

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO
DE MESQUITA FILHO” FACULDADE DE
ENGENHARIA CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

Daniel Pavan Parra

Análise numérica via Dinâmica dos Fluidos
Computacional da modificação do centro de
massa em *Floating Offshore Wind Turbines*
(FOWT) submetidas à ondas regulares

Ilha Solteira - SP
2023

Daniel Pavan Parra

Análise numérica via Dinâmica dos Fluidos
Computacional da modificação do centro de massa em
Floating Offshore Wind Turbines (FOWT)
submetidas à ondas regulares.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Nome do orientador:

Aluisio Viais Pantaleão

Ilha Solteira - SP

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

P259a Parra, Daniel Pavan.
Análise numérica via dinâmica dos fluidos computacional da modificação do centro de massa em Floating Offshore Wind Turbines (FOWT) submetidas à ondas regulares / Daniel Pavan Parra. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
69 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Aluisio Viais Pantaleão

Inclui bibliografia

1. CFD (Computational Fluid Dynamics). 2. SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics). 3. Interação fluido-estrutura. 4. Dualsphysics.

ANEXO 02
MODELO DE ATA DE DEFESA

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA – CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

TÍTULO: Análise numérica via Dinâmica dos Fluidos Computacional da modificação do centro de massa em Floating Offshore Wind Turbines (FOWT) submetidas à ondas regulares.

ALUNO: Daniel Pavan Parra RA: 191052671

Orientador: Aluisio Viais Pantaleão

Aprovado (X) – Reprovado () pela Comissão Examinadora

Nota obtida: 9,0

Comissão Examinadora:

Prof. _____
Presidente (Orientador)

Prof. _____
Vinícius Marson

Prof. _____
Henrique Matos Campos
Henrique Matos Campos

Assinatura do Aluno

Ilha Solteira (SP) 18 de dezembro de 2023.

*Este trabalho é dedicado aos meus pais e meu irmão,
que me apoiaram e incentivaram em todas as
ocasiões, e sem os quais eu não seria nada.*

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Vera e Valdecir, por proverem um lar repleto de amor e cuidado, e por todos os sacrifícios feitos para me possibilitar uma educação de qualidade sempre, cada madrugada de minha mãe trabalhando para conseguir me manter aqui. Cada passo à diante que dou é, primeiramente, mérito dos meus pais.

Ao meu irmão mais velho, Diego, o qual sem sua influência não teria vindo para Ilha Solteira, e por sempre me ensinar, através do exemplo, valores como perseverança e dedicação.

À minha namorada, Camile, por tornar leve até os dias mais difíceis, por cada momento de felicidade proporcionado, por me apoiar em todas as etapas, me incentivar e tranquilizar sempre, e por me ensinar a sempre ter resiliência e perseverança em todos os aspectos.

Ao meu amigo, Hugo, pela amizade sincera e companheirismo sempre.

Ao meu amigo Guilherme, pela amizade, toda ajuda e contribuição acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Aluisio Viais Pantaleão, pelos, até o presente momento, 2 anos de orientação e amizade ímpar, além de todo o apoio e confiança.

Ao Grupo PET-EM, cujas atividades de extensão e ensino influenciaram de maneira significativa na minha formação, tanto profissional quanto pessoal.

Aos meus colegas de turma, que me ajudaram no início, e me acolheram muito bem, tornando a adaptação com a nova rotina mais fácil.

Por fim, a todos que de alguma forma, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação, deixo meu sincero muito obrigado.

*“A failure is not always a mistake, it may simply
be the best one can do under the circumstances.*

The real mistake is to stop trying.”

Burrhus Frederic Skinner.

Resumo

Os métodos numéricos são essenciais para prever fenômenos aerodinâmicos e desenvolver novas tecnologias em Mecânica dos Fluidos. Com isso, aprimorar técnicas computacionais para visualizar escoamentos, determinar coeficientes aerodinâmicos, estudar fenômenos de fluxo e observar a interação onda-estrutura é crucial para entender os fenômenos relacionados à mecânica dos fluidos, tendo utilidade em diversas aplicações industriais, como é objetivo do projeto ligado ao OTIC (*Offshore Technology Innovation Center*), ao longo de todo seu desenvolvimento, utilizando ferramentas de CFD (*Computational Fluid Dynamics*). O presente trabalho tem como intuito analisar o comportamento da estrutura de uma turbina eólica *offshore* (FOWT) submetida à forças externas de uma onda marítima através do software *DualSPHysics*, que em conjunto com o acoplamento *MoorDyn* permite o estudo de corpos flutuantes sob a ação de ondas periódicas e aleatórias. Assim, por meio da análise dos parâmetros obtidos numericamente, para verificar a estabilidade da estrutura perante aos esforços submetidos, sendo modificada a posição do seu centro de massa em 5 medidas. Como resultado, constatou-se que os softwares utilizado descreveram os fenômenos de interação fluido-estrutura, como o tombamento da estrutura pela configuração do posicionamento do centro de massa da mesma. Através das simulações realizadas, percebeu-se um comportamento mais estável e próximo ao desejado, ocorreu com o centro de gravidade na configuração 2 (com o centro de gravidade, CG, em uma altura de 0,226 m em Z+) e 3 (com o CG em uma altura de 0,246 m em Z+), não apresentando fortes oscilações com grandes amplitudes, nem falhas e danos na estrutura analisada.

Palavras-chave: *CFD (Computational Fluid Dynamics)*, SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics), Interação fluido-estrutura e *DualSPHysics*.

Abstract

Numerical methods are crucial for predicting aerodynamic phenomena and developing new technologies in Fluid Mechanics. Thus, enhancing computational techniques to visualize flows, determine aerodynamic coefficients, study flow phenomena, and observe wave-structure interaction is essential for understanding fluid mechanics-related phenomena. This has practical applications in various industrial contexts, as is the objective of the project associated with the *Offshore Technology Innovation Center* (OTIC) throughout its development, employing *Computational Fluid Dynamics* (CFD) tools. The present work aims to analyze the behavior of the structure of an *offshore* wind turbine (FOWT) subjected to external forces from a maritime wave using the *DualSPHysics* software. In conjunction with the *MoorDyn* coupling, this setup allows the study of floating bodies under the action of periodic and random waves. Thus, by analyzing numerically obtained parameters to verify the stability of the structure under the submitted forces, the position of its center of mass was modified in five measurements. As a result, it was observed that the utilized software accurately described fluid-structure interaction phenomena, such as the tilting of the structure due to the configuration of the center of mass positioning. Through the conducted simulations, a more stable behavior, closely aligned with the desired outcome, was achieved with the center of gravity in configuration 2 (with the center of gravity, CG, at a height of 0.226 m in Z+) and 3 (with the CG at a height of 0.246 m in Z+). The structure showed no strong oscillations with significant amplitudes, nor did it exhibit failures or damage during the analysis.

Keywords: *CFD* (*Computational Fluid Dynamics*), SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*), wave-structure interaction and *DualSPHysics*.

Lista de Figuras

Figura 1 – Simulação vs experimental realizado em um FOWT em escala reduzida.	15
Figura 2 – <i>Cubic spline</i> considerando partículas dentro de um raio de $2h$	19
Figura 3 – Tipos de geração de ondas no <i>DualSPHysics</i> com o acoplamento <i>SWASH</i>	26
Figura 4 – Fluxograma do acoplamento <i>Moordyn</i>	27
Figura 5 – Configuração do caso no acoplamento <i>DesignSPHysics</i> com o <i>Free-CAD</i>	28
Figura 6 – Graus de liberdade de uma estrutura flutuante.	29
Figura 7 – Cota do metacentro (KM) e do centro de gravidade (KG).	31
Figura 8 – Configuração do caso no acoplamento <i>DesignSPHysics</i> com o <i>Free-CAD</i>	32
Figura 9 – Disposição das geometrias visualizadas através do <i>DesignSPHysics</i>	34
Figura 10 – Disposição das geometrias visualizadas através do <i>DesignSPHysics</i>	37
Figura 11 – Análise dos segundos iniciais com a configuração 5.	41
Figura 12 – Ângulo <i>Pitch</i> em função da variação do centro de gravidade da estrutura.	42
Figura 13 – Comparação do ângulo <i>Pitch</i> para as diferentes configurações.	43
Figura 14 – Comparação das acelerações de <i>Surge</i> e <i>Heave</i> para as diferentes posições do centro de gravidade.	45
Figura 15 – Comparação das posições em relação a X (<i>Surge</i>) e Z (<i>Heave</i>) para as diferentes configurações.	46

Lista de Tabelas

1	Tabela com os parâmetros do modelo utilizado	33
2	Tabela com os parâmetros do modelo utilizado	35
3	Parâmetros utilizados no acoplamento <i>Moordyn</i> para as amarrações.	37
4	Parâmetros para a geração de ondas regulares por meio de <i>WavePaddles</i>	38
5	Parâmetros utilizados na simulação.	40

