

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

SAMUEL NOBRE CHAVES GONÇALVES

INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DO RAO DE SENSOES DE RASTREAMENTO  
ÓPTICO PARA MEDIÇÃO DE ALTURA DE ONDA

Joinville  
2023

SAMUEL NOBRE CHAVES GONÇALVES

INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DO RAO DE SENSORES DE RASTREAMENTO  
ÓPTICO PARA MEDIÇÃO DE ALTURA DE ONDA

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
Naval do Centro Tecnológico de Joinville da  
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. André Luís Condino Fugarra

Coorientador: Dr. Ernane Silva

Joinville  
2023

SAMUEL NOBRE CHAVES GONÇALVES

INVESTIGAÇÃO NUMÉRICA DO RAO DE SENSORES DE RASTREAMENTO  
ÓPTICO PARA MEDIÇÃO DE ALTURA DE ONDA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 11 de dezembro de 2023.

**Banca Examinadora:**

---

Dr. André Luís Condino Fugarra  
Orientador  
Presidente

---

Dra. Talita Sauter Possamai  
Membra  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Pedro Cardozo de Mello  
Membro  
Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho a meu pai Silvaldo, a minha mãe Flavia e a minha irmã Samantha.

## AGRADECIMENTOS

Antes de qualquer coisa, gostaria de afirmar a gratidão eterna que tenho pelos meus pais, Silvaldo Gonçalves e Flavia Gonçalves, e por todos os seus incansáveis esforços para me edificar como pessoa ao longo de toda minha vida, pois, assim como disse Isaac Newton, "se eu vi mais longe, foi por estar sobre o ombro de gigantes". Tudo o que conquistei e conquistarei seria impossível sem eles. Agradeço muito, também, à minha irmã Samantha Gonçalves por sempre ter sido tão doce e atenciosa comigo, apesar de eu não ser o irmão mais fácil de se lidar. Também quero agradecer à minha avó Palmira Machado, minha dinda Pauline Machado e meu primo Alexandre Machado por terem sempre demonstrado interesse no meu progresso ao longo do curso.

Sou enormemente grato à Karen Soares, uma pessoa extremamente dedicada que, mesmo tendo entrado na minha vida após o período da graduação que mais me desgastou, valoriza como ninguém, além da minha família, cada parcela da quantidade absurda de esforço que investi nos estudos ao longo desses 5 anos. Agradeço por ter contribuído tanto para eu enxergar cada vez mais que meu empenho não foi e nunca vai ser em vão. Obrigado, também, por toda a paciência com meu jeito de ser, preocupado com o futuro, e por sempre me ajudar quando começo a pensar demais.

Quero agradecer demais às minhas amigas Laura Lessa, Letícia Mello e Amanda Miyamoto por toda a parceria e trabalhos juntos desde que ingressamos na faculdade em 2019, mas, principalmente, às duas primeiras por, no período pós-pandemia, terem aceitado dividir apartamento mesmo sem me conhecer tão bem e por terem sido amigas tão fáceis de se cultivar logo quando eu mais precisava sair da inércia social em que eu estava imerso. Dividir apartamento com pessoas tão diferentes de mim, embora tão parecidas, e construir um laço de amizade tão único entre nós três é uma lembrança que ficará guardada para sempre.

Agradeço aos amigos de Blumenau e região, mais especificamente à galera do LoL: Renato Heuer, Guilherme Tavera, Marcel Anesi, Marcos Tillmann, Vinícius de Tofol, João Marcolla, Igor Hornburg e Ian Nunes. Pode parecer bobo, mas aqueles repetitivos finais de semana jogando LoL em chamada durante a pandemia eram o ponto alto das minhas semanas depois de estudar até a exaustão. Não vou me esquecer das risadas de coisas sem sentido que demos pois realmente foram importantes para mim. Além disso, em especial, também sou grato ao Renato por, durante todo esse tempo, ter estado por perto mesmo nos momentos em que eu mais me isolei. Agradeço, também, aos outros amigos e colegas do ensino médio, como o Marcos Batista, Pedro Wust, Arthur Bett, Matheus Ribeiro e Vinicius Knaesel, que enviaram boas energias para essa etapa da minha vida pois tenho certeza que foi de grande ajuda.

Agradeço ao corpo docente da Universidade Federal de Santa Catarina Centro Tecnológico de Joinville por todas as contribuições ao longo dos meus anos de graduação, em especial aos professores André Fajarra, Ernane Silva e Thiago Tancredi por todos os ensinamentos acerca de desenvolvimento de senso crítico na análise de resultados, utilização de ferramentas computacionais e também das lições sobre a vida de modo geral. Também sou grato aos professores Juan Salazar e Diogo Siebert, responsáveis pelo Laboratório de Computação Científica da UFSC CTJ, por terem prestado todo o suporte na utilização do cluster sempre que necessitei. Agradeço, também, a todos os colegas discentes de quem tive oportunidade de receber ajuda ou trocar algum conhecimento, como o Bruno Erzinger e o João Anuto.

Gostaria de agradecer tanto ao time de engenharia do Estaleiro Navship quanto à equipe de engenharia de manutenção da Bram Offshore por terem todos me recebido de braços abertos durante meu período de estágio, como também por terem contribuído com tanto conhecimento aplicado em áreas que eu ainda não havia tido a oportunidade de explorar a fundo.

Por fim, expresso muita gratidão a todas as versões do otimista Samuel que nunca hesitaram em dar seu máximo em tudo que fizeram. Agradeço por terem sempre transformado pensamentos autocríticos em combustível e por nunca terem deixado de acreditar, mesmo quando era difícil fazê-lo, que toda a dedicação, constância e comprometimento valiam a pena. Posso afirmar que realmente valeu. Muitíssimo obrigado, Samuel.

## RESUMO

Os sistemas de rastreamento por imagem utilizando alvos refletivos vêm sendo otimizados e uma de suas aplicações é na medição da elevação de superfície livre em tanques de onda. Em estudos anteriores acerca dessa aplicação, foram verificadas discrepâncias em relação às medições feitas com sensores mais tradicionais no mercado onde, também, foram listadas possíveis causas das medições imperfeitas. O presente trabalho baseia-se na investigação de uma das hipóteses levantadas: uma avaliação do RAO dos alvos refletivos flutuantes para verificar se seus movimentos, que são capturados pelo sistema de rastreamento óptico, coincidem com os da superfície livre. Foi utilizado o software OpenFOAM com a extensão olaFlow para realizar simulações do movimento dos alvos refletivos submetidos à ondas, a partir das quais puderam ser obtidas razões entre valores de altura de onda medida pelo alvo e medição convencional do software, e uma comparação tanto com os resultados experimentais quanto com a curva de RAO gerada pelo software Maxsurf pelo método dos painéis pôde ser realizada. Verificou-se que, para a faixa de frequências de onda utilizada nas simulações, os pontos na curva de RAO encontram-se na região regida pelos termos de restauração, tendo valores iguais ou levemente diferente de um, no entanto os desvios observados nas simulações entre corpo flutuante e onda foram de magnitude inferior e de comportamento diferente dos observados pelos ensaios experimentais dos estudos anteriores. Assim, concluiu-se que o RAO não era o responsável pelas inconformidades nos resultados dos experimentos com rastreamento óptico, abrindo espaço para estudos visando aprimoramento da captura óptica do sistema rastreamento por imagem em ensaios de onda.

**Palavras-chave:** Elevação de onda. Sensor óptico. RAO. OpenFOAM.

## ABSTRACT

Image tracking systems using reflective targets have been getting optimized and one of its applications is free-surface elevation measurement in wave tanks. Previous studies considering this application verified discrepancies in relation to measurements from more traditional sensors where also were listed possible causes for the imperfect measurements. The present work is based on the investigation of one of the raised hypotheses: an evaluation of the RAO of the floating reflective targets to verify if its movements, which are captured by the optical tracking system, coincide with the ones of the free surface. It was used the OpenFOAM software with the olaFlow extension to simulate the reflective targets' movements when submitted to waves, from where could be obtained the ratio between the wave height values measured by the floating body tracking and standard software's measurement, and a comparison both with experimental data and with with a RAO curve generated by pannel method in the software Maxsurf could be done. It was verified that, for the range of wave frequencies considered in the simulations, the points on the RAO curve are located in the region governed by the restoration terms, having values equal or slightly higher than one, however the deviations observed between floating body and wave in the simulations had less magnitude and different behavior than the experimental data of the previous studies. Thereby, it was concluded that the RAO is not the responsible for the unconformities on the results of the optical tracking experiments, making space for studies aiming improvements in optical capture from the image tracking system on wave experiments.

**Keywords:** Wave elevation. Optical sensor. RAO. OpenFOAM.



## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Parâmetros de uma onda . . . . .   | 22 |
| Figura 2 – Condições de contorno do volume de controle . . . . .  | 24 |
| Figura 3 – Formatos de ondas para diferentes teorias . . . . .  | 25 |
| Figura 4 – Simplificações das expressões nos limites assintóticos . . . . .   | 27 |
| Figura 5 – Gerador do tipo flap . . . . .   | 28 |
| Figura 6 – Absorvedores passivos e ativos . . . . .   | 29 |
| Figura 7 – Prós e contras dos tipos de sensores . . . . .   | 30 |
| Figura 8 – Exemplos de alvos refletivos . . . . .   | 30 |
| Figura 9 – Composição do movimento de corpo flutuante . . . . .   | 31 |
| Figura 10 – Formatos característicos das curvas de RAO de <i>Heave</i> e influência de parâmetros . . . . .   | 33 |
| Figura 11 – Esquemático das Três Estratégias Consideradas para Absorção Passiva, sendo o domínio formado pelas regiões brancas e pretas .   | 37 |
| Figura 12 – Principais condições de contorno consideradas nas simulações . .  | 37 |
| Figura 13 – Disposição das WPs nos ensaios da base experimental utilizada por Hannes (2020) . . . . .   | 39 |
| Figura 14 – Diagrama para seleção das teorias de onda . . . . .   | 41 |
| Figura 15 – RAOs da Esfera e Cilindros via Maxsurf . . . . .  | 43 |
| Figura 16 – RAOs via Maxsurf frente aos resultados experimentais de Hannes (2020) . . . . .   | 44 |
| Figura 17 – Incertezas dos ensaios de Hannes (2020) para cada onda . . . . .  | 45 |
| Figura 18 – Região ao redor da NB1 na Malha da Onda 1 . . . . .   | 46 |
| Figura 19 – Região ao redor da NB1 na Malha da Onda 7 . . . . .   | 46 |
| Figura 20 – Região ao redor da NB1 na Malha da Onda 12 . . . . .  | 47 |
| Figura 21 – Fluxograma indicando as etapas da análise dos resultados . . . . .  | 49 |
| Figura 22 – Resultados das simulações de frentes de onda . . . . .  | 50 |
| Figura 23 – Sinais do Caso 1 (Sem Absorção) em fase: Desempenho Qualitativamente Ruim . . . . .   | 51 |
| Figura 24 – Sinais do Caso 24 (Praia de 10°, Porosidade 90%) em fase: Desempenho Qualitativamente Bom . . . . .   | 51 |
| Figura 25 – Razões de áreas para as três ondas com frequências em escala 100:1 junto à curva de RAO gerada pelo software Maxsurf Motions para cilindro de comprimento igual ao diâmetro . . . . . | 67 |
| Figura 26 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 1 . . . . .   | 68 |
| Figura 27 – Caso 2: Absorção Ativa . . . . .  | 73 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 28 – Caso 3: Praia Física, Inclinação 10° . . . . .                   | 73 |
| Figura 29 – Caso 4: Praia Física, Inclinação 20° . . . . .                   | 74 |
| Figura 30 – Caso 5: Região Retangular 30% Porosa, Comprimento 32m . . . . .  | 74 |
| Figura 31 – Caso 6: Região Retangular 30% Porosa, Comprimento 16m . . . . .  | 75 |
| Figura 32 – Caso 7: Região Retangular 30% Porosa, Comprimento 8m . . . . .   | 75 |
| Figura 33 – Caso 8: Região Retangular 30% Porosa, Comprimento 4m . . . . .   | 76 |
| Figura 34 – Caso 9: Região Retangular 50% Porosa, Comprimento 32m . . . . .  | 76 |
| Figura 35 – Caso 10: Região Retangular 50% Porosa, Comprimento 16m . . . . . | 77 |
| Figura 36 – Caso 11: Região Retangular 50% Porosa, Comprimento 8m . . . . .  | 77 |
| Figura 37 – Caso 12: Região Retangular 50% Porosa, Comprimento 4m . . . . .  | 78 |
| Figura 38 – Caso 13: Região Retangular 70% Porosa, Comprimento 32m . . . . . | 78 |
| Figura 39 – Caso 14: Região Retangular 70% Porosa, Comprimento 16m . . . . . | 79 |
| Figura 40 – Caso 15: Região Retangular 70% Porosa, Comprimento 8m . . . . .  | 79 |
| Figura 41 – Caso 16: Região Retangular 70% Porosa, Comprimento 4m . . . . .  | 80 |
| Figura 42 – Caso 17: Região Retangular 90% Porosa, Comprimento 32m . . . . . | 80 |
| Figura 43 – Caso 18: Região Retangular 90% Porosa, Comprimento 16m . . . . . | 81 |
| Figura 44 – Caso 19: Região Retangular 90% Porosa, Comprimento 8m . . . . .  | 81 |
| Figura 45 – Caso 20: Região Retangular 90% Porosa, Comprimento 4m . . . . .  | 82 |
| Figura 46 – Caso 21: Praia 30% Porosa, Inclinação 10° . . . . .              | 82 |
| Figura 47 – Caso 22: Praia 50% Porosa, Inclinação 10° . . . . .              | 83 |
| Figura 48 – Caso 23: Praia 70% Porosa, Inclinação 10° . . . . .              | 83 |
| Figura 49 – Caso 24: Praia 90% Porosa, Inclinação 10° . . . . .              | 84 |
| Figura 50 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 1 . . . . .      | 85 |
| Figura 51 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 2 . . . . .      | 85 |
| Figura 52 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 3 . . . . .      | 86 |
| Figura 53 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 4 . . . . .      | 86 |
| Figura 54 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 5 . . . . .      | 87 |
| Figura 55 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 6 . . . . .      | 87 |
| Figura 56 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 7, par 1 . . . . .      | 88 |
| Figura 57 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 7, par 2 . . . . .      | 88 |
| Figura 58 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 7, par 3 . . . . .      | 89 |
| Figura 59 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 7, par 4 . . . . .      | 89 |
| Figura 60 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 7, par 5 . . . . .      | 90 |
| Figura 61 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 7, par 6 . . . . .      | 90 |
| Figura 62 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 12, par 1 . . . . .     | 91 |
| Figura 63 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 12, par 2 . . . . .     | 91 |
| Figura 64 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 12, par 3 . . . . .     | 92 |
| Figura 65 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 12, par 4 . . . . .     | 92 |
| Figura 66 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 12, par 5 . . . . .     | 93 |

Figura 67 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 12, par 6 . . . . . 93

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 – Número de células de cada uma das malhas finais . . . . .   | 42 |
| Tabela 2 – Alturas de onda obtidas nas simulações sem absorção (Caso 1), com absorção ativa (Caso 2), praia física de 10° (Caso 3) e praia física de 20° (Caso 4) . . . . .                    | 52 |
| Tabela 3 – Alturas de onda obtidas nas simulações com regiões porosas de índice de porosidade 30% e comprimento 32m (Caso 5), 16m (Caso 6), 8m (Caso 7) e 4m (Caso 8) . . . . .                | 53 |
| Tabela 4 – Alturas de onda obtidas nas simulações com regiões porosas de índice de porosidade 50% e comprimento 32m (Caso 9), 16m (Caso 10), 8m (Caso 11) e 4m (Caso 12) . . . . .             | 53 |
| Tabela 5 – Alturas de onda obtidas nas simulações com regiões porosas de índice de porosidade 70% e comprimento 32m (Caso 13), 16m (Caso 14), 8m (Caso 15) e 4m (Caso 16) . . . . .            | 54 |
| Tabela 6 – Alturas de onda obtidas nas simulações com regiões porosas de índice de porosidade 90% e comprimento 32m (Caso 17), 16m (Caso 18), 8m (Caso 19) e 4m (Caso 20) . . . . .            | 54 |
| Tabela 7 – Alturas de onda obtidas nas simulações com regiões porosas em formato de praia de 10° de índice de porosidade 30% (Caso 21), 50% (Caso 22), 70% (Caso 23) e 90% (Caso 24) . . . . . | 55 |
| Tabela 8 – Ranqueamento de performance dos 24 Casos de absorção baseado no menor desvio padrão entre medições . . . . .  | 56 |
| Tabela 9 – Resultados para medição via <i>Numerical Probe</i> (NP) e <i>Wave Probe</i> (WP) da altura da Onda 1: Altura nominal = 12.98mm . . . . .  | 57 |
| Tabela 10 – Resultados para medição via <i>Numerical Probe</i> (NP) e <i>Wave Probe</i> (WP) da altura da Onda 7: Altura nominal = 70.86mm . . . . .   | 57 |
| Tabela 11 – Resultados para medição via <i>Numerical Probe</i> (NP) e <i>Wave Probe</i> (WP) da altura da Onda 12: Altura nominal = 200mm . . . . .  | 57 |
| Tabela 12 – Resultados para medição via <i>Numerical Probe</i> (NP) e <i>Wave Probe</i> (WP) do período da Onda 1: Período nominal = 0.53s . . . . .   | 59 |
| Tabela 13 – Resultados para medição via <i>Numerical Probe</i> (NP) e <i>Wave Probe</i> (WP) do período da Onda 7: Período nominal = 1.55s . . . . .   | 59 |
| Tabela 14 – Resultados para medição via <i>Numerical Probe</i> (NP) e <i>Wave Probe</i> (WP) do período da Onda 12: Período nominal = 1.5s . . . . .   | 59 |
| Tabela 15 – Síntese dos resultados experimentais para a Onda 1 . . . . .   | 60 |
| Tabela 16 – Síntese dos resultados experimentais para a Onda 7 . . . . .   | 60 |

|   |    |
|---|----|
| Tabela 17 – Síntese dos resultados experimentais para a Onda 12 . . . . .   | 61 |
| Tabela 18 – Resultados para medição via <i>Numerical Ball</i> (NB) e <i>Wave Ball</i> (WB)<br>da altura da Onda 1: Altura nominal = 12.98mm . . . . . | 62 |
| Tabela 19 – Resultados para medição via <i>Numerical Ball</i> (NB) e <i>Wave Ball</i> (WB)<br>da altura da Onda 7: Altura nominal = 70.86mm . . . . . | 62 |
| Tabela 20 – Resultados para medição via <i>Numerical Ball</i> (NB) e <i>Wave Ball</i> (WB)<br>da altura da Onda 12: Altura nominal = 200mm . . . . .  | 63 |
| Tabela 21 – Resultados para medição via <i>Numerical Ball</i> (NB) e <i>Wave Ball</i> (WB)<br>do período da Onda 1: Período nominal = 0.53s . . . . . | 63 |
| Tabela 22 – Resultados para medição via <i>Numerical Ball</i> (NB) e <i>Wave Ball</i> (WB)<br>do período da Onda 7: Período nominal = 1.55s . . . . . | 64 |
| Tabela 23 – Resultados para medição via <i>Numerical Ball</i> (NB) e <i>Wave Ball</i> (WB)<br>do período da Onda 12: Período nominal = 1.5s . . . . . | 64 |
| Tabela 24 – Síntese dos resultados numéricos para a Onda 1 . . . . .  | 65 |
| Tabela 25 – Síntese dos resultados numéricos para a Onda 7 . . . . .  | 65 |
| Tabela 26 – Síntese dos resultados numéricos para a Onda 12 . . . . .   | 66 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|            |                                       |
|------------|---------------------------------------|
| $L$        | Comprimento de onda                   |
| $T$        | Período da onda                       |
| $H$        | Altura de onda                        |
| $a$        | Amplitude da onda                     |
| $h$        | Profundidade                          |
| $\eta$     | Elevação instantânea da onda          |
| $t$        | Tempo                                 |
| $x$        | Posição da coordenada x               |
| $y$        | Posição da coordenada y               |
| $z$        | Posição da coordenada z               |
| $U$        | Velocidade                            |
| $u$        | Componente da velocidade na direção x |
| $v$        | Componente da velocidade na direção y |
| $w$        | Componente da velocidade na direção z |
| $\nabla$   | Operador Nabla                        |
| $\phi$     | Função potencial de onda              |
| $p$        | Pressão                               |
| $g$        | Aceleração da gravidade               |
| $\rho$     | Massa específica do fluido            |
| $f(t)$     | Função genérica                       |
| $\delta$   | Declividade                           |
| $\epsilon$ | Perturbação adimensional              |
| $k$        | Número de onda                        |

|               |  |
|---------------|--|
| $c$           | Celeridade da onda                                   |
| $\lambda$     | Periodicidade  |
| $Y$           | Função auxiliar de $y$                               |
| $\Lambda$     | Função auxiliar de $\lambda$                         |
| $\omega$      | Frequência da onda                                   |
| $S_t$         | Stroke   |
| $H_R$         | Altura da onda refletida                             |
| $H_I$         | Altura da onda incidente                             |
| $C_R$         | Coeficiente de reflexão                              |
| $V$           | Volume de água deslocada pelo corpo                  |
| $\dot{z}$     | Velocidade vertical do corpo flutuante               |
| $\ddot{z}$    | Aceleração vertical do corpo flutuante               |
| $F_h$         | Forças hidrostáticas                                 |
| $F_o$         | Forças impostas pelas ondas                          |
| $m$           | Massa do corpo flutuante                             |
| $c_1$         | Constante 1  |
| $c_2$         | Constante 2  |
| $c_3$         | Constante 3  |
| $c_4$         | Constante 4  |
| $c_5$         | Constante 5  |
| $c_6$         | Constante 6  |
| $\dot{\eta}$  | Velocidade da elevação da onda                       |
| $\ddot{\eta}$ | Aceleração da elevação da onda                       |
| $\eta_a$      | Amplitude da elevação da onda                        |
| $\alpha_i$    | Fração de ocupação de volume de um $i$ -ésimo fluido |
| $\alpha$      | Fração de ocupação de volume de água                 |

|              |                                  |
|--------------|----------------------------------|
| $i$          | Índice de porosidade             |
| $p^*$        | Pressão pseudo-dinâmica          |
| $\mu_{eff}$  | Viscosidade dinâmica efetiva     |
| $TF$         | Termos de fechamento             |
| $U_{agua}$   | Velocidade da fração da água     |
| $U_{ar}$     | Velocidade da fração de ar       |
| $U_r$        | Velocidade de compressão         |
| $a$          | Aceleração linear                |
| $F$          | Forças externas                  |
| $\theta$     | Aceleração angular               |
| $I_m$        | Momento de inércia de massa      |
| $M$          | Momentos externos                |
| $\tau$       | Tensão viscosa                   |
| $I$          | Matriz identidade                |
| $F_{amarrr}$ | Forças de amarração              |
| $r_{cs}$     | Braço das forças hidrodinâmicas  |
| $r_{cm}$     | Braço das forças de amarração    |
| $r_{cg}$     | Braço da força de gravidade      |
| $\Delta t$   | Incremento temporal              |
| $\gamma$     | Parâmetro $\gamma$ de Newmark    |
| $\beta$      | Parâmetro $\beta$ de Newmark     |
| $C_o$        | Número de Courant                |
| $\Delta x$   | Incremento espacial na direção x |
| $L_c$        | Comprimento do cilindro          |
| $D$          | Diâmetro do cilindro             |
| $D_r$        | Desvio relativo                  |



|             |  |
|-------------|--|
| $\sigma$    | Desvio padrão                                      |
| $L_p$       | Comprimento da região porosa                       |
| $D_{r,nom}$ | Desvio relativo ao valor nominal                   |
| $H_{NP}$    | Altura de onda medida pela <i>Numerical Probe</i>  |
| $H_{WP}$    | Altura de onda medida pela <i>Wave Probe</i>       |
| $T_{NP}$    | Período da onda medida pela <i>Numerical Probe</i> |
| $T_{WP}$    | Período da onda medida pela <i>Wave Probe</i>      |
| $H_{WB}$    | Altura de onda medida pela <i>Wave Ball</i>        |
| $H_{NB}$    | Altura de onda medida pela <i>Numerical Ball</i>   |
| $T_{NB}$    | Período da onda medida pela <i>Numerical Ball</i>  |
| $T_{WB}$    | Período da onda medida pela <i>Wave Ball</i>       |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |  |
|--------|--|
| CH-TPN | Calibrador Hidrodinâmico do Tanque de Provas Numérico  |
| RAO    | <i>Response Amplitude Operator</i>                     |
| NWT    | <i>Numerical Wave Tank</i>                             |
| CCF    | Condição de Contorno de Fundo                          |
| CCDSL  | Condição de Contorno Dinâmica da Superfície Livre      |
| CCCSL  | Condição de Contorno Cinemática da Superfície Livre    |
| CCLP   | Condição de Contorno Lateral Periódica                 |
| VARANS | <i>Volume Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes</i> |
| VOF    | Método <i>Volume of Fluid</i>                          |
| NP     | <i>Numerical Probe</i>                                 |
| WP     | <i>Wave Probe</i>                                      |
| CFL    | Critério de Courant-Friedrichs-Lewy                    |
| FFT    | <i>Fast Fourier Transform</i>                          |
| NB     | <i>Numerical Ball</i>                                  |
| WB     | <i>Wave Ball</i>                                       |

## SUMÁRIO

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>20</b> |
| 1.1          | OBJETIVOS   | 21        |
| <b>1.1.1</b> | <b>Objetivo Geral</b>   | <b>21</b> |
| <b>1.1.2</b> | <b>Objetivos Específicos</b>  | <b>21</b> |
| <b>2</b>     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>  | <b>22</b> |
| 2.1          | TEORIA LINEAR DE ONDAS  | 22        |
| 2.2          | TANQUE DE ONDAS   | 27        |
| 2.3          | SENSORES DE ONDAS   | 29        |
| 2.4          | DINÂMICA DE CORPOS FLUTUANTES   | 31        |
| 2.5          | FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS  | 33        |
| <b>3</b>     | <b>METODOLOGIA</b>  | <b>36</b> |
| 3.1          | DESENVOLVIMENTO DO TANQUE NUMÉRICO DE ONDAS   | 36        |
| <b>3.1.1</b> | <b>Avaliação preliminar: Simulações com frentes de onda</b>                                 | <b>38</b> |
| <b>3.1.2</b> | <b>Avaliação final: Simulações com geração contínua de ondas</b>                            | <b>38</b> |
| 3.2          | BIDIMENSIONALIZAÇÃO DO PROBLEMA   | 42        |
| 3.3          | SIMULAÇÕES COM CORPOS FLUTUANTES  | 45        |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>  | <b>49</b> |
| 4.1          | DESENVOLVIMENTO DO TANQUE NUMÉRICO DE ONDAS   | 50        |
| <b>4.1.1</b> | <b>Avaliação preliminar: Simulações com frentes de onda</b>                                 | <b>50</b> |
| <b>4.1.2</b> | <b>Avaliação final: Simulações com geração contínua de ondas</b>                            | <b>50</b> |
| <b>4.1.3</b> | <b>Validação da geração de ondas</b>  | <b>56</b> |
| 4.2          | SIMULAÇÕES COM CORPOS FLUTUANTES  | 60        |
| <b>4.2.1</b> | <b>Recapitulação dos Resultados Experimentais que Motivaram a<br/>Investigação Numérica</b> | <b>60</b> |
| <b>4.2.2</b> | <b>Resultados das Simulações com Corpos Flutuantes</b>                                      | <b>61</b> |
| 4.3          | SÍNTESE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS  | 64        |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÕES</b>   | <b>69</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS</b>  | <b>71</b> |
|              | <b>APÊNDICE A</b>   | <b>73</b> |
|              | <b>APÊNDICE B</b>   | <b>85</b> |

|                         |           |
|-------------------------|-----------|
| <b>APÊNDICE C</b> ..... | <b>94</b> |
|-------------------------|-----------|

## 1 INTRODUÇÃO

De modo a garantir segurança, operabilidade e durabilidade de estruturas offshore, são necessários estudos sobre o comportamento dinâmico quando submetidas a ondas. Para essas avaliações, modelos em escala reduzida são ensaiados em tanques de prova onde são simuladas condições de mar obtidas em campo, utilizando-se sensores e registrando em bancos de dados (CARNEIRO, 2012).

Os experimentos envolvendo geração de ondas tendem a apresentar problemas com reflexão nos tanques na extremidade oposta ao gerador, interferindo nas características desejadas para a onda submetida ao corpo de prova, atrasando ensaios sequenciais. Para evitar que as ondas reflitam nas extremidades dos tanques, são empregados absorvedores cujo princípio pode ser passivo, como praias e meios porosos (CONDE et al., 2012), ou ativo, como o movimento compensatório do gerador de ondas com base no registro de sensores de altura de onda (CARNEIRO, 2007) (DE MELLO, 2012) (MICHIMA, 2007).

Nos laboratórios de estudos oceânicos, os sensores empregados nos sistemas de medição de onda são os capacitivos, resistivos e por ultrassom. Devido a diferentes limitações desses tipos de sensores, como influência das propriedades do fluido e necessidade de montagem de aparatos extras próximo a superfície livre, estudos vêm sendo feitos para analisar a viabilidade do uso de sensores ópticos com alvos refletivos visto que são empregados em diversas outras áreas da ciência (FUJARRA et al., 2009) (HANNES, 2020).

Hannes (2020) analisou a caracterização de ondas com sensores capacitivos e ópticos com alvos flutuantes realizados no Calibrador Hidrodinâmico do Tanque Numérico de Provas (CH-TPN), do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, observando uma diferença entre os dados obtidos pelos dois tipos de sensores, entretanto, não ficou clara a fonte dessa divergência, deixando hipóteses a serem postas à prova em estudos futuros.

Uma das hipóteses em aberto, é a possibilidade de o alvo utilizado ter a razão entre amplitude de movimento e amplitude de onda com valor diferente de um para a faixa de frequências de onda experimentadas, tal razão é denominada função de transferência ou *Response Amplitude Operator* (RAO). Nesse cenário, o alvo refletivo teria amplitude de movimento diferente da amplitude da onda, ocasionando uma medição incorreta das propriedades da onda (HANNES, 2020).

Assim, o presente estudo propõe completar tais raciocínios e dirimir as dúvidas metodológicas baseando-se na simulação numérica dos experimentos avaliados por Hannes (2020), paralelo a uma avaliação da curva da função de transferência do

alvo refletivo para detectar, na curva, a posição da faixa de frequências de onda dos experimentos. Para tornar possível a investigação proposta, é desenvolvido, com as dimensões do CH-TPN, um tanque numérico de ondas, ou *Numerical Wave Tank* (NWT), dentro do software OpenFOAM 9, onde foram realizadas as simulações. Tal desenvolvimento consistiu no estudo, teste e seleção de estratégias de absorção para posterior validação com base nos resultados via sensor convencional de base experimental utilizada por Hannes (2020). Como os experimentos abrangem baixas frequências, espera-se que os pontos, na curva de RAO, estejam localizados na região à esquerda, sendo o formato da curva nesse intervalo regido pelos parâmetros de rigidez, relacionado com o volume do corpo flutuante (JOURNÉE; MASSIE, 2001).

## 1.1 OBJETIVOS

Pondo em prova a hipótese do RAO do alvo ser o motivo da imperfeita correlação entre resultados de sensores ópticos e capacitivos, propõe-se os seguintes objetivos.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Investigar, a partir de simulações numéricas, o impacto da função de transferência de alvos refletivos utilizados na medição da altura de ondas por meio de rastreamento óptico.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Encontrar uma estratégia de absorção passiva que garanta adequada geração de ondas contínuas no NWT através da avaliação do desempenho de diferentes opções;
- Validar a geração de ondas no NWT a partir dos resultados da base experimental;
- Determinar numericamente se a função de transferência do alvo refletivo flutuante guarda relação com as diferenças observadas entre medição de altura de onda por rastreamento óptico e por sensor convencional.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

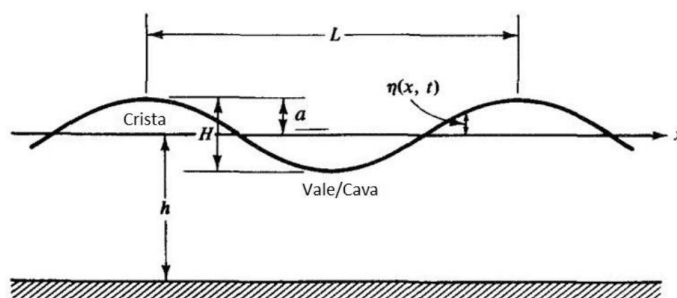
A fundamentação teórica para a investigação sobre o impacto da função de transferência de alvos refletivos na medição da altura de onda, inicia dando ciência da teoria de ondas de gravidade para entender o funcionamento de um tanque de ondas. Em seguida é feita uma revisão sobre sensores com ênfase na proposta da utilização do sensor de rastreamento óptico, cujo movimento é descrito por meio da dinâmica de um corpo flutuante. Ao final é apresentada a teoria quanto ao equacionamento baseado na teoria linear de ondas utilizado na ferramenta numérica computacional OpenFOAM.

### 2.1 TEORIA LINEAR DE ONDAS

De acordo com Young e Babanin (2020), ondas de gravidade e sua interferência em corpos flutuantes são importantes objetos de estudo, pois relacionam-se com diferentes segmentos das ciências navais e oceânicas, desde tópicos ambientais e oceanográficos até temas envolvendo interação fluido-estrutura. Tais ondas são formadas na interface entre ar e água e sofrem influência da gravidade que tem papel restaurador (ELMORE; HEALD, 1969).

