluation of the main operational principle of an overtopping wave energy converter by means of Constructal Design. **Renewable Energy**, v. 118, p. 727-741, 2018.

MCCORMICK, M. E. **Ocean Engineering Wave Mechanics**, John Wiley & Sons, Nova York, p. 179, 1973.

MCCORMICK, M. E. **Ocean Wave Energy Conversion**. Dover Publications, Inc., New York, 1981.

MOHAPATRA, S. C.; GUEDES, S. C. Hydroelastic response of a flexible submerged porous plate for wave energy absorption. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 8, n. 9, p. 698, 2020.

MOHAPATRA, A. K.; SAHOO, T. Surface gravity wave interaction with a floating dock in the presence of a submerged composite wavy porous plate. **Applied Ocean Research**, v. 139, p. 103686, 2023.

MOREIRA, P. A. V. **Projeto de produção de tubo elíptico em aço avançado de elevada resistência para uma serra de arco**. Tese de Doutorado, Universidade do Minho, 2015.

MOTTA, V. E.; THUM, G. Ü.; PAIVA, M. D. S.; GONÇALVES, R. A. A. C.; ROCHA, L. A. O.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. Numerical Investigation of Inclination Effects on a Submerged Plate as Breakwater and Wave Energy Converter Under Realistic Sea State Waves. **Journal of Marine Science and Engineering**, v. 13, n. 8, p. 1438, 2025.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H.; HUEBSCH, W. W. **Fundamentals of Fluid Mechanics**. 7th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.

NEMES, D. D.; MARONE, E. Caracterização das ondas de superfície na plataforma interna do estado do Paraná, Brasil. *Boletim Paranaense de Geociências*, v. 69, p. 1-14, 2013.

NEZHAD, M. M.; GROPP, D.; ROSA, F.; PIRAS, G.; CUMO, F.; GARCIA, D. A. Nearshore wave energy converters comparison and Mediterranean small island grid integration. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 30, p. 68-76, 2018.

NING, D.; LI, Q.; LIN, H.; TENG, B. Numerical investigation of nonlinear wave scattering by a horizontal submerged plate. **Procedia Engineering**, v. 116, p. 237-244, 2015.

OLIVEIRA, D. M.; ISOLDI, L. A.; DOS SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O.; GOMES, M. D. N. **Ocean Wave Energy as a Possible Power Source for the Brazilian Energy Matrix**. In: Defect and Diffusion Forum. Trans Tech Publications Ltd, p. 70-78, 2019.

OPOKU, F.; UDDIN, M. N.; ATKINSON, M. A review of computational methods for studying oscillating water columns—the Navier-Stokes based equation approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 174, p. 113124, 2023.

ORER, G.; OZDAMAR, A. An experimental study on the efficiency of the submerged plate wave energy converter. **Renewable Energy**, v. 32, n. 8, p. 1317-1327, 2007.

ORGANIZACIÓN METEOROLOGICA MUNDIAL (OMM). **Guia para el Análisis y pronóstico de las olas**. n. 702, Ginebra, Suiza, p. 250, 1998.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. McGraw Hill, New York, 1980.

PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. **Brazilian Journal of Oceanography**, 58(1), 53-70, 2010.

PISCOPO, V.; BENASSAI, G.; DELLA MORTE, R.; SCAMARDELLA, A. Cost-based design and selection of point absorber devices for the mediterranean sea. **Energies**, v. 11, n. 4, p. 946, 2018.

PHILLIPS, R. E. Harvesting Ocean Wave Energy: A Proposed System for Conversion into Electrical Power. **Natural Gas & Electricity**, v. 36, n. 2, p. 9-15, 2019.

RAMALHAIS, R. S. **Estudo numérico de um dispositivo de conversão da energia das ondas do tipo coluna de água oscilante (CAO)**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2011.

RAMACHANDRAN, G. K. V.; ROBERTSON, A.; JONKMAN, J. M.; MASCIOLA, M. D. Investigation of response amplitude operators for floating offshore wind turbines. In: **ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference**. ISOPE, p. ISOPE-I-13-106, 2013.

RATTANAPITIKON, W.; DUONG, N. T. Parametric Wave Models for Computing Statistical-Based and Spectral-Based Root-Mean-Square Wave Heights. In: **International Conference on Asian and Pacific Coasts**. Singapore: Springer Singapore, p. 681-686, 2019.

SANO, M; TAMAI, K. A universal transition to turbulence in channel flow. **Nature Physics**, v. 12, n. 3, p. 249-253, 2016.

SEIBT, F. M. **Análise Numérica do Princípio de Funcionamento do Conversor de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do Tipo Placa Submersa**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande, 2014.

SEIBT, F. M.; COUTO, E. C.; TEIXEIRA, P. R. F.; DOS SANTOS, E. D. Numerical study on the effect of submerged depth on the horizontal plate wave energy converter. **China Ocean Engineering**, v. 28, n. 5, p. 687-700, 2014b.

SEIBT, F. M.; DOS SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O. Modelagem Computacional do Conversor de Energia das Ondas Tipo Placa Horizontal Submersa em Escala Real e Análise de Similaridade com Modelo em Escala de Laboratório. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 6, n. 3, 2017.

SEIBT, F. M.; DE CAMARGO, F. V.; DOS SANTOS E. D.; GOMES, M. N.; ROCHA, L. A. O.; ISOLDI, L. A.; FRAGASSA, C. Numerical Evaluation on the Efficiency of the Submerged Horizontal Plate Type Wave Energy Converter, **FME Transactions**, 47(2), 543-551, 2019.

SEIBT, F. M. **Estudo Numérico de um Dispositivo de Placa Horizontal Submersa para Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica Aplicando Design Construtal**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.