Sumário

1	Introdução	11
1.1	Motivação	11
1.2	Objetivos	12
1.3	Revisão Bibliográfica	13
1.4	Método do SPH - Laticce Boltzman	15
1.4.1	Fundamentos do SPH	16
1.4.2	Kernel de suavização W	18
1.5	Equações que modelam o escoamento de fluidos	20
1.5.1	Equação da continuidade (Conservação da massa)	21
1.5.2	Equação da quantidade de movimento (Equação do momento)	22
1.5.3	Discretização SPH das equações.	23
1.6	Acoplamentos utilizados do <i>DualSPHysics</i>	25
1.6.1	Propagação de ondas <i>Wave Piston Generator</i>	25
1.6.2	<i>Moordyn</i>	26
1.6.3	<i>DesignSPHysics</i>	27
1.6.4	Validação da aplicação do software em simulações com ondas regulares	28
2	Metodologia	29
2.1	Definição dos parâmetros analisados	29
2.1.1	Graus de liberdade de uma estrutura flutuante	29
2.1.2	Movimentos de translação (<i>Surge, Sway e Heave</i>)	29
2.1.3	Movimentos de rotação (<i>Roll, Pitch e Yaw</i>)	30
2.2	Estabilidade transversal de uma estrutura flutuante	30
2.2.1	Relação das variáveis com a estabilidade da estrutura	32
2.3	Modelagem da geometria e do caso	33
2.4	Hardware do computador utilizado	34
2.5	Considerações para a simulação do caso	35
2.6	Desenvolvimento do código XML	36

2.7	Parâmetros utilizados para o <i>Moordyn</i>	36
2.8	Parâmetros utilizados na geração de onda	38
2.9	Influência dos principais parâmetros na qualidade da simulação e poder computacional	38
2.9.1	Distância e quantidade de partículas	38
2.9.2	Tempo de análise	39
3	Resultados e discussões	41
3.1	Consolidação do software na captura de alguns fenômenos fluidodinâmicos	41
3.2	Variação do Pitch com o centro de massa	42
3.3	Variação do centro de gravidade da estrutura analisada	44
3.4	Variação das variáveis	45
4	Conclusões	47
	Referências	48

1 Introdução

1.1 Motivação

Uma quantidade relativamente grande de problemas de engenharia, envolvem o comportamento dos fluidos e sua influência sobre corpos, através dos quais escoam. Nesse âmbito, frequentemente são utilizadas abordagens experimentais, devido as equações que modelam o escoamento dos fluidos não possuírem soluções analíticas. Porém, tem-se que a abordagem experimental é algo extremamente custoso e demanda uma logística complexa. Posto isso, o CFD (*Computational Fluid Dynamics*) vem ganhando notoriedade nos últimos anos como uma alternativa para a obtenção dos parâmetros de interesse, mostrando resultados condizentes com os obtidos através de abordagens experimentais, porém apresentando um menor custo.

A necessidade de obter métodos de CFD estáveis, mesmo quando aplicados em geometrias complexas, sem a necessidade de realizar grandes simplificações, fez o método *Lattice-Boltzmann* ganhar destaque, podendo ser compreendido como uma analogia a Navier-Stokes por sua importância na modelagem do comportamento do fluido no método lagrangiano. Este descreve a dinâmica espacial-temporal de uma grandeza estatística chamada função de distribuição de probabilidade (PDF), um método inerentemente transiente, apresentando como uma das principais vantagens sua não limitação pela hipótese do contínuo, como explica [de Carvalho Brito \(2017\)](#). Alguns dos principais parâmetros de interesse obtidos por meio da utilização do método *Lattice-Boltzmann* e a utilização do SPH (*Smoothed Particle Hydrodynamics*), se mostram amplamente convergentes com os dados obtidos por meio de abordagem experimental, tendo uma vasta gama de aplicações em diversas situações que envolvam escoamentos multifásicos e interação fluido-estrutura.

Uma frente de interesse da dinâmica dos fluidos, é o comportamento de estruturas mediante a sua exposição a forças geradas por fluidos que escoam ao seu redor, verificando sua estabilidade mediante a esta situação. Sendo, estudos em torno da resposta de

movimento e cargas ambientais em múltiplas situações dessas estruturas são cruciais no desenvolvimento de novas tecnologias *Offshore*.

Com o intuito de minimizar os efeitos que os métodos de geração de energia não renováveis, como o gás natural e o carvão mineral por exemplo, causam ao meio ambiente, vem sendo estudados e aprimorados a implementação dos "métodos de geração de energia limpa", que além de reduzir esses efeitos nocivos, possuem cada vez um custo mais atrativo, graças aos recentes avanços tecnológicos e a melhora de sua eficiência.

Neste quesito, há um interesse na aplicação dessa produção de energia em plataformas petrolíferas distantes da costa, através da instalação de turbinas eólicas em meio ao mar, para substituir as turbinas movidas a gás natural (provenientes dos poços de petróleo) usadas atualmente, devido à alta demanda de energia elétrica dos maquinários utilizados (Valencio 2023).

Contudo, para tornar essa implementação algo prático, é necessário determinar qual seria uma melhor combinação entre um bom desempenho e uma garantia de segurança na operação. Contudo, devido as dificuldades encontradas nas abordagens experimentais, a utilização de métodos numéricos se demonstra uma excelente alternativa, o qual é possível, além da obtenção de resultados de algumas grandezas, a visualização do comportamento tanto do escoamento quanto das estruturas a ele expostas.

1.2 Objetivos

O presente trabalho visa realizar o desenvolvimento e aplicação de métodos de análise numérica, via *Computacional Fluid Dynamics (CFD)*, para o levantamento do comportamento de estruturas expostas à movimentos de onda gerados nos fluidos, tendo como objetivo verificar a estabilidade da estrutura e dos parâmetros de interesse, além da avaliação de possíveis falhas e tombamentos das estruturas baseado na modificação do seu centro de gravidade.

1.3 Revisão Bibliográfica

Dentre os diversos softwares utilizados no CFD, o *DualSPHysics* destaca-se, como aborda [Domínguez et al. \(2021\)](#), dado sua aplicabilidade para casos particulares nos quais outros softwares não são capazes de realizar com tamanha precisão, principalmente em problemas que envolvem uma abordagem multifásica de fluidos e estruturas, em especial problemas que envolvem escoamento com superfícies livres.

Um dos pilares que o destacou na área de *CFD* foi a utilização da formulação Lagrangiana na simulação, sendo um método que acompanha o movimento e as propriedades de um elemento ao longo do espaço e do tempo, assim, com a determinação da trajetória de todos os elementos do domínio, se obtém o comportamento global do sistema, enquanto na formulação Euleriana, os elementos não são acompanhados temporal e espacialmente, e é observado a variação dos parâmetros em determinadas regiões presentes no domínio.

Atualmente, a maioria dos métodos utilizados em simulações numéricas de FOWTs, ainda são baseadas em métodos atrelados a malhas. Algumas ferramentas como teoria do fluxo potencial e equação de Morison, assim, os softwares que utilizam desses métodos (ANSYS AQWA, FAST, OpenFOAM, Orca Flex, SIMA e Bladed) são amplamente utilizados nestes casos ([Tan et al. 2023](#)).

[Shi et al. \(2021\)](#) estudaram o desempenho hidrodinâmico da unidade flutuante FOWT semissubmersível OO-Star através do ANSYS AQWA, sob diferentes condições de vento e ondas. Já [Xue et al. \(2022\)](#), utilizaram do software aberto OpenFOAM para calcular a resposta de onda de unidade FOWT, sendo considerado um efeito de amortecimento líquido multicoluna sintonizado.

Alguns pesquisadores também realizam o acoplamento entre dois softwares para realizar análises de casos, por exemplo, [Chen et al. \(2018\)](#) desenvolveram um método acoplado para realizar o estudo de um sistema de amarração no FOWT, baseado em modelos de diferença finita de cabos de amarração, o qual apresentava boa concordância com o acoplamento *Moordyn*.

Entretanto, a utilização destes métodos ainda possuem algumas limitações ao simular

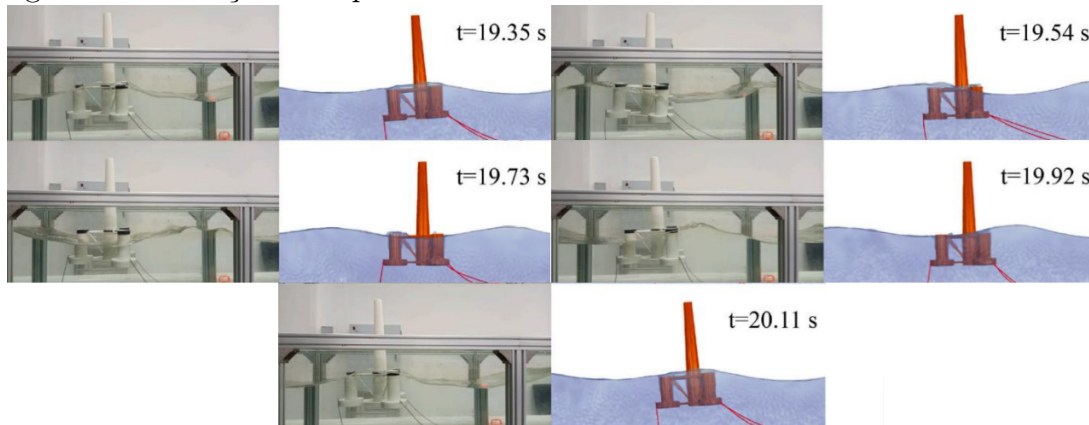
fortes deformações e até mesmo ruptura de superfície livre, além do movimento e deformação dos limite sólidos, como relata [LIU & ming LI \(2016\)](#). Assim, o método SPH se destaca por ser um método livre de malha, que realiza a discretização do domínio do problema com partículas sem conexão fixa, tornando possível que as partículas assumam movimentos arbitrários, apresentando um diferencial quando comparados a métodos com malha já utilizados e validados em problemas de engenharia multifásicos ou que envolvam interação fluido-estrutura. Além da não utilização de malha, outro aspecto importante deste método é sua abordagem lagrangiana, apresentando vantagens em pesquisa de convecção severa, grande deformação e problemas de fronteira móvel, segundo [Khayyer et al. \(2022\)](#) e [Liu & Liu \(2010\)](#).