Dean e Dalrymple (1991) descrevem uma onda genérica por seu comprimento, profundidade da região de propagação e altura, sendo esses os parâmetros principais, já que todos os outros são função desses. A Figura 1 ilustra a disposição dos parâmetros, onde o comprimento de onda  $L$  é a distância horizontal entre duas cristas ou cavas, o período  $T$  é o intervalo de tempo que a onda leva para percorrer  $L$ , a altura de onda  $H$  é a distância vertical entre valores máximos e mínimos,  $a$  é a amplitude, sendo este valor a metade de  $H$  e  $h$  é a profundidade local em repouso, ou seja, a distância entre o fundo e o ponto em que a elevação instantânea  $\eta(x, t)$  tem valor nulo.

Figura 1 – Parâmetros de uma onda



Fonte: Hannes (2020, p. 22).

O equacionamento que modela matematicamente as ondas de gravidade pode ser visto em detalhes em Chakrabarti (1987), e leva em consideração o fluido ideal, irrotacional e regime permanente. Para isso, deve-se respeitar a equação da continuidade (Equação 1)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

onde  $u$ ,  $v$  e  $w$  são as componentes da velocidade  $\mathbf{U}$  nas três direções cartesianas  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente. Em termos vetoriais, a equação da continuidade fica na forma da Equação 2.

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2)$$

Assumindo a hipótese de fluido irrotacional, a velocidade do escoamento pode ser descrita a partir de uma função potencial (Equação 3), de modo que

$$\mathbf{U} = -\nabla\phi \quad (3)$$

Ao substituir a função potencial na equação de continuidade, obtém-se a Equação (4) de Laplace

$$\nabla^2\phi = \frac{\partial^2\phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4)$$

A Equação (5) de Bernoulli, responsável por descrever a cinética da onda, é obtida a partir da equação de movimento de Cauchy e é utilizada assumindo as hipóteses de fluido ideal e irrotacional.

$$\rho \frac{\partial\phi}{\partial t} + p + \rho gy + \frac{1}{2}\rho \left[ \left( \frac{\partial\phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial\phi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial\phi}{\partial z} \right)^2 \right] = f(t) \quad (5)$$

onde  $p$  é a pressão,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\rho$  é a massa específica do fluido e  $f(t)$  é uma função genérica.

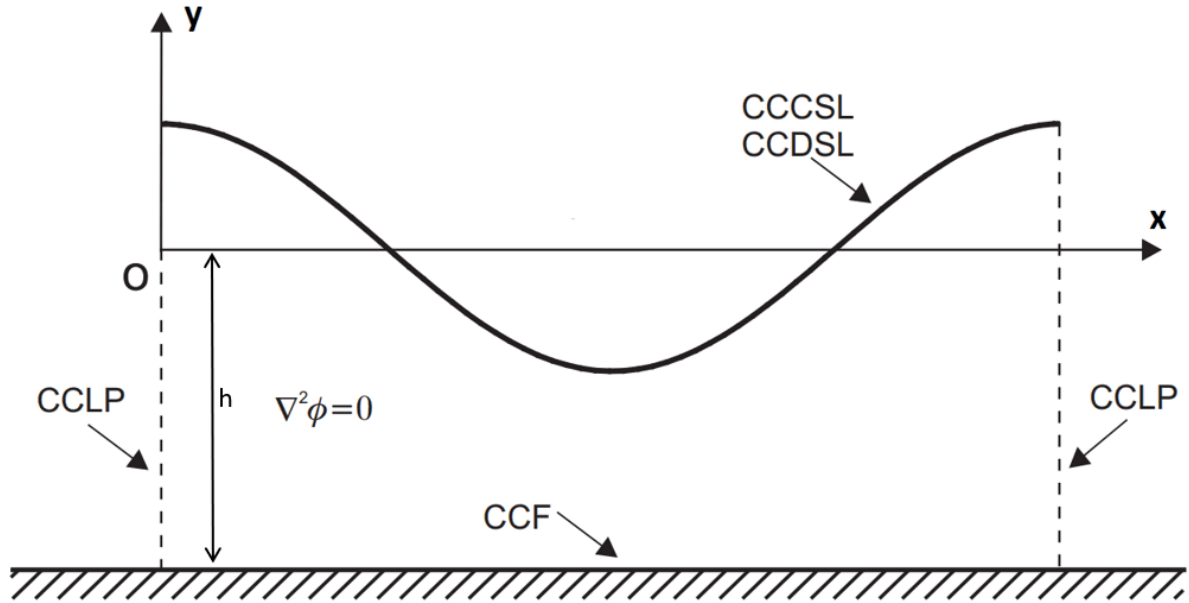
Assumindo a linha de corrente onde a derivada temporal de  $\phi$  é nula, a Equação (6) de Bernoulli é simplificada para

$$p + \rho gy + \frac{1}{2}\rho(u^2 + v^2 + w^2) = \text{constante} \quad (6)$$

De modo a solucionar o problema envolvendo equações diferenciais, considerando um caso bidimensional cujas direções são  $x$  e  $y$ , Dean e Dalrymple (1991) detalham condições de contorno dinâmicas e cinemáticas, que são posteriormente esquematizadas e resumidas por Carneiro (2007) na Figura 2, para um volume de controle que contempla uma onda de gravidade.



Figura 2 – Condições de contorno do volume de controle



Fonte: Adaptado de Carneiro (2007, p. 31).

A condição de contorno de fundo (CCF) garante que os efeitos da onda não penetrem nessa superfície considerando uma condição de velocidade vertical nula no fundo (Equação 7).

$$\frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{em } y = -h \quad (7)$$

A condição de contorno dinâmica da superfície livre (CCDSL) (Equação 8) é obtida a partir da Equação de Bernoulli (Equação 5) considerando a pressão atmosférica constante fora do fluido.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] + g\eta = 0 \quad \text{em } y = \eta(x, t) \quad (8)$$

Já a condição de contorno cinemática da superfície livre (CCCSL), garante que uma partícula localizada na superfície livre em um instante de tempo permanecerá na superfície livre (DEAN; DALRYMPLE, 1991), de modo que (Equação 9):

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \phi}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0 \quad \text{em } y = \eta(x, t) \quad (9)$$

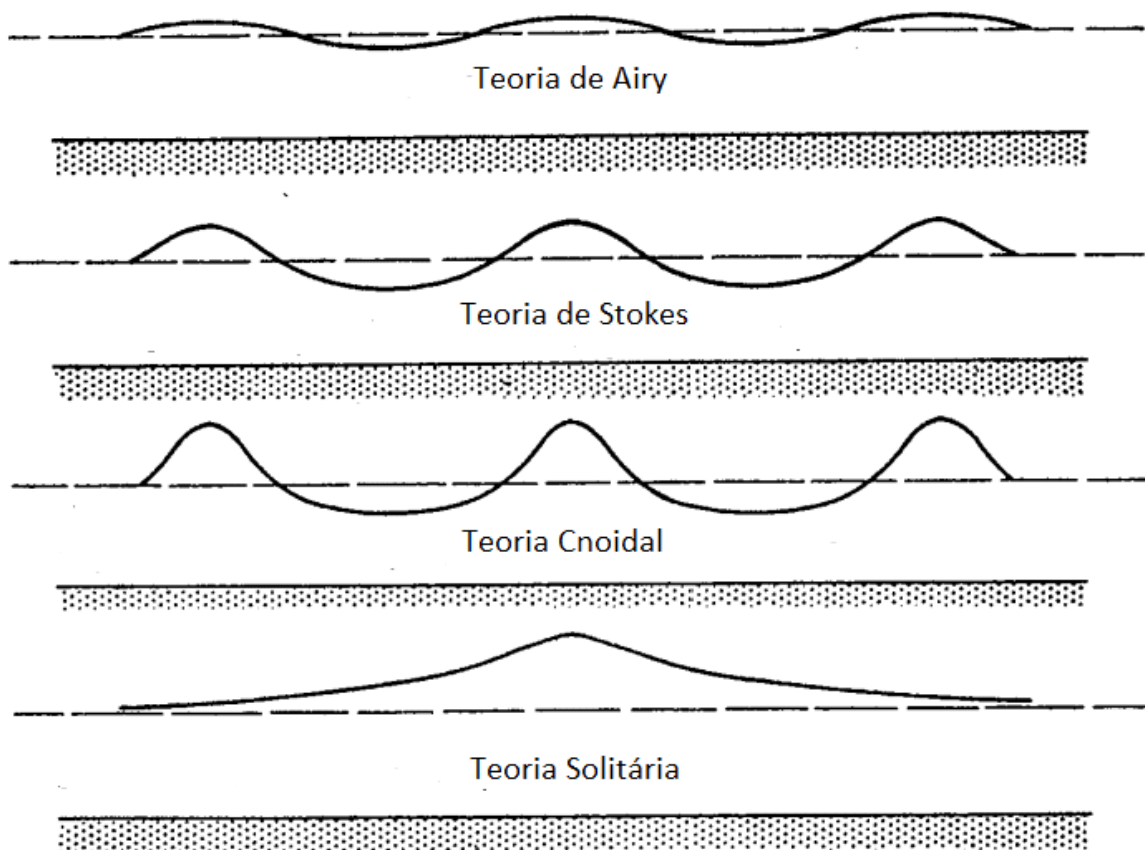
Por fim, a condição de contorno lateral periódica (CCLP), garante a periodicidade espacial e temporal do escoamento na entrada e saída do volume de controle (DEAN; DALRYMPLE, 1991) (Equações 10 e 11).

$$\phi(x, t) = \phi(x + L, t) \quad (10)$$

$$\phi(x, t) = \phi(x, t + T) \quad (11)$$

O potencial de velocidades  $\phi$  do problema deve satisfazer a equação de Laplace juntamente com as condições de contorno apresentadas e tem um grau de complexidade elevado, visto que a superfície livre varia com o tempo e os termos das condições de contorno não são lineares. As teorias de ondas propostas ao longo dos anos tratam de diferentes estratégias para a solução desse problema e geram diferentes padrões de cristas e cavas, diminuindo a simetria de cristas e cavas em relação à linha d'água conforme eleva-se o grau da teoria, apresentadas na Figura 3, servindo como opções para diferentes modelagens considerando o fundo plano e ondas progressivas (CHAKRABARTI, 1987).

Figura 3 – Formatos de ondas para diferentes teorias



Fonte: Adaptado de Wilson (1963) apud Chakrabarti (1987).

Segundo Chakrabarti (1987), a teoria mais simples e útil é a teoria de Airy para pequenas amplitudes, também conhecida como teoria linear, que é fundamentada na hipótese de que a amplitude é baixa frente à profundidade e ao comprimento da onda. Sendo assim, possível, linearizar as condições de contorno da superfície livre.

É assumido que a solução para  $\phi$  tem a forma de uma série de potências em função de um parâmetro de perturbação adimensional  $\varepsilon$ , como mostra a Equação 12

$$\phi = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \phi_n \quad (12)$$

onde  $\varepsilon$  é definido em função da declividade  $\delta$  dada por  $H/L$  na forma da Equação 13,

$$\varepsilon = \pi\delta = \pi \frac{H}{L} = \frac{kH}{2} \quad (13)$$

com  $k$  sendo o número de onda.

Analogamente à Equação 12, pode-se definir a elevação de onda como na Equação 14.

$$\eta = \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n \eta_n \quad (14)$$

Pela hipótese inicial, considerando apenas o primeiro termo das séries e combinando com as condições de contorno de superfície, obtém-se as Equações 15 e 16.

$$\eta_1 = -\frac{1}{g} \left( \frac{\partial \phi_1}{\partial t} \right) \quad \text{em } y = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial^2 \phi_1}{\partial t^2} + g \frac{\partial \phi_1}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

A CCF permanece inalterada e a CCPL considera a celeridade da onda  $c = L/T$  para formular a periodicidade  $\lambda = x - ct$ . Ao se aplicar separação de variáveis no problema (CHAKRABARTI, 1987), o potencial pode ser escrito como na Equação 17 por meio das duas funções auxiliares  $Y$  e  $\Lambda$ .

$$\phi_1 = Y(y)\Lambda(\lambda) \quad (17)$$

Substituindo a condição inicial de  $\eta_1(0, 0) = H/2$ , é obtida a Equação 18 para o primeiro termo da série do potencial de velocidades  $\phi$ .

$$\phi = \frac{gH}{2\omega} \frac{\cosh[k(h+y)]}{\cosh(kh)} \text{sen}[k(x-ct)] \quad (18)$$

onde  $\omega = kc$  é a frequência da onda em rad/s.

Substituindo o valor de  $\phi$  na Equação de Laplace (4), combinada com as condições de contorno, obtém-se a relação de dispersão (Equação 19).

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (19)$$

Dado um conjunto de ondas progressivas, a relação de dispersão descreve a maneira como a componente de cada frequência se separará devido ao seu valor de velocidade, onde ondas de maior período propagam-se com maior velocidade (DEAN; DALRYMPLE, 1991). Por meio da relação de dispersão pode-se apresentar a celeridade e comprimento de onda como nas Equações 20 e 21, respectivamente.

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (20)$$

$$c = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (21)$$

Para Dean e Dalrymple (1991), a razão entre a profundidade  $h$  e comprimento de onda  $L$ , chamada de profundidade relativa, possibilita a simplificação das expressões por meio de limites assintóticos da função hiperbólica como apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Simplificações das expressões nos limites assintóticos

| Condição             | Limites   | Simplificação assintótica | L  | C  |
|----------------------|---|---------------------------|--|--|
| Águas Rasas          | $\frac{h}{L} < 1/20$<br>$kh < \pi/10$               | $\tanh kh \approx kh$     | $L = \frac{gT^2 kh}{2\pi}$                                 | $\sqrt{gh}$  |
| Águas Intermediárias | $1/20 < \frac{h}{L} < 1/2$<br>$\pi/10 < kh < \pi/2$ | $\tanh kh$                | $L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$ | $c = \frac{gT}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)$ |
| Águas Profundas      | $\frac{h}{L} > 1/2$<br>$kh > \pi/2$                 | $\tanh kh \approx 1$      | $L_0 = \frac{gT^2}{2\pi}$                                  | $c_0 = \frac{gT}{2\pi}$                                  |

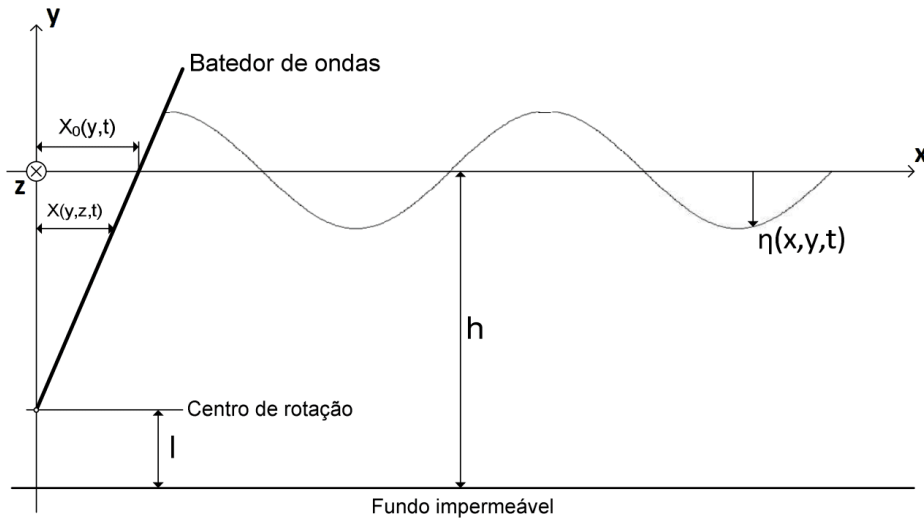
Fonte: Hannes (2020, p. 28).

Este estudo utiliza dados obtidos com ensaios em tanques de geração de onda em condições de pequenas amplitudes e águas profundas, portanto a teoria de Airy é satisfatória. O detalhamento que tange as outras teorias de onda podem ser encontrados em Dean e Dalrymple (1991), Chakrabarti (1987) e Elmore e Heald (1969).

## 2.2 TANQUE DE ONDAS

Com a teoria de ondas apresentada, podem ser melhor descritos os sistemas que compõem um tanque gerador de ondas. Os experimentos realizados em estudos anteriores a este foram feitos em um gerador do tipo flap, esquematizado na Figura 5.

Figura 5 – Gerador do tipo flap



Fonte: Adaptado de De Mello (2012, p. 26).

De maneira simplória, o funcionamento de geradores tipo flap baseia-se no impulso periódico da água para a formação de ondas, onde a frequência, amplitude e centro de rotação impactam nas características da onda gerada.

O equacionamento é feito com base na teoria linear, a qual, segundo Dean e Dalrymple (1991), descreve satisfatoriamente geradores de onda relacionando a amplitude do movimento da extremidade do flap, denominado stroke  $St$ , com a altura da onda gerada, apresentado na Equação 22 para um caso com centro de rotação localizado no fundo do tanque, cuja dedução pode ser vista com mais detalhes na obra.

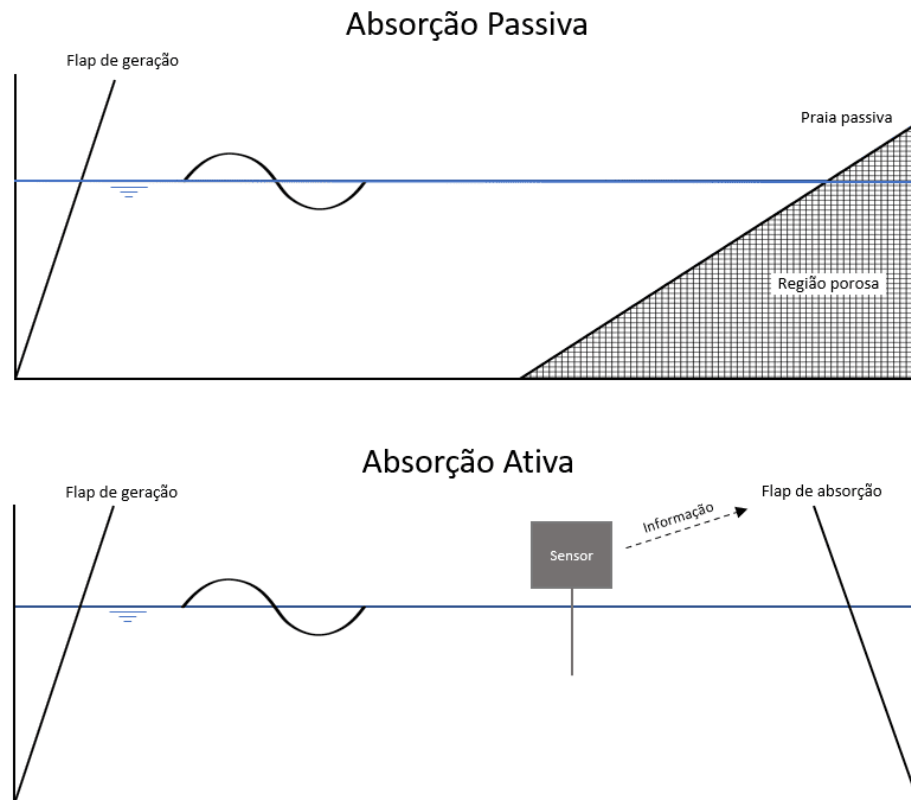
$$\frac{H}{S_t} = 4 \left( \frac{\sinh(kh)}{kh} \right) \frac{kh \sinh(kh) - \cosh(kh) + 1}{\sinh(2kh) + 2kh} \quad (22)$$

Outro aspecto importante em geradores de onda é a capacidade de evitar a reflexão das ondas incidentes nas paredes. A reflexão é consequência da energia da onda incidente que não foi absorvida pelo obstáculo e limita a duração dos ensaios ao alterar as características da onda pela adição de uma componente de reflexão. A razão entre alturas das ondas refletida  $H_R$  e incidente  $H_I$  é chamada de coeficiente de reflexão  $C_R$  (Equação 23).

$$C_R = \frac{H_R}{H_I} \quad (23)$$

O coeficiente pode ser utilizado em conjunto com uma tolerância de 5% como proposto por Chakrabarti (1987). Como forma de manter esse valor o menor possível, são utilizados absorvedores que podem ser divididos entre passivos e ativos, esquematizados na Figura 6.

Figura 6 – Absorvedores passivos e ativos



Fonte: Autor (2022).

Absorvedores passivos consistem em sistemas compostos majoritariamente por obstáculos como praias, degraus ou meios porosos com o objetivo de minimizar a energia da onda incidente na parede do tanque. Já os absorvedores ativos partem do princípio de utilizar medições de frequência e altura de onda para alimentar um sistema reativo que, segundo Bhattacharyya (1978), pode ou movimentar a parede, flap, cunha ou pistão de modo a evitar a reflexão, ou recalcular continuamente o movimento do gerador para compensar a contribuição da reflexão. Um sistema de absorção pode conter uma combinação de diferentes absorvedores passivos e ativos (CARNEIRO, 2012).

### 2.3 SENSORES DE ONDAS

O uso de sensores para monitoramento de altura de onda é essencial tanto para o funcionamento de absorvedores ativos, quanto para a própria instrumentação dos ensaios. Desse modo, a qualidade dos resultados dos experimentos está diretamente relacionada com os sensores selecionados. Atualmente, para a aplicação naval e oceânica são utilizados em laboratório majoritariamente sensores resistivos, capacitivos e por ultrassom, cujos princípios de funcionamento bem como aspectos positivos e

negativos são apresentados na Figura 7.

Figura 7 – Prós e contras dos tipos de sensores

| Tipo de sensor | Princípio de funcionamento   | Prós  | Contra  |
|----------------|--|---|---|
| Capacitivo     | Capacitância elétrica entre duas hastes revestidas e imersas na água.          | Escala de medição contínua.<br>Fácil montagem.<br>Fácil conexão ao sistema de aquisição de dados.   | Necessita isolamento galvânica.<br>Precisam de calibração para o uso.<br>Sofrem com histerese por tensão superficial da água.<br>Sujeira que adere nas hastes provoca erro de medição.  |
| Resistivo      | Resistência elétrica entre duas hastes imersas na água.                        | Escala de medição contínua.<br>Fácil montagem.<br>Fácil conexão ao sistema de aquisição de dados.   | Necessita isolamento galvânica.<br>Precisam de calibração para o uso.<br>Sofrem com histerese por tensão superficial da água.<br>Sujeira que adere nas hastes provoca erro de medição.  |
| Ultrassônico   | Tempo de voo de pulso-eco acústico dentro de uma guia de ondas imersa na água. | Calibração simplificada; a partir da velocidade de propagação do som na água.<br>Estável eletricamente e com a característica físico-química da água. | Necessita uso de guia de ondas.<br>Sensível à desalinhamentos de montagem.<br>Amplitude do eco é sensível à propagação do som dentro da guia de ondas.<br>Menisco da superfície da água pode causar atenuação no eco acústico.<br>Sujeira e bolhas de ar dentro da guia de ondas provocam atenuação acústica, ocasionando perda de leitura ou leitura falsa da linha de água. |

Fonte: De Mello (2012, p. 53).

Uma alternativa atrativa é o rastreamento por imagem com sensores ópticos utilizando alvos refletivos (Figura 8) e um conjunto de câmeras pelo fato de terem aspecto construtivo simples além de pouco invasivo, permitirem o mapeamento de grandes áreas ao posicionar um grande número de alvos e pela etapa de calibração ser mais simples em relação aos outros tipos de sensores. Essa tecnologia recentemente vem sendo aprimorada, refletindo em custos reduzidos e acurácia aumentada (FUJARRA et al., 2009).

Figura 8 – Exemplos de alvos refletivos



Fonte: B&L Engineering (2022). Disponível em: <https://bleng.com/>

O sistema de rastreamento óptico é composto por pelo menos duas câmeras para triangulação dos registros, alvos refletivos e um software para rastreamento do

movimento dos alvos nos vídeos (HANNES, 2020).

Investigações experimentais feitas por Fujarra et al. (2009) e sequenciadas por Hannes (2020) compararam o desempenho dos sensores ópticos frente aos capacitivos, observando boa mas não perfeita correlação entre os resultados para ondas regulares, as principais diferenças observadas foram nas medições dos cavados das ondas. Hannes (2020) também fez um levantamento de uma série de possíveis causas das discordâncias observadas propondo futuros estudos para otimização:

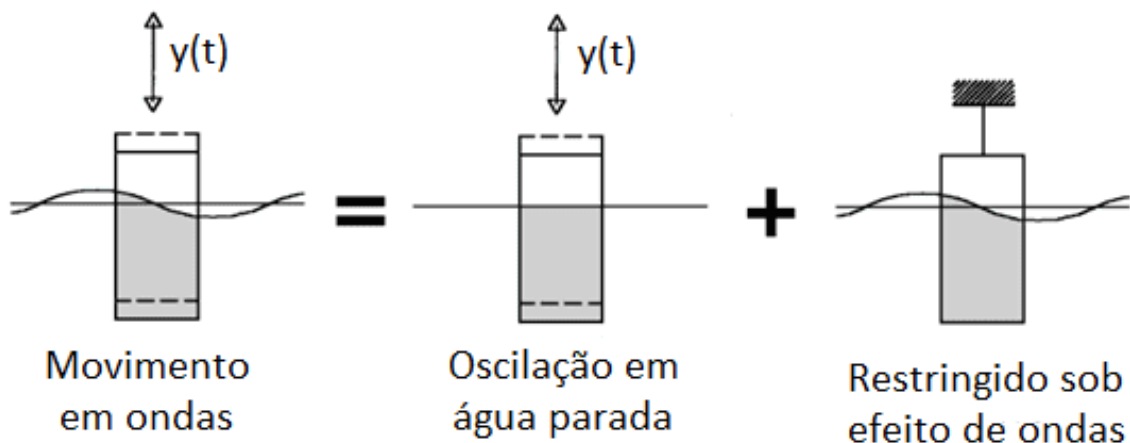
- A possibilidade de haverem reflexos do sinal óptico nas cavas das ondas, fazendo com que o software identifique erroneamente a posição do alvo;
- Forças dissipativas entre o alvo e o cabo que restringia seu movimento apenas na direção vertical;
- Possibilidade do alvo não se mover com mesma amplitude e fase que a onda por conta de sua função de transferência (*Response Amplitude Operator* ou RAO).

## 2.4 DINÂMICA DE CORPOS FLUTUANTES

A terceira problemática levantada será abordada neste trabalho e seu entendimento parte do equacionamento da dinâmica do movimento vertical (*Heave*) de um corpo flutuante sujeito a ondas utilizando a 2ª Lei de Newton considerando que seu movimento será composto, como pode ser visto na Figura 9, pela superposição das forças hidrostáticas  $F_h$  e forças impostas pela onda no corpo parado  $F_o$  (JOURNÉE; MASSIE, 2001) (Equação 24).

$$\frac{d}{dt}(\rho V \cdot \dot{z}) = \rho V \cdot \ddot{z} = F_h + F_o \quad (24)$$

Figura 9 – Composição do movimento de corpo flutuante





O primeiro termo da superposição refere-se ao decaimento do corpo, onde o corpo oscila sujeito a uma força hidromecânica até atingir o equilíbrio. Pela 2ª Lei de Newton:

$$m\ddot{z} = F_h \quad (25)$$

$$F_h = -c_1\ddot{z} - c_2\dot{z} - c_3z \quad (26)$$

Reescrevendo a expressão para o movimento de decaimento temos a Equação 27.

$$(m + c_1) \cdot \ddot{z} + c_2 \cdot \dot{z} + c_3 \cdot z = 0 \quad (27)$$

Para o segundo termo da superposição, força no corpo causada pelas ondas pode ser escrita em função da elevação da onda como mostra a Equação 28.

$$F_o = c_4\ddot{\eta} + c_5\dot{\eta} + c_6\eta \quad (28)$$

Desse modo, a Equação (29) de movimento do corpo flutuando verticalmente em ondas é obtida substituindo as expressões na Equação 24.

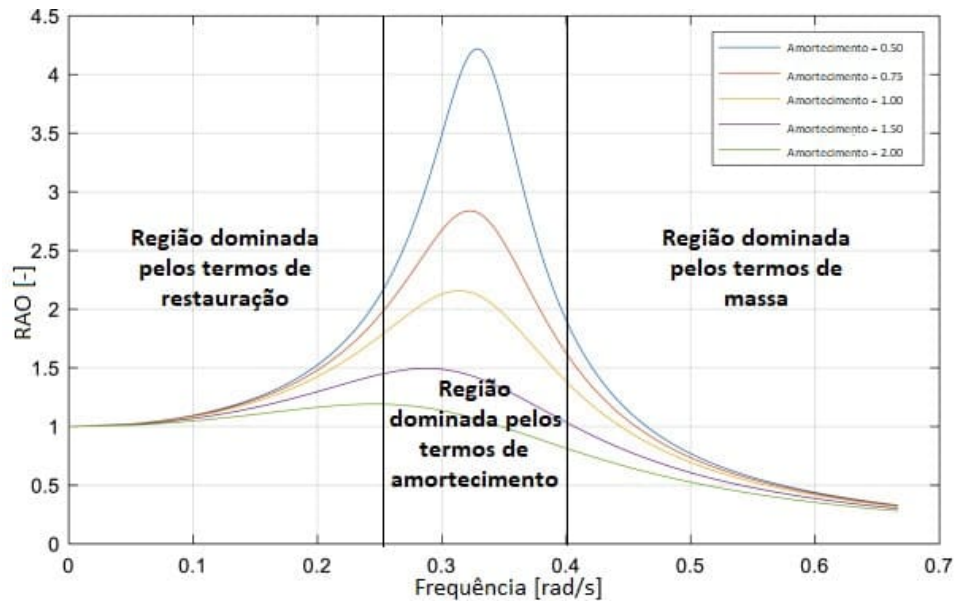
$$(m + c_1)\ddot{z} + c_2\dot{z} + c_3z = c_4\ddot{\eta} + c_5\dot{\eta} + c_6\eta \quad (29)$$

Solucionando esta equação diferencial ao substituir uma solução proposta na forma de uma função trigonométrica com amplitude  $Z$ , obtém-se a seguinte expressão (Equação 30) , conhecida como função de transferência ou *Response Amplitude Operator* (RAO):

$$\frac{Z}{\eta_a} = e^{-kT} \sqrt{\frac{(c_6 - c_4\omega^2)^2 + (c_5\omega)^2}{(c_3 - (m + c_1)\omega^2)^2 + (c_2\omega)^2}} \quad (30)$$

Essa expressão representa a razão adimensional entre amplitudes do movimento de um corpo cilíndrico e da onda, que pode ser generalizada para qualquer corpo já que a expressão é função de características da onda, geometria do corpo e da interação deste com a água, como a massa adicional  $c_1$ , coeficiente de amortecimento hidrodinâmico  $c_2$  e coeficiente de restauração hidrodinâmica  $c_3$ . Tipicamente, o RAO tem os formatos característicos apresentados na Figura 10, com valor e posição de pico dependentes, respectivamente, do fator de amortecimento e a razão entre o termo de restauração e o de massa.

Figura 10 – Formatos característicos das curvas de RAO de *Heave* e influência de parâmetros



Fonte: Adaptado de Whittaker, Folley e Hancock (2020).

Ainda na Figura 10 é possível identificar que o tamanho da região com RAO próximo de um é dominado pelo termo de restauração que por sua vez é regido pelo volume submerso do corpo. Dada uma onda de frequência  $\omega$ , caso o RAO do corpo flutuante tenha valor diferente de 1 para essa frequência o corpo estará sujeito a um movimento de amplitude diferente da onda, resultando em uma medição incorreta da altura.

## 2.5 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Como forma de investigar essa problemática com baixo custo financeiro, é proposta a utilização do software de fluidodinâmica computacional OpenFOAM 9, que utiliza o método dos volumes finitos. Para a simulação de ondas com diferentes características nas condições com e sem alvo flutuante para, posteriormente, compararem-se as amplitudes medidas, é utilizada a extensão olaFlow desenvolvida como continuação do trabalho de Higuera (2015).

O solver utilizado soluciona tridimensionalmente as equações *Volume Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes* (VARANS) para dois fluidos, no caso água e ar, utilizando discretização em volumes finitos e o método *volume of fluid* (VOF) (HIGUERA, 2016). Segundo Berberovic et al. (2009), cada fase de um  $i$ -ésimo fluido é descrita pela fração de ocupação de volume  $\alpha_i$  para cada célula.

Para as simulações com corpos flutuantes, é adotado, além do solver anteriormente mencionado, um solver para movimento de até seis graus de liberdade

onde as formulações matemáticas podem ser vistas na sequência.

As equações de governo utilizadas são as conservações de massa (Equação 2) e movimento (Equação 31) para cada um dos dois fluidos

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \frac{1}{i} \rho u v \right] = -i \frac{\partial p^*}{\partial x} + i g y \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu_{eff} \frac{\partial u}{\partial y} \right] - [TF] \quad (31)$$

onde  $\rho$  é a densidade, constante com valor dependendo de qual fluido preenche a célula,  $i$  é o índice de porosidade,  $p^*$  é a pressão pseudo-dinâmica,  $\mu_{eff}$  é a viscosidade dinâmica efetiva e  $TF$  são os termos de fechamento, os quais podem ser vistos com mais detalhes em Higuera (2016).

Simultaneamente com essas equações, são resolvidas as equações de transporte da fração de volume  $\alpha$  para cada fase de fluido (Equações 32 e 33)

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \left( \frac{1}{i} \right) \nabla \cdot (\mathbf{U}_{agua} \alpha) = 0, \quad (32)$$

$$\frac{\partial(1 - \alpha)}{\partial t} + \left( \frac{1}{i} \right) \nabla \cdot [\mathbf{U}_{ar}(1 - \alpha)] = 0, \quad (33)$$

$\alpha$  é a fração de volume tendo valor 1 para água e 0 para ar, valores intermediários indicam células na superfície livre. Note que o campo de velocidades é separado em um campo para cada fluido, o campo resultante na célula é dado pela Equação 34.

$$\mathbf{U} = \alpha \mathbf{U}_{agua} + (1 - \alpha) \mathbf{U}_{ar} \quad (34)$$

A Equação 32 pode ser rearranjada na forma da Equação 35, fornecendo uma equação de governo unificada.