SEIBT, F. M; DOS SANTOS E. D.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O. Constructal Design on full-scale numerical model of a submerged horizontal plate-type wave energy converter. **Marine Systems & Ocean Technology**, p. 1-13, 2023.

SCHLICHTING, H.; KESTIN, J. **Boundary layer theory**. New York: McGraw-Hill, 1961.

SHENG, W. Wave energy conversion and hydrodynamics modelling technologies: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 109, p. 482-498, 2019.

SNIRH. **Conjunto de Dados Geoespaciais de Recursos Hídricos do Brasil**. (recurso eletrônico). Disponível em: <<https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=5094e51beb90418aab741d9dc56ddeb9>>. Acesso em: 04 abril de 2023.

SRINIVASAN, V.; SALAZAR, A. J.; SAITO, K. Modeling the disintegration of modulated liquid jets using volume-of-fluid (VOF) methodology. **Applied Mathematical Modelling**, vol. 35, n. 8, p. 3710-3730, 2011.

STRAUCH, J.C., 1997. **Monitoramento de Ondas em Rio Grande**. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitoria, Brasil, n. 4, pp. 385-391.

SUN, H.; XU, J.; DING, W.; ZHAO, X.; XIE, J.; REN, X. Numerical study on the wave dissipation performance of double-row horizontal plates. **Ocean Engineering**, v. 333, p. 121553, 2025.

TIAN, Z.; WEN, H. Hydrodynamic Characteristics of an Immersed Horizontal Plate in Front of a Steep Slope Revetment. **Available at SSRN 4223521**.

THUM, G. Ü.; THUM, A.; CASTRO, J. A. A.; VIEIRA, R. H. S.; BRITO, M. A. S. Numerical analysis of the submerged horizontal plate device subjected to representative regular and realistic irregular waves of a sea state. **Fluids**, v. 9, n. 8, p. 188, 2024.

UN DESA - United Nations Department of Economic and Social Affairs, **Sustainable Development Goal 7: Ensure Access to Affordable, Reliable, Sustainable and Modern Energy for All**, UN DESA, New York, NY, 2017. Disponível em: < <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg7> >. Acesso em: 14 agosto de 2023.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. **Shore Protection Manual**. Volume I. Waterways Experiment Station – Coastal Engineering Research Center, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 4th Ed., 1984.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. **Coastal Engineering Manual**. Part II. Coastal Engineering Research Center, Department of the Army, USACE Publications, Washington, D.C., 2002.

USACE – U.S. Army Corps of Engineers. **Coastal Engineering Manual**. Chapter II-2, Meteorology and Wave Climate, Engineer Manual 1110-2-1100, Department of the Army, USACE Publications, Washington, D.C., 2006.

UBBINK, O. Numerical prediction of two-fluid systems with sharp interfaces. **PhD Thesis, Imperial College of Science Technology and Medicine, University of London**, 1997.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method**. New York: Wiley, 1999.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics – The Finite Volume Method**. Pearson, England, 2007.

VICINANZA, D.; CONTESTABILE, P.; NØRGAARD, J. Q. H.; ANDERSEN, T. L. Innovative rubble mound breakwaters for overtopping wave energy conversion. **Coastal Engineering**, v. 88, p. 154-170, 2014.

WANG, G.; REN, B.; WANG, Y. Experimental study on hydrodynamic performance of arc plate breakwater. **Ocean engineering**, v. 111, p. 593-601, 2016.

WANG, K.H.; SHEN, Q. Wave motion over a group of submerged horizontal plates. **International Journal of Engineering Science**, v. 37, n. 6, p. 703-715, 1999.

WHITE, F. M. **Fluid Mechanics**. 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

YADAV, S. S. Numerical study of nonlinear wave flow past vertically submerged plate over uneven bottom. **Materials Today: Proceedings**, v. 59, p. 1804-1809, 2022.

YU, X. Wave breaking over submerged horizontal plate. **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, v. 121, n. 2, p. 105-113, 1995.

YU, X. Functional performance of a submerged and essentially horizontal plate for offshore wave control: a review. **Coastal Engineering Journal**, vol. 44, n. 02, p. 127-147, 2002.

YUEH, C. Y.; CHUANG, S. H.; WEN, C. C. Bragg reflection of water waves due to submerged wavy plate breakwater. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 21, p. 52-59, 2018.

YOUNGS, D. L. Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion. **Numerical Methods for Fluid Dynamics**, p. 273–285, 1982.

ZEYMER, J.S.; SILVA, C. H. O.; SCHNEIDER, M. G. Comparação entre a exatidão de sensores analógicos e digitais utilizados em sistemas de termometria para armazenagem de grãos. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 1, p. 813-819, 2021.

ZHENG, S.; MEYLAN, M.; ZHANG, X.; IGLESIAS, G.; GREAVES, D. Performance of a plate-wave energy converter integrated in a floating breakwater. **IET Renewable Power Generation**, v. 15, n. 13, p. 2745-2758, 2021.

ZHENG, Y.; ZHOU, Y.; JIN, R.; MU, Y.; HE, M.; ZHAO, L. Experimental study on submerged horizontal perforated plates under irregular wave conditions. **Water**, v. 15, n. 16, p. 3015, 2023.

ASPRONE, D.; AURICCHIO, F.; MANFREDI, G.; PROTA, A.; REALI, A.; SANGALLI, G. Particle methods for a 1 d elastic model problem: Error analysis and development of a second-

order accurate formulation. **Computer Modeling in Engineering & Sciences (CMES)**, v. 62, n. 1, p. 1-21, 2010.

ZOLLANVARI, A.; DOUGHERTY, E. R. Moments and root-mean-square error of the Bayesian MMSE estimator of classification error in the Gaussian model. **Pattern recognition**, v. 47, n. 6, p. 2178-2192, 2014.