[Crespo et al. \(2017\)](#) utilizaram o software para analisar a interação entre as ondas e um dispositivo gerador de energia de onda com uma coluna de água oscilante. Também relatou a facilidade da abordagem de objetos que se movimentam enquanto estão em contato com o fluido, sendo uma das principais vantagens dos métodos lagrangianos. [Leble & Barakos \(2016\)](#) realizaram uma análise dinâmica de um FOWT baseado no acoplamento de SPH e HMB2 CFD, que foi usado para a simulação hidrodinâmica da unidade flutuante FOWT e a análise aerodinâmica das pás, respectivamente. Os resultados obtidos mostraram que mesmo um método de acoplamento com as equações não sendo exatamente satisfeitas, devido a sua configuração de apenas um compartilhamento de informação por *timeStep* (particionado explícito), conseguiu realizar bem a análise do caso estudado. Também foi abordado alguns casos em que se utilizou o SPH para análise da flutuabilidade de estruturas ancoradas ao solo.

Recentemente, [Tan et al. \(2023\)](#) realizaram a análise e validação da resposta de movimento de estruturas flutuantes ancoradas ao solo com o uso do acoplamento do *Moordyn* (utilizado para obter o comportamento de estruturas com amarrações, tanto em pontos fixos quanto interligados em outras estruturas), quando expostas a influência de ondas marítimas regulares e irregulares. Os resultados obtidos se mostraram condizentes com o comportamento obtido nos experimentos conduzidos por eles em laboratório, tanto para condições regulares quanto irregulares de onda. Por meio da análise de resultados numé-

ricos para uma simulação em escala real, o método mostrou potencial para representar o comportamento e as forças nas linhas de ancoragem obtidas. Assim, o método SPH se mostrou preciso para abordar caso em que envolvam a resolução de movimento de unidades flutuantes sob diferentes configurações de ondas, como mostrado na [Figura 1](#), em que é apresentado o resultado visual obtido experimentalmente quando comparado ao numérico.

Figura 1: Simulação vs experimental realizado em um FOWT em escala reduzida.



Fonte: [Tan et al. \(2023\)](#)

Posto isso, o presente trabalho busca realizar a análise de casos semelhantes aos já estudados e validados por [Tan et al. \(2023\)](#), abordando como a localidade do centro de gravidade na estrutura influenciará na resposta de movimento da estrutura analisada, além de analisar possíveis pontos de tombamento e também qual dentre as configurações utilizadas apresentaria uma melhor estabilidade, a fim de complementar os resultados obtidos, e confrontar os dados obtidos para estruturas FOWTs com sistemas de ancoragem.

1.4 Método do SPH - Laticce Boltzman

O termo SPH significa *Smoothed Particle Hydrodynamics*, sendo o *Smoothed* para representar a suavização segundo o peso das variáveis do campo na vizinhança da partícula, *Particle*, se referindo ao seu método que utiliza partículas na discretização do domínio, e *Hydrodynamics*, representando o alvo de atuação deste método em analisar a

hidrodinâmica de problemas de engenharia.

O método SPH foi criado com o intuito de resolver problemas astrofísicos no espaço tridimensional (Lucy 1977, Gingold & Monaghan 1977). Contudo, como consegue modelar facilmente fenômenos complexos, tornou-se uma ferramenta de solução usada em uma gama ampla de problemas e áreas de atuação (Vila 1998). Por se tratar de um método isento de malha computacional, lagrangiano e de partícula, se difere dos métodos conhecidos e utilizados atualmente, demonstrando vantagens como por exemplo, sua natureza adaptativa. Essa adaptabilidade é alcançada em um estágio inicial na aproximação da variável do campo, realizada a cada passo de tempo, dependendo da quantidade de partículas (Vasco 2014).

1.4.1 Fundamentos do SPH

Como dito anteriormente, o método realiza a discretização do domínio por meio de partículas, ou seja, representa o fluido por uma quantidade de partículas (dada pela distância entre elas) evoluindo com a velocidade do escoamento, em que cada uma representa um ponto de interpolação, em que as propriedades do fluido são conhecidas. Expressando a função f como um campo variável, tem-se a Equação 1:

$$f(\vec{r}) = \int \vec{r}_b \delta(\vec{r} - \vec{r}_b) d\vec{r}_b \quad (1)$$

Em que o subíndice b denota a partícula vizinha a partícula a da interpolação para os cálculos, a qual se substituirmos a função delta de Dirac (δ) por uma função de suavização $W(\vec{r} - \vec{r}_b, h)$ que satisfaça as Equações 2 e 3:

$$\int W(\|\vec{r} - \vec{r}_b\|, h) d\vec{r}_b = 1 \quad (2)$$

$$\lim_{h \rightarrow 0} W(\|\vec{r} - \vec{r}_b\|, h) = \delta(\vec{r} - \vec{r}_b) \quad (3)$$

Sendo termo W o kernel de suavização citado na Seção 1.4.2, \vec{r}_i o vetor posição refe-

rente a partícula i , h o domínio do suporte (*smoothing lenght*) do núcleo e f uma função a qual se aplica as variáveis, como o campo vetorial \vec{u} por exemplo.

A função então pode ser aproximada pela [Equação 4](#):

$$f(\vec{r}) \approx \int f(\vec{r}')W(\|\vec{r} - \vec{r}'\|, h)d\vec{r}' \quad (4)$$

Assim, podendo ser considerada uma regularização da função f original.

Aplicando o divergente à função f , obtém-se a [Equação 5](#)

$$\vec{\nabla} f(\vec{r}) \approx \int \vec{\nabla} f(\vec{r}')W(\|\vec{r} - \vec{r}'\|, h)d\vec{r}' \quad (5)$$

Realizando a integração por partes, desprezando os termos de superfície, aplicando as propriedades do termo do kernel de suavização e dado que $\vec{r}' = m_b/\rho_b$, tem-se a [Equação 6](#):

$$\langle \vec{\nabla} f(\vec{r}) \rangle \approx \sum_b f_b \frac{m_b}{\rho_b} \vec{\nabla} W(\|\vec{r} - \vec{r}'\|, h) \quad (6)$$

Entretanto, é comum utilizar a equação desenvolvida por [Monaghan \(2005\)](#) que dá origem a uma das expressões utilizadas no SPH, apresentada na [Equação 7](#):

$$\rho \vec{\nabla} f(\vec{r}) = \vec{\nabla}(\rho f(\vec{r})) - f(\vec{r}) \vec{\nabla} \rho \Rightarrow \langle \vec{\nabla} f(\vec{r}) \rangle_a = \frac{1}{\rho_a} \sum_b m_j (f_b - f_a) \vec{\nabla} W(r_{ab}, h) \quad (7)$$

Com isso, a partir da equação [7](#), aplicando no campo vetorial \vec{u} , obtém-se a [Equação 8](#):

$$\langle \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \rangle_a = \sum_b m_b \vec{u} \cdot \vec{\nabla} W(r_{ab}, h) \quad (8)$$

Que pode ser reescrita da forma apresentada na [Equação 9](#):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = \frac{1}{\rho} [\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) - \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \rho] \quad (9)$$

Resultando em uma aproximação do divergente de uma função vetorial \vec{u} , comum no SPH, dada na [Equação 10](#):

$$\langle \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \rangle_a = \frac{1}{\rho} \sum_b m_b (\vec{u}_b - \vec{u}_a) \cdot \vec{\nabla}_a W(r_{ab}, h) \quad (10)$$

Sendo $\vec{\nabla}_i$ o gradiente de W em relação às coordenadas de i , ($\langle \cdot \rangle$) são representações para funções aproximadas, que para facilitar, serão omitidas, considerando-as implícitas nas equações. Também tem-se que $W_{ab} = W(r_{ab}, h)$, $f_{ab} = f_a - f_b$ e $\bar{f}_{ab} = \frac{f_a + f_b}{2}$.