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \left( \frac{1}{i} \right) \nabla \cdot (\mathbf{U} \alpha) + \left( \frac{1}{i} \right) \nabla \cdot [\mathbf{U}_r \alpha (1 - \alpha)] = 0 \quad (35)$$

A velocidade  $\mathbf{U}_r = \mathbf{U}_{agua} - \mathbf{U}_{ar}$  é chamada de velocidade de compressão pois esse termo tem o papel de minimizar a quantidade de células com valores de alpha entre 0 e 1, afinando a região da superfície livre (BERBEROVIC et al., 2009).

A solução das equações é feita utilizando o solver olaFlow, baseado no interFoam nativo do OpenFOAM, estes solvers utilizam o algoritmo PIMPLE que é uma junção dos algoritmos PISO e SIMPLE tendo estrutura semelhante ao PISO mas permitindo relaxação para facilitar a convergência. A estrutura do algoritmo para o solver interFoam pode ser vista com mais detalhes com aplicação em VOF podem ser encontrados em Jasak (1996) e Versteeg e Malasekera (2007).

A implementação numérica da geração de ondas é semelhante para as diferentes teorias de ondas abrangidas pelo olaFlow, de maneira resumida, consiste na leitura dos dados de entrada de modo a atualizar a superfície livre a cada passo de tempo. Internamente, as alturas de ondas são medidas por meio do parâmetro

alpha para ativar absorvedores de onda na entrada e na saída, similarmente a tanques de onda reais. Maiores detalhes acerca da implementação como seu impacto na estabilidade da simulação podem ser vistos em Higuera (2016).

O cálculo do movimento de corpo rígido flutuante é feito por meio do solver olaDyMFlow que é a incorpora o solver de movimento de corpos rígidos sixDoFRigidBodyMotion nativo do OpenFOAM ao solver olaFlow. As Equações (36 e 37) de movimento são baseadas na conservação de momento linear e angular da seguinte maneira:

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m} \quad (36)$$

$$\boldsymbol{\theta} = \mathbf{I}_m^{-1} \cdot \mathbf{M} \quad (37)$$

onde  $\mathbf{a}$  e  $\boldsymbol{\theta}$  são as acelerações lineares e angulares do corpo,  $m$  e  $\mathbf{I}_m$  são a massa e os momentos de inércia de massa do corpo. Os termos  $\mathbf{F}$  e  $\mathbf{M}$  são as forças e momentos externos expressos pelas Equações 38 e 39.

$$\mathbf{F} = \iint_S (\rho \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}) \cdot d\mathbf{S} + \mathbf{F}_{amarr} + m\mathbf{g} \quad (38)$$

$$\mathbf{M} = \iint_S \mathbf{r}_{CS} \times (\rho \mathbf{I} + \boldsymbol{\tau}) \cdot d\mathbf{S} + \mathbf{r}_{CM} \times \mathbf{F}_{amarr} + \mathbf{r}_{CG} \times m\mathbf{g} \quad (39)$$

sendo  $\boldsymbol{\tau}$  a tensão viscosa,  $\mathbf{I}$  a matriz identidade e  $S$  a superfície do corpo flutuante.  $\mathbf{F}_{amarr}$  é a força de amarração do corpo, caso exista, enquanto  $\mathbf{r}_{CS}$ ,  $\mathbf{r}_{CM}$  e  $\mathbf{r}_{CG}$  são os braços das forças hidrodinâmicas, de amarração e de gravidade, respectivamente.

Aplicando o esquema de integração de Newmark nas Equações 36 e 37 é possível obter os valores de velocidade e posição em cada direção para cada instante de tempo. As Equações 40 e 41 apresentam as formulações para a coordenada  $x$ .

$$\mathbf{u}_{n+1}^{k+1} = \mathbf{u}_n + \Delta t(\gamma \mathbf{a}_{n+1}^k + (1 - \gamma)\mathbf{a}_n) \quad (40)$$

$$\mathbf{x}_{n+1}^{k+1} = \mathbf{x}_n + \mathbf{u}_n \Delta t + \beta (\Delta t)^2 \mathbf{a}_{n+1}^k + (0.5 - \beta)(\Delta t)^2 \mathbf{a}_n \quad (41)$$

sendo  $\gamma$  e  $\beta$  parâmetros apresentados no esquema de Newmark e  $\Delta t$  o incremento temporal. Tipicamente são usados os valores  $\gamma = 0.5$  e  $\beta = 0.25$  que implicam no chamado método da aceleração média constante (CHEN et al., 2019). As equações são resolvidas para cada passo de tempo, o valor envolvendo  $k$  indica a célula tratada e o subscrito envolvendo  $n$  indica se o valor utilizado é do passo atual ou anterior.

### 3 METODOLOGIA

O presente capítulo apresenta detalhamentos acerca dos métodos e ferramentas utilizados para a execução do estudo, como também das justificativas para as abordagens e considerações adotadas.

De modo a criar-se um cenário em que fosse possível executar o estudo proposto, tornou-se necessário, antes de simular os corpos flutuantes, mover esforços para ser obtida uma geração de ondas confiável que reproduzisse adequadamente os parâmetros de entrada nas ondas geradas.

Assim, a metodologia do trabalho pode ser dividida em duas: o desenvolvimento do tanque numérico de ondas e a execução das simulações que fundamentam as principais discussões do estudo.

#### 3.1 DESENVOLVIMENTO DO TANQUE NUMÉRICO DE ONDAS

A necessidade de um prévio e específico estudo sobre a qualidade das ondas geradas no tanque numérico de ondas se deu por meio da identificação de interferência devido à suspeita de ocorrência de reflexão nas ondas geradas em testes iniciais dentro do software OpenFOAM 9 mesmo quando considerada a condição de absorção nativa da extensão olaFlow na parede oposta à geração. Nesses testes iniciais observou-se clara irregularidade nas amplitudes ao longo da direção de propagação da onda, sendo fortes indícios da ocorrência de reflexão.

O trabalho de Higuera (2015) posteriormente culminou na extensão olaFlow para geração de ondas e, como seu estudo abordava escoamentos em águas rasas, a absorção ativa foi implementada para tal condição. Posteriormente essa implementação foi passada para a extensão olaFlow, resultando na absorção defeituosa nos testes efetuados visto que todas as simulações ocorreriam em situações de águas profundas.

Buscando solucionar o problema, foram propostas estratégias para absorção passiva das ondas, inspirados por Conde et al. (2012), utilizando-se de praias e regiões porosas para tal. A Figura 11 ilustra os diferentes tipos de absorção passiva considerados, de cima para baixo, podem ser vistas as estratégias de absorção com região porosa tradicional, praia física e praia porosa.

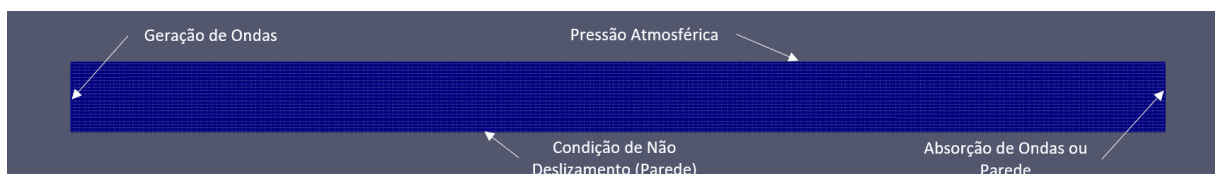
Figura 11 – Esquemático das Três Estratégias Consideradas para Absorção Passiva, sendo o domínio formado pelas regiões brancas e pretas



Fonte: Autor (2023).

A Figura 12 apresenta as principais condições de contorno consideradas nas simulações em regime bidimensionalmente forçado para avaliação e desenvolvimento do NWT, ou seja a malha é tridimensional com apenas uma célula nesta direção e são estabelecidas condições de contorno de simetria nas duas faces normais à terceira dimensão. Note que, na Figura 12 é apresentado todo o domínio, sem distinção entre as regiões com água e com ar. Nas malhas com praias físicas, a estas foram atribuídas a mesma condição de contorno de não deslizamento aplicada no fundo do tanque. Foi adotada uma condição de geração de ondas estática, de modo que não torna necessário o movimento da superfície, reduzindo o custo computacional, esta condição de contorno é baseada nas teorias de onda de Stokes e prescreve valores de velocidade e elevação da superfície a cada instante de tempo de modo a gerar a onda com os parâmetros introduzidos no setup. No topo foi considerada a condição de contorno *pressureInletOutletVelocity* que representa a superfície aberta para a atmosfera. A condição de absorção ativa do olaFlow implementada por Higuera (2015) baseia-se na geração de uma velocidade de correção calculada com o intuito de cancelar as ondas vindouras.

Figura 12 – Principais condições de contorno consideradas nas simulações



Fonte: Autor (2023).

### 3.1.1 Avaliação preliminar: Simulações com frentes de onda

Inicialmente, as propostas de absorção foram avaliadas considerando uma praia física 10° de inclinação e regiões porosas retangulares e em formato de praia de 10° com índice de porosidade de 50%, onde tal índice representa a porcentagem da região em que há poros. As estratégias foram combinadas com a absorção ativa implementada por Higuera (2015) nos casos sem praia física, casos apenas com a absorção ativa e sem nenhuma estratégia de absorção aplicada também foram simulados para comparação.

Tais simulações foram executadas em uma malha preliminar que permitisse uma rápida avaliação inicial, contendo 566 células na direção longitudinal e 65 na direção vertical, totalizando 36790 células. O domínio consistiu em uma região de 0.625m de altura, nos quais 0.425m foram preenchidos com água, e 10m de comprimento. Nos casos com praias e regiões porosas, estas se estenderam longitudinalmente da marca de 6.35m até os 10m. A avaliação de cada estratégia consistiu no monitoramento ao longo de 60s da altura de superfície livre de um ponto localizado 2m a jusante do gerador de ondas (chamado de *Numerical Probe* ou NP) após uma frente de ondas de 5 períodos não transientes de altura 23.8mm, período 0.714s e comprimento de onda 0.92m ser gerada. A medição da superfície livre nesta posição se deu por meio do algoritmo MULES que interpreta os valores do parâmetro  $\alpha$  ao longo de uma linha especificada, nesse caso a vertical no ponto da NP.

Fundamentado no solver interFoam, nativo do OpenFOAM, o solver olaFlow, que permite a geração das ondas, foi utilizado com os esquemas de interpolação aplicados nos casos tutoriais, em regime laminar, com discretização temporal de 0.01s e frequência de registro de resultados de 100Hz.

Tais simulações foram executadas em um notebook com processador Intel i7 de 11ª geração, com 16GB de memória RAM e as simulações todas levaram apenas alguns minutos para serem concluídas.

### 3.1.2 Avaliação final: Simulações com geração contínua de ondas

Após a avaliação inicial, pôde ser identificado que as estratégias eram promissoras e seguiu-se a busca por uma solução ótima ao fazer testes com geração contínua de ondas em uma malha mais refinada que seria também usada para as etapas posteriores do estudo. Os testes com geração contínua abrangeram diferentes índices de porosidade, bem como diferentes comprimentos de regiões porosas e praias de modo a avaliar a sensibilidade das características das ondas geradas a estes parâmetros.

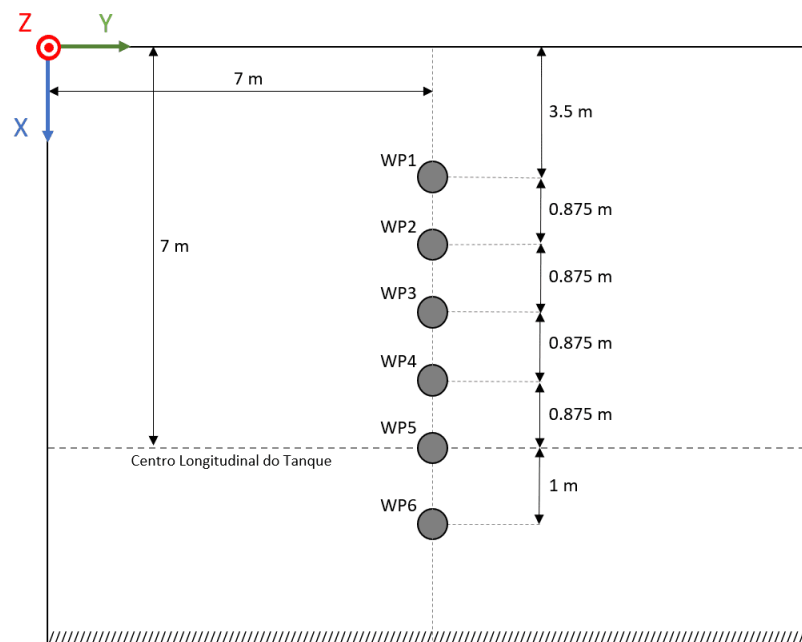
De modo a manter o mesmo grau de refino independentemente da onda a ser simulada, foi desenvolvida uma malha parametrizada por meio de linhas de código a

serem interpretadas pelo blockMesh, ferramenta de geração de malha do OpenFOAM. O script a ser executado pelo blockMesh recebe como parâmetros de entrada o período e altura da onda onde, pela hipótese de águas profundas, calcula comprimento de onda e profundidade necessária no tanque. Verticalmente, a malha é construída com 1.5 vezes o valor da profundidade para comportar a região com ar, e longitudinalmente é considerada uma região de interesse de 14 m, mesmo comprimento do CH-TPN da USP para ser realizada a posterior validação dos resultados, e um comprimento adicional exclusivo para a alocação das condições de absorção passiva a serem testadas.

Para discretização longitudinal do domínio, foi estabelecido o valor de 120 células por comprimento de onda. Já para discretização vertical, foi selecionado o valor de 20 células por altura de onda em uma região de refino que contempla duas alturas de onda e é centrada na linha d'água. Ambos os valores foram selecionados a partir da referência do estudo de Conde (2019). As regiões acima e abaixo da região de refino contam com um fator de crescimento de 50, de modo a proporcionar uma transição gradual entre as regiões. Diferentes valores de taxa de crescimento foram testados de modo a buscar a maior redução do custo computacional sem interferir nos resultados.

Para as simulações, foram estabelecidos pontos de rastreamento chamados de *Numerical Probes*, ou NPs, nas exatas posições longitudinais em que os sensores convencionais do trabalho de Hannes (2020), *Wave Probes*, ou WPs, foram alocados, como apresentado na Figura 13. Assim como para as simulações anteriores, foi utilizado o algoritmo MULES para medição da altura da superfície livre.

Figura 13 – Disposição das WPs nos ensaios da base experimental utilizada por Hannes (2020)



Fonte: Adaptado de Hannes (2020, p. 44).



As simulações com ondas contínuas foram executadas em regime laminar considerando a Onda 7 da base experimental utilizada por Hannes (2020), a qual tem altura de 70.86mm, período 1.55s e comprimento de onda 3.75m. A geração de ondas ocorreu ininterruptamente durante 100s de simulação e os 24 casos considerados para a avaliação são descritos na sequência:

- Caso 1: Sem absorção na parede oposta à geração no NWT;
- Caso 2: Absorção ativa do olaFlow na parede oposta à geração no NWT;
- Casos 3 e 4: Praias físicas de inclinação 10° e 20°;
- Casos 5 a 20: Regiões porosas retangulares com comprimentos de 32m, 16m, 8m e 4m;
- Casos 21 a 24: Regiões porosas em formato de praia de inclinação 10° com absorção ativa do olaFlow na parede oposta à geração;

onde foram considerados os índices de porosidade 30%, 50%, 70% e 90% para as estratégias que abordavam regiões porosas e os valores de comprimento para os Casos 5 a 20 foram selecionados por serem múltiplos ou frações de 16, que é aproximadamente o comprimento da praia de 10° na malha parametrizada para a onda em análise.

As simulações foram novamente executadas com o solver olaFlow, com os mesmos esquemas de interpolação das simulações anteriores e o incremento temporal foi selecionado de modo a garantir convergência por meio do critério de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL). A condição de CFL estabelece uma relação entre a discretização temporal e espacial da solução numérica de equações diferenciais parciais para garantir estabilidade na solução destes problemas (DE MOURA; KUBRUSLY, 2013). A Equação 42 apresenta o critério de estabilidade CFL para a direção longitudinal, onde  $u$  é a velocidade,  $\Delta t$  é o incremento temporal e  $\Delta x$  é o incremento espacial.

$$C_o = u \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1 \quad (42)$$

Percebe-se, pelo equacionamento, que quanto mais refinada a malha, menor deverá ser o  $\Delta t$ . Para evitar um estudo a parte do incremento temporal ideal, visto que o critério CFL teria de ser aplicado em ambas as direções do escoamento, optou-se por apenas testar diferentes valores de  $\Delta t$  e estabelecer um critério de parada caso o  $C_o$  ultrapassasse o valor unitário. Feitos os testes, o valor selecionado para o incremento temporal foi de 0.001s. Além disso, foi estabelecido um intervalo de 0.01s para registro dos resultados ao longo da simulação, o que garantiu resultados com frequência de aquisição de 100Hz.

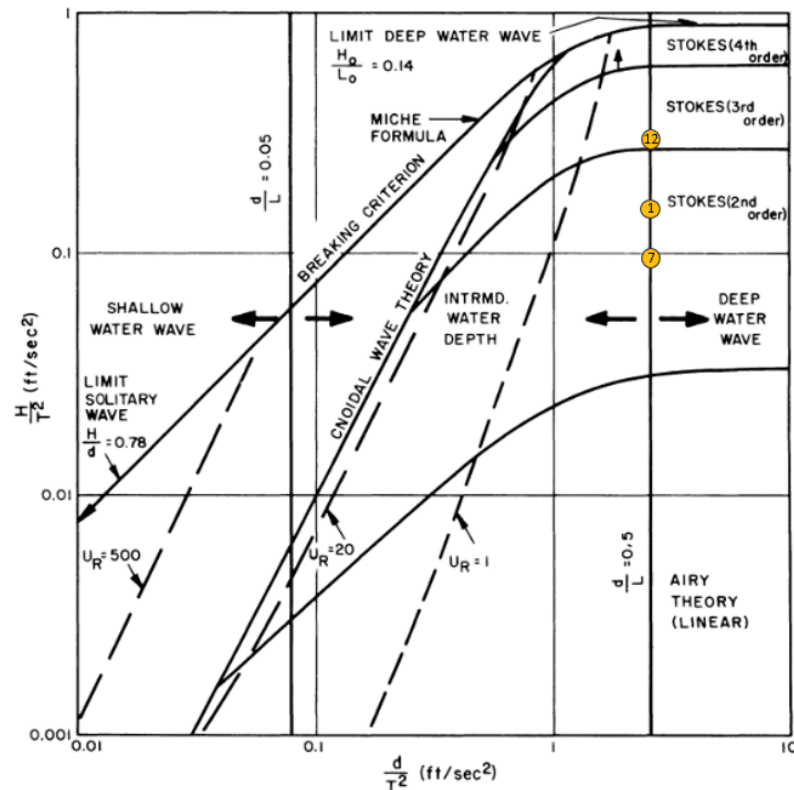
O procedimento de avaliação dos resultados alicerçou-se na conversão dos sinais temporais para o domínio da frequência a partir da aplicação da transformada rápida de Fourier ou *Fast Fourier Transform* (FFT) utilizando o software Octave. Os sinais de cada NP foram manualmente cortados por volta dos valores de 60s e

100s de modo a manter um número inteiro de períodos no sinal senoidal, o que é uma boa prática para a aplicação da FFT. O intervalo foi selecionado com o intuito de descartar qualquer eventual comportamento transiente, visto que a menor onda abordada nos experimentos, também a mais devagar, levaria 38.5s para retornar ao gerador considerando o comprimento total da malha e uma reflexão completa na extremidade.

A conversão do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência permitiu a obtenção da amplitude e frequência de oscilação em cada NP, valores que relacionam-se com a altura de onda e período em cada uma das posições longitudinais pré-selecionadas. Os casos simulados foram comparados entre si, a solução de absorção ótima foi escolhida utilizando como critério de seleção principal o menor desvio padrão entre medições.

Em sequência, foi verificado o desempenho da condição de absorção selecionada para, além da Onda 7, também as Ondas 1 e 12 de modo a cobrir os extremos do intervalo de valores ensaiados. A Tabela 1 resume os parâmetros principais das 3 ondas simuladas, bem como a quantidade de células de cada respectiva malha parametrizada e a teoria de onda mais adequada seguindo o diagrama presente na Figura 14, proposto por Le Méhauté (1976), onde os pontos em amarelo marcam a posição dos casos (Ondas 1, 7 e 12) a serem simulados.

Figura 14 – Diagrama para seleção das teorias de onda



Fonte: Adaptado de Le Méhauté (1976).

Tabela 1 – Número de células de cada uma das malhas finais

| Parâmetros Relacionados | Onda 1    | Onda 7    | Onda 12    |
|-------------------------|-----------|-----------|------------|
| Altura [mm]             | 12.98     | 70.86     | 200.00     |
| Período [s]             | 0.53      | 1.55      | 1.50       |
| Comprimento [m]         | 0.44      | 3.75      | 3.51       |
| Teoria de Onda          | Stokes II | Stokes II | Stokes III |
| Número de Células [-]   | 572880    | 95800     | 149568     |

Fonte: Elaborado pelo autor.

As simulações foram realizadas no cluster do Laboratório de Computação Científica - LabCC da Universidade Federal de Santa Catarina Centro Tecnológico de Joinville. O processador utilizado para rodar os casos foi um Intel Xeon CPU E5-2640 v420 com 20 cores, onde as simulações finais para as Ondas 1, 7 e 12 duraram, respectivamente, 1 dia e 22 horas, 2 horas e 18 minutos, e 11 horas e 20 minutos.

De modo a validar as simulações, os resultados para cada NP destes casos foram avaliados frente aos resultados experimentais das respectivas WPs. Com isso, pôde-se passar para a etapa de simulação da dinâmica dos corpos flutuantes.

### 3.2 BIDIMENSIONALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Em se tratando da avaliação de corpos flutuantes esféricos, a maneira mais correta de se realizar o estudo seria com simulações em domínios tridimensionais. No entanto, tais simulações, para manter o grau de discretização necessário para a adequada geração de ondas avaliado na etapa anterior, requeririam malhas com quantidade de células tal que os recursos computacionais disponíveis seriam excedidos. Dessa forma, foi proposta a verificação da viabilidade da bidimensionalização dos casos, substituindo os corpos esféricos por cilindros de mesmo raio.

Para tanto, foi utilizado o software potencial Maxsurf Motions para obter as curvas RAO do corpo esférico e de corpos cilíndricos para comparação utilizando o método dos painéis que, segundo Liburdy (2021), divide as regiões submersas do corpo em painéis em que são atribuídas funções para descrever a geometria e distribuição das forças hidrodinâmicas para, então, serem resolvidas as equações de Navier-Stokes para cada painel. Por se tratar de um software potencial, tais simulações não captam os efeitos viscosos da interação do corpo flutuante com o fluido, portanto as curvas RAO obtidas por este método serão utilizadas apenas para comparação da resposta de corpos esféricos e cilíndricos. As geometrias consideradas para a comparação foram as seguintes:

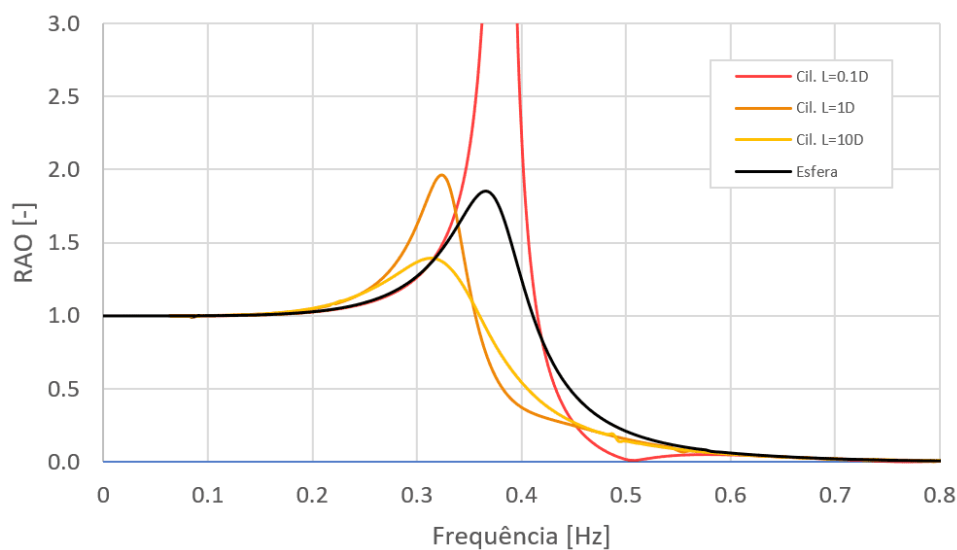
- Esfera de 38mm de diâmetro com calado de 10mm;
- Cilindros posicionados horizontalmente com seção paralela ao escoamento de 38mm de diâmetro, 10mm de calado e comprimentos  $L_c$  iguais a  $0.1D$ ,  $D$  e  $10D$ ,

onde  $D$  é o diâmetro do cilindro.

O calado foi considerado de forma a atribuir ao corpo uma massa superior à dos alvos reais como forma de realçar quaisquer efeitos inerciais que pudessem estar afetando o sistema.

Como o software foi desenvolvido para aplicações navais em escala real, as dimensões reduzidas dos corpos considerados tiveram que ser passadas por uma escala 100:1 para evitar erros numéricos. A Figura 15 apresenta as diferentes curvas RAO obtidas por meio do Maxsurf Motions.

Figura 15 – RAOs da Esfera e Cilindros via Maxsurf



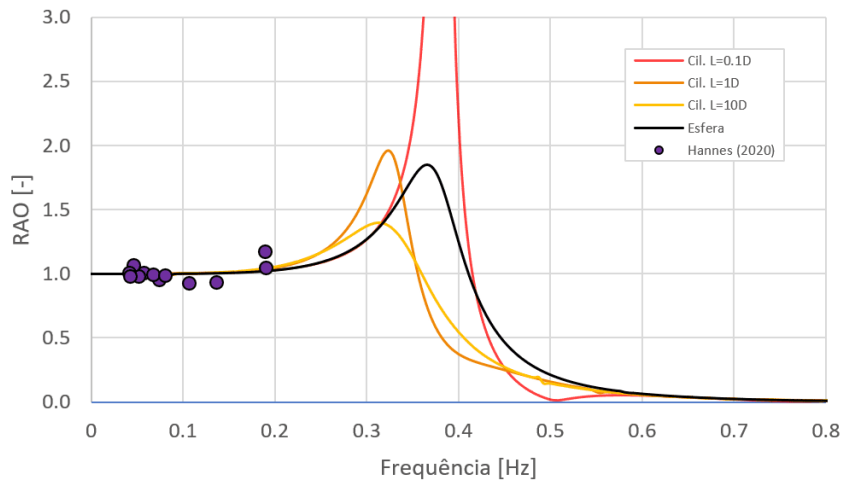
Fonte: Autor (2023).

Como foi considerado o mesmo calado para todos os corpos, internamente ao software, cada um tem diferentes valores de massa, área de linha d'água e volume submerso. Devido a isso, era esperado formatos diferentes nas curvas, seja em relação a frequências naturais, amortecimento do pico de ressonância e também extensão do trecho com RAO próximo a 1, já que as propriedades de restauração, amortecimento e inércia variariam. Entretanto, mesmo assim, percebe-se semelhança entre as curvas para os 4 corpos avaliados, havendo um deslocamento para a esquerda da frequência de ressonância dos cilindros de  $L_c = 1D$  e  $L_c = 10D$  em relação à esfera onde também se nota diferenças nas amplitudes desses picos.

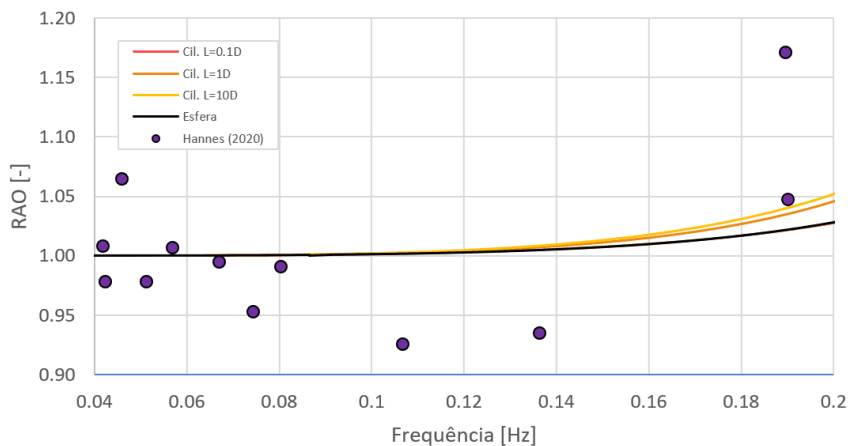
De modo a verificar a viabilidade da utilização de cilindros ao invés de esferas, torna-se necessário, também, verificar a região nas curvas de RAO em que se encontram as 13 ondas ensaiadas para o estudo de Hannes (2020) pois, dependendo da região de abrangência das ondas, as diferenças observadas entre os diferentes cilindros e a esfera podem não impactar no presente estudo.

São apresentados, nos gráficos da Figura 16, os dados obtidos por Hannes (2020) com os sensores ópticos e capacitivos onde caracterizam-se 13 pontos na curva RAO representando cada uma das ondas ensaiadas, sendo os valores de frequência também convertidos para a escala 100:1. Percebe-se, ainda, que os pontos referentes aos experimentos encontram-se na região dominada pelos termos de restauração, tendo valores muito próximos da unidade. Paralelamente, percebe-se que na região de abrangência dos experimentos as curvas RAO da esfera e dos cilindros de comprimento  $0.1D$ ,  $D$  e  $10D$  distinguem-se por pouco, sendo, também, muito próximos da unidade em toda a região, tornando pouco relevantes as diferenças observadas nas posições e valores dos picos das curvas.

Figura 16 – RAOs via Maxsurf frente aos resultados experimentais de Hannes (2020)



(a)

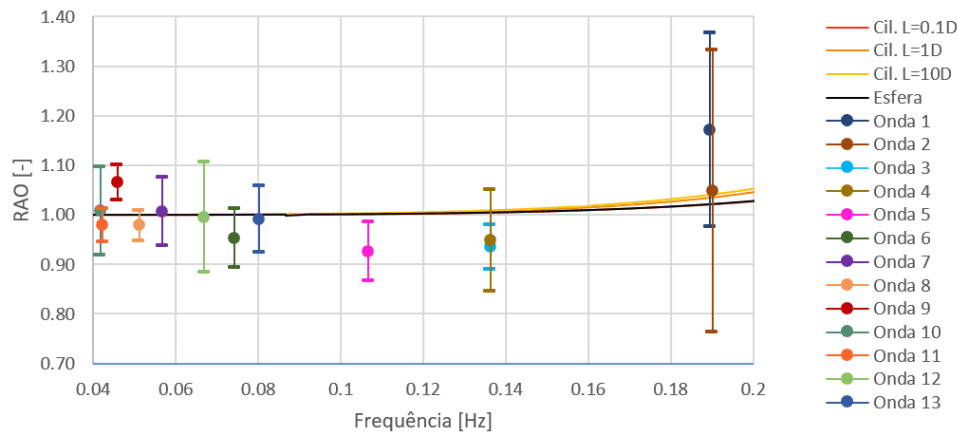


(b)

Fonte: Autor (2023).

É, ainda, feita uma análise de incerteza expandida do tipo A nos dados experimentais utilizados por Hannes (2020), considerando distribuição Gaussiana, como forma de verificar se o intervalo de incerteza de 95% abrange as curvas de RAO geradas pelo software. Os intervalos de incerteza para cada onda podem ser vistos na Figura 17.

Figura 17 – Incertezas dos ensaios de Hannes (2020) para cada onda



Fonte: Autor (2023).

Destaca-se que para algumas ondas, como a Onda 5, o intervalo de incertezas não contemplou as curvas, porém deve ser lembrado que os pontos apresentados também se relacionam com valores obtidos pelo sistema óptico, para o qual foi levantada a hipótese de não estar fornecendo resultados tão precisos. De toda sorte, no trecho onde o RAO dos corpos começa a crescer para além da unidade encontram-se apenas as Ondas 1 e 2, cujos intervalos de incerteza satisfatoriamente abrangem as curvas, sendo um indício de que os experimentos tenderam, de fato, a seguir a curva.

Como foi verificado que as ondas a serem simuladas no OpenFOAM dispõem-se em uma faixa de frequências em que existe pouca distinção entre as curvas de RAO das geometrias consideradas, sendo essas diferenças inferiores às diferenças entre os resultados experimentais e o próprio RAO da esfera via Maxsurf, é considerada viável a bidimensionalização do problema. Foram utilizados cilindros de L igual a D, visto que foi o caso que apresentou a curva de RAO mais próxima da curva referente à esfera no intervalo de interesse.

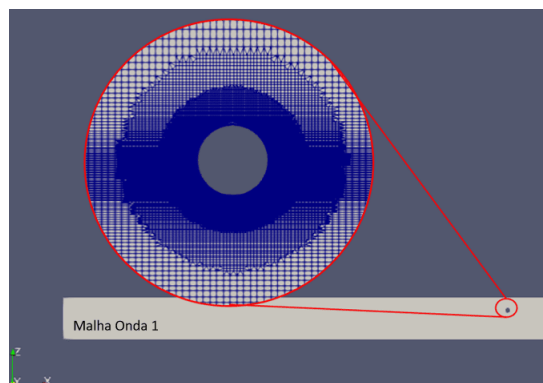
### 3.3 SIMULAÇÕES COM CORPOS FLUTUANTES

As simulações com os corpos flutuantes foram executadas nas mesmas malhas parametrizadas detalhadas na Seção 3.1, sendo a adição dos cilindros flutuantes feita nas mesmas posições das NPs (ver Figura 13) por meio da ferramenta snappyHexMesh,

interna ao OpenFOAM. Nas simulações, referenciar-se-á cada corpo flutuante como NB, ou *Numerical Ball*, numerados de 1 a 6, assim como as NPs. Para as comparações, os resultados de rastreamento óptico da base de dados experimental serão referenciados como é feito em Hannes (2020), como *Wave Ball*, ou WB.

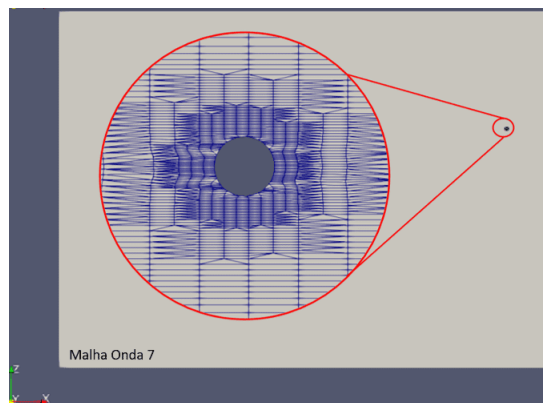
Devido ao diâmetro de 38mm do corpo, optou-se por elaborar uma parcial estruturação da malha ao redor do corpo apenas para a malha da Onda 1 pois, devido às dimensões das células das outras malhas em comparação com o corpo, uma estruturação completa com transição suave exigiria refino longitudinal maior que o empregado, o que acarretaria em uma elevação no custo computacional que já estava alto em decorrência das dimensões do tanque. As Figuras 18 a 20 apresentam as regiões ao redor da WB1 para as 3 malhas utilizadas. Para as malhas das Ondas 7 e 12 o aumento no número de células não foi significativo, sendo um aumento de 4003 células para a malha da Onda 7 e 1495 para a malha da Onda 12, já para a malha da Onda 1, houve um aumento de 107884 células.

Figura 18 – Região ao redor da NB1 na Malha da Onda 1



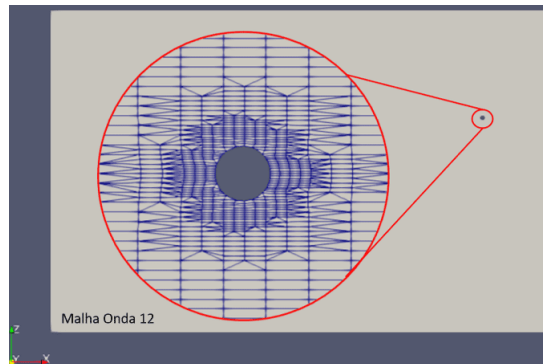
Fonte: Autor (2023).

Figura 19 – Região ao redor da NB1 na Malha da Onda 7



Fonte: Autor (2023).

Figura 20 – Região ao redor da NB1 na Malha da Onda 12



Fonte: Autor (2023).

Novamente, foram simulados 100s de geração das Ondas 1, 7 e 12, onde a posição do centro de gravidade das WBs foram monitoradas por meio da função objeto rigidBodyState nativa do OpenFOAM para posterior avaliação dos resultados.

No que tange à convergência das simulações, foi empregado incremento temporal de 0.0001s, que foi o maior valor que garantiu um número de Courant inferior a 1 ao longo de toda a simulação e em todo o domínio das 3 malhas utilizadas. Como característica própria da função objeto para monitoramento do corpo, em cada incremento temporal da simulação a posição é registrada, não seguindo o valor da opção de intervalo para registro de resultados. Assim, os resultados para esta etapa foram registrados com frequência de aquisição de 10000Hz.

O solver utilizado nas simulações foi o olaDyMFlow, modificação de Higuera (2015) do solver interDyMFlow para geração ondas. O solver tradicional tem o mesmo fundamento que o interFoam, porém reconstrói a malha a cada passo temporal de modo a atualizar a posição do corpo móvel de acordo com cálculos de dinâmica e cinemática feitos internamente tendo como parâmetro de entrada o arquivo dynamicMeshDict, onde são especificados parâmetros e condições dos corpos flutuantes. Para as simulações, cada cilindro teve comprimento igual ao diâmetro e calado definido como 10mm, sendo a massa do corpo ajustada dessa forma já que a terceira dimensão da malha foi setada para ter comprimento igual ao diâmetro do cilindro. Além disso, seus movimentos foram restringidos de modo a permitir apenas translação na direção vertical e sem rotacionar.

Os resultados para posição vertical do centro de massa das NBs foram tratados por meio da FFT em um script no software Octave, assim como na primeira etapa, onde foram obtidos os valores de amplitude e frequência de oscilação do sinal. Para cada onda, foram feitas comparações entre os métodos e abordagens de modo a evidenciar as diferenças na medição da altura de onda em cada posição logitudinal. Foram diretamente comparadas NPs e NBs, WPs e WBs, e NBs e WBs.

Os mesmos recursos computacionais utilizados na Seção 3.1.2 foram utilizados para as simulações com corpos flutuantes, onde as simulações duraram, para a Onda



1, 13 dias, 15 horas e 10 minutos, para a Onda 7, 5 horas e 24 minutos e, para a Onda 12, 3 dias, 3 horas e 38 minutos.

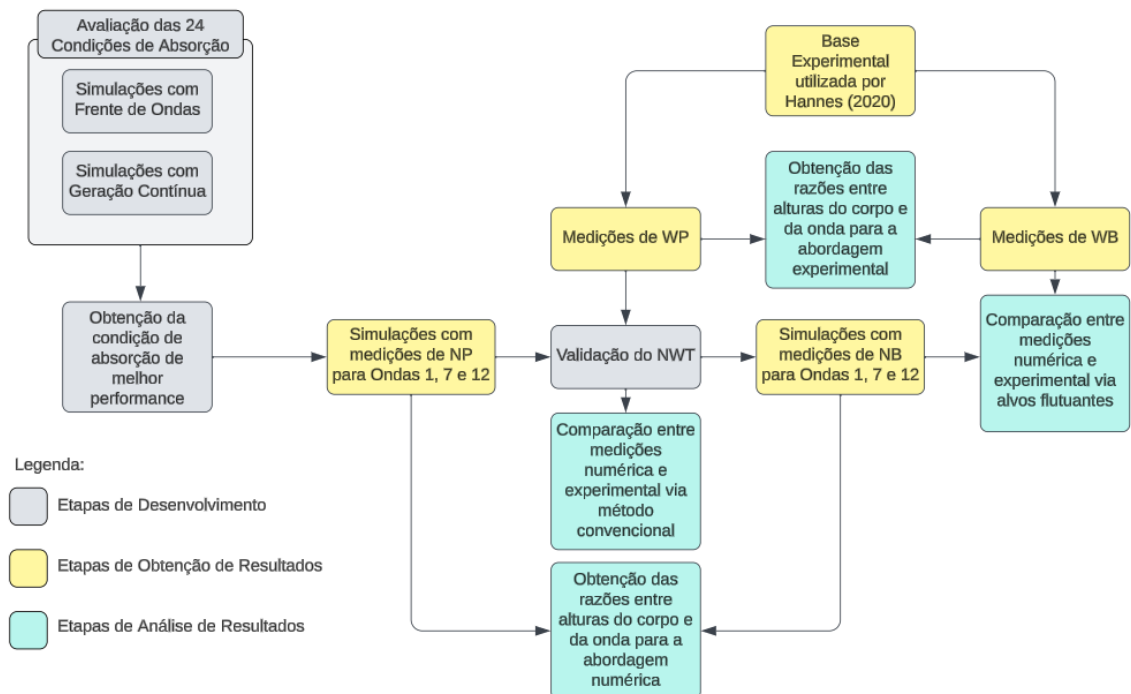
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção é destinada à apresentação dos resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia previamente detalhada, bem como à discussão acerca da correlação entre métodos, levantamento de justificativas e conclusões preliminares.

Em um primeiro momento são apresentados os resultados referentes à criação de um NWT capaz de gerar as ondas de interesse com precisão, com etapas caracterizadas pela busca por uma solução de absorção passiva e validação da solução promissora para diferentes ondas.

Após, são apresentados os resultados das simulações com corpos flutuantes, os quais permitem, finalmente, a comparação dos resultados entre os métodos empregados tanto na abordagem numérica, executada neste estudo, quanto na abordagem experimental anteriormente avaliada por Hannes (2020) de modo a gerar discussões e conclusões referentes à problemática levantada no trabalho da autora. Na Figura 21 pode ser visto um fluxograma que sumariza as etapas de análise dos resultados.

Figura 21 – Fluxograma indicando as etapas da análise dos resultados



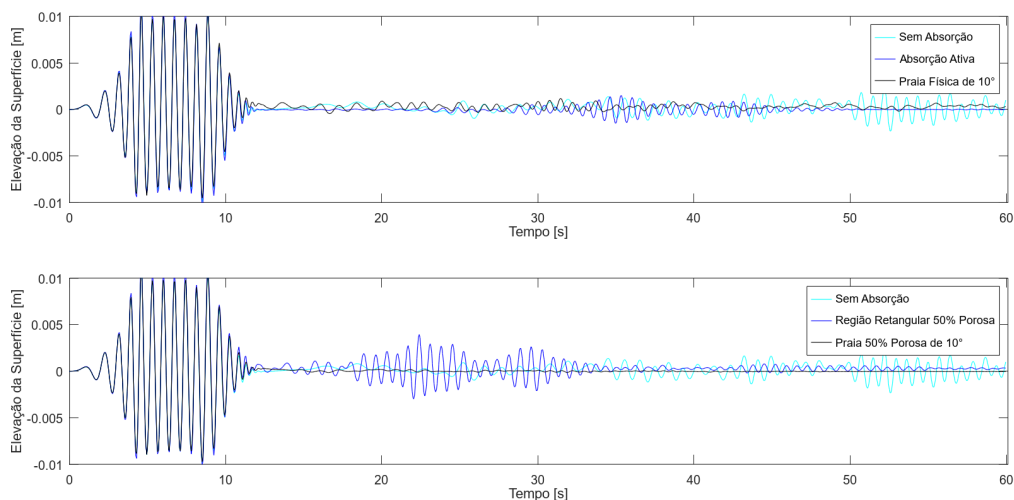
Fonte: Autor (2023).

## 4.1 DESENVOLVIMENTO DO TANQUE NUMÉRICO DE ONDAS

### 4.1.1 Avaliação preliminar: Simulações com frentes de onda

A Figura 22 apresenta os resultados da NP para as simulações de frentes de onda para pré-avaliação das estratégias de absorção. A praia porosa apresentou a melhor performance para absorção das ondas, não apresentando grandes perturbações na superfície livre após o fim da geração de ondas, diferentemente da região porosa retangular que apresentou uma parcial reflexão devido à interface porosa agir como uma segunda parede vertical. O efeito da porosidade pode ser observado ao serem comparados os resultados para os dois absorvedores em formato de praias de  $10^\circ$ , onde a porosidade da praia porosa visivelmente tornou os picos das ondas refletidas menores que na praia física. Também é possível confirmar que a absorção ativa do olaFlow não é muito efetiva para a condição de águas profundas dadas as claras ondas refletidas observadas, similar à quantidade refletida pela praia física de  $10^\circ$ .

Figura 22 – Resultados das simulações de frentes de onda

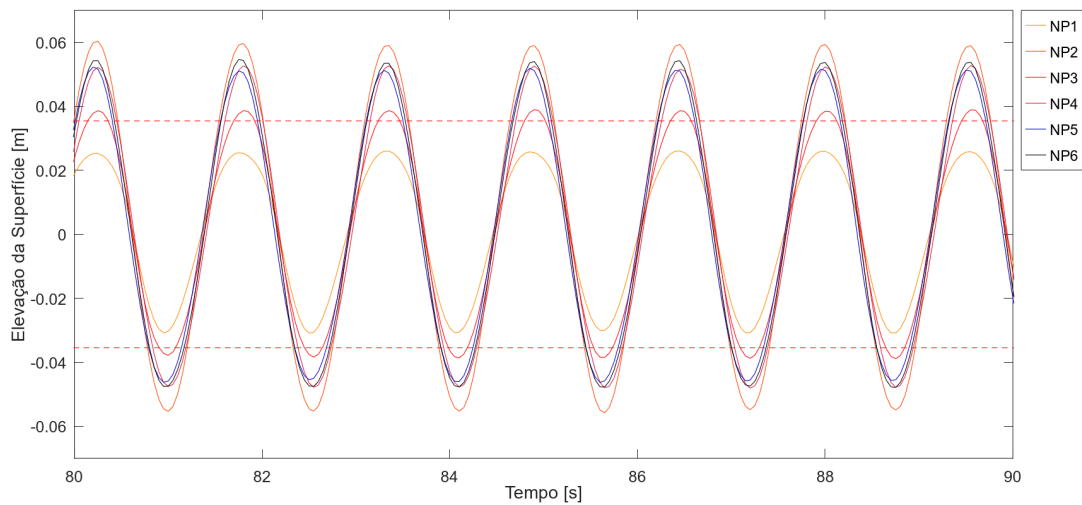


Fonte: Autor (2023).

### 4.1.2 Avaliação final: Simulações com geração contínua de ondas

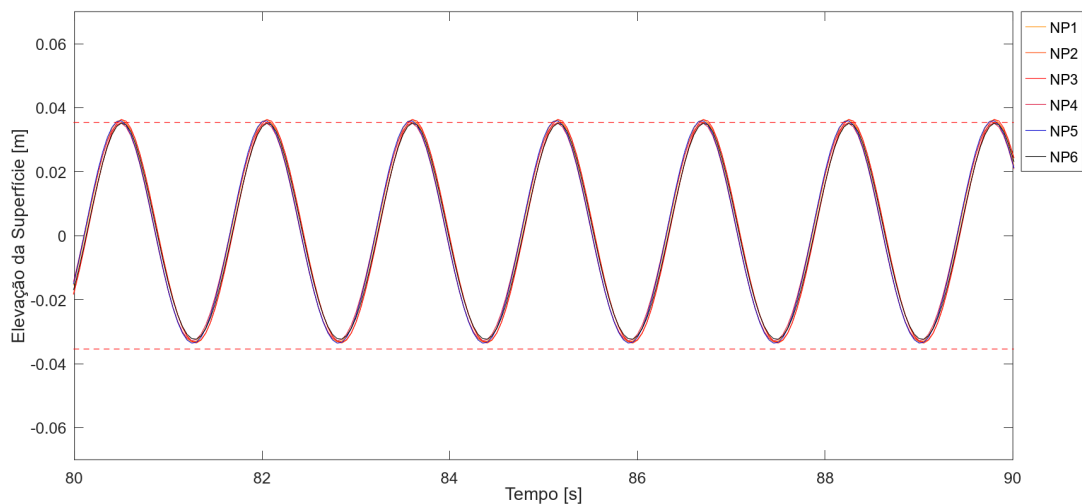
As Figuras 23 e 24 apresentam os sinais temporais de elevação da superfície livre das 6 NPs para os Casos 1 e 24 das simulações com geração contínua de ondas, os gráficos referentes aos demais casos podem ser encontrados no Apêndice A. Os resultados foram deslocados no eixo temporal de modo a todos os sinais ficarem em fase com o intuito de facilitar a visualização da diferença entre as elevações obtidas pelas NPs.

Figura 23 – Sinais do Caso 1 (Sem Absorção) em fase: Desempenho Qualitativamente Ruim



Fonte: Autor (2023).

Figura 24 – Sinais do Caso 24 (Praia de 10°, Porosidade 90%) em fase: Desempenho Qualitativamente Bom



Fonte: Autor (2023).

As linhas pontilhadas em vermelho representam os limites superior e inferior para a altura de onda estabelecida no setup das simulações. Percebe-se que na condição sem absorção há NPs que captam alturas superiores bem como inferiores ao valor estabelecido, isso se deve ao fenômeno da reflexão que, ao longo do comprimento do tanque, cria tanto pontos em que as ondas se somam quanto pontos onde se subtraem. Verificando a Figura 24 e o Apêndice A, nota-se que foi obtida maior

uniformidade entre os sinais das diferentes WPs para as estratégias contendo regiões porosas.

Para cada estratégia de absorção foram computados média e desvio padrão entre as alturas medidas por cada NP como forma de verificar, respectivamente, precisão em relação ao valor de referência e uniformidade longitudinal das ondas no NWT. Também são apresentados, para cada média, as diferenças relativas ( $D_r$ ) da média à altura nominal  $H=70.86\text{mm}$  e, ainda, é apresentada a adimensionalização do desvio padrão por  $H$ , permitindo uma análise percentual. Os resultados para as simulações sem absorção ativa, com absorção ativa e para as praias físicas (Casos 1 a 4) podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Alturas de onda obtidas nas simulações sem absorção (Caso 1), com absorção ativa (Caso 2), praia física de  $10^\circ$  (Caso 3) e praia física de  $20^\circ$  (Caso 4)

|                | Sem Abs. | Abs. Ativa | Praia $10^\circ$ | Praia $20^\circ$ |
|----------------|----------|------------|------------------|------------------|
| NP1 [mm]       | 57.66    | 89.66      | 90.49            | 74.21            |
| NP2 [mm]       | 114.76   | 53.81      | 51.43            | 82.13            |
| NP3 [mm]       | 78.92    | 91.67      | 86.19            | 58.01            |
| NP4 [mm]       | 99.45    | 49.99      | 57.89            | 92.59            |
| NP5 [mm]       | 98.04    | 91.41      | 80.15            | 41.43            |
| NP6 [mm]       | 101.65   | 49.03      | 55.7             | 91.38            |
| Média [mm]     | 91.75    | 70.93      | 70.31            | 73.29            |
| $D_r$ [-]      | 29.48%   | 0.10%      | -0.78%           | 3.43%            |
| $\sigma$ [mm]  | 20.26    | 21.96      | 17.21            | 20.14            |
| $\sigma/H$ [-] | 28.60%   | 30.99%     | 24.28%           | 28.42%           |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se, entre as NPs, variação entre medições, quantificável pelos valores de desvio padrão que se mostraram superiores a 24% do valor de  $H$  para as 4 condições. Nos 4 casos, a superfície livre se comporta com amplitudes longitudinalmente irregulares devido à ocorrência de reflexão, assim, os valores de média e erro tornam-se irrelevantes para estes casos. Destaca-se que o caso com apenas absorção ativa performou pior que no caso sem absorção e que entre os dois casos com praias, a inclinação de  $10^\circ$  apresentou menos variações nas amplitudes de elevação.

As Tabelas 3 a 6 apresentam os resultados para a avaliação das regiões retangulares de diferentes comprimentos  $L_p$  e índices de porosidade (Casos 5 a 20).

Tabela 3 – Alturas de onda obtidas nas simulações com regiões porosas de índice de porosidade 30% e comprimento 32m (Caso 5), 16m (Caso 6), 8m (Caso 7) e 4m (Caso 8)

| Índice de Porosidade: 30% |           |           |          |          |
|---------------------------|-----------|-----------|----------|----------|
|                           | $L_p=32m$ | $L_p=16m$ | $L_p=8m$ | $L_p=4m$ |
| NP1 [mm]                  | 58.79     | 58.18     | 57.41    | 52.79    |
| NP2 [mm]                  | 101.38    | 101.71    | 101.2    | 102.56   |
| NP3 [mm]                  | 76.87     | 76.41     | 75.41    | 70.93    |
| NP4 [mm]                  | 86.95     | 87.31     | 87.04    | 89.23    |
| NP5 [mm]                  | 92.72     | 92.45     | 91.29    | 87.18    |
| NP6 [mm]                  | 88.57     | 89.14     | 88.88    | 90.8     |
| Média [mm]                | 84.21     | 84.20     | 83.54    | 82.25    |
| $D_r$ [-]                 | 18.84%    | 18.83%    | 17.89%   | 16.07%   |
| $\sigma$ [mm]             | 14.79     | 15.14     | 15.24    | 17.63    |
| $\sigma/H$ [-]            | 20.87%    | 21.37%    | 21.51%   | 24.88%   |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Alturas de onda obtidas nas simulações com regiões porosas de índice de porosidade 50% e comprimento 32m (Caso 9), 16m (Caso 10), 8m (Caso 11) e 4m (Caso 12)

| Índice de Porosidade: 50% |           |           |          |          |
|---------------------------|-----------|-----------|----------|----------|
|                           | $L_p=32m$ | $L_p=16m$ | $L_p=8m$ | $L_p=4m$ |
| NP1 [mm]                  | 58.32     | 57.89     | 57.4     | 54.12    |
| NP2 [mm]                  | 89.34     | 89.37     | 89.03    | 90.24    |
| NP3 [mm]                  | 71.62     | 71.13     | 70.37    | 67.08    |
| NP4 [mm]                  | 77.79     | 77.9      | 77.76    | 79.45    |
| NP5 [mm]                  | 83.56     | 83.06     | 82.15    | 79.185   |
| NP6 [mm]                  | 79.04     | 79.16     | 79.03    | 80.57    |
| Média [mm]                | 76.61     | 76.42     | 75.96    | 75.11    |
| $D_r$ [-]                 | 8.12%     | 7.84%     | 7.19%    | 5.99%    |
| $\sigma$ [mm]             | 10.74     | 10.89     | 10.93    | 12.64    |
| $\sigma/H$ [-]            | 15.16%    | 15.37%    | 15.43%   | 17.84%   |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Alturas de onda obtidas nas simulações com regiões porosas de índice de porosidade 70% e comprimento 32m (Caso 13), 16m (Caso 14), 8m (Caso 15) e 4m (Caso 16)

| Índice de Porosidade: 70% |           |           |          |          |
|---------------------------|-----------|-----------|----------|----------|
|                           | $L_p=32m$ | $L_p=16m$ | $L_p=8m$ | $L_p=4m$ |
| NP1 [mm]                  | 60.39     | 60.16     | 59.89    | 58.18    |
| NP2 [mm]                  | 79.18     | 79.2      | 78.98    | 79.85    |
| NP3 [mm]                  | 67.5      | 67.22     | 66.74    | 64.91    |
| NP4 [mm]                  | 71.98     | 72.03     | 71.9     | 72.98    |
| NP5 [mm]                  | 74.5      | 74.17     | 73.57    | 71.88    |
| NP6 [mm]                  | 72.42     | 72.48     | 72.35    | 73.39    |
| Média [mm]                | 71.00     | 70.88     | 70.57    | 70.20    |
| $D_r$ [-]                 | 0.19%     | 0.02%     | -0.41%   | -0.93%   |
| $\sigma$ [mm]             | 6.43      | 6.52      | 6.53     | 7.57     |
| $\sigma/H$ [-]            | 9.08%     | 9.19%     | 9.22%    | 10.68%   |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Alturas de onda obtidas nas simulações com regiões porosas de índice de porosidade 90% e comprimento 32m (Caso 17), 16m (Caso 18), 8m (Caso 19) e 4m (Caso 20)

| Índice de Porosidade: 90% |           |           |          |          |
|---------------------------|-----------|-----------|----------|----------|
|                           | $L_p=32m$ | $L_p=16m$ | $L_p=8m$ | $L_p=4m$ |
| NP1 [mm]                  | 65.19     | 65.09     | 64.76    | 64.45    |
| NP2 [mm]                  | 72.09     | 72.1      | 72.11    | 72.38    |
| NP3 [mm]                  | 66.74     | 66.59     | 66.29    | 66.04    |
| NP4 [mm]                  | 69.46     | 69.49     | 69.41    | 69.56    |
| NP5 [mm]                  | 68.6      | 68.42     | 68.14    | 68.09    |
| NP6 [mm]                  | 69.19     | 69.21     | 69.13    | 69.28    |
| Média [mm]                | 68.55     | 68.48     | 68.31    | 68.30    |
| $D_r$ [-]                 | -3.27%    | -3.35%    | -3.60%   | -3.61%   |
| $\sigma$ [mm]             | 2.38      | 2.44      | 2.57     | 2.80     |
| $\sigma/H$ [-]            | 3.36%     | 3.44%     | 3.63%    | 3.95%    |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para um mesmo índice de porosidade, o desvio padrão diminui ao passo que o comprimento aumenta, tendo seus menores valores no comprimento de 32m. Assim, relacionando com a realidade, quanto mais extenso o obstáculo (região porosa) que a onda percorre, mais energia ela perde, reduzindo os efeitos de reflexão.

Pelas simulações dos Casos 5 a 20 também percebe-se clara a influência do índice de porosidade, onde quanto menor o índice menor a absorção das ondas. Como levantado na discussão da avaliação preliminar, o motivo para tal comportamento frente ao índice de porosidade é que com maiores índices de porosidade a colisão das ondas com o início da região é menos abrupta, tornando possível que mais energia seja

dissipada pelo meio poroso ao invés de ser refletida na interface.

A Tabela 7 apresenta os resultados dos Casos 21 a 24, os com praias porosas de inclinação  $10^\circ$  e mesmo índices de porosidade abordados nos casos anteriores. Nota-se que estas estratégias foram as que melhor performaram, garantindo tanto valores satisfatoriamente baixos de desvio padrão, inferiores a 3% da altura de referência, quanto médias entre medições com erros inferiores a 6%.

Tabela 7 – Alturas de onda obtidas nas simulações com regiões porosas em formato de praia de  $10^\circ$  de índice de porosidade 30% (Caso 21), 50% (Caso 22), 70% (Caso 23) e 90% (Caso 24)

|                | Praia Porosa de Inclinação $10^\circ$ |                |                |                |
|----------------|---------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|                | Porosidade 30%                        | Porosidade 50% | Porosidade 70% | Porosidade 90% |
| NP1 [mm]       | 69.91                                 | 68.52          | 70.11          | 69.24          |
| NP2 [mm]       | 66.65                                 | 67.7           | 68.23          | 68.98          |
| NP3 [mm]       | 68.03                                 | 66.09          | 69.46          | 69.34          |
| NP4 [mm]       | 66.4                                  | 67.75          | 67.86          | 67.81          |
| NP5 [mm]       | 66.57                                 | 64.48          | 68.82          | 69.48          |
| NP6 [mm]       | 65.41                                 | 66.74          | 67.25          | 67.31          |
| Média [mm]     | 67.16                                 | 66.88          | 68.62          | 68.69          |
| $D_r$ [-]      | -5.22%                                | -5.62%         | -3.16%         | -3.06%         |
| $\sigma$ [mm]  | 1.59                                  | 1.45           | 1.06           | 0.91           |
| $\sigma/H$ [-] | 2.24%                                 | 2.05%          | 1.49%          | 1.28%          |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores de período de cada sinal foram omitidos nas tabelas pelo motivo de o valor ter sido o mesmo em todas as WPs e para todos os casos simulados, onde o valor obtido foi 1.49s, apresentando um erro de 3.87% em relação à referência de 1.55s, considerado suficientemente baixo. Como a mesma diferença esteve presente em todas as simulações, acredita-se que a causa desta diferença esteja atrelada à implementação, no olaFlow, dos solvers responsáveis por ler as informações de entrada e gerar as ondas.

Destaca-se, também, que o desempenho das estratégias avaliadas foram coerentes entre si, visto que a implementação de regiões porosas se mostrou altamente eficiente e que a inserção de praias garantiu menos irregularidade na superfície do que a parede vertical, de modo que, combinando as duas estratégias e avaliando a influência do índice de porosidade, obteve-se o desempenho ótimo com a praia 90% porosa com inclinação de  $10^\circ$ . Sendo assim, esta foi a condição selecionada para uso nas demais etapas cujos resultados são apresentados na sequência. A Tabela 8 apresenta um ranqueamento das 24 condições de absorção avaliadas a partir do valor de desvio padrão entre NPs onde a primeira colocação indica a condição que melhor performou.



Tabela 8 – Ranqueamento de performance dos 24 Casos de absorção baseado no menor desvio padrão entre medições

| Colocação | Condição de Absorção                           | $\sigma$ [mm] |
|-----------|--|---------------|
| 1         | Praia 90% Porosa de 10° (Caso 24)              | 0.91          |
| 2         | Praia 70% Porosa de 10° (Caso 23)              | 1.06          |
| 3         | Praia 50% Porosa de 10° (Caso 22)              | 1.45          |
| 4         | Praia 30% Porosa de 10° (Caso 21)              | 1.59          |
| 5         | Região 90% Porosa de Comprimento 32m (Caso 17) | 2.38          |
| 6         | Região 90% Porosa de Comprimento 16m (Caso 18) | 2.44          |
| 7         | Região 90% Porosa de Comprimento 8m (Caso 19)  | 2.57          |
| 8         | Região 90% Porosa de Comprimento 4m (Caso 20)  | 2.80          |
| 9         | Região 70% Porosa de Comprimento 32m (Caso 13) | 6.43          |
| 10        | Região 70% Porosa de Comprimento 16m (Caso 14) | 6.52          |
| 11        | Região 70% Porosa de Comprimento 8m (Caso 15)  | 6.53          |
| 12        | Região 70% Porosa de Comprimento 4m (Caso 16)  | 7.57          |
| 13        | Região 50% Porosa de Comprimento 32m (Caso 9)  | 10.74         |
| 14        | Região 50% Porosa de Comprimento 16m (Caso 10) | 10.89         |
| 15        | Região 50% Porosa de Comprimento 8m (Caso 11)  | 10.93         |
| 16        | Região 50% Porosa de Comprimento 4m (Caso 12)  | 12.64         |
| 17        | Região 30% Porosa de Comprimento 32m (Caso 5)  | 14.79         |
| 18        | Região 30% Porosa de Comprimento 16m (Caso 6)  | 15.14         |
| 19        | Região 30% Porosa de Comprimento 8m (Caso 7)   | 15.24         |
| 20        | Praia Física de 10° (Caso 3)                   | 17.21         |
| 21        | Região 30% Porosa de Comprimento 4m (Caso 8)   | 17.63         |
| 22        | Praia Física de 20° (Caso 4)                   | 20.14         |
| 23        | Sem Absorção (Caso 1)                          | 20.26         |
| 24        | Absorção Ativa do olaFlow (Caso 2)             | 21.96         |

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.1.3 Validação da geração de ondas

Foi empregada a condição de absorção com praia 90% porosa com inclinação de 10° para a simulação das outras duas ondas. Os resultados numéricos para a altura de onda em geração contínua das Ondas 1, 7 e 12 ( $H_{NP}$ ) foram comparados com os obtidos experimentalmente via sensor capacitivo ( $H_{WP}$ ) ao avaliar as diferenças relativas ao valor nominal ( $D_{r,nom}$ ) da altura para cada medição em cada um dos dois métodos. É também apresentada a coluna " $D_r$  Entre Abordagens", que guarda os valores da diferença relativa entre os resultados de NP e WP de cada posição, tomando os valores experimentais como o referencial. Podem ser vistos os resultados para as três simulações nas Tabelas 9 até 11.

Tabela 9 – Resultados para medição via *Numerical Probe* (NP) e *Wave Probe* (WP) da altura da Onda 1: Altura nominal = 12.98mm

| Posição  | Simulação (NP) |                 | Experimento (WP) |                 | $D_r$ entre abordagens [-] |
|----------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------|
|          | $H_{NP}$ [mm]  | $D_{r,nom}$ [-] | $H_{WP}$ [mm]    | $D_{r,nom}$ [-] |                            |
| 1        | 10.47          | -19.34%         | 13.14            | 1.19%           | -20.29%                    |
| 2        | 10.16          | -21.73%         | 11.85            | -8.74%          | -14.23%                    |
| 3        | 9.92           | -23.57%         | 12.47            | -3.95%          | -20.43%                    |
| 4        | 9.87           | -23.96%         | 11.57            | -10.86%         | -14.69%                    |
| 5        | 9.73           | -25.04%         | 12.25            | -5.61%          | -20.58%                    |
| 6        | 9.59           | -26.12%         | 12.70            | -2.19%          | -24.46%                    |
| Média    | 9.96           | -23.29%         | 12.33            | -5.03%          | -19.11%                    |
| $\sigma$ | 0.32           |                 | 0.57             |                 |                            |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Resultados para medição via *Numerical Probe* (NP) e *Wave Probe* (WP) da altura da Onda 7: Altura nominal = 70.86mm

| Posição  | Simulação (NP) |                 | Experimento (WP) |                 | $D_r$ entre abordagens [-] |
|----------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------|
|          | $H_{NP}$ [mm]  | $D_{r,nom}$ [-] | $H_{WP}$ [mm]    | $D_{r,nom}$ [-] |                            |
| 1        | 69.24          | -2.29%          | 84.62            | 19.41%          | -18.17%                    |
| 2        | 68.98          | -2.65%          | 75.59            | 6.68%           | -8.75%                     |
| 3        | 69.34          | -2.15%          | 83.44            | 17.75%          | -16.90%                    |
| 4        | 67.81          | -4.30%          | 77.52            | 9.39%           | -12.52%                    |
| 5        | 69.48          | -1.95%          | 76.15            | 7.46%           | -8.76%                     |
| 6        | 67.31          | -5.01%          | 86.01            | 21.38%          | -21.74%                    |
| Média    | 68.69          | -3.06%          | 80.55            | 13.68%          | -14.47%                    |
| $\sigma$ | 0.91           |                 | 4.64             |                 |                            |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 – Resultados para medição via *Numerical Probe* (NP) e *Wave Probe* (WP) da altura da Onda 12: Altura nominal = 200mm

| Posição  | Simulação (NP) |                 | Experimento (WP) |                 | $D_r$ entre abordagens [-] |
|----------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------|
|          | $H_{NP}$ [mm]  | $D_{r,nom}$ [-] | $H_{WP}$ [mm]    | $D_{r,nom}$ [-] |                            |
| 1        | 190.88         | -4.56%          | 202.29           | 1.15%           | -5.64%                     |
| 2        | 190.77         | -4.61%          | 217.50           | 8.75%           | -12.29%                    |
| 3        | 188.38         | -5.81%          | 192.17           | -3.92%          | -1.97%                     |
| 4        | 187.75         | -6.13%          | 227.09           | 13.55%          | -17.32%                    |
| 5        | 186.66         | -6.67%          | 189.16           | -5.42%          | -1.32%                     |
| 6        | 184.76         | -7.62%          | 211.11           | 5.56%           | -12.48%                    |
| Média    | 188.20         | -5.90%          | 206.55           | 3.28%           | -8.50%                     |
| $\sigma$ | 2.38           |                 | 14.76            |                 |                            |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos valores de  $\sigma$  percebe-se que há uma maior uniformidade nas amplitudes captadas pelas diferentes *Probes* na simulação do que nos experimentos, visto que os valores de desvio padrão da simulação são menores que no experimento para as três ondas. Os menores percentuais de erros em relação ao referencial ocorreram para as Ondas 7 e 12, onde tais valores mantiveram-se abaixo dos 8%, frente aos valores experimentais que mantiveram-se entre os 10% e 15% para a maior parte das posições, mostrando-se como resultados satisfatórios para validação. Para a Onda 1 observaram-se os maiores percentuais de erros, mesmo com a diferença máxima de 3.39mm sendo menor que a mínima diferença para a Onda 12 de 9.12mm, por conta do tamanho inferior da Onda 1, tais diferenças absolutas caracterizam altas diferenças percentuais. Mesmo apresentando percentuais de desvio próximos de 26%, os resultados foram considerados satisfatórios para validação devido às baixas diferenças absolutas.