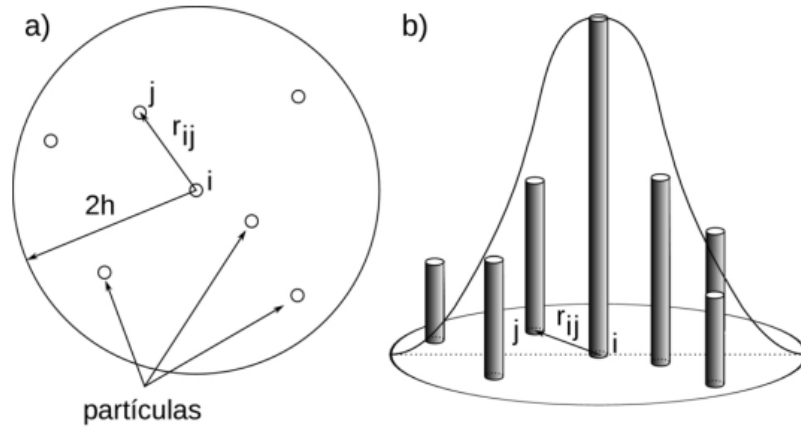
1.4.2 Kernel de suavização W

O núcleo de suavização tem como função interpolar uma grandeza qualquer entre partículas, limitada pela distância Kh , sendo a distância entre a partícula e o raio limite da vizinhança, e qualquer função é candidata a representar W . Um tipo de núcleo bastante utilizado, são as funções *splines*, em que o modelo *cubic spline* é descrito como apresentado na [Equação 11](#):

$$W^{SC}(q) = \frac{a_D}{h^2} \begin{cases} \frac{2}{3} - q^2 + \frac{q^3}{2} & , \text{ se } 0 < q \leq 1 \\ \frac{(2-q)^3}{6} & , \text{ se } 1 < q \leq 2 \\ 0 & , \text{ se } q > 2 \end{cases} \quad (11)$$

Em que a_D é $\frac{10}{7\pi}$ para abordagens bidimensionais, e $\frac{1}{\pi}$ para tridimensionais e q é a distância relativa entre a partícula considerada e uma partícula vizinha da interpolação. Uma das maiores vantagens na utilização do *cubic spline*, é que a função é nula para valores maiores que duas vezes o comprimento de suavização estimado ($2h$), funcionando como um suporte compacto que reduz o tempo computacional, já que a contribuição das partículas é limitada a um raio de $2h$, como explícito na [Figura 2](#).

Figura 2: *Cubic spline* considerando partículas dentro de um raio de $2h$.



Fonte: Vasco (2014).

Entretanto, o método não é recomendado caso seja necessário varrer todas as partículas para verificar se sua distância até a partícula considerada é menor ou maior que $2h$. Há outras técnicas como a tabela de *Verlet*, que consiste na introdução de um raio maior que o anterior por uma diferença de Δ . Isso garante que uma partícula, por mais que esteja em uma velocidade máxima permitida, não ultrapasse a região pertencente, otimizando a busca por vizinhos, garantindo que todos os vizinhos da partícula estejam incluídos durante os números de passo de tempo estabelecidos (Colagrossi 2004).

Essa diferenciação do núcleo de suavização é um fator importante, dado que a aproximação do gradiente de uma função depende das derivadas da função de suavização, e erros nos cálculos de derivadas de funções são maiores que a aproximação de funções (Monaghan 2005).

Outro aspecto importante é o comprimento de suavização (h), que está associado à resolução numérica desejada. Por exemplo, se o escoamento não apresentar regiões com grandes variações da massa específica da partícula (ρ_i), h pode se manter constante, entretanto, para simular choques ou impactos (contendo variação na massa específica localmente), se torna necessário variar o h para manter o número de partículas vizinhas constante.

Dessa maneira, para estabelecer uma expressão que relacione diretamente h com ρ ,

realiza-se a derivada de $h_i = h_0 \left(\frac{\rho_0}{\rho_i} \right)^{1/d}$ em função do tempo, sendo d o diâmetro da partícula, e aplicando a equação da continuidade, resulta na expressão para a aproximação inicial de h , explícita na [Equação 12](#):

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{d} h \vec{\nabla} \cdot \vec{u} \quad (12)$$

Outro kernel de suavização que vem sendo amplamente utilizado, e foi o kernel utilizado no presente trabalho, é o *Wendland* de quinta ordem, caracterizado pela instabilidade de emparelhamento ([Wendland 1995](#)). Este kernel exibe uma transformada de Fourier de kernel positiva, e é demonstrada na [Equação 13](#)

$$W(q) = a_D \left(1 - \frac{q^4}{2} \right) (2q + 1), \quad \text{para } 0 \leq q \leq 2 \quad (13)$$

Sendo a_D $7/4\pi$ para abordagens 2D e $21/16\pi$ para abordagens 3D.

1.5 Equações que modelam o escoamento de fluidos

As equações responsáveis por descrever o comportamento dos fluidos em movimento enunciam matematicamente as leis da física, sendo elas a conservação da massa (lei da continuidade); a taxa de variação de energia é igual a soma da taxa de adição de calor e a taxa de trabalho realizada (Primeira Lei da Termodinâmica) e a taxa de variação da quantidade de momento linear é igual a somatória das forças que atuam sobre a partícula (Segunda Lei de Newton). Neste trabalho, será realizado um estudo contínuo e levantamento bibliográfico acerca dos princípios supracitados da lei da continuidade e da quantidade de movimento, que são essenciais para o entendimento da mecânica dos fluidos ([Versteeg & Malalasekera 2007](#)), assim não havendo interesse pelos fenômenos de transferência de calor.

1.5.1 Equação da continuidade (Conservação da massa)

Esse princípio exige que a massa do sistema seja constante a todo momento, sendo que sua derivada em função do tempo é nula (Fox et al. 2000). Assim, a taxa de aumento da massa no interior de um elemento fluido é dado por Versteeg & Malalasekera (2007):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \delta x \delta y \delta z) = \frac{\partial \rho}{\partial t} \delta x \delta y \delta z \quad (14)$$

Em um sistema de coordenadas cartesianas, para cada instante de tempo, tem-se as componentes do vetor velocidade $u(x, y, z, t)$ de uma partícula fluida, dadas por $u = u(x, y, z)$ (direção x), $v = v(x, y, z)$ (direção y) e $w = w(x, y, z)$ (direção z). A partir deste princípio, sabendo que para cada instante de tempo t em uma determinada direção, a vazão mássica é dada pelo produto da componente da velocidade pela sua massa específica (Versteeg & Malalasekera 2007), ou seja, $\rho u(x, y, z)$ (direção x), $\rho v(x, y, z)$ (direção y) e $\rho w(x, y, z)$ (direção z).

Posto isto, sabendo que o fluido no formato SPH é tratado como compressível, o que permite usar uma equação de estado para determinar a pressão do fluido, em vez de resolver uma equação. No entanto, a compressibilidade é ajustada a fim de diminuir a velocidade do som para que o passo de tempo no modelo (baseado na velocidade do som) seja razoável (A. J. C. Crespo 2007).

No método SPH, uma vez que possui características do sistema particulado, se torna dispensável esse balanço de massa, dado que a massa das partículas é constante, e em uma simulação não ocorre o acréscimo ou decréscimo no número de partículas. Contudo, como escoamento de fluidos como a água por exemplo, são tratados como fracamente compressíveis no SPH, não se consegue garantir uma massa específica constante, muito menos que o gradiente do vetor velocidade seja nulo. Assim, se torna necessário a utilização do termo presente na Equação 15:

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot \vec{u}, \quad (15)$$

E aplicando um rearranjo na formulação do divergente (Eq. 10), devido ao decaimento ocorrido em regiões de superfície livre sem a utilização deste contorno, e aplicando na equação da continuidade, tem-se a [Equação 16](#):

$$\frac{D\rho_a}{Dt} = \rho_a \sum_b \frac{m_b}{\rho_b} \vec{u} \cdot \vec{\nabla}_a W_{ab} \quad (16)$$

Sendo ρ_a a massa específica na partícula a , m_b a massa na partícula b , \vec{u} o vetor velocidade da partícula e $\vec{\nabla}W_{ab}$ o gradiente da função de suavização W_{ab} em relação as coordenadas da partícula a ao longo do domínio de suporte (h).

1.5.2 Equação da quantidade de movimento (Equação do momento)

Através da segunda lei de Newton, tem-se que a taxa de variação temporal da quantidade de movimento de uma partícula é igual a resultante das forças que agem sobre essa partícula ([Fox et al. 2000](#)).

No Método SPH, abordagens diferentes do método Euleriano são consideradas para descrever a equação do momento devido às diferentes formulações dos termos difusivos. Os métodos e considerações utilizadas no SPH foram abordados de forma mais detalhada no [Capítulo 1.4](#), dedicado ao desenvolvimento e considerações do método. A viscosidade artificial proposta por [Monaghan \(1992\)](#) tem sido classicamente utilizada devido à sua simplicidade. Na notação SPH, a equação do momento pode ser escrito como na [Equação 17](#):

$$\frac{D\vec{u}_a}{Dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_a + P_b}{\rho_a \rho_b} \right) \vec{\nabla}_a W_{ab} \quad (17)$$

Em que foi utilizado de um operador SPH simétrico que garante a conservação do momento para o termo da pressão. Alguns termos de dissipação são adicionados a [Equação 17](#) a fim de reduzir oscilações e estabilizar esquema do SPH.