Mesmo com a parametrização da malha, a qual garante um número total de células superior para o caso da Onda 1, observaram-se diferenças absolutas de mesma ordem de grandeza, portanto acredita-se que a origem das diferenças observados seja a maneira que o algoritmo MULES interpreta os valores de  $\alpha$  para definir onde está, de fato, a superfície livre. Em adição, analisando os valores de " $D_r$  entre abordagens" não foi constatado nenhum padrão entre posições e nem entre ondas, o motivo provável é a menor uniformidade entre os valores medidos em cada posição na abordagem experimental.

As Tabelas 12 a 14 mostram os resultados dos valores de períodos medidos seguindo o mesmo padrão da apresentação da medição das alturas de onda. As simulações apresentaram valores inferiores de período ( $T_{NP}$ ) tanto em relação ao valor nominal quanto aos experimentos ( $T_{WP}$ ) para as três Ondas avaliadas. A abordagem experimental apresentou melhores resultados para períodos para as Ondas 1 e 12 com diferenças relativas nominais menores que 2%, no entanto para a Onda 7 observam-se diferenças superiores a 10%. De toda sorte, a abordagem numérica teve desempenho satisfatório visto que as diferenças relativas permaneceram inferiores a 5% em todos os casos.

Tabela 12 – Resultados para medição via *Numerical Probe* (NP) e *Wave Probe* (WP) do período da Onda 1: Período nominal = 0.53s

| Posição | Simulação (NP) |                 | Experimento (WP) |                 | $D_r$ entre abordagens [-] |
|---------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------|
|         | $T_{NP}$ [s]   | $D_{r,nom}$ [-] | $T_{WP}$ [s]     | $D_{r,nom}$ [-] |                            |
| 1       | 0.51           | -3.77%          | 0.53             | 0.00%           | -3.77%                     |
| 2       | 0.51           | -3.77%          | 0.53             | 0.00%           | -3.77%                     |
| 3       | 0.51           | -3.77%          | 0.53             | 0.00%           | -3.77%                     |
| 4       | 0.51           | -3.77%          | 0.53             | 0.00%           | -3.77%                     |
| 5       | 0.51           | -3.77%          | 0.53             | 0.00%           | -3.77%                     |
| 6       | 0.51           | -3.77%          | 0.53             | 0.00%           | -3.77%                     |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 13 – Resultados para medição via *Numerical Probe* (NP) e *Wave Probe* (WP) do período da Onda 7: Período nominal = 1.55s

| Posição | Simulação (NP) |                 | Experimento (WP) |                 | $D_r$ entre abordagens [-] |
|---------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------|
|         | $T_{NP}$ [s]   | $D_{r,nom}$ [-] | $T_{WP}$ [s]     | $D_{r,nom}$ [-] |                            |
| 1       | 1.49           | -3.87%          | 1.76             | 13.55%          | -15.34%                    |
| 2       | 1.49           | -3.87%          | 1.78             | 14.84%          | -16.29%                    |
| 3       | 1.49           | -3.87%          | 1.78             | 14.84%          | -16.29%                    |
| 4       | 1.49           | -3.87%          | 1.79             | 15.48%          | -16.76%                    |
| 5       | 1.49           | -3.87%          | 1.73             | 11.61%          | -13.87%                    |
| 6       | 1.49           | -3.87%          | 1.74             | 12.26%          | -14.37%                    |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 14 – Resultados para medição via *Numerical Probe* (NP) e *Wave Probe* (WP) do período da Onda 12: Período nominal = 1.5s

| Posição | Simulação (NP) |                 | Experimento (WP) |                 | $D_r$ entre abordagens [-] |
|---------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------|
|         | $T_{NP}$ [s]   | $D_{r,nom}$ [-] | $T_{WP}$ [s]     | $D_{r,nom}$ [-] |                            |
| 1       | 1.45           | -3.33%          | 1.51             | 0.67%           | -3.97%                     |
| 2       | 1.45           | -3.33%          | 1.51             | 0.67%           | -3.97%                     |
| 3       | 1.45           | -3.33%          | 1.48             | -1.33%          | -2.03%                     |
| 4       | 1.45           | -3.33%          | 1.48             | -1.33%          | -2.03%                     |
| 5       | 1.45           | -3.33%          | 1.50             | 0.00%           | -3.33%                     |
| 6       | 1.44           | -4.00%          | 1.49             | -0.67%          | -3.36%                     |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido à adequada performance do absorvedor para as três ondas frente aos resultados experimentais via sensor convencional tanto para período quanto para altura de onda, é considerada validada a geração de ondas no NWT com praia 90% porosa de inclinação 10° como unidade de absorção de ondas.

## 4.2 SIMULAÇÕES COM CORPOS FLUTUANTES

### 4.2.1 Recapitulação dos Resultados Experimentais que Motivaram a Investigação Numérica

Antes de entrar no mérito dos resultados obtidos nas simulações, apresentar-se-á uma síntese dos resultados das medições de altura de onda via sensor convencional (WP) e de rastreamento óptico (WB) nos experimentos realizados no CH-TPN. As Tabelas 15 a 17 mostram as alturas de onda obtidas após tratamento dos sinais de medição dos experimentos bem como o cálculo da razão entre medições de altura de WB ( $H_{WB}$ ) e de WP ( $H_{WP}$ ).

Tabela 15 – Síntese dos resultados experimentais para a Onda 1

| Posição | $H_{WP}$ [mm] | $H_{WB}$ [mm] | $H_{WB}/H_{WP}$ [-] |
|---------|---------------|---------------|---------------------|
| 1       | 13.14         | 13.92         | 1.060               |
| 2       | 11.85         | 14.31         | 1.208               |
| 3       | 12.47         | 15.29         | 1.226               |
| 4       | 11.57         | 13.39         | 1.157               |
| 5       | 12.25         | 12.03         | 0.982               |
| 6       | 12.70         | 12.89         | 1.015               |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 16 – Síntese dos resultados experimentais para a Onda 7

| Posição | $H_{WP}$ [mm] | $H_{WB}$ [mm] | $H_{WB}/H_{WP}$ [-] |
|---------|---------------|---------------|---------------------|
| 1       | 84.62         | 82.70         | 0.977               |
| 2       | 75.59         | 75.59         | 1.000               |
| 3       | 83.44         | 83.78         | 1.004               |
| 4       | 77.52         | 80.21         | 1.035               |
| 5       | 76.15         | 76.95         | 1.011               |
| 6       | 86.01         | 84.58         | 0.983               |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 17 – Síntese dos resultados experimentais para a Onda 12

| Posição | $H_{WP}$ [mm] | $H_{WB}$ [mm] | $H_{WB}/H_{WP}$ [-] |
|---------|---------------|---------------|---------------------|
| 1       | 202.29        | 191.51        | 0.947               |
| 2       | 217.50        | 211.46        | 0.972               |
| 3       | 192.17        | 190.63        | 0.992               |
| 4       | 227.09        | 217.37        | 0.957               |
| 5       | 189.16        | 185.88        | 0.983               |
| 6       | 211.11        | 209.66        | 0.993               |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi apontado por Hannes (2020) que a existência de pontos em que as razões de altura têm valores superiores ou inferiores a 1 levanta as hipóteses de fenômenos ópticos e hidrodinâmicos estarem influenciando na medição da altura de onda por meio do rastreamento do alvo refletivo. A primeira hipótese sugere a possibilidade do sistema de rastreamento estar com dificuldade de capturar a real posição do alvo devido a, por exemplo, reflexos na superfície da água ou outros fenômenos ópticos. A segunda hipótese é a de o alvo não estar se movendo junto à onda devido a suas características geométricas e inerciais mesmo o sistema de rastreamento estando captando sua posição adequadamente. O presente estudo aborda as simulações numéricas como uma forma de investigar a segunda hipótese, visto que permite isolar e avaliar especificamente o comportamento hidrodinâmico do corpo submetido a ondas dado que nenhum fenômeno óptico influencia no rastreamento dos alvos flutuantes dentro das simulações.

#### 4.2.2 Resultados das Simulações com Corpos Flutuantes

Os resultados de altura de onda medidos por *Numerical Balls* ( $H_{NB}$ ) e por *Wave Balls* ( $H_{WB}$ ) são apresentados juntamente de suas diferenças relativas à altura nominal, bem como da coluna de diferenças dos resultados numéricos em relação aos experimentais, assim como descrito para a apresentação dos resultados de NPs e WPs na Seção 4.1.3. A Tabela 18 compara os resultados obtidos pelas NBs e WBs nas medições da Onda 1.

Tabela 18 – Resultados para medição via *Numerical Ball* (NB) e *Wave Ball* (WB) da altura da Onda 1: Altura nominal = 12.98mm

| Posição  | Simulação (NB) |                 | Experimento (WB) |                 | $D_r$ entre abordagens [-] |
|----------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------|
|          | $H_{NB}$ [mm]  | $D_{r,nom}$ [-] | $H_{WB}$ [mm]    | $D_{r,nom}$ [-] |                            |
| 1        | 14.62          | 12.60%          | 13.92            | 7.27%           | 4.96%                      |
| 2        | 13.54          | 4.35%           | 14.31            | 10.27%          | -5.37%                     |
| 3        | 12.12          | -6.63%          | 15.29            | 17.79%          | -20.73%                    |
| 4        | 11.15          | -14.10%         | 13.39            | 3.17%           | -16.74%                    |
| 5        | 10.51          | -19.01%         | 12.03            | -7.33%          | -12.60%                    |
| 6        | 12.17          | -6.22%          | 12.89            | -0.69%          | -5.57%                     |
| Média    | 12.35          | -4.84%          | 13.64            | 5.08%           | -9.34%                     |
| $\sigma$ | 1.51           |                 | 1.14             |                 |                            |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se desvio padrão próximo entre as medições das duas abordagens, no entanto os valores experimentais apresentaram menor desvio. Houve uma tendência das medições experimentais de serem levemente superiores à altura nominal enquanto os numéricos tenderam a ser levemente inferiores. Em termos da diferença relativa entre as abordagens, apesar de os valores atingirem até a faixa dos 20%, não houve nenhum caso que caracterizasse uma diferença absoluta considerável. Na sequência podem ser vistos os resultados para a Onda 7 na Tabela 19.

Tabela 19 – Resultados para medição via *Numerical Ball* (NB) e *Wave Ball* (WB) da altura da Onda 7: Altura nominal = 70.86mm

| Posição  | Simulação (NB) |                 | Experimento (WB) |                 | $D_r$ entre abordagens [-] |
|----------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------|
|          | $H_{NB}$ [mm]  | $D_{r,nom}$ [-] | $H_{WB}$ [mm]    | $D_{r,nom}$ [-] |                            |
| 1        | 71.44          | 0.82%           | 82.70            | 16.71%          | -13.62%                    |
| 2        | 69.52          | -1.89%          | 75.59            | 6.68%           | -8.03%                     |
| 3        | 70.53          | -0.47%          | 83.78            | 18.23%          | -15.82%                    |
| 4        | 69.37          | -2.10%          | 80.21            | 13.19%          | -13.51%                    |
| 5        | 69.81          | -1.48%          | 76.95            | 8.59%           | -9.28%                     |
| 6        | 68.71          | -3.03%          | 84.58            | 19.37%          | -18.76%                    |
| Média    | 69.90          | -1.36%          | 80.63            | 13.79%          | -13.17%                    |
| $\sigma$ | 0.96           |                 | 3.71             |                 |                            |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a Onda 7 as medições realizadas pela simulação apresentaram melhor desempenho tanto em questão de desvio entre posições quanto em relação às diferenças relativas à altura nominal que não passaram de 4%, ao passo que para os experimentos a diferença se chegou até a 20% além do valor nominal. As diferenças relativas entre abordagens tiveram valores na faixa dos 13% mesmo os resultados numéricos tendo capturado o valor nominal. A Tabela 20 apresenta os resultados para

a Onda 12.

Tabela 20 – Resultados para medição via *Numerical Ball* (NB) e *Wave Ball* (WB) da altura da Onda 12: Altura nominal = 200mm

| Posição  | Simulação (NB) |                 | Experimento (WB) |                 | $D_r$ entre abordagens [-] |
|----------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------|
|          | $H_{NB}$ [mm]  | $D_{r,nom}$ [-] | $H_{WB}$ [mm]    | $D_{r,nom}$ [-] |                            |
| 1        | 197.95         | -1.03%          | 191.51           | -4.25%          | 3.36%                      |
| 2        | 196.10         | -1.95%          | 211.46           | 5.73%           | -7.26%                     |
| 3        | 196.66         | -1.67%          | 190.63           | -4.69%          | 3.16%                      |
| 4        | 197.04         | -1.48%          | 217.37           | 8.69%           | -9.35%                     |
| 5        | 195.76         | -2.12%          | 185.88           | -7.06%          | 5.32%                      |
| 6        | 197.13         | -1.44%          | 209.66           | 4.83%           | -5.98%                     |
| Média    | 196.77         | -1.61%          | 201.09           | 0.54%           | -1.79%                     |
| $\sigma$ | 0.78           |                 | 13.26            |                 |                            |

Fonte: Elaborado pelo autor.

As medições de altura da Onda 12 seguiram o mesmo padrão dos resultados da Onda 7: com os registros de NB com menor desvio padrão e valores de  $D_{r,nom}$  inferiores aos de WB. Entretanto as diferenças relativas à altura nominal das medições experimentais não apresentaram valores tão altos quanto os da Onda 7, não passando de 9%. As Tabelas 21, 22 e 23 contém a relação de períodos obtidos no tratamento dos sinais dos experimentos e simulações das Ondas 1, 7 e 12 respectivamente.

Tabela 21 – Resultados para medição via *Numerical Ball* (NB) e *Wave Ball* (WB) do período da Onda 1: Período nominal = 0.53s

| Posição | Simulação (NB) |                 | Experimento (WB) |                 | $D_r$ entre abordagens [-] |
|---------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------|
|         | $T_{NB}$ [s]   | $D_{r,nom}$ [-] | $T_{WB}$ [s]     | $D_{r,nom}$ [-] |                            |
| 1       | 0.51           | -3.77%          | 0.53             | -0.57%          | -3.23%                     |
| 2       | 0.51           | -3.77%          | 0.53             | -0.75%          | -3.04%                     |
| 3       | 0.51           | -3.77%          | 0.53             | -0.38%          | -3.41%                     |
| 4       | 0.51           | -3.77%          | 0.53             | -0.75%          | -3.04%                     |
| 5       | 0.51           | -3.77%          | 0.52             | -1.32%          | -2.49%                     |
| 6       | 0.51           | -3.77%          | 0.53             | -0.38%          | -3.41%                     |

Fonte: Elaborado pelo autor.



Tabela 22 – Resultados para medição via *Numerical Ball* (NB) e *Wave Ball* (WB) do período da Onda 7: Período nominal = 1.55s

| Posição | Simulação (NB) |                 | Experimento (WB) |                 | $D_r$ entre abordagens [-] |
|---------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------|
|         | $T_{NB}$ [s]   | $D_{r,nom}$ [-] | $T_{WB}$ [s]     | $D_{r,nom}$ [-] |                            |
| 1       | 1.49           | -3.87%          | 1.77             | 13.94%          | -15.63%                    |
| 2       | 1.49           | -3.87%          | 1.74             | 12.52%          | -14.56%                    |
| 3       | 1.49           | -3.87%          | 1.78             | 14.84%          | -16.29%                    |
| 4       | 1.49           | -3.87%          | 1.79             | 15.35%          | -16.67%                    |
| 5       | 1.49           | -3.87%          | 1.73             | 11.61%          | -13.87%                    |
| 6       | 1.49           | -3.87%          | 1.74             | 12.26%          | -14.37%                    |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23 – Resultados para medição via *Numerical Ball* (NB) e *Wave Ball* (WB) do período da Onda 12: Período nominal = 1.5s

| Posição | Simulação (NB) |                 | Experimento (WB) |                 | $D_r$ entre abordagens [-] |
|---------|----------------|-----------------|------------------|-----------------|----------------------------|
|         | $T_{NB}$ [s]   | $D_{r,nom}$ [-] | $T_{WB}$ [s]     | $D_{r,nom}$ [-] |                            |
| 1       | 1.45           | -3.33%          | 1.52             | 1.27%           | -4.54%                     |
| 2       | 1.45           | -3.33%          | 1.49             | -0.87%          | -2.49%                     |
| 3       | 1.45           | -3.33%          | 1.48             | -1.40%          | -1.96%                     |
| 4       | 1.45           | -3.33%          | 1.49             | -0.73%          | -2.62%                     |
| 5       | 1.45           | -3.33%          | 1.49             | -0.40%          | -2.95%                     |
| 6       | 1.44           | -4.00%          | 1.49             | -0.93%          | -3.10%                     |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como para as medições via NP, o rastreamento das NBs resultou em medições de período com diferenças inferiores à 5% para todas as ondas em acordo com o obtido pelos ensaios, menos para a Onda 7 onde as medições tanto de WP quanto de WB divergiram do valor nominal.

De modo geral, as simulações para as três ondas apresentaram medições coerentes de período e altura de onda, tendo desempenho coerente e semelhante à abordagem experimental.

#### 4.3 SÍNTESE DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

Como forma de sintetizar os resultados obtidos nas simulações, os registros de NPs e NBs são apresentados lado a lado para cada Onda avaliada, juntamente com a razão entre a altura do movimento do corpo e a altura da onda incidente. A seguir, a Tabela 24 resume os resultados numéricos para a Onda 1.

Tabela 24 – Síntese dos resultados numéricos para a Onda 1

| Posição | $H_{NP}$ [mm] | $H_{NB}$ [mm] | $H_{NB}/H_{NP}$ [-] |
|---------|---------------|---------------|---------------------|
| 1       | 10.47         | 14.62         | 1.396               |
| 2       | 10.16         | 13.54         | 1.333               |
| 3       | 9.92          | 12.12         | 1.222               |
| 4       | 9.87          | 11.15         | 1.130               |
| 5       | 9.73          | 10.51         | 1.080               |
| 6       | 9.59          | 12.17         | 1.269               |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebem-se que os valores de altura de onda medidos pelas NBs foram superiores aos medidos pelas NPs, resultando em razões superiores a 1 em todos os pares, o que era esperado visto que o ponto que caracterizava a condição de frequência da Onda 1 na curva de RAO do alvo flutuante prevista pelo software Maxsurf estava em uma região onde os valores começavam a crescer em relação à unidade, entretanto a previsão de valores não foi tão alta quanto os valores em torno de 1.3 observados.

Pode-se hipotetizar que a diferença constatada foi o problema na medição das alturas de ondas curtas nas simulações com NP discutida na Seção 4.1.3, que faz as medições de NP serem menores do que deveriam ser. Uma segunda hipótese é a possibilidade do amortecimento viscoso resultante do contato do corpo com a água, o qual não é previsto nas simulações potenciais executadas no Maxsurf, mas sim nas simulações no OpenFOAM, colaborar com um deslocamento da curva de RAO para a esquerda tornando, assim, a razão de alturas real superior à prevista pelo Maxsurf nesta frequência. Essa segunda hipótese ganha credibilidade ao identificar que as razões de alturas experimentais apresentados na Tabela 15 também tenderam a valores levemente superiores a 1 para a maioria dos pares da Onda 1. A Tabela 25 contém os resultados numéricos para a Onda 7.

Tabela 25 – Síntese dos resultados numéricos para a Onda 7

| Posição | $H_{NP}$ [mm] | $H_{NB}$ [mm] | $H_{NB}/H_{NP}$ [-] |
|---------|---------------|---------------|---------------------|
| 1       | 69.24         | 71.44         | 1.032               |
| 2       | 68.98         | 69.52         | 1.008               |
| 3       | 69.34         | 70.53         | 1.017               |
| 4       | 67.81         | 69.37         | 1.023               |
| 5       | 69.48         | 69.81         | 1.005               |
| 6       | 67.31         | 68.71         | 1.021               |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelas simulações da Onda 7 com NBs obtiveram-se resultados muito próximos dos das simulações com NPs, de modo que os valores de razão entre alturas para os

6 pares mantiveram-se todos no intervalo de 1 a 1.04, apresentando comportamento de acordo com o previsto pelas simulações potenciais. Assim como para a Onda 7, as simulações de NB envolvendo a Onda 12, cujos resultados podem ser vistos na Tabela 26 abaixo, apresentaram boa correlação com as simulações de NP, onde a razão de alturas dos pares permaneceu entre os valores de 1.03 e 1.07.

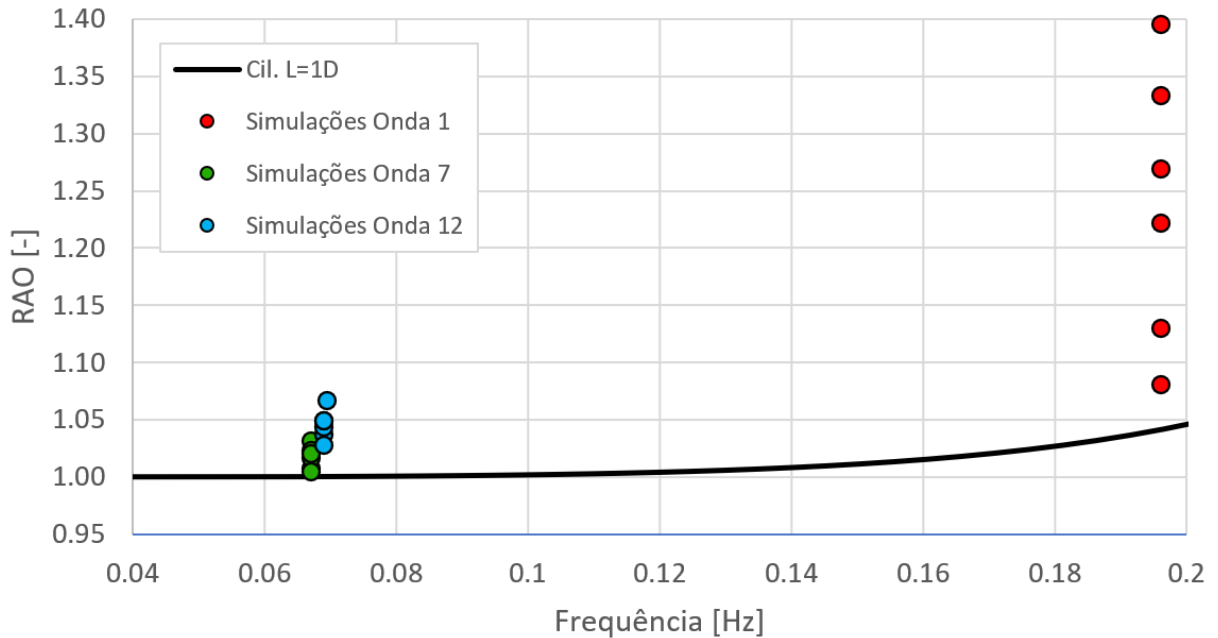
Tabela 26 – Síntese dos resultados numéricos para a Onda 12

| Posição | $H_{NP}$ [mm] | $H_{NB}$ [mm] | $H_{NB}/H_{NP}$ [-] |
|---------|---------------|---------------|---------------------|
| 1       | 190.88        | 197.95        | 1.037               |
| 2       | 190.77        | 196.10        | 1.028               |
| 3       | 188.38        | 196.66        | 1.044               |
| 4       | 187.75        | 197.04        | 1.049               |
| 5       | 186.66        | 195.76        | 1.049               |
| 6       | 184.76        | 197.13        | 1.067               |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Juntamente ao bom desempenho das simulações de rastreamento de NBs apresentado na Seção 4.2.2, como as razões entre alturas nas 6 posições se mantiveram superiores e próximas a 1 para as Ondas 7, 12 e, feitas as devidas considerações, para a Onda 1 também, é possível afirmar que a função de transferência dos alvos flutuantes não é a responsável pelas diferenças observadas entre medições experimentais de altura de onda via rastreamento óptico e sensor convencional. Isso se justifica ao verificar que as razões de alturas tenderam a se adequar bem à previsão das curvas de RAO das simulações potenciais, como pode ser visto na Figura 25, apresentando valores próximos a 1 nas ondas de menor frequência (Ondas 7 e 12) que se aproximam do limite assintótico de baixas frequências, valores levemente superiores a 1 na frequência da Onda 1 e a ausência de razões de alturas inferiores a 1, o que não é possível ocorrer na faixa de frequências abordada de acordo com a curva de RAO gerada.

Figura 25 – Razões de áreas para as três ondas com frequências em escala 100:1 junto à curva de RAO gerada pelo software Maxsurf Motions para cilindro de comprimento igual ao diâmetro

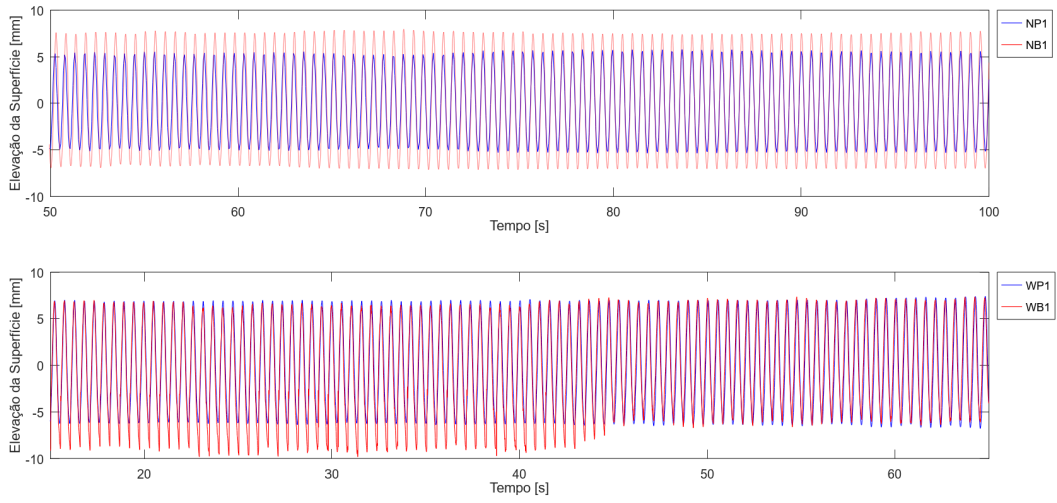


Fonte: Autor (2023).

Como dito acima, a curva de RAO não prevê valores inferiores a 1 de razão entre alturas, o que direciona as investigações para a influência de fenômenos ópticos no sistema de rastreamento por imagem visto que tais valores foram encontrados apenas nos resultados experimentais.

Adicionalmente, comparando os registros temporais de medições experimentais e numéricas dos trechos em regime permanente utilizados para o tratamento dos sinais, identificam-se visualmente, principalmente nas cavas, algumas diferenças entre os registros experimentais de WPs e WBs, o que não ocorre na maioria dos registros numéricos. Além disso, para a Onda 1, na maior parte das WBs são visíveis maiores e singulares variações no registro das cavas, como apresentado na Figura 26. As comparações para todas as Ondas e posições dos sensores podem ser visualizadas no Apêndice B.

Figura 26 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 1



Fonte: Autor (2023).

## 5 CONCLUSÕES

Este estudo abordou a avaliação da dinâmica de corpos flutuantes por meio da fluidodinâmica computacional com o intuito de verificar se a função de transferência de alvos refletivos flutuantes para rastreamento óptico era o motivo de diferenças entre as medições de altura de onda deste tipo de sensoriamento e de sensores capacitivos convencionais observadas no trabalho de Hannes (2020). O estudo abordou 3 ondas das 13 ondas ensaiadas de modo a cobrir o intervalo de alturas e períodos de onda. Para tal, desenvolveu-se um NWT com região de interesse igual ao CH-TPN e com região 90% porosa em formato de praia com inclinação de  $10^\circ$ , selecionada por meio da avaliação de estratégias para minimizar efeitos de reflexão de ondas na extremidade oposta à geração.

Destaca-se que o NWT desenvolvido, por gerar ondas adequadamente e permitir avaliar o comportamento de corpos sob ação de ondas com baixo custo comparado a experimentos em tanques reais, impulsiona o surgimento de novas linhas de pesquisa sem que seja necessário um esforço inicial tão grande em ajustar a geração de ondas. No Apêndice C é possível encontrar indicações para o setup do NWT no OpenFOAM para a Onda 7.

No que tange ao objetivo principal do trabalho, as medições numéricas tanto com corpo flutuante quanto sem, assim como as medições experimentais, apresentaram baixas diferenças absolutas em relação ao valor nominal. Além disso, as diferenças relativas entre abordagens numérica e experimental não ultrapassaram 25% em nenhuma comparação direta entre *Numerical Probes* (NP) e *Wave Probes* (WP), e *Numerical Balls* (NB) e *Wave Balls* (WB), sendo, na maioria dos casos, inferior a 10%.

Entretanto, calculando as razões entre alturas medidas pelos pares NB e NP em cada uma das 6 posições consideradas, percebem-se valores com baixo desvio padrão muito próximos à unidade para as Ondas 7 e 12, e levemente superiores a 1 para a Onda 1, comportamento já previsto pela curva RAO gerada para o corpo flutuante via software potencial. Computando as razões entre as medições experimentais de WB e WP não é identificado o mesmo padrão, com valores com maior desvio padrão e, inclusive, razões inferiores a 1, o que não deveria ocorrer na faixa de frequências em que os experimentos foram realizados pois se aproximam do limite assintótico de baixas frequências, onde as razões tendem a 1 por cima quando mais baixa é a frequência da onda incidente.

Destarte, conclui-se que as diferenças observadas na base experimental não se devem à resposta dos corpos flutuantes às ondas geradas, direcionando estudos futuros para as demais hipóteses para diferenças nos resultados experimentais levantadas por

Hannes (2020). Dentre as propostas de investigação, destacam-se as que abordam os fenômenos ópticos, como a avaliação do impacto do nível de iluminação do ambiente, verificação da possibilidade de reflexão dos raios infravermelhos na superfície da água e comparação entre medições por rastreamento de alvos passivos e ativos, ou seja, com emissão própria de luz. Além disso, ainda é possível investigar mais a fundo a problemática abordada neste trabalho por meio de simulações tridimensionais ou em softwares comerciais com scripts mais otimizados que tornem menor o custo computacional, possibilitando avaliações mais detalhadas.

## REFERÊNCIAS

- BERBEROVIC, E. et al. Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: Dynamics of the cavity evolution. **Physical Review E**, n. 79, p. 1–15, abr 2009.
- BHATTACHARYYA, R. **Dynamics of marine vehicles**. Nova Iorque: John Willey & Sons, 1978.
- CARNEIRO, M. L. **Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanques de ensaios de estruturas oceânicas**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- CARNEIRO, M. L. **Desenvolvimento de sistema de controle para geração e absorção ativa de ondas em tanques de ensaios de estruturas oceânicas**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- CHAKRABARTI, S. K. **Hydrodynamics of offshore structures**. Plainfield: Springer, 1987.
- CHEN, H. et al. Application of an overset mesh based numerical wave tank for modelling realistic free-surface hydrodynamic problems. **Ocean Engineering**, n. 176, p. 97–117, fev 2019.
- CONDE, J. M. P. Comparison of different methods for generation and absorption of water waves. **Engenharia Térmica (Thermal Engineering)**, v. 18, n. 1, p. 71–77, jun 2019.
- CONDE, J. M. P. et al. Comparação de técnicas de absorção passiva de ondas com avaliação da agitação incidente e refletida em canal. *In*: 2ª JORNADA DE ENGENHARIA HIDROGRÁFICA. **Anais [...]**. Lisboa, 2012. Disponível em: [http://repositorio.inec.pt:8080/jspui/bitstream/123456789/1003819/1/2as\%20Jornadas\%20de\%20Engenharia\%20Hidrogr\%C3%A1fica\\_2012\\_Conde\\_et\\_al.pdf](http://repositorio.inec.pt:8080/jspui/bitstream/123456789/1003819/1/2as\%20Jornadas\%20de\%20Engenharia\%20Hidrogr\%C3%A1fica_2012_Conde_et_al.pdf). Acesso em: 21 nov. 2022.
- DE MELLO, P. C. **Sistema de automação e controle para tanques oceânicos com múltiplos atuadores**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- DE MOURA, C. A.; KUBRUSLY, C. S. **The Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) condition**. Rio de Janeiro: Birkhauser, 2013.
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. 2. ed. Singapura: World Scientific, 1991.
- ELMORE, W. C.; HEALD, M. A. **Physics of waves**. Nova Iorque: McGraw-Hill Book Company, 1969.