1.5.3 Discretização SPH das equações.

Sabendo que pela propriedade de conservação da massa do SPH, a derivada da massa em função do tempo tem que ser nula, e que a massa é conservada exatamente dentro de uma partícula lagrangiana (Domínguez et al. 2021), ela resulta em uma densidade devido a mudança volumétrica do termo no lado direito da Equação 18, resultada na forma diferencial da equação da continuidade dada pela Equação 18:

$$\frac{d\rho}{dt}|_{a \in P} = \rho_a \sum_{b \in P} \frac{m_b}{\rho_b} \mathbf{v}_{ab} \cdot \nabla_a W_{ab} + D_a, \quad (18)$$

Sendo D_a um termo de difusão de densidade numérica e, para um ponto a com posição respectiva r_a , $W_{ab} = W(r_a - r_b, h)$ e $(\bullet)_{ab} = (\bullet)_a - (\bullet)_b$, $W(r, h)$ uma função positiva com uma forma geral descrita pela Equação 19:

$$W(\mathbf{r}, h) := \frac{1}{h^d} \omega(q), \quad (19)$$

Com $h > 0$, $q = |\mathbf{r}|/h$ e a função $\omega : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ é uma função suave não negativa integrada em um domínio Ω como apresentado na Equação 20 e 21:

$$\int_{\Omega} \omega(q) d\mathbf{r} = \frac{1}{h^d}, \quad (20)$$

$$\omega(q) = 0 \text{ para } |\mathbf{r}| \geq kh, k \in \mathbb{R}^+, \quad (21)$$

Como dito em 1.4.2, as funções de *Wendland* resultam em uma melhor convergência numérica que os *splines* comuns, dado que possibilitam um número de vizinhos N_H maior, por serem mais convenientes computacionalmente. Dehnen & Aly (2012).

Analogamente, a forma discreta da equação da quantidade de movimento, no formalismo do SPH, pode ser escrita conforme a Equação 22:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt}|_{a \in F} = - \sum_{b \in P} m_b \left(\frac{P_a + P_b}{\rho_a \rho_b} \right) \nabla W + \langle \Gamma \rangle_a + \mathbf{f}, \quad (22)$$

Em que \mathbf{v} é o vetor velocidade, ρ_a e ρ_b são as respectivas densidades das partículas a e b , P_a e P_b são as respectivas pressões, Γ denota os termos de dissipação e \mathbf{f} representa as acelerações devido a forças externas, como a gravidade. Sendo o operador simétrico de SPH utilizado para garantir que a conservação do momento ocorra para o termo de pressão.

No software utilizado, *DualSPHysics*, existem formulações de termos de difusão de densidade implementados, que atuam como um filtro de ruído numérico de alta frequência, que como resultado melhoram a estabilidade do esquema suavizando a densidade e consequentemente a pressão, que podem ser considerados hipotéticos devido a sua natureza colocada (em velocidade e densidade) e explícita (integração de tempo) para o SPH fracamente compressível (Domínguez et al. 2021).

Além do termo de difusão de densidade, o *DualSPHysics* também possui os termos de dissipação, sendo eles:

- Termo de dissipação para a viscosidade artificial: em que um termo artificial é utilizado na equação do momento, baseada na viscosidade artificial de *Nuemann-Richtmeyer* (Birro 2017), e pela sua simplicidade, a formulação da viscosidade artificial é comumente utilizada no SPH como o termo de dissipação viscosa.
- Termo de dissipação para a viscosidade laminar: sendo o termo da dissipação viscosa do momento em um regime laminar no *DualSPHysics*, aproximado por Y.M. Lo & Shao (2002), dependente da viscosidade cinemática do fluido. É válido ressaltar que esse termo da viscosidade laminar diverge próximo a superfície livre.
- Modelo em escala de subpartículas: implementado no software como descrito por Dalrymple & Rogers (2006) utilizando a média de *Favre* e uma abordagem fracamente compressível.

1.6 Acoplamentos utilizados do *DualSPHysics*

1.6.1 Propagação de ondas *Wave Piston Generator*

Em casos especiais, como os problemas de engenharia costeira, se torna necessário a simulação adequada de todos os processos envolvidos no caso, desde a geração de ondas, até a interação onda-estrutura. Os solucionadores que utilizam do método SPH permitem o desenvolvimento de um modelo detalhado de fenômenos locais, como a interação entre as ondas do mar e as defesas costeiras (Altomare et al. 2014).

A não utilização de malha pelo SPH o torna bem sucedido em imitar o sistema de geração de ondas de instalações experimentais, empregando limites móveis, como o *Wave Piston Generation* ou o *Wave Flap Generation* (gerando ondas através de pistões ou flaps respectivamente).

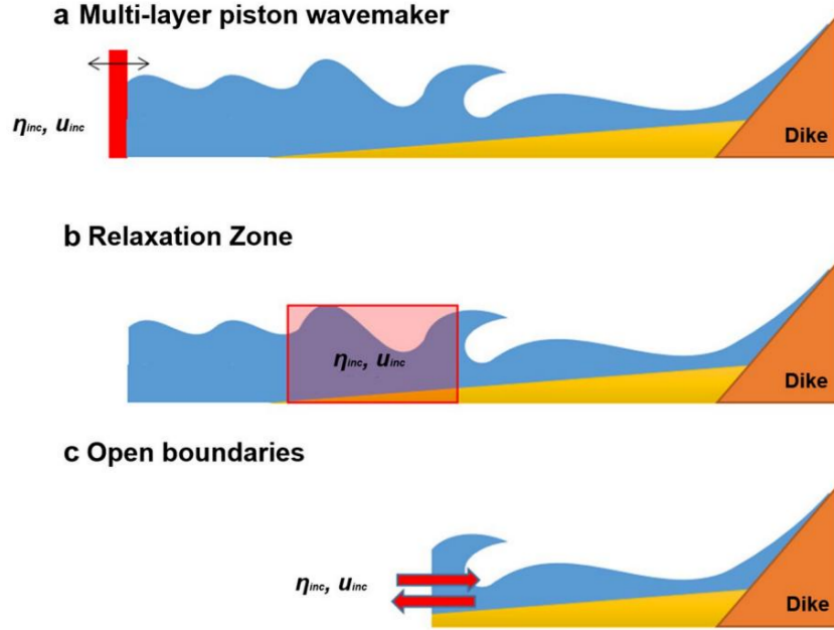
Entretanto, para simular adequadamente a transformação de ondas, garantindo o correto estado do mar de ondas no pé da estrutura, se faz necessário sua propagação em meio a domínios relativamente longos, semelhantes aos que ocorrem nos testes de modelos físicos.

Os esquemas de acoplamento entre os modelos *DualSPHysics* e *SWASH* (*Simulating WAVes Until SHore*), utilizada para prever a transformação de ondas superficiais e fluxos de águas rasas rapidamente variados nas costas (Zijlema et al. 2011), tão presentes na Figura 3, sendo estes:

1) *O Multi-layer Piston Wavemaker* (Pistão gerador de ondas de múltiplas camadas), em que o seu deslocamento em tempo real é reconstruído com base na série temporal de velocidade, calculada pelo modelo *SWASH* e interpolada da profundidade da água até a coordenada x , que corresponde à direção de propagação da onda.

2) *O Relaxation Zones (RZ)* o qual realiza uma zona de acoplamento estendida de um único local para uma área, em que a velocidade orbital é calculada pelo modelo de propagação de ondas imposta nas partículas de fluido no *DualSPHysics*. A velocidade das partículas é controlada por uma solução analítica com função de ponderação C para equilibrar as ondas refletidas dentro da *RZ* (Domínguez et al. 2021).

Figura 3: Tipos de geração de ondas no *DualSPHysics* com o acoplamento *SWASH*.



Fonte: [Altomare et al. \(2014\)](#)

3) *Open Boundaries* é um acoplamento bidirecional melhorado com *OceanWave3D*, utilizado por [Verbrugge et al. \(2019\)](#). Esse algoritmo é empregado nas interfaces de acoplamento, em que na entrada, as velocidades orbitais horizontais e as elevações de superfície são impostas a algumas partículas superiores. Na saída, essas velocidades são impostas, enquanto a elevação é extrapolada a partir do domínio do fluido SPH.

Não obstante, os limites abertos permitem o acoplamento em águas rasas em que a não linearidade das ondas e o transporte de massa são dominantes, como em zonas em que ocorre a quebra de ondas.

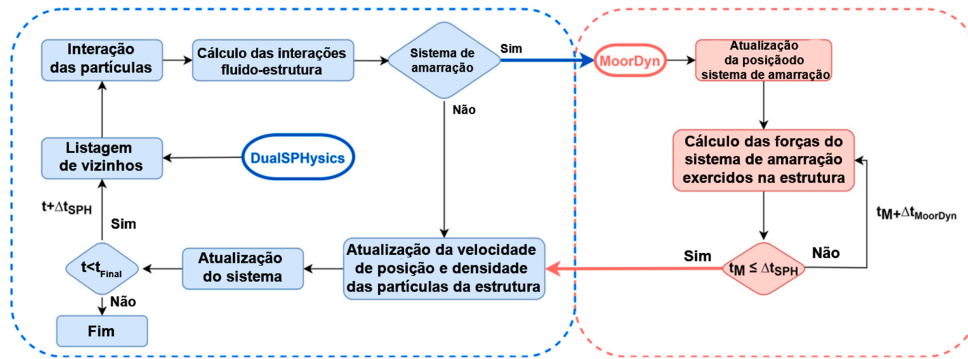
Para o presente trabalho, foi utilizado o gerador de ondas *Multi-layer Piston Wavemaker*, o qual tem seu movimento oscilatório descrito através do código utilizado na simulação, gerando ondas regulares com seus parâmetros definidos.