FUJARRA, A. C. et al. Optical motion capture as a technique for measuring the water wave elevation. *In: Proceedings* of the 4th INTERNATIONAL WORKSHOP ON APPLIED OFFSHORE HYDRODYNAMICS. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: [https://www.academia.edu/30904683/Optical\\_motion\\_capture\\_as\\_a\\_technique\\_for\\_measuring\\_the\\_water\\_wave\\_elevation](https://www.academia.edu/30904683/Optical_motion_capture_as_a_technique_for_measuring_the_water_wave_elevation). Acesso em: 15 out. 2022.

HANNES, N. H. **Determinação das propriedades de ondas de gravidade com um sistema de rastreamento óptico**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas) — Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2020.

HIGUERA, P. **Application of computational fluid dynamics to wave action on structures**. 2015. PhD Thesis — University of Cantabria, 2015.

HIGUERA, P. **olaFlow Reference Manual**. Cantabria: olaFlow CFD, 2016.

JASAK, H. **Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows**. 1996. PhD Thesis — Imperial College of Science, Technology and Medicine, 1996.

JOURNÉE, J. M. J.; MASSIE, W. W. **Offshore hydromechanics**. Delft: Delft University of Technology, 2001.

LE MÉHAUTÉ, B. **An introduction to hydrodynamics and water waves**. Rio de Janeiro: Springer, 1976.

LIBURDY, J. **Intermediate fluid mechanics**. Corvallis: Oregon State University, 2021.

MICHIMA, P. S. S. **Estudo de um absorvedor de ondas ativo para tanque didático**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

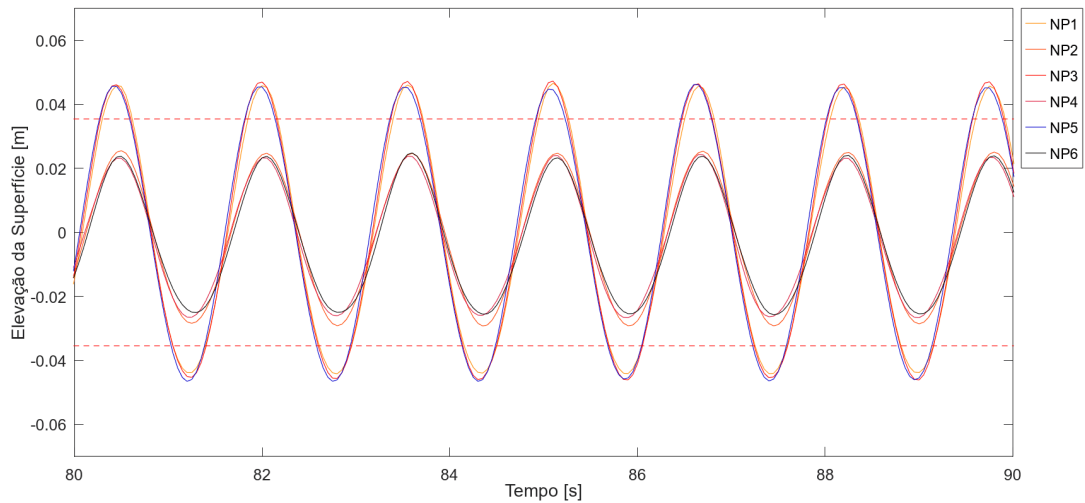
VERSTEEG, H. K.; MALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics**. 2. ed. Harlow: Pearson, 2007.

WHITTAKER, T.; FOLLEY, M.; HANCOCK, J. Environmental loads, motions, and mooring systems. *In: ROSA-CLOT, M.; TINA, G. M. Floating PV Plants*. Elsevier, p. 47–66, 2020.

YOUNG, I.; BABANIN, A. **Ocean wave dynamics**. Singapura: WSPC, 2020.

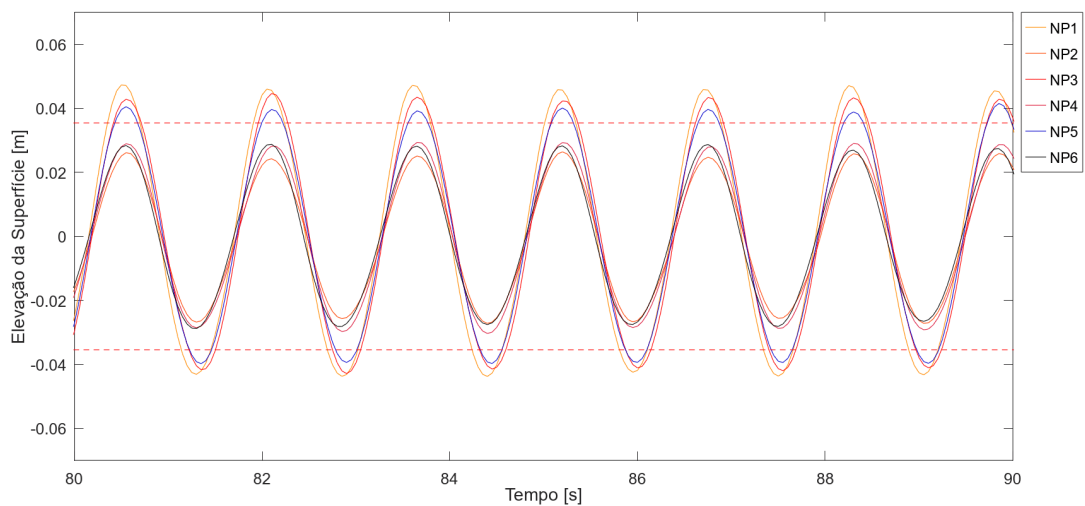
## APÊNDICE A - VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DO DESEMPENHO DAS ESTRATÉGIAS DE ABSORÇÃO SOB GERAÇÃO CONTÍNUA DE ONDAS

Figura 27 – Caso 2: Absorção Ativa



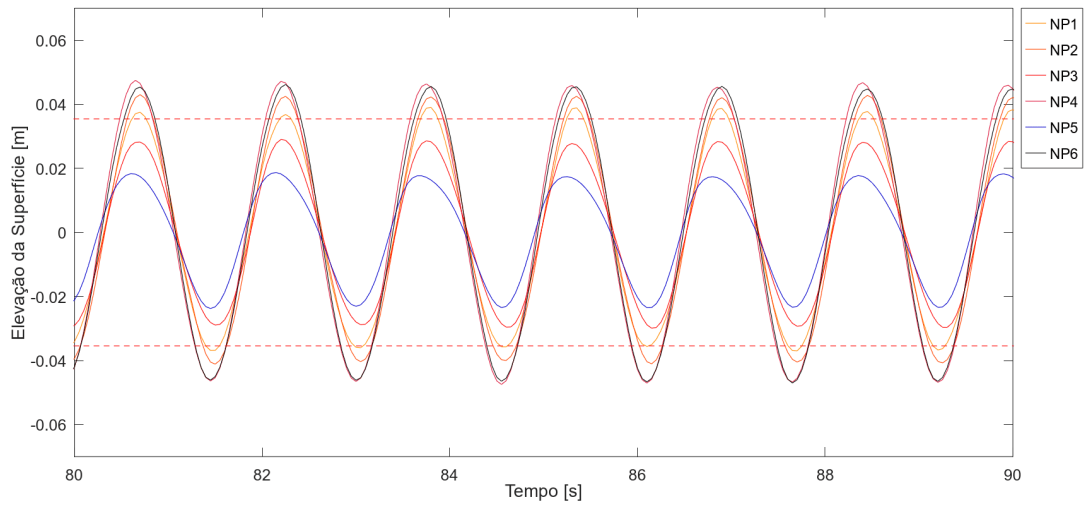
Fonte: Autor (2023).

Figura 28 – Caso 3: Praia Física, Inclinação 10°



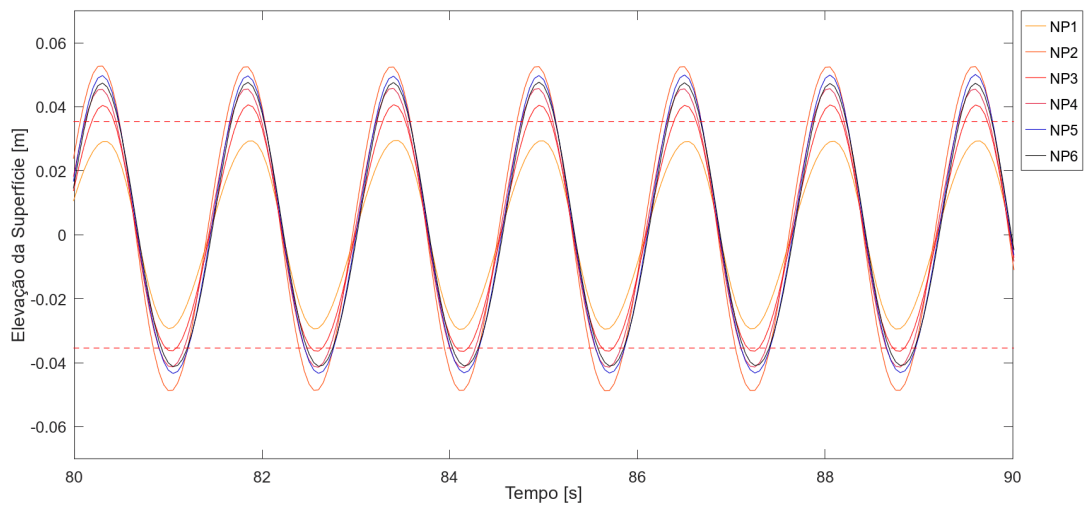
Fonte: Autor (2023).

Figura 29 – Caso 4: Praia Física, Inclinação 20°



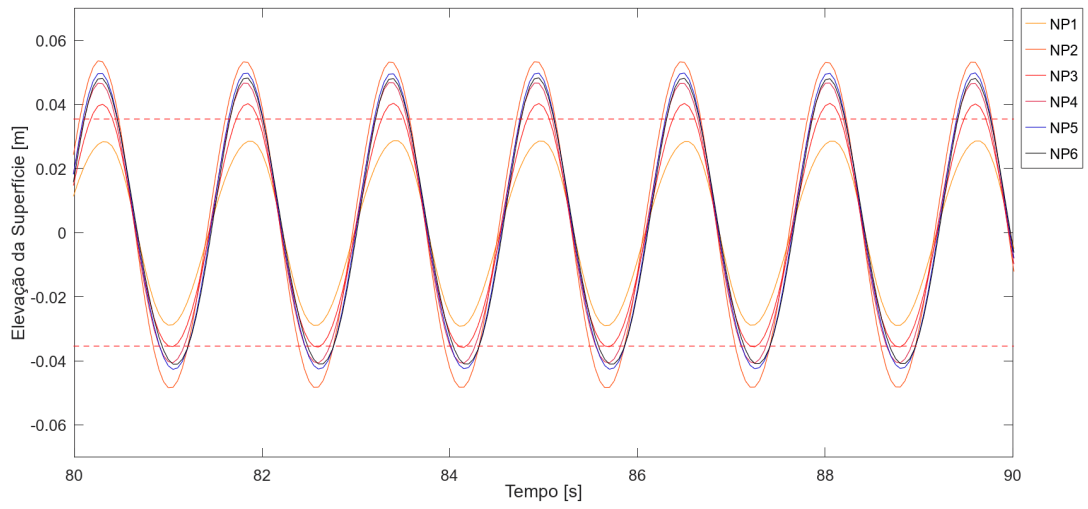
Fonte: Autor (2023).

Figura 30 – Caso 5: Região Retangular 30% Porosa, Comprimento 32m



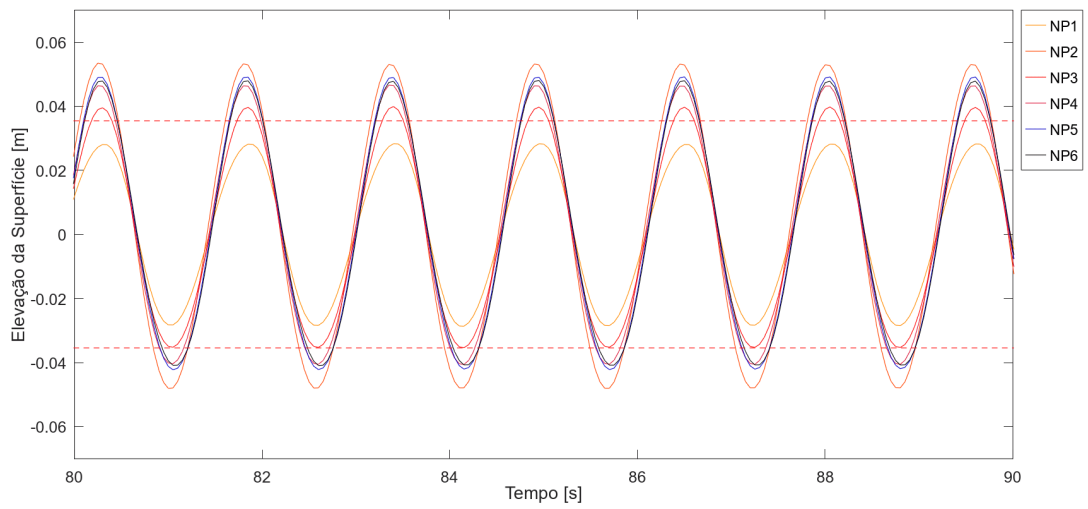
Fonte: Autor (2023).

Figura 31 – Caso 6: Região Retangular 30% Porosa, Comprimento 16m



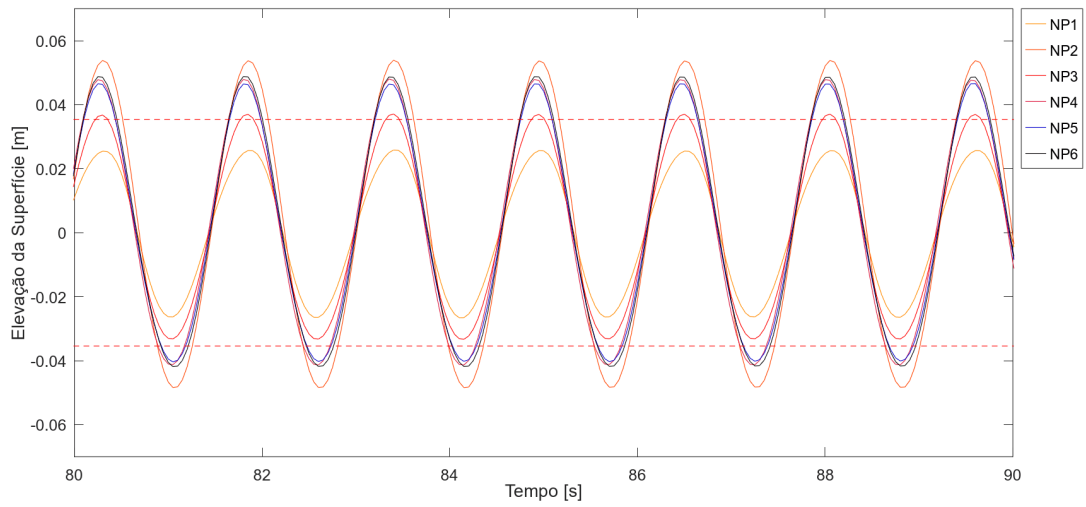
Fonte: Autor (2023).

Figura 32 – Caso 7: Região Retangular 30% Porosa, Comprimento 8m



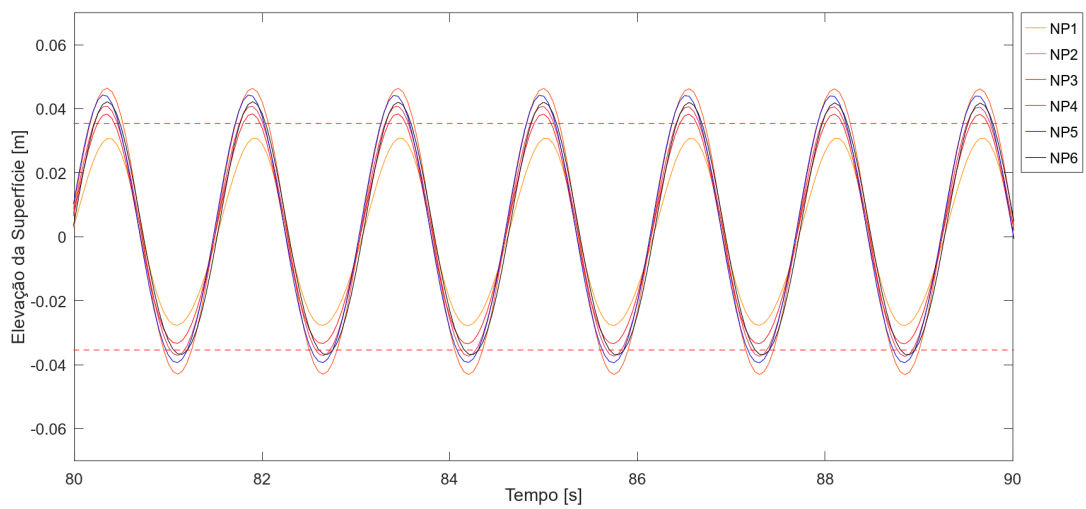
Fonte: Autor (2023).

Figura 33 – Caso 8: Região Retangular 30% Porosa, Comprimento 4m



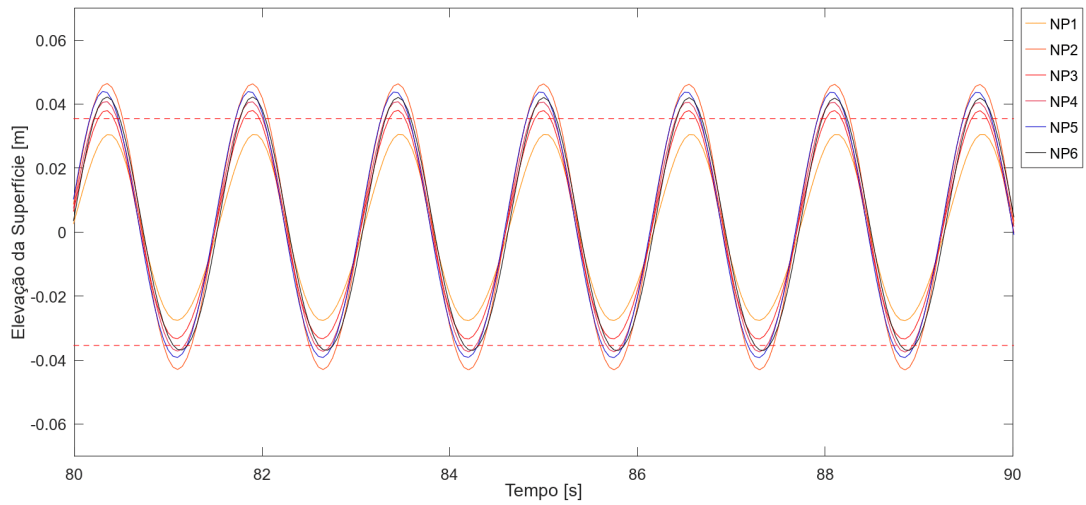
Fonte: Autor (2023).

Figura 34 – Caso 9: Região Retangular 50% Porosa, Comprimento 32m



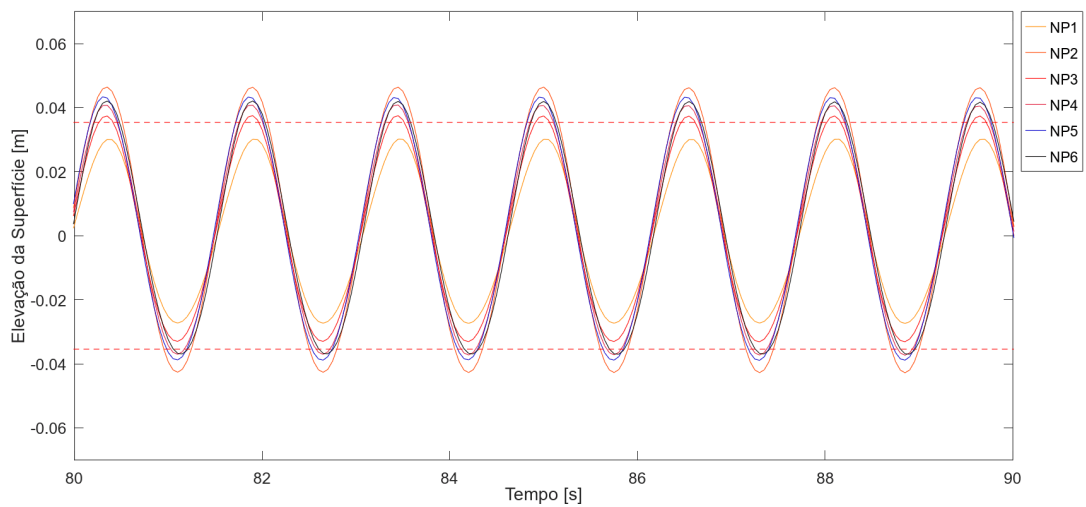
Fonte: Autor (2023).

Figura 35 – Caso 10: Região Retangular 50% Porosa, Comprimento 16m



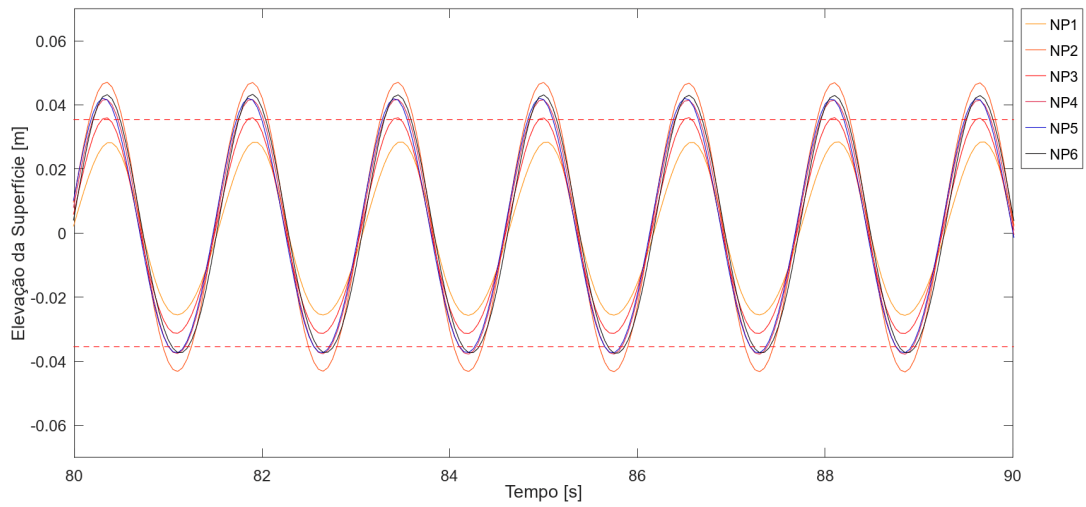
Fonte: Autor (2023).

Figura 36 – Caso 11: Região Retangular 50% Porosa, Comprimento 8m



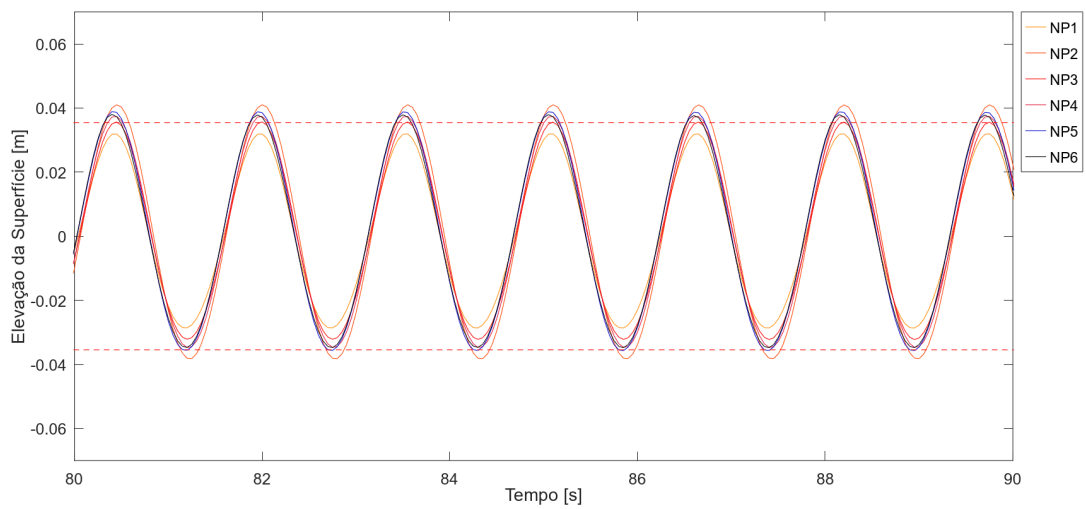
Fonte: Autor (2023).

Figura 37 – Caso 12: Região Retangular 50% Porosa, Comprimento 4m



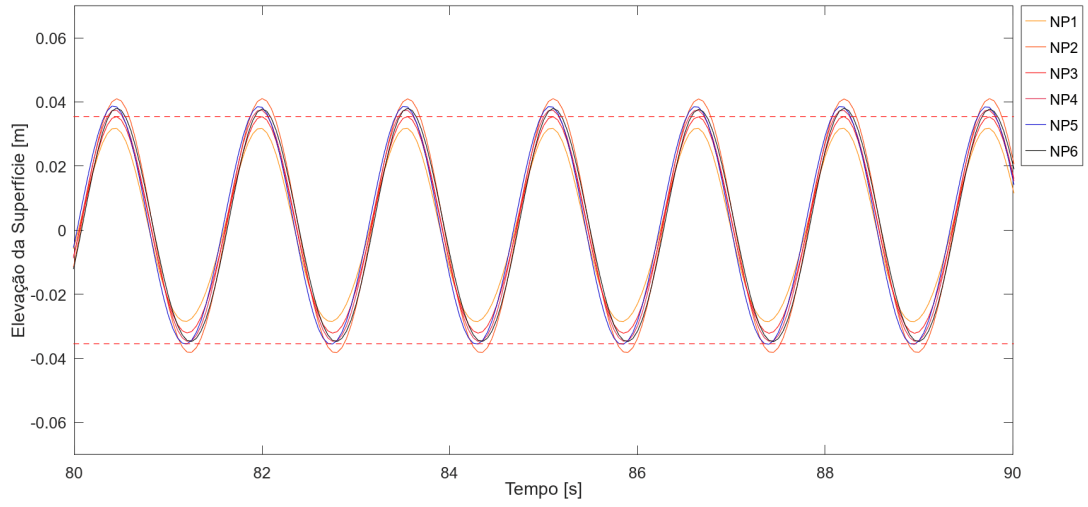
Fonte: Autor (2023).

Figura 38 – Caso 13: Região Retangular 70% Porosa, Comprimento 32m



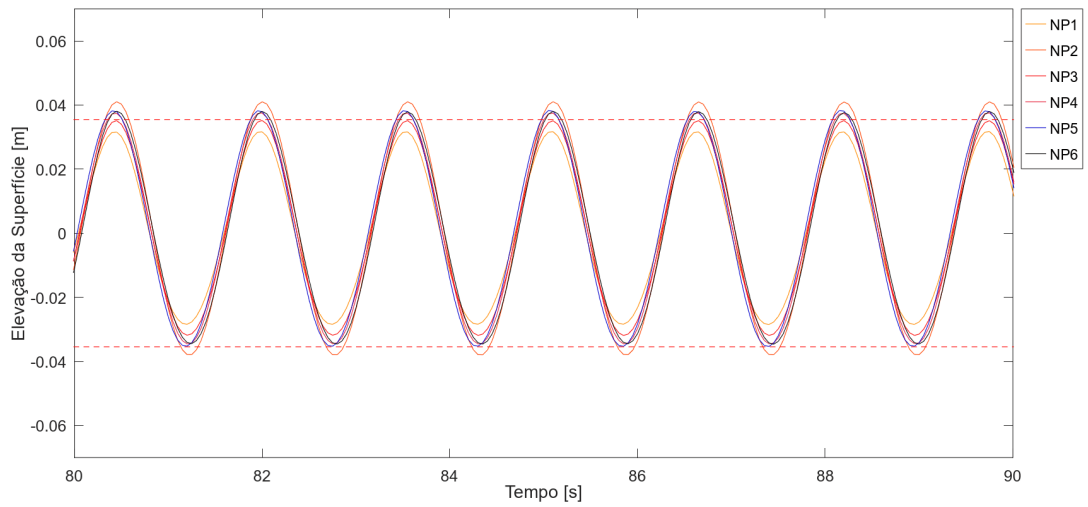
Fonte: Autor (2023).

Figura 39 – Caso 14: Região Retangular 70% Porosa, Comprimento 16m



Fonte: Autor (2023).

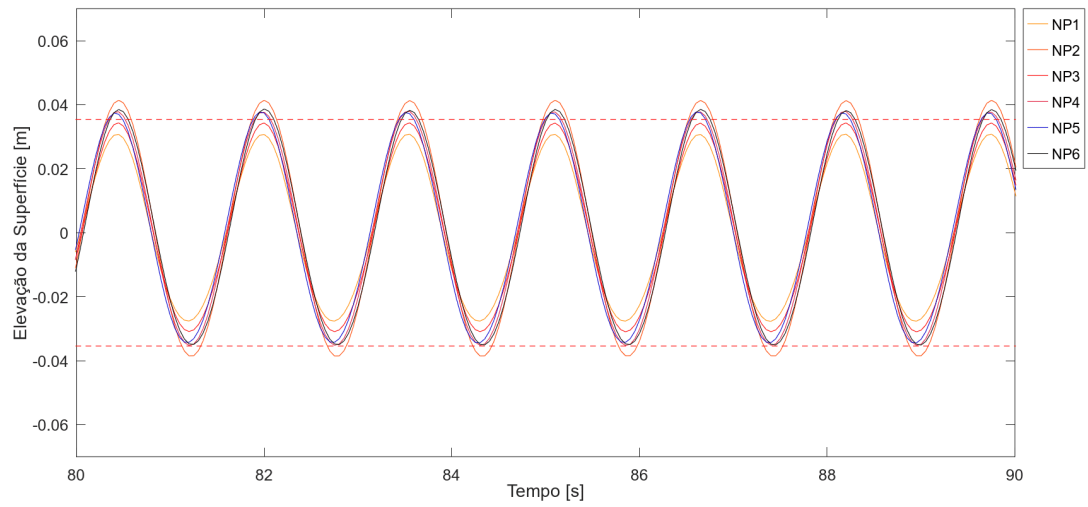
Figura 40 – Caso 15: Região Retangular 70% Porosa, Comprimento 8m



Fonte: Autor (2023).

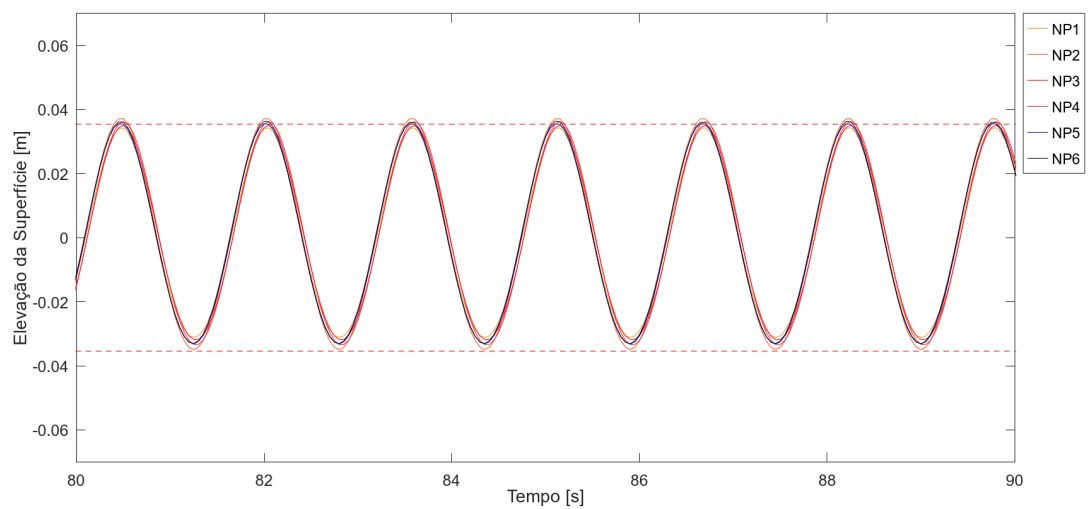


Figura 41 – Caso 16: Região Retangular 70% Porosa, Comprimento 4m



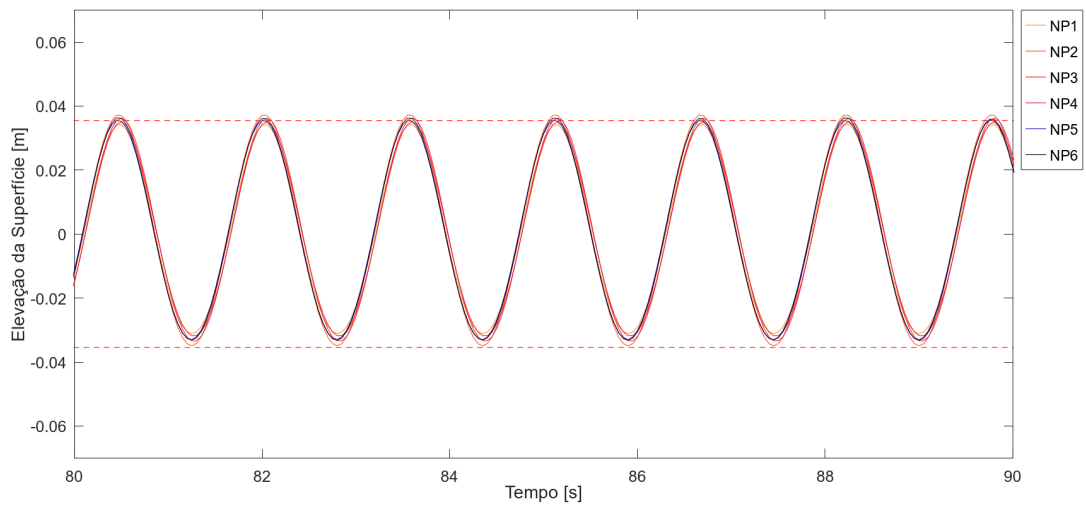
Fonte: Autor (2023).

Figura 42 – Caso 17: Região Retangular 90% Porosa, Comprimento 32m



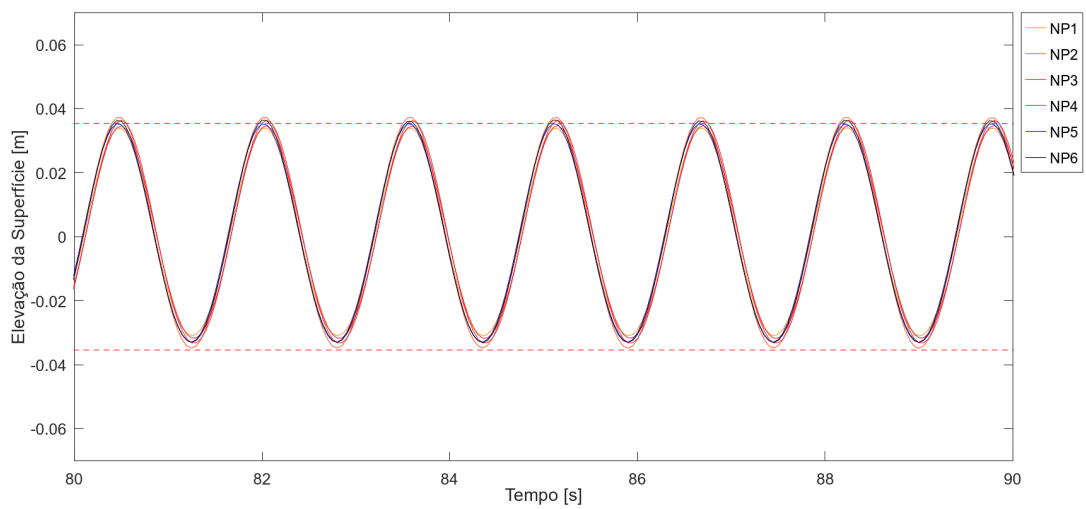
Fonte: Autor (2023).

Figura 43 – Caso 18: Região Retangular 90% Porosa, Comprimento 16m



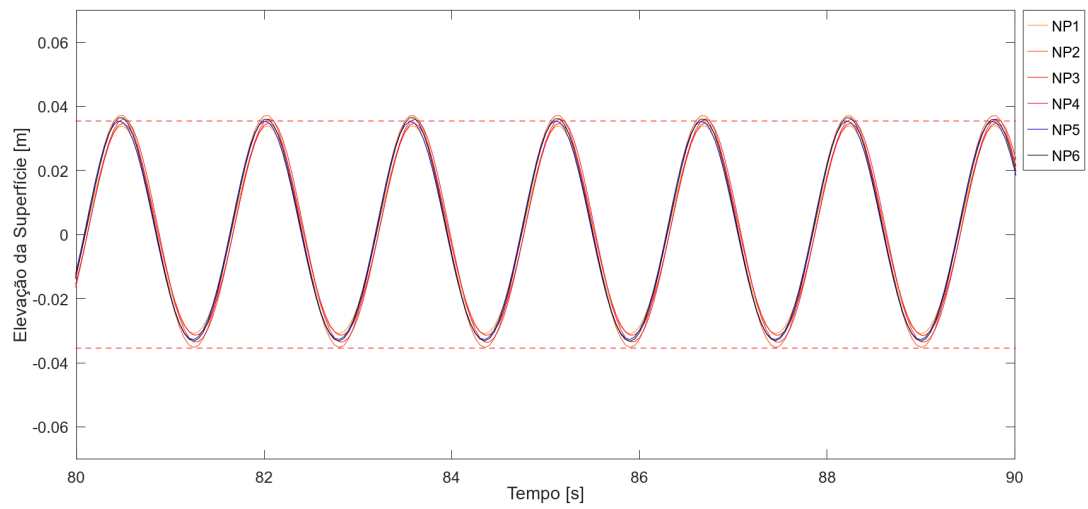
Fonte: Autor (2023).

Figura 44 – Caso 19: Região Retangular 90% Porosa, Comprimento 8m



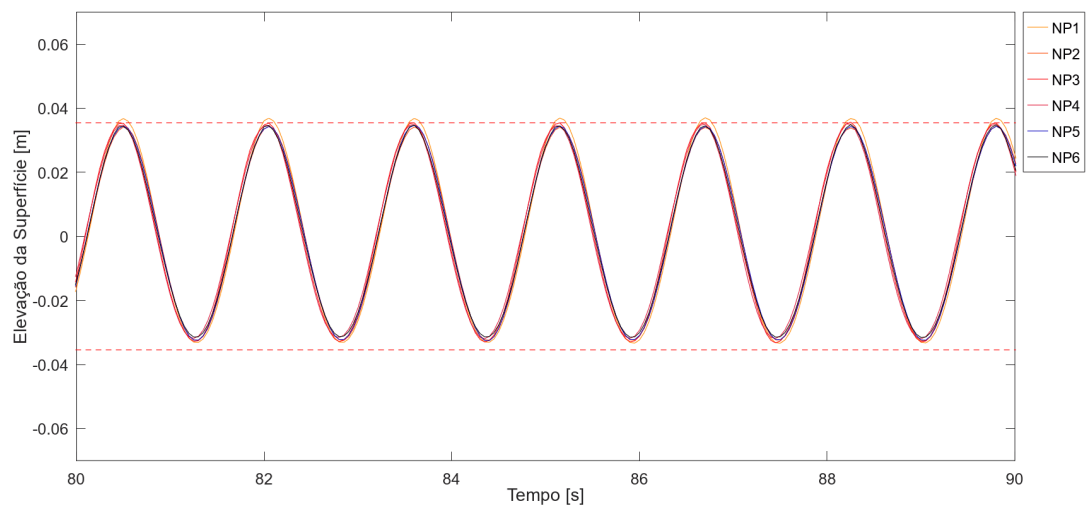
Fonte: Autor (2023).

Figura 45 – Caso 20: Região Retangular 90% Porosa, Comprimento 4m



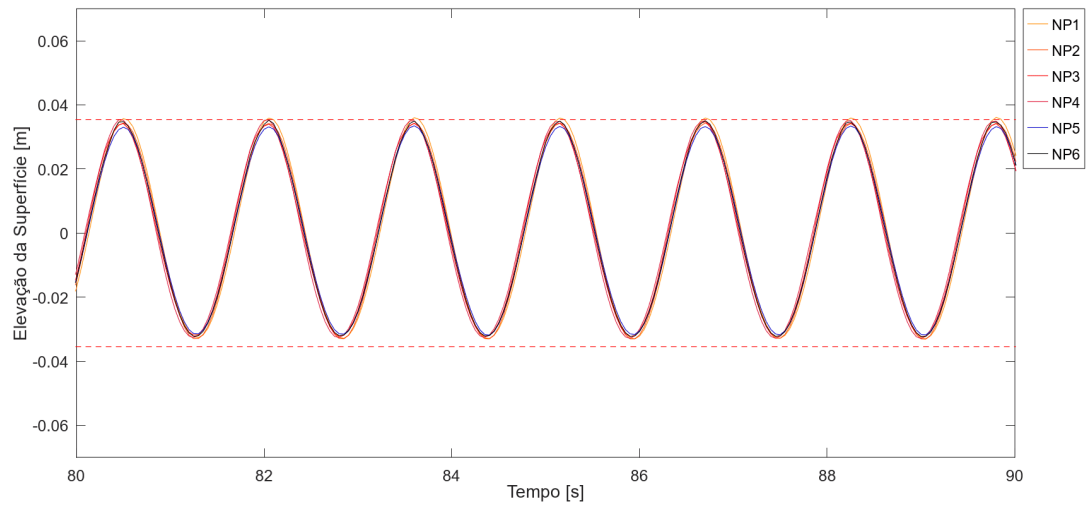
Fonte: Autor (2023).

Figura 46 – Caso 21: Praia 30% Porosa, Inclinação 10°



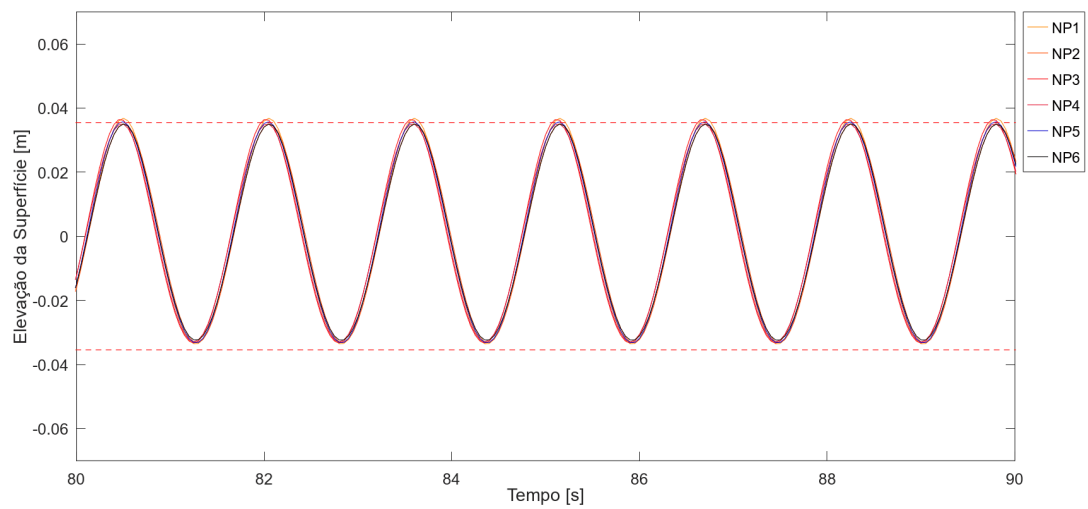
Fonte: Autor (2023).

Figura 47 – Caso 22: Praia 50% Porosa, Inclinação 10°



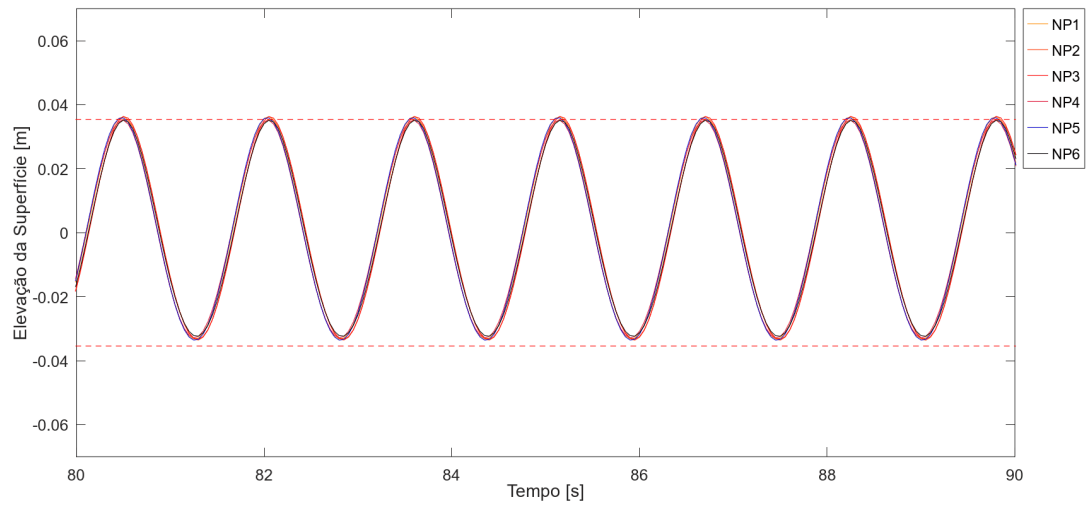
Fonte: Autor (2023).

Figura 48 – Caso 23: Praia 70% Porosa, Inclinação 10°



Fonte: Autor (2023).

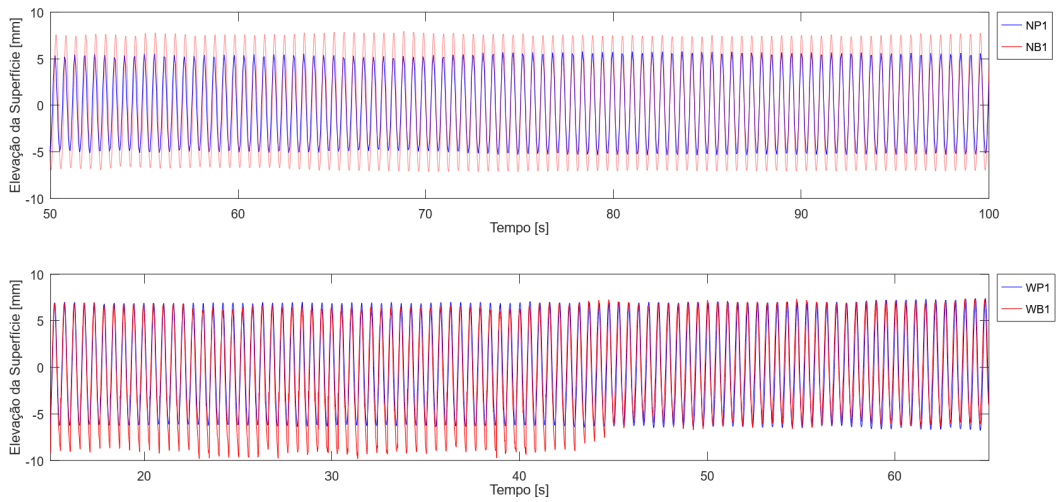
Figura 49 – Caso 24: Praia 90% Porosa, Inclinação 10°



Fonte: Autor (2023).

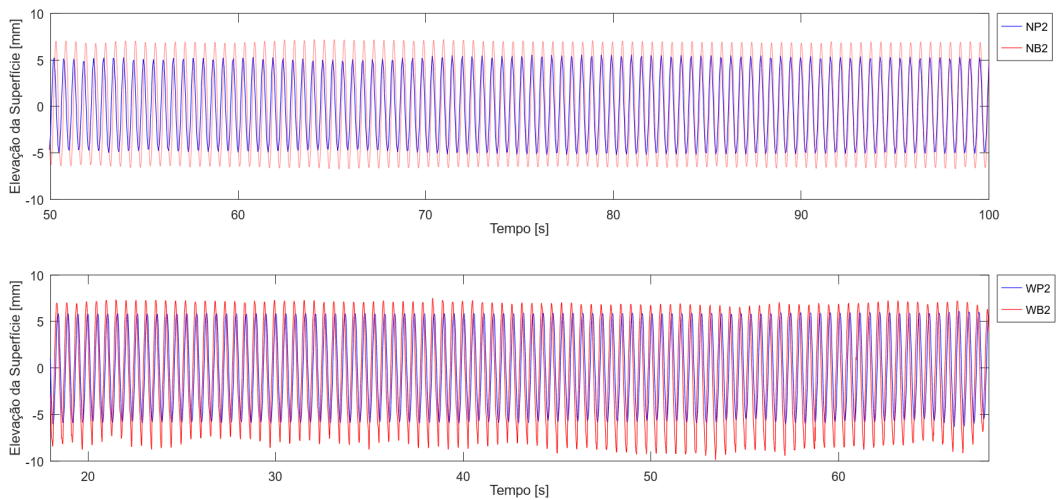
## APÊNDICE B - COMPARAÇÕES DOS REGISTROS TEMPORAIS DOS REGISTROS DE WP E WB PARA AS ABORDAGENS NUMÉRICA E EXPERIMENTAL

Figura 50 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 1



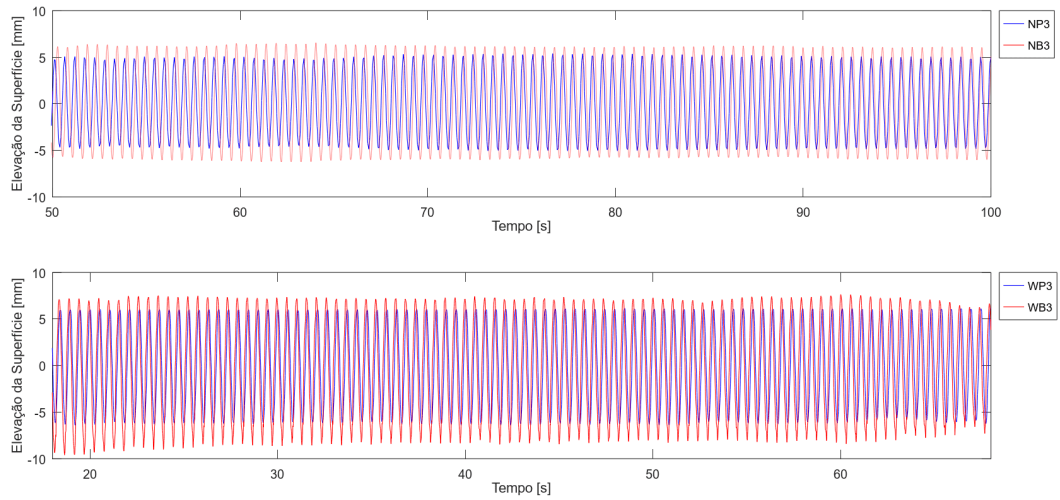
Fonte: Autor (2023).

Figura 51 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 2



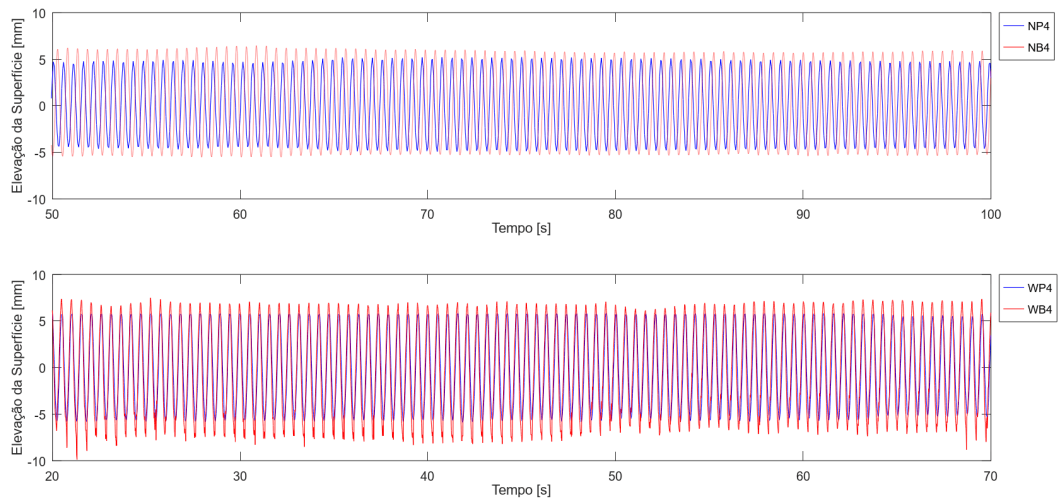
Fonte: Autor (2023).

Figura 52 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 3



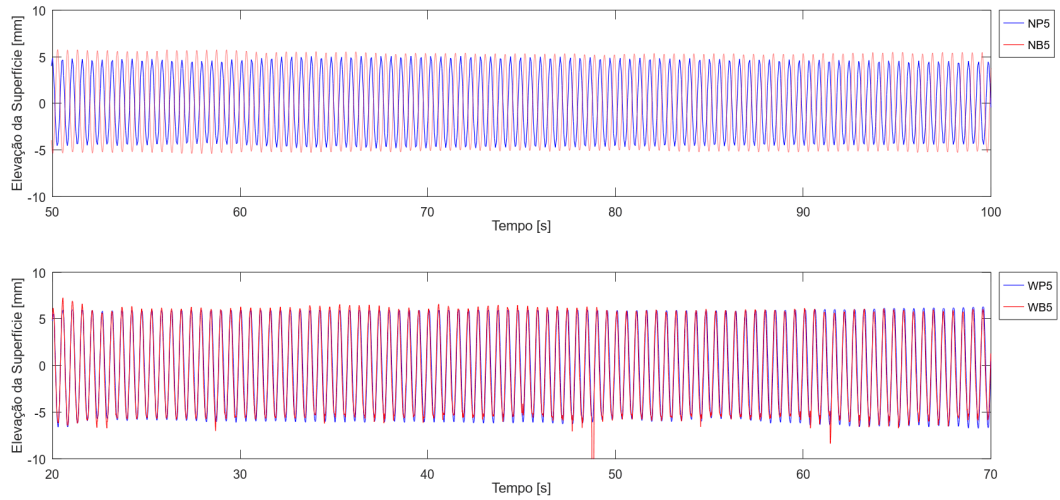
Fonte: Autor (2023).

Figura 53 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 4



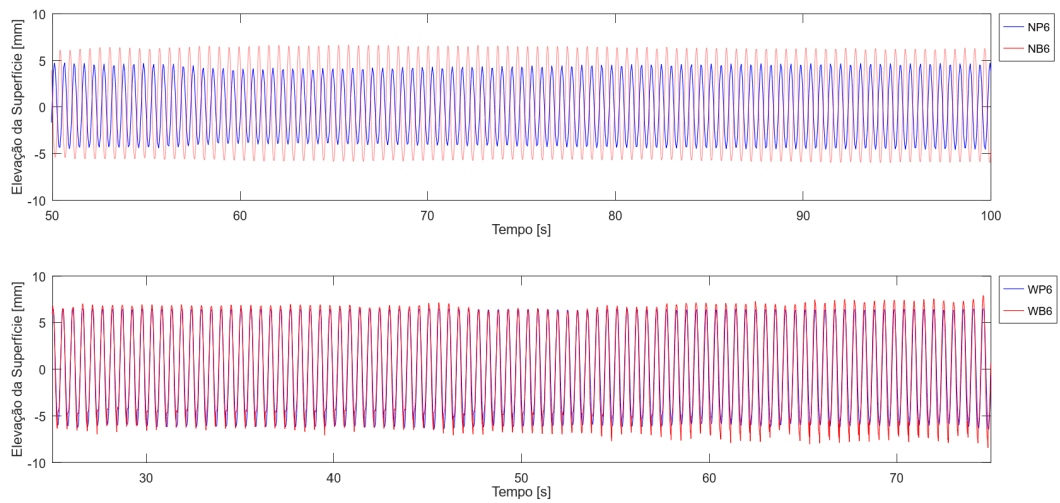
Fonte: Autor (2023).

Figura 54 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 5



Fonte: Autor (2023).

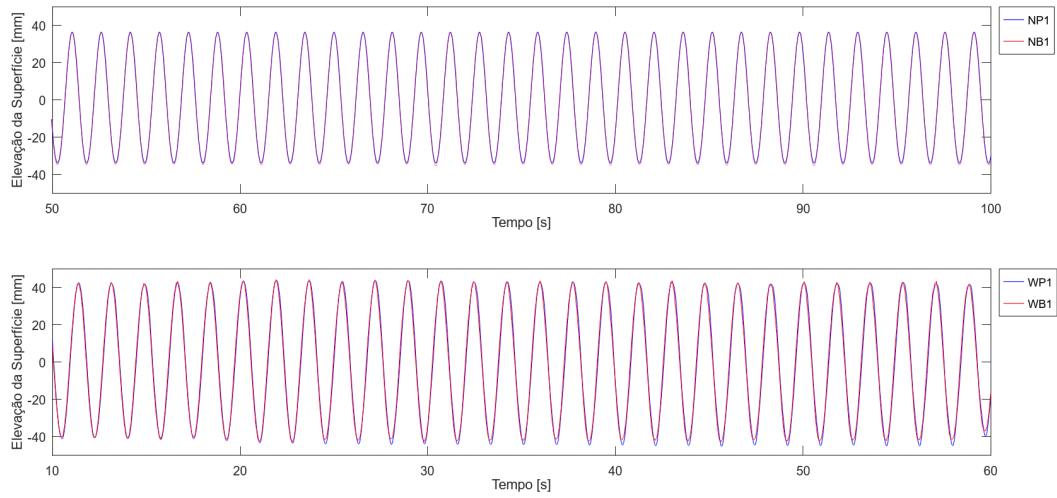
Figura 55 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 1, par 6



Fonte: Autor (2023).

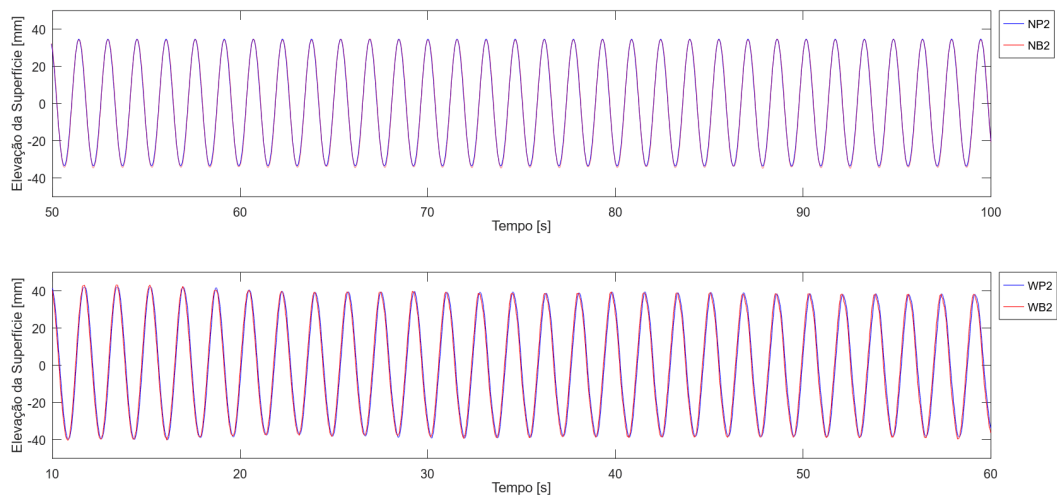


Figura 56 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 7, par 1



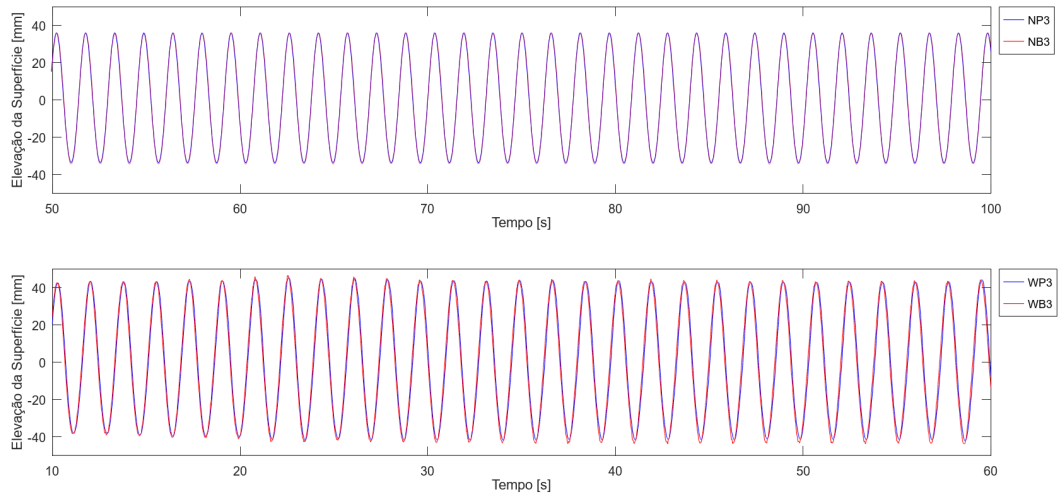
Fonte: Autor (2023).

Figura 57 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 7, par 2



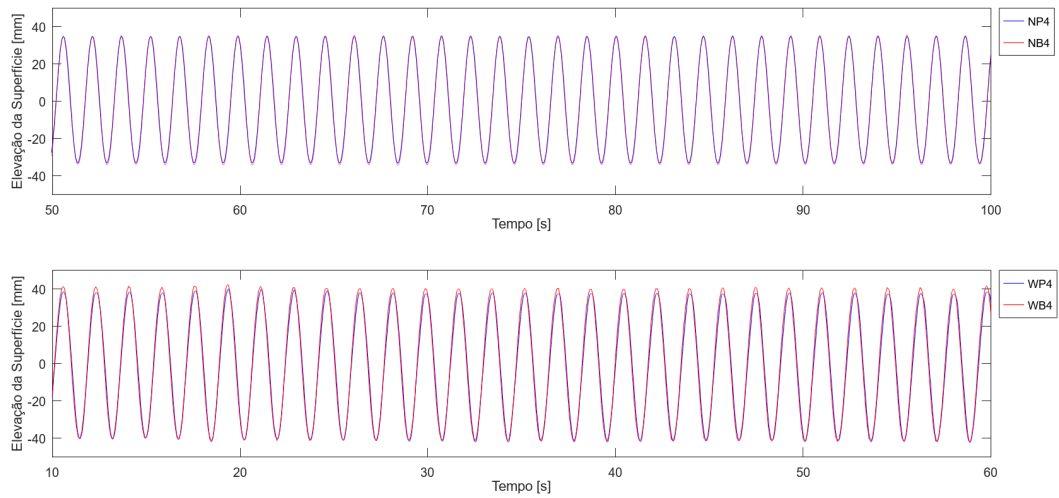
Fonte: Autor (2023).

Figura 58 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 7, par 3



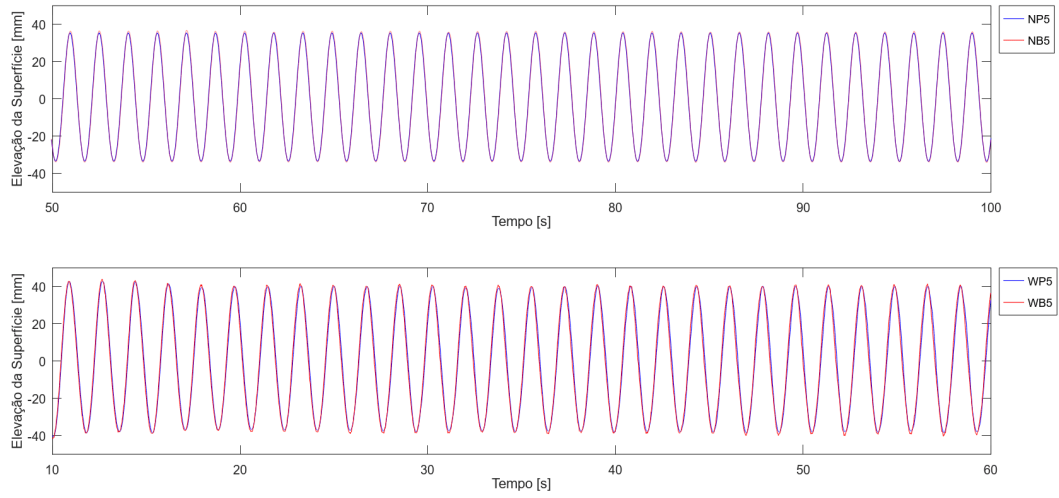
Fonte: Autor (2023).

Figura 59 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 7, par 4



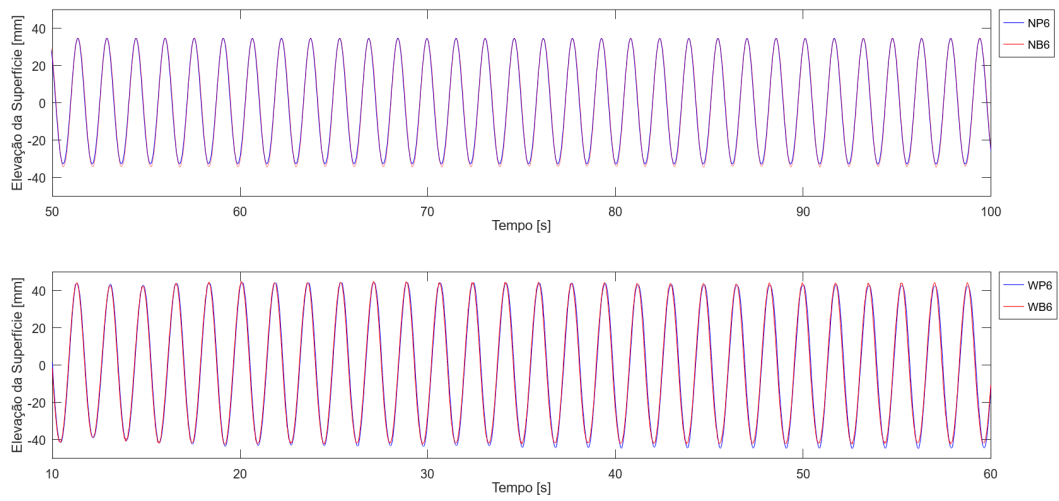
Fonte: Autor (2023).