1.6.2 *Moordyn*

Dada a capacidade do *DualSPHysics*, que utiliza o método SPH em simular objetos movidos por fluidos, foi desenvolvido um acoplamento para a resolução de problemas que envolvam a limitação por meio de amarrações. O código se mostrou preciso na

simulação da interação fluido-estrutura Pavan & Pantaleão (2023), e dado que na vida real, geralmente se realizam um sistema de ancoragem em estruturas flutuantes para garantir segurança e maior controle. Posto isso, as tensões de amarração dos objetos flutuantes foram incluídas no solver SPH por meio do acoplamento da biblioteca *Moordyn*, que emprega um modelo preciso e eficiente de linha de ancoragem dinâmica de código aberto (Hall & Goupee 2015) que realiza a discretização das linhas de amarração como pontos de massa pontuais conectados por segmentos lineares de mola-amortecedor, para fornecer elasticidade na direção axial. Tan et al. (2023) realizou o acoplamento entre o *DualSPHysics* e o *Moordyn* na simulação do movimento de uma estrutura flutuante ancorada sob a ação de ondas.

Figura 4: Fluxograma do acoplamento *Moordyn*.



Fonte: Tan et al. (2023).

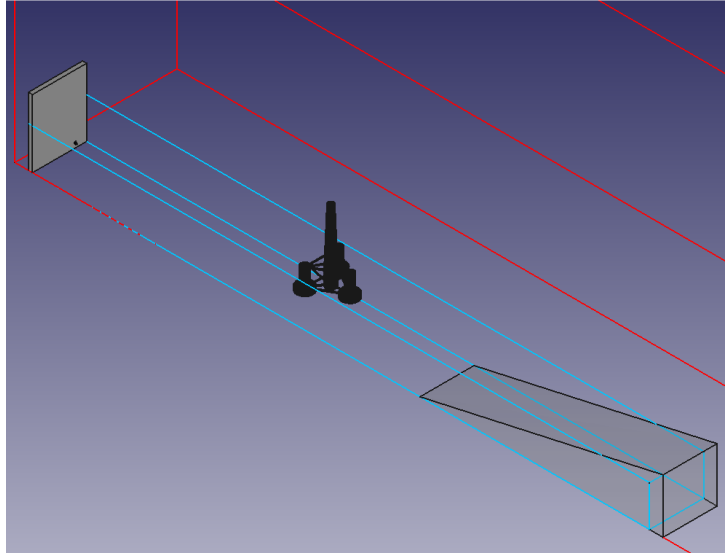
O fluxograma da abordagem desse acoplamento é demonstrado na Figura 4, que consiste basicamente em passar a cinemática do ponto de amarração (*fairlead*) para o *Moordyn*, que resolve a dinâmica do sistema de amarração e essas tensões resultantes são transferidas de volta para o *DualSPHysics*. Desta forma, ele calcula as forças externas para derivar o movimento final resultante da flutuação ancorada no solver SPH.

1.6.3 *DesignSPHysics*

Recentemente foi desenvolvido um *plug-in* de interface gráfica de usuário (*Graphical User Interface*, GUI) para o software *FreeCAD*, denominado *DesignSPHysics* (Domínguez

et al. 2021), com o intuito de facilitar a modificação de casos já existentes. Esse acoplamento torna o fluxo de trabalho para a geração de casos, Gencases e códigos XML de testes, mais simples e acessível, além da geração da estrutura para futuras modificações dentro do código gerado conforme necessário.

Figura 5: Configuração do caso no acoplamento *DesignSPHysics* com o *FreeCAD*.



Fonte: elaborado pelo autor.

Com esse *plug-in*, a elaboração de casos e disposição de geometrias se tornou mais simples, dado que por uma interface gráfica, se torna mais visual. Com isso, a elaboração dos arquivos necessários através do *DesignSPHysics* e suas modificações e ajustes mais finos sendo realizados diretamente no código obtido, acabou se apresentando como uma alternativa viável e mais prática na confecção de novos casos.

1.6.4 Validação da aplicação do software em simulações com ondas regulares

A utilização do software em problemas de engenharia que envolvam estruturas expostas a interação com ondas regulares foi validada através do confronto entre resultados experimentais obtidos e a realização de uma simulação com mesma configuração (Pavan & Pantaleão 2023), mostrando que o software é apto para realizar simulações com essas condições de contorno impostas, prevendo um comportamento fiel ao obtido experimentalmente.

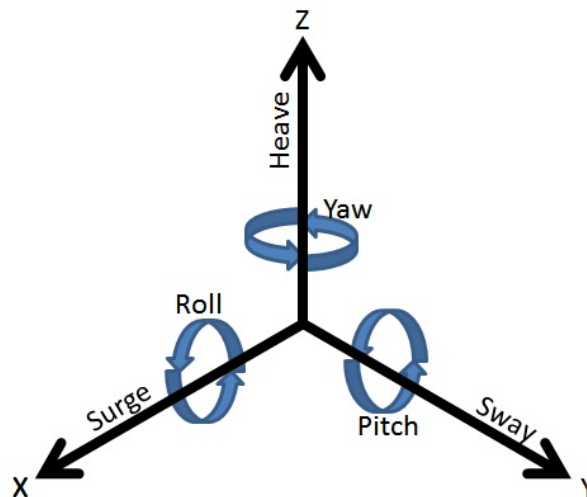
2 Metodologia

2.1 Definição dos parâmetros analisados

2.1.1 Graus de liberdade de uma estrutura flutuante

As embarcações e estruturas flutuantes estão sujeitas a realizar movimentos que possuem seis graus de liberdade (*Degrees Of Freedom*, DOF) em torno de três eixos que passam pelo ponto de flutuação, como explícito na [Figura 6](#), sendo que esses graus de liberdade podem tanto girar o corpo em torno do eixo (Movimentos de rotação) quanto percorrer ao longo dele (Movimento de translação) ([Peres 2013](#)).

Figura 6: Graus de liberdade de uma estrutura flutuante.



Fonte: Geospatial Education Platform, 2023. Disponível em:

<https://www.polyu.edu.hk/proj/gef/index.php/glossary/ship-dynamics/>.

Em alguns casos particulares, de acordo com as condições de contorno aplicadas, podem ser consideradas simplificações acerca de alguns graus de liberdade, que não apresentarão valores relevantes devido aos esforços aplicados na estrutura.

2.1.2 Movimentos de translação (*Surge*, *Sway* e *Heave*)

- **Surge:** É o movimento de avanço e recuo da estrutura flutuante, realizada percorrendo ao longo do eixo longitudinal (eixo X).

- **Sway**: Movimento de caimento da estrutura flutuante percorrendo ao longo do eixo transversal (eixo Y), movimentação de um lado para o outro.
- **Heave**, ou em português, *Caturro*, se trata do movimento de ascendente e descendente da estrutura, ou seja, a elevação ou afundamento da mesma, percorrendo ao longo do eixo vertical (eixo Z).

2.1.3 Movimentos de rotação (*Roll, Pitch e Yaw*)

- **Roll**: A rolagem é o balanço em torno do eixo longitudinal (eixo X), ou seja, a inclinação lateral da estrutura de um lado para o outro.
- **Pitch**: A arfagem é o movimento de rotação da estrutura em torno do eixo transversal (eixo Y), que pode levantar ou abaixar a frente da estrutura de acordo com as condições de contorno.
- **Yaw**: O movimento de guinada ocorre quando a estrutura se rotaciona em torno do eixo vertical (eixo Z), fazendo com que a frente da estrutura mude de posição.

2.2 Estabilidade transversal de uma estrutura flutuante

Estabilidade transversal é a capacidade de não ocorrer grandes oscilações que possam comprometer a integridade física e/ou funcional da estrutura, evitando sua falha ou algum outro efeito negativo. Para que a estabilidade ocorra, são necessários alguns requisitos envolvendo:

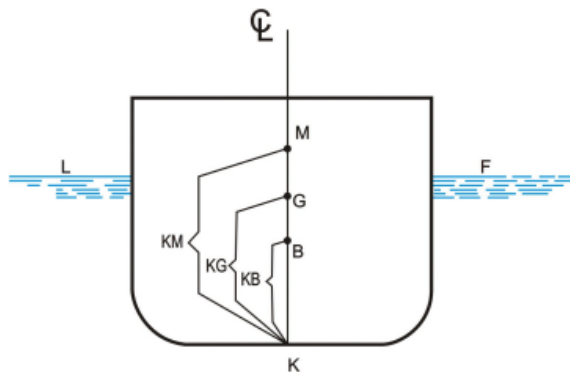
O centro de gravidade (G): é o ponto em que ocorre a aplicação da resultante das forças gravitacionais que atuam no corpo.

O centro de Carena (B): é o ponto em que ocorre a aplicação das forças de empuxo que atuam ao longo da carena, debaixo para cima, permitindo que a estrutura flutue.

O metacentro (M): é o ponto de encontro dos raios de uma pequena curvatura descrita pela sucessiva mudança de posição do centro de carena de uma estrutura, oscilando com um mesmo volume submerso (da Silva Coelho 2007).

A altura metacêntrica (GM): é a diferença entre os valores da cota do centro de gravidade (KG) que é a distância do centro de gravidade até a base da estrutura, e a Cota do Metacentro (KM) sendo a distância entre o metacentro e a base da estrutura, K , como mostra a [Figura 7](#).

Figura 7: Cota do metacentro (KM) e do centro de gravidade (KG).



Fonte: [da Silva Coelho \(2007\)](#).

Para que ocorra o estado de Equilíbrio Estável, que é a condição ideal de estabilidade, é necessário que a altura metacêntrica (GM) seja maior que zero. Essa condição implica que quanto mais baixo estiver o centro de gravidade da estrutura, maior é o momento de adriçamento (MA), e quando for retirada de sua condição de equilíbrio, mais rapidamente tende a voltar para ela ([da Silva Coelho 2007](#)).