Figura 60 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 7, par 5



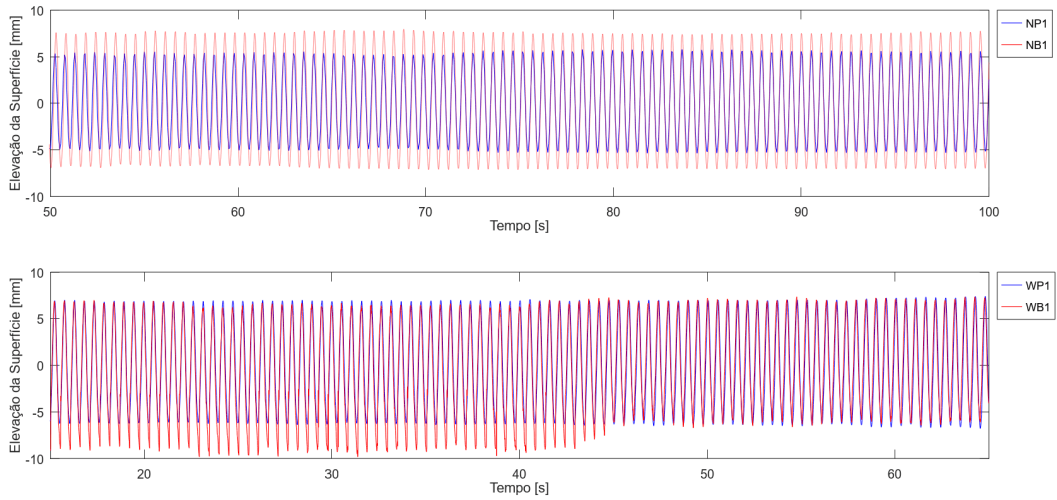
Fonte: Autor (2023).

Figura 61 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 7, par 6



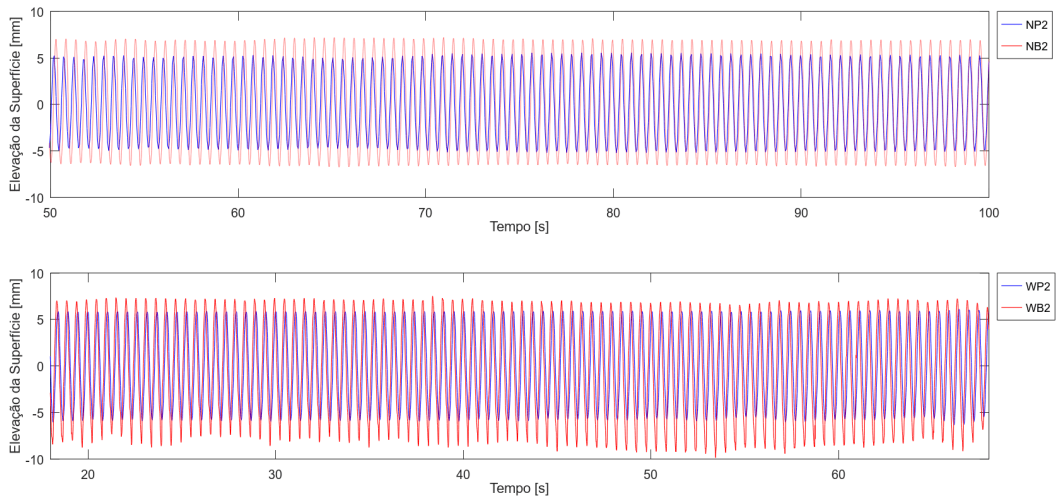
Fonte: Autor (2023).

Figura 62 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 12, par 1



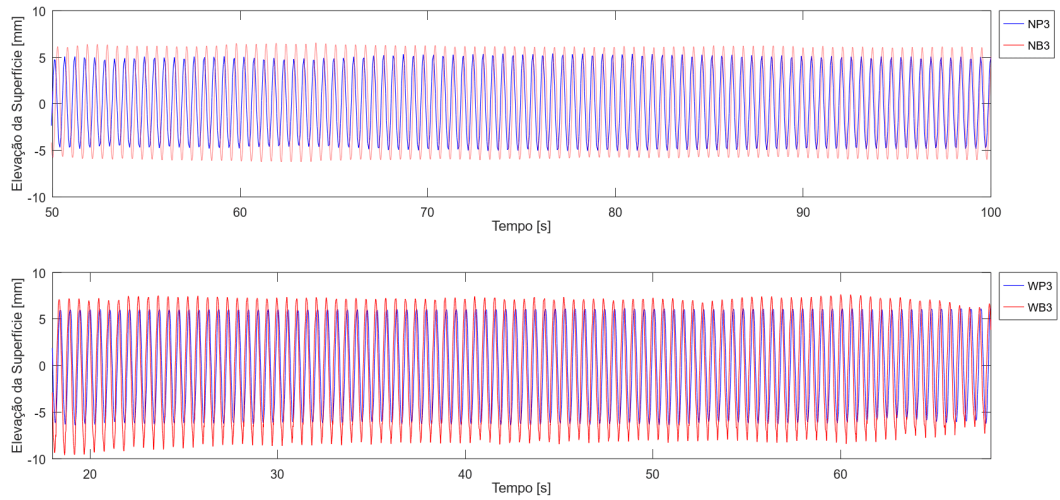
Fonte: Autor (2023).

Figura 63 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 12, par 2



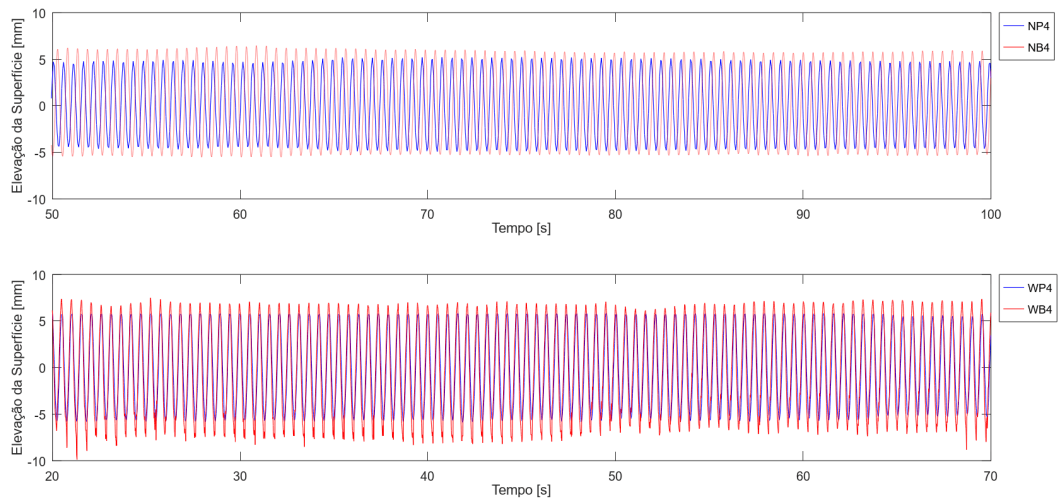
Fonte: Autor (2023).

Figura 64 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 12, par 3



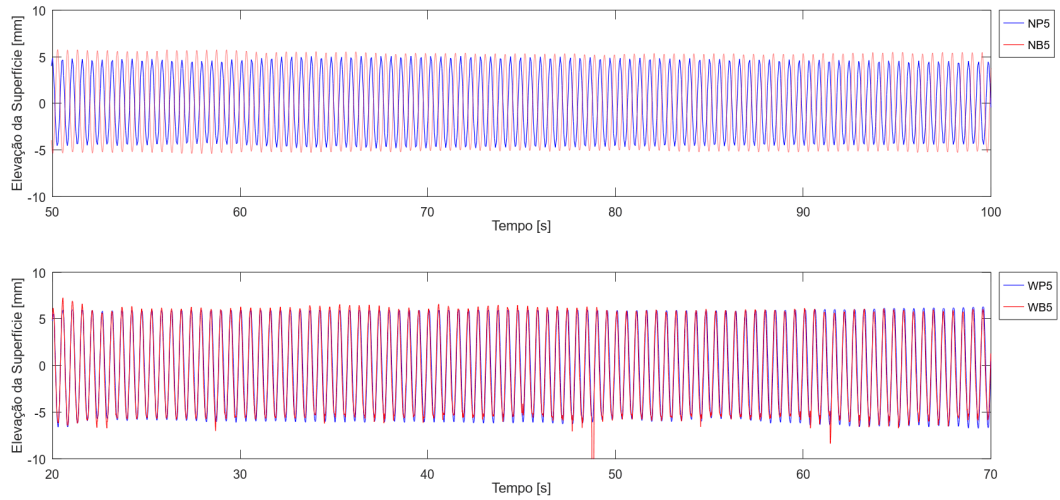
Fonte: Autor (2023).

Figura 65 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 12, par 4



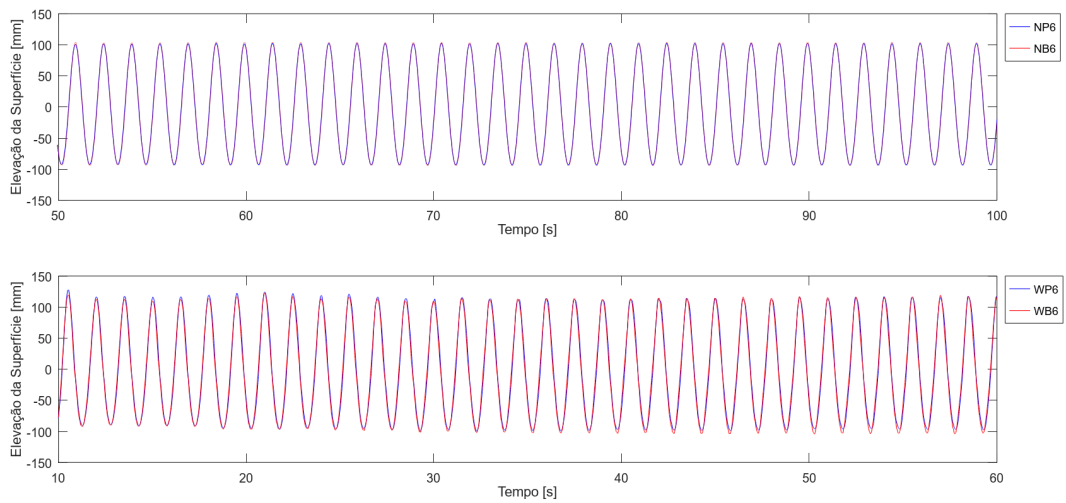
Fonte: Autor (2023).

Figura 66 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 12, par 5



Fonte: Autor (2023).

Figura 67 – Comparação dos Registros Temporais: Onda 12, par 6



Fonte: Autor (2023).

## APÊNDICE C - SETUP PARA SIMULAÇÕES DO NWT NO OPENFOAM 9

Para rodar a simulação é necessário ter o OpenFOAM 9 e o olaFlow instalados no computador, além disso são necessárias as seguintes pastas e arquivos dentro da pasta principal do caso a ser rodado:

- **Pasta "0.org"**: Pasta com os arquivos contendo as condições iniciais e de contorno do problema;  
Arquivos: "alpha", "p\_rgh", "pointDisplacement", "porosityIndex", "U";
- **Pasta "constant"**: Pasta com os arquivos contendo as constantes envolvidas como as características da onda;  
Arquivos: "g", "porosityDict", "transportProperties", "turbulenceProperties", "waveDict";
- **Pasta "system"**: Pasta com os arquivos referentes às configurações da simulação;  
Arquivos: "blockMeshDict", "controlDict", "decomposeParDict", "fvSchemes", "fvSolution", "setFieldsDict";
- Arquivo "postSensVOF".

### COMANDOS PARA RODAR A SIMULAÇÃO

Dentro da pasta do caso contendo as pastas e arquivos apontados acima execute os seguintes comandos:

- `rm -r 0`
- `cp -r 0.org/ 0`
- `runApplication blockMesh`
- `runApplication setFields`
- `runApplication decomposePar`
- `runParallel -s controlDict $(getApplication)`
- `python3 postSensVOF.py`

### CONFIGURAÇÃO DOS ARQUIVOS

Na sequência podem ser verificados cada um dos arquivos listados acima com as configurações utilizadas na simulação da Onda 7 com a configuração de absorção

com praia 90% porosa de 10° com absorção ativa do olaFlow na extremidade oposta ao gerador de ondas.

### Arquivo "alpha":

```
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       alpha.water;
}
dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {
        type            waveAlpha;
        waveDictName    waveDict;
        value            uniform 0;
    }
    front
    {
        type            empty;
    }
    back
    {
        type            empty;
    }
    bottom
    {
        type            zeroGradient;
    }
    outlet
    {
        type            zeroGradient;
    }
}
```



```

    }
    atmosphere
    {
        type            inletOutlet;
        inletValue      uniform 0;
        value           uniform 0;
    }
}

```

```
\*-----*/
```

### Arquivo "p\_rgh":

```
\*-----*/
```

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       p_rgh;
}

```

```
\*-----*/
```

```
dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];
```

```
internalField   uniform 0;
```

```

boundaryField
{
    front
    {
        type            empty;
    }
    back
    {
        type            empty;
    }
    inlet

```

```

{
    type            fixedFluxPressure;
    value           uniform 0;
}
bottom
{
    type            fixedFluxPressure;
    value           uniform 0;
}
outlet
{
    type            fixedFluxPressure;
    value           uniform 0;
}
atmosphere
{
    type            totalPressure;
    U               U;
    phi             phi;
    rho             rho;
    psi             none;
    gamma           1;
    p0              uniform 0;
    value           uniform 0;
}
}

```

\\*-----\*/

### Arquivo "pointDisplacement":

```

\*-----*/
FoamFile
{
    version         2.0;
    format          ascii;
    class           pointVectorField;
}

```

```

    location    "0.01";
    object      pointDisplacement;
}
\*-----*/

dimensions    [0 1 0 0 0 0 0];

internalField uniform (0 0 0);

boundaryField
{
    inlet
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform (0 0 0);
    }
    front
    {
        type      empty;
    }
    back
    {
        type      empty;
    }
    bottom
    {
        type      fixedNormalSlip;
        n         (0 0 1);
        value     uniform (0 0 0);
    }
    outlet
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform (0 0 0);
    }
    atmosphere
    {
        type      zeroGradient;
    }
}

```

```
}

```

```
\*-----*/

```

### Arquivo "porosityIndex":

```
\*-----*/

```

```
FoamFile

```

```
{

```

```
    version      2.0;
    format        ascii;
    class         volScalarField;
    location      "0";
    object        porosityIndex;

```

```
}

```

```
\*-----*/

```

```
dimensions      [0 0 0 0 0 0 0];

```

```
internalField   uniform 0;

```

```
boundaryField

```

```
{

```

```
    inlet
    {
        type          zeroGradient;
    }

```

```
    outlet
    {
        type          zeroGradient;
    }

```

```
    bottom
    {
        type          zeroGradient;
    }

```

```
    atmosphere
    {

```

```

        type          zeroGradient;
    }
    front
    {
        type          empty;
    }
    back
    {
        type          empty;
    }
}

```

```
\*-----*/
```

### Arquivo "U":

```
\*-----*/
```

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volVectorField;
    location     "0";
    object       U;
}

```

```
\*-----*/
```

```
dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
```

```
internalField   uniform (0 0 0);
```

```

boundaryField
{
    inlet
    {
        type          waveVelocity;
        waveDictName  waveDict;
    }
}

```

```

        value            uniform (0 0 0);
    }
    bottom
    {
        type              fixedValue;
        value              uniform (0 0 0);
    }
    outlet
    {
        type              waveAbsorption2DVelocity;
        value              uniform (0 0 0);
    }
    atmosphere
    {
        type              pressureInletOutletVelocity;
        value              uniform (0 0 0);
    }
    front
    {
        type              empty;
    }
    back
    {
        type              empty;
    }
}

```

```
\*-----*/
```

### Arquivo "g":

```
\*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        uniformDimensionedVectorField;
}

```

```

        location    "constant";
        object      g;
    }
    \*-----*/

```

```

dimensions    [0 1 -2 0 0 0 0];
value        ( 0 0 -9.81 );

```

```

\*-----*/

```

### Arquivo "porosityDict":

```

\*-----*/

```

```

FoamFile
{
    version    2.0;
    format     ascii;
    class      dictionary;
    location   "constant";
    object     porosityDict;
}

```

```

\*-----*/

```

```

a          2(0 50);
b          2(0 2.0);
c          2(0 0.34);

```

```

D50        2(1 0.0159);
porosity   2(1 0.9);

```

```

\*-----*/

```

### Arquivo "transportProperties":

```

\*-----*/

```

```

FoamFile

```

```

{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "constant";
    object       transportProperties;
}
/*-----*/

phases (water air);

water
{
    transportModel  Newtonian;
    nu              [0 2 -1 0 0 0 0] 1e-06;
    rho            [1 -3 0 0 0 0 0] 1000;
}

air
{
    transportModel  Newtonian;
    nu              [0 2 -1 0 0 0 0] 1.48e-05;
    rho            [1 -3 0 0 0 0 0] 1;
}

sigma            [1 0 -2 0 0 0 0] 0.07;

/*-----*/

```

### Arquivo "turbulenceProperties":

```

/*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
}

```



```

        class      dictionary;
        location    "constant";
        object      turbulenceProperties;
    }
    /*-----*/

```

```
simulationType laminar;
```

```
/*-----*/
```

### Arquivo "waveDict":

```

/*-----*/
FoamFile
{
    version      2.0;
    format        ascii;
    class        dictionary;
    location      "constant";
    object        waveDict;
}
/*-----*/

```

```
waveType      regular;
```

```
waveTheory     StokesI;
```

```
genAbs         1;
```

```
absDir         0.0;
```

```
nPaddles      1;
```

```
wavePeriod    1.55;
```

```
waveHeight    0.07086;
```

```
//waveHeight  0.0;
```

```
waveDir      0.0;
```

```
wavePhase    0.0;
```

```
tSmooth      0.0;
```

```
\*-----*/
```

### Arquivo "blockMeshDict":

```
\*-----*/
```

```
FoamFile
```

```
{
```

```
    version      2.0;
    format        ascii;
    class         dictionary;
    object        blockMeshDict;
```

```
}
```

```
\*-----*/
```

```
convertToMeters 1;
```

```
//-----Inicio da listagem/calculo de parametros-----
```

```
//Parametros de Entrada
```

```
////Alteraveis
```

```
Tonda 1.55; //Periodo
```

```
Honda 0.07086; //Altura de onda
```

```
CellspL 120.0; //Numero de celulas por comprimento de onda
```

```
CellspH 20.0; //Numero de celulas por altura de onda
```

```
////Relativamente Fixos
```

```
Nint 8.0; //Numero de comprimentos de onda na regio de interesse
```

```
growRateUp 50; //Taxa de crescimento das células na direcao vertical
```

```

growRateDown #calc "1.0 / $growRateUp";

//Parametros Calculados
////Caracteristicas Hidrodinamicas
Londa #calc "9.81 * $Tonda * $Tonda / 6.282"; //comprimento da onda
h #calc "$Londa / 2.0"; //profundidade
Har #calc "$h / 2.0"; //Altura de ar (metade da profundidade) (CONDE, 2019)

////Dimensoes Principais
xi 0.0;
yi 0.0;
zi 0.0;

//xint #calc "$Nint * $Londa"; //Comprimento da zona de interesse
xint 14;
yf -1.0;
zf #calc "$h + $Har";

compPraia #calc "$zf / 0.1763"; // 0.1763=tan(10°)
xf #calc "$xint + $compPraia";

////Intervalo da Zona de Refino
ziRef #calc "$h - $Honda"; // Zona de refino com o dobro da altura de onda
zfRef #calc "$h + $Honda";

dimRefZ #calc "$zfRef - $ziRef";

////Numero de Celulas
deltaXRef #calc "$Londa / $CellspL";
deltaZRef #calc "$Honda / $CellspH";

xcells1 #calc "$xf / $deltaXRef";
ycells1 1.0;
zcells1 #calc "$dimRefZ / $deltaZRef";

xcells #calc "std::floor($xcells1)";
ycells #calc "std::floor($ycells1)";

```

```

zcellsRef #calc "std::floor($zcells1)"; // Numero de celulas na zona de refino

zcellsDown #calc "0.9 * $zcellsRef"; // N° de cel. no bloco de baixo da zona
zcellsUp #calc "0.6 * $zcellsRef"; // N° de cel. no bloco de cima da zona

```

```
//-----Fim da listagem/calculo de parametros-----
```

```
//blockMeshDict
```

```
vertices
```

```
(
```

```
    ($xi    $yi    $zi)    //0
```

```
    ($xi    $yi    $ziRef) //1
```

```
    ($xi    $yi    $zfRef) //2
```

```
    ($xi    $yi    $zf)    //3
```

```
    ($xi    $yf    $zi)    //4
```

```
    ($xi    $yf    $ziRef) //5
```

```
    ($xi    $yf    $zfRef) //6
```

```
    ($xi    $yf    $zf)    //7
```

```
    ($xf    $yf    $zi)    //8
```

```
    ($xf    $yf    $ziRef) //9
```

```
    ($xf    $yf    $zfRef) //10
```

```
    ($xf    $yf    $zf)    //11
```

```
    ($xf    $yi    $zi)    //12
```

```
    ($xf    $yi    $ziRef) //13
```

```
    ($xf    $yi    $zfRef) //14
```

```
    ($xf    $yi    $zf)    //15
```

```
);
```

```
blocks
```

```
(
```

```
    hex (4 8 12 0 5 9 13 1) ($xcells $ycells $zcellsDown)
```

```
    [...] simpleGrading (1 1 $growRateDown) // Bloco abaixo da zona de refino
```

```
    hex (5 9 13 1 6 10 14 2) ($xcells $ycells $zcellsRef)
```

```

[...] simpleGrading (1 1 1) // Bloco da zona de refino
hex (6 10 14 2 7 11 15 3) ($xcells $ycells $zcellsUp)
[...] simpleGrading (1 1 $growRateUp) // Bloco acima da zona de refino
);

edges
(
);

patches
(
  patch inlet
  (
    (4 0 1 5)
    (5 1 2 6)
    (6 2 3 7)
  )
  patch outlet
  (
    (12 8 9 13)
    (13 9 10 14)
    (14 10 11 15)
  )
  wall bottom
  (
    (0 4 8 12)
  )
  patch atmosphere
  (
    (3 15 11 7)
  )
  empty front
  (
    (0 12 13 1)
    (1 13 14 2)
    (2 14 15 3)
  )
  empty back
  (

```

```

        (4 5 9 8)
        (5 6 10 9)
        (6 7 11 10)
    )
);

```

```

mergePatchPairs
(
);

```

```

\*-----*/

```

### Arquivo "controlDict":

```

\*-----*/

```

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    location     "system";
    class        dictionary;
    object       controlDict;
}

```

```

\*-----*/

```

```

application     olaFlow;

startFrom       latestTime;

startTime       0.0;

stopAt          endTime;

endTime         100;

deltaT          0.001;

```

```
writeControl    adjustableRunTime;

writeInterval   0.05;

purgeWrite      10;

writeFormat     ascii;

writePrecision  6;

writeCompression uncompressed;

timeFormat      general;

timePrecision   6;

runTimeModifiable no;

adjustTimeStep  no;

maxCo           1;
maxAlphaCo      1;

maxDeltaT       0.025;

functions
{
    gaugesVOF
    {
        type      sets;
        libs ("libsampling.so");
        writeControl    outputTime;
        writeInterval   1;
        setFormat        raw;
        surfaceFormat    raw;
        interpolationScheme cellPoint;
        fields           ( alpha.water );
        sets
        (
```

```
VOF1 //WP1 (manter como VOF o início do nome de cada WP)
{
    type    lineCellFace;
    axis    xyz;
    start   ( 3.5 -0.05 0.1 );
    end     ( 3.5 -0.05 5.0 );
}
VOF2 //WP3
{
    type    lineCellFace;
    axis    xyz;
    start   ( 4.375 -0.05 0.1 );
    end     ( 4.375 -0.05 5.0 );
}
VOF3 //WP4
{
    type    lineCellFace;
    axis    xyz;
    start   ( 5.25 -0.05 0.1 );
    end     ( 5.25 -0.05 5.0 );
}
VOF4 //WP4
{
    type    lineCellFace;
    axis    xyz;
    start   ( 6.125 -0.05 0.1 );
    end     ( 6.125 -0.05 5.0 );
}
VOF5 //WP5
{
    type    lineCellFace;
    axis    xyz;
    start   ( 7.0 -0.05 0.1 );
    end     ( 7.0 -0.05 5.0 );
}
VOF6 //WP6
{
    type    lineCellFace;
```



```

        axis    xyz;
        start   ( 8.0 -0.05 0.1 );
        end     ( 8.0 -0.05 5.0 );
    }
);
}
}

```

```
\*-----*/
```

### Arquivo "decomposeParDict":

```
\*-----*/
```

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    location     "system";
    class        dictionary;
    object       decomposeParDict;
}

```

```
\*-----*/
```

```
numberOfSubdomains 20; //Trocar dependendo do número de cores da máquina
```

```
method          scotch;
```

```
simpleCoeffs
```

```

{
    n          ( 2 2 1 );
    delta      0.001;
}

```

```
hierarchicalCoeffs
```

```

{
    n          ( 1 1 1 );
    delta      0.001;
}

```

```

    order            xyz;
}

metisCoeffs
{
    processorWeights ( 1 1 1 1 );
}

manualCoeffs
{
    dataFile         "";
}

distributed        no;

roots              ();

```

```
\*-----*/
```

### Arquivo "fvSchemes":

```
\*-----*/
```

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       fvSchemes;
}

```

```
\*-----*/
```

```

ddtSchemes
{
    default      Euler;
}

```

```

gradSchemes
{
    default          Gauss linear;
}

divSchemes
{
    div(rhoPhi,U)  Gauss limitedLinearV 1;
    div(U)         Gauss linear;
    div((rhoPhi|interpolate(porosity)),U)  Gauss limitedLinearV 1;
    div(rhoPhiPor,UPor)  Gauss limitedLinearV 1;
    div(rhoPhi,UPor)  Gauss limitedLinearV 1;
    div(rhoPhiPor,U)   Gauss limitedLinearV 1;
    div(phi,alpha)  Gauss vanLeer;
    div(phirb,alpha) Gauss interfaceCompression;
    div((muEff*dev(T(grad(U)))))) Gauss linear;
    div(phi,k)      Gauss upwind;
    div(phi,epsilon) Gauss upwind;
    div((phi|interpolate(porosity)),k)      Gauss upwind;
    div((phi|interpolate(porosity)),epsilon) Gauss upwind;
    div(phi,omega) Gauss upwind;
    div((phi|interpolate(porosity)),omega) Gauss upwind;
}

laplacianSchemes
{
    default          Gauss linear corrected;
}

interpolationSchemes
{
    default          linear;
}

snGradSchemes
{
    default          corrected;
}

```

```

fluxRequired
{
    default          no;
    p_rgh;
    pcorr;
    alpha.water;
}

```

```
\*-----*/
```

### Arquivo "fvSolution":

```
\*-----*/
```

```

FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        dictionary;
    location     "system";
    object       fvSolution;
}

```

```
\*-----*/
```

```

solvers
{
    "alpha.water.*"
    {
        nAlphaCorr      1;
        nAlphaSubCycles 2;
        alphaOuterCorrectors yes;
        cAlpha          1;

        MULESCorr      no;
        nLimiterIter   3;

        solver          smoothSolver;
        smoother        symGaussSeidel;
    }
}

```

```
        tolerance      1e-8;
        relTol         0;
    }

    "pcorr.*"
    {
        solver          PCG;
        preconditioner  DIC;
        tolerance       1e-5;
        relTol          0;
    }

    pcorrFinal
    {
        $pcorr;
        relTol          0;
    }

    p_rgh
    {
        solver          PCG;
        preconditioner  DIC;
        tolerance       1e-07;
        relTol          0.05;
    }

    p_rghFinal
    {
        $p_rgh;
        relTol          0;
    }

    U
    {
        solver          smoothSolver;
        smoother        symGaussSeidel;
        tolerance       1e-06;
        relTol          0;
    }
```

```
cellDisplacement
{
    solver          GAMG;
    tolerance       1e-5;
    relTol          0;
    smoother        GaussSeidel;
    cacheAgglomeration false;
    nCellsInCoarsestLevel 10;
    agglomerator    faceAreaPair;
    mergeLevels     1;
}

cellDisplacementFinal
{
    $cellDisplacement;
    relTol          0;
}
}

PIMPLE
{
    momentumPredictor no;
    nOuterCorrectors  1;
    nCorrectors        3;
    nNonOrthogonalCorrectors 0;
}

relaxationFactors
{
    fields
    {
    }
    equations
    {
        ".*" 1;
    }
}
}
```

```
\*-----*/
```

### Arquivo "setFieldsDict":

```
\*-----*/
```

```
FoamFile
```

```
{
```

```
    version      2.0;
    format        ascii;
    class         dictionary;
    location      "system";
    object        setFieldsDict;
```

```
}
```

```
\*-----*/
```

```
//-----Inicio da listagem/calculo de parametros-----
```

```
//Parametros de Entrada
```

```
////Alteraveis
```

```
Tonda 1.55; //Periodo
```

```
Honda 0.07086; //Altura de onda
```

```
////Relativamente Fixos
```

```
Nint 8.0; //Numero de comprimentos de onda na regio de interesse
```

```
//Parametros Calculados
```

```
////Caracteristicas Hidrodinamicas
```

```
Londa #calc "( 9.81 * $Tonda * $Tonda ) / 6.282"; //comprimento da onda
```

```
h #calc "$Londa / 2.0"; // profundidade
```

```
Har #calc "$h / 2.0"; //Altura de ar (metade da profundidade) (CONDE, 2019)
```

```
////Dimensoes Principais
```

```
xi 0.0;
```

```
yi 0.0;
```

```
zi 0.0;
```

```
//xint #calc "$Nint * $Londa"; //Comprimento da zona de interesse
```

```

xint 14;
yf -1.0;
zf #calc "$h + $Har";

compPraia #calc "$zf / 0.1763"; // 0.1763=tan(10°)
xf #calc "$xint + $compPraia";

//-----Fim da listagem/calculo de parametros-----

//setFieldsDict
defaultFieldValues
(
    volScalarFieldValue alpha.water 0
    volScalarFieldValue porosityIndex 0
);

xiset #calc "$xi - 1.0";
yiset #calc "$yf - 1.0";
ziset #calc "$zi - 1.0";
xfset #calc "$xf + 1.0";
yfset #calc "$yi + 2.0";

compPraiaX #calc "$compPraia * 100 * 0.1736482"; // sen(10)
compPraiaZ #calc "- $compPraia * 100* 0.9848077"; // cos(10)
hX #calc "$zf * 100 * 0.9848077"; // cos(10)
hZ #calc "$zf * 100 * 0.1736482"; // sen(10)

regions
(
    boxToCell // Water level
    {
        box ($xiset $yiset $ziset) ($xfset $yfset $h);

        fieldValues
        (
            volScalarFieldValue alpha.water 1
        );
    }
)

```



```

rotatedBoxToCell // Porous zone
{
    origin ($xint -2 $zi);
    i ($compPraiaX 0 $compPraiaZ);
    j (0 2 0);
    k ($hX 0 $hZ);

    fieldValues
    (
        volScalarFieldValue porosityIndex 1
    );
}

);

/*-----*/

```

**Arquivo "postSensVOF"(script extraído dos casos de exemplo da extensão olaFlow):**

```

#!/usr/bin/python

import os

pathname = os.path.abspath('.')
savePath = os.path.join(pathname, 'gaugesVOF')
if not os.path.isdir(savePath):
    os.makedirs(savePath)

postPath = os.path.join(pathname, 'postProcessing/sets')
if not os.path.isdir(postPath):
    postPath = 'postProcessing/gaugesVOF'

```

```

# List of time dirs in order
a = os.listdir('./'+postPath)
a.sort()

# Get number of sensors
dir1 = os.path.join(pathname,postPath,a[int(len(a)/2.0])
b = os.listdir(dir1)
nSens = 0
index = []
for i in range(len(b)):
    test1 = b[i].find('VOF') + 1
    test2 = b[i].find('alpha') + 1
    if test1 and test2:
        index.append(i)
        nSens += 1

first = True

for i in range(nSens):
    # Create files to write
    fileName = b[index[i]][0:b[index[i]].find('_')]
    fileW = open(os.path.join(savePath,fileName), 'w')
    print( 'Sensor ' + '%i' % int(i+1) + ' of ' + '%i' % nSens + '.' )

# Read files time by time
for j in range(len(a)):
    directory = os.path.join(pathname,postPath,a[j])
    try:
        fileR = open(os.path.join(directory,b[index[i]]), 'r')
    except:
        print( 'WARNING - File not present: ' + [...]
              os.path.join(directory,b[index[i]]) )
    else:
        data = fileR.read()
        fileR.close()
        data = data.split('\n')

        if first: # First time step

```

```

        coord = j
        first = False

x = []
y = []
z = []
alpha = []

# x y z alpha1 calculation
for k in range(len(data)-1):
    line = data[k]
    line = line.split('\t')
    # x = float(line[0]) # y = float(line[1])
    # z = float(line[2]) # pres = float(line[3])

    z.append(float(line[2]))
    alpha.append(float(line[3]))

    if j == coord: # First time step
        # Create coordinate files
        fileWXYZ = open(os.path.join(savePath,fileName + '.xy'), 'w')
        fileWXYZ.write( line[0] + line[1] )
        fileWXYZ.close()

# Integrate in Z
wLevel = z[0]
for k in range(len(z)-1):
    wLevel = wLevel + alpha[k]*(z[k+1]-z[k])

# Write to file
time = a[j]
fileW.write(time + ' ' + '%.6f' % wLevel + '\n')

fileW.close()

print( 'Done')

```