Entretanto, uma estrutura com excesso de estabilidade, balança violentamente, podendo acarretar em danos estruturais, falhas e até mesmo acidentes dependendo da aplicação. Dessa forma, se busca um CG baixo o suficiente para dar segurança a estrutura, mas que não acarrete no excesso de estabilidade.

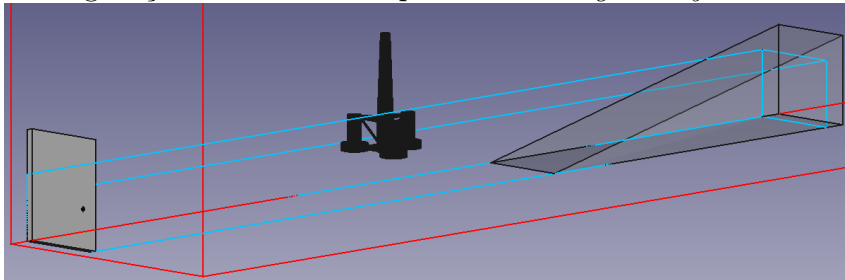
Se o posicionamento do CG acarretar em um GM negativo, o mesmo provoca um estado de equilíbrio instável, fazendo com que a estrutura oscile fortemente, podendo virar.

2.2.1 Relação das variáveis com a estabilidade da estrutura

Posto isso, a análise dos valores referentes aos seis graus de liberdade, é crucial para uma estimativa da melhor configuração com o intuito de alcançar uma estabilidade da estrutura flutuante adequada. Em casos de estruturas expostas a ação de ondas marítimas, o comportamento da rotação em torno do eixo perpendicular a direção em que a onda se desloca é um dos principais parâmetros de análise para possíveis falhas, ou em aplicações de *FOWT*, perdas de eficiência e tombamentos.

A partir dos softwares *FreeCAD* ([FreeCAD 2023](#)), ambas plataformas para realização de modelos em 3D, foi modelada a geometria utilizada no presente estudo. Para a confecção do mesmo, foi tomado como base a geometria .STL referente ao FOWT utilizada em [Tan et al. \(2023\)](#), em que é uma geometria da unidade flutuante de uma turbina eólica flutuante *offshore* ([Figura 8](#)).

Figura 8: Configuração do caso no acoplamento *DesignSPHysics* com o *FreeCAD*.



Fonte: elaborado pelo autor

Com suas respectivas dimensões presentes na [Tabela 1](#).

A simulação foi realizada em escala reduzida, com as devidas configurações do gerador de onda para ondas regulares, a fim de realizar um estudo e análise da influência da localização do centro de gravidade (CG) na estabilidade da estrutura flutuante.

Assim, com o auxílio do *FreeCAD* v0.19 e do acoplamento *DesignSPHysics* 0.6.0.1911-06-15 presente nele, que por ser uma interface gráfica, se apresentou mais simples de se utilizar na disposição geométrica do caso, porém com uma limitação de alteração de parâmetros. Diante disso, foi desenvolvido apenas o arquivo em código .XML contendo todos

Tabela 1: Tabela com os parâmetros do modelo utilizado

Comprimento da torre	380 <i>mm</i>
Diâmetro da torre	<i>Topo</i> = 41 <i>mm</i> , <i>Base</i> = 69 <i>mm</i>
Comprimento da coluna central	147 <i>mm</i>
Diâmetro da coluna central	69 <i>mm</i>
Espaçamento entre as colunas de apoio	24 <i>mm</i>
Comprimento das colunas de apoio (superiores)	127 <i>mm</i>
Diâmetro das colunas de apoio (superiores)	59 <i>mm</i>
Comprimento das colunas de apoio (base)	29 <i>mm</i>
Diâmetro das colunas de apoio (base)	117 <i>mm</i>
Diâmetro das barras de conexão entre as colunas	8 <i>mm</i>
Altura total	527 <i>mm</i>
Profundidade submersa	120 <i>mm</i>
Massa total do FOWT	2,166 <i>kg</i>
Momento de inércia XX (Roll)	0,0386 <i>kg · m²</i>
Momento de inércia YY (Pitch)	0,0386 <i>kg · m²</i>
Momento de inércia ZZ (Yaw)	0,0331 <i>kg · m²</i>

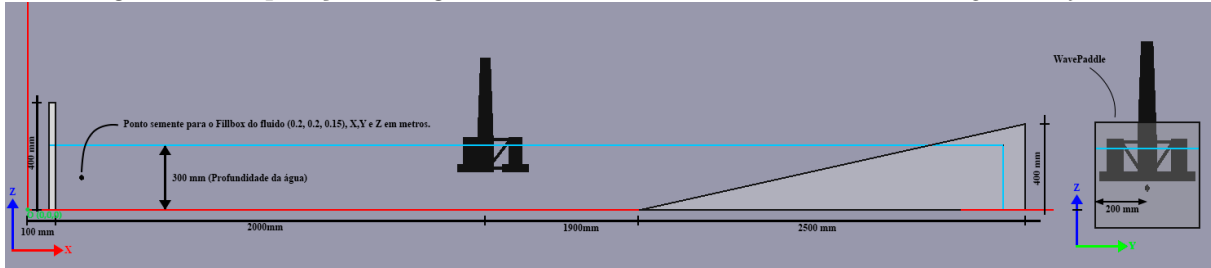
Fonte: Autor.

os parâmetros geométricos, valores de constante, acoplamentos utilizados, parâmetros da simulação, dentre outros necessários para a realização do estudo no *DualSPHysics*, e a simulação e alteração de alguns outros aspectos foi realizado via editor de texto, o que possibilita maior controle das variáveis.

2.3 Modelagem da geometria e do caso

Como dito anteriormente, a modelagem básica do caso e da geometria foi realizado via *FreeCAD* e *DesignSPHysics*, onde a visualização da disposição dos corpos utilizados facilitou o desenvolvimento do caso. Por meio de análise de estudos já realizados e também acerca de pesquisas feitas, foi obtido um conjunto para o caso com a configuração presente na [Figura 9](#):

Figura 9: Disposição das geometrias visualizadas através do *DesignSPHysics*.



Fonte: elaborado pelo autor.

Com o *WavePaddle* com as dimensões de 30 mm de espessura, e 400 mm de largura e altura, foi configurada uma distância de 2.000 mm entre o *WavePaddle* e o centro de gravidade da estrutura em X, para que não ocorra fenômenos de formação de onda como citado anteriormente. As dimensões do *Dike* são de 2.500 mm em X, 400 mm em Y e Z, disposto a uma distância de 1.900 mm entre o centro do FOWT e sua ponta inferior, formando uma rampa para amortecer os efeitos da resposta da onda em contato com uma parede. O nível da água se encontra em 300 mm do solo, e a origem está explícita pelo ponto O presente na [Figura 9](#).

2.4 Hardware do computador utilizado

Para o presente trabalho, foi utilizado um computador disposto com uma placa de vídeo (GPU) do modelo 1080 da marca Nvidia[®], que mesmo sendo um modelo antigo, lançado em 2018, ainda possibilitou uma aceleração computacional de cerca de sete vezes quando comparado com a CPU disponível na mesma máquina, um i7-8700 da marca Intel[®].

A possibilidade de utilização da GPU, dentro do *DualSPHysics*, na solução das simulações realizadas, permitiu uma aceleração computacional significativa, dado o número cerca de 20 vezes maior de núcleos que em um processador como o mencionado, quando comparado os núcleos CUDA utilizados na GPU para os cálculos das propriedades e interpolações com os núcleos do processador.

As configurações disponíveis neste computador, assim como sua capacidade de memória inicial de 1 TB, tornou uma otimização do estudo, como um possível refino do domínio

diminuindo a distância entre partículas inviável, dado que uma diminuição de 0.001 m no dp , acarretou em um tempo total de simulação de 10 dias em apenas um caso.

2.5 Considerações para a simulação do caso

Neste contexto, foram utilizadas 5 configurações de centro de massa da geometria utilizada, determinadas de forma arbitrária variando com um acréscimo e decréscimo de 0,02 m no valor utilizado para a validação do mesmo caso em [Pavan & Pantaleão \(2023\)](#) e [Tan et al. \(2023\)](#) (0,246 m), alterando sua coordenada ao longo do eixo Z para verificar a influência da altura do CG na estabilidade da unidade flutuante da FOWT. As configurações estão presentes na [Tabela 2](#)

Tabela 2: Tabela com os parâmetros do modelo utilizado

Configuração	X (m)	Y (m)	Z (m)
Caso 1	2.100	0.200	0.206
Caso 2	2.100	0.200	0.226
Caso 3	2.100	0.200	0.246
Caso 4	2.100	0.200	0.266
Caso 5	2.100	0.200	0.286

Além das modificações acerca da coordenada do centro de gravidade, também foram necessárias algumas considerações para tornar possível o desenvolvimento e conclusão do trabalho, sendo elas:

- **Desenvolvimento completo da onda:** para garantir um comportamento mais condizente com os obtidos em abordagem experimentais, foi configurado uma disposição da geometria para uma distância um tanto quanto considerável do pistão gerador de ondas, para que o fenômeno pudesse se desenvolver completamente antes de entrar em contato com a estrutura, a fim de se assemelhar o máximo possível de um comportamento de ondas marítimas completamente desenvolvidas.
- **Ondas regulares:** no desenvolvimento do caso, foram consideradas ondas regulares a fim de simplificar a modelagem e a simulação do caso, para estudos a cerca da estabilidade da estrutura quando exposta a estes esforços.

- *Flume/Dike*: para que não ocorra influência do movimento das ondas ao se chocar com a parede do domínio, foram dispostos *flumes* do lado oposto ao *WavePaddle*, para que ocorra a absorção da energia gerada pelas ondas, e o fluido não retorne contra a correnteza, afetando no resultado e comportamento da estrutura.
- **Distância entre a estrutura e o *Wave Generator***: é preciso garantir que a onda esteja totalmente formada quando iniciar sua interação com a estrutura, foi configurada para uma distância de 2.1 m da origem até seu centro de gravidade, evitando assim, fenômenos indesejáveis enquanto a onda ainda não esta completamente desenvolvida.

2.6 Desenvolvimento do código XML

O código .XML foi obtido através da geração do *GenCase* presente no *DesignSPHysics*, sendo posteriormente feitas as modificações necessárias e a simulação via terminal (*Shell*). Este arquivo é responsável por configurar todos os parâmetros utilizados na simulação, como a definição das constantes utilizadas, configurações dos corpos e geometrias utilizadas, corpos flutuantes existentes e suas propriedades, movimentos presentes em corpos específicos, acoplamentos especiais como *WavePaddles* e *Moordyn* e os parâmetros de execução ([Apêndice A](#)), assim como as coordenadas do centro de massa da estrutura que será modificada apenas na direção Z, sendo mantido sua localização em relação aos eixos X (2.1 m) e Y (0.2 m).

2.7 Parâmetros utilizados para o *Moordyn*

Os parâmetros utilizados no acoplamento *Moordyn* estão presentes na [Tabela 3](#), sendo utilizadas configurações de linhas de amarração com discretização da mesma em 50 pontos nodais, para ser possível obter as forças exercidas pela linha.

Sendo cada parâmetro:

- **kBot**: constante de rigidez inferior da linha de ancoragem.

Tabela 3: Parâmetros utilizados no acoplamento *Moordyn* para as amarrações.

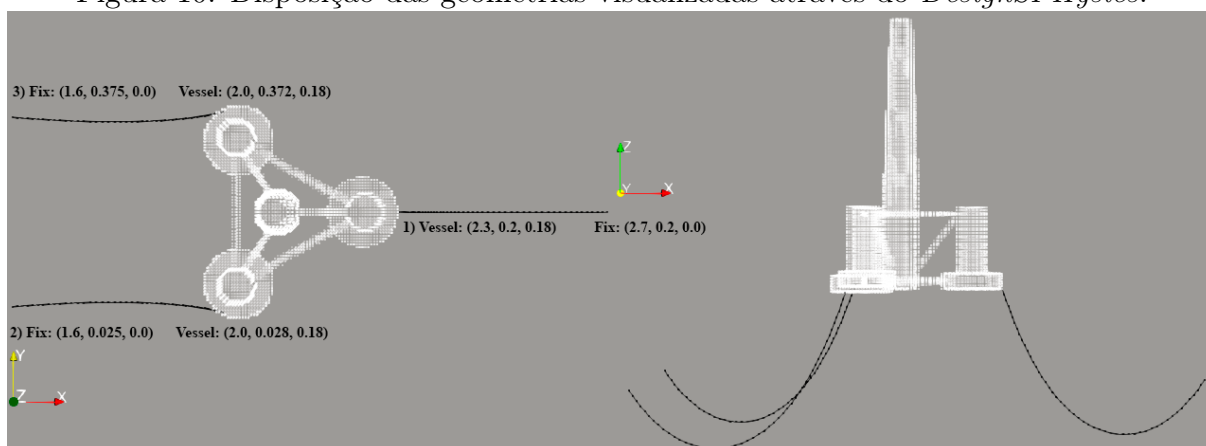
kBot	$3 \cdot 10^6$
cBot	$3 \cdot 10^5$
fricDamp	200
EA [N]	$7,42 \cdot 10^5$
Diâmetro [m]	0.002213
Massa/Unidade de Comprimento [kg/m]	0.0305
Comprimento do cabo [m]	0.6
Número de nós discretos	50

Fonte: Autor.

- **cBot:** constante de amortecimento inferior da linha de ancoragem.
- **fricDamp:** coeficiente de amortecimento utilizada no modelo.
- **EA:** produto do módulo de elasticidade com a área de seção transversal da linha de ancoragem.
- **Diâmetro:** diâmetro do volume equivalente.

Foram utilizados para o caso, três pontos de ancoragem, os quais são realizados três amarrações na estrutura (*Vessel connections*) e três amarrações no solo (*Fix connections*), disposto conforme apresentado na [Figura 10](#):

Figura 10: Disposição das geometrias visualizadas através do *DesignSPHysics*.



Fonte: elaborado pelo autor.

2.8 Parâmetros utilizados na geração de onda

Para uma configuração de geração de onda aproximada da realidade de ondas marítimas, o caso é configurado com uma distância relativamente grande entre a fonte da geração da onda e a localização da geometria estudada. Nos casos estudados, foram dispostas as configurações presentes na [Tabela 4](#).

Tabela 4: Parâmetros para a geração de ondas regulares por meio de *WavePaddles*.

Profundidade [m]	0.3
Início [s]	0
Duração [s]	25
Ordem da Onda	2
Altura da Onda [m]	0.1
Período da Onda [s]	1

Fonte: Autor.

Nestes casos foram utilizadas as mesmas configurações de onda para as diferentes coordenadas do centro de gravidade adotado.

2.9 Influência dos principais parâmetros na qualidade da simulação e poder computacional

Alguns casos podem exigir uma maior discretização das geometrias e fluidos envolvidos, sendo ambos discretizados através do método lagrangiano, porém, isso demanda de um maior poder computacional, o que poderia tornar a simulação algo inviável. Posto isto, em alguns casos se busca simplificações acerca da discretização do caso para que se possa realizar estudos acerca da modificação de parâmetros antes de realizar um refinamento por completo, enquanto outros casos apresentam inconsistências e divergência nos resultados devido ao refinamento incapaz de capturar alguns fenômenos de fluidos.

2.9.1 Distância e quantidade de partículas

O distanciamento entre as partículas da simulação, dp , define a quantidade de partículas que estarão presentes no caso, dado um domínio definido previamente. Quanto maior essa quantidade de partículas para o caso, ou seja, um dp relativamente pequeno,

mais fielmente será reproduzido o formato de geometrias mais complexas, tais como seus cantos e arestas mais agudos.

No entanto, uma diminuição continua no dp , acarreta em um crescimento exponencial do custo computacional, devido ao aumento da complexidade na solução do caso e do número de interações com os vizinhos necessária para a obtenção de resultados, provocando uma maior demora para a realização de uma única rodada da simulação. Portanto, se busca encontrar um equilíbrio em uma quantidade de partículas que identifique e modele os fenômenos dos fluidos de interesse e que não exija muito do hardware disponível, dada sua limitação.

2.9.2 Tempo de análise

O tempo de análise é outro aspecto de grande importância, dado que no início, os casos de estudo com geração de ondas são muito instáveis, e apresentam um comportamento mais condizente com o da realidade após um determinado período depois de iniciados, quando estabilizam o movimento do fluido e a estrutura.

Entretanto, assim como a quantidade de partículas, quanto maior o tempo de análise do caso, mais demorado será para a obtenção do resultado de uma simulação, visto que serão calculados mais dados e mais parâmetros com um tempo total maior. Outros parâmetros utilizados na simulação, estão dispostos na [Tabela 5](#)

Sendo estes:

- **Distância das partículas (dp):** distância entre o centro de uma partícula e uma partícula vizinha mais próxima.
- γ : constante politrópica para a água que será utilizada na equação do estado para a obtenção da massa específica ao longo da simulação.
- $Coeff_{sound}$: coeficiente para a obtenção da velocidade do som.
- $Coeff_h$: coeficiente para o cálculo do comprimento de suavização h
- CFL : coeficiente associado a variação do tempo dt .

Tabela 5: Parâmetros utilizados na simulação.

Distância das partículas [m]	0.004
ρ_{agua} [kg/m ³]	1000
γ	7
Coef _{sound}	1.25
Speped Sound [m/s]	43.8
Coef _h	1.25
CFL	0.4
Boundary	DBC
StepAlgorithm	Symplectic
Kernel	Wendland
Termo Difusivo da Densidade	0,1 (Fourtakas)
TimeMax [s]	25
TimeOut [s]	0.03

Fonte: Autor.

- **Boundary:** abordagem utilizada para o contorno da estrutura analisada.
- **StepAlgorithm:** modelo do algoritimo de interpolação.
- **Kernel de suavização (W):** tipo de kernel de suavização para a interpolação dos parâmetros das partículas.
- **Termo difusivo da densidade:** valor da variação do termo e da influência do modelo que é aplicado as partículas de fluido que não interagem com a fronteira (*Fourtakas*).
- **TimeMax:** tempo real total da simulação.
- **TimeOut:** tempo de escrita da informações calculadas, resultando em uma quantidade de pontos para interpretação dos resultados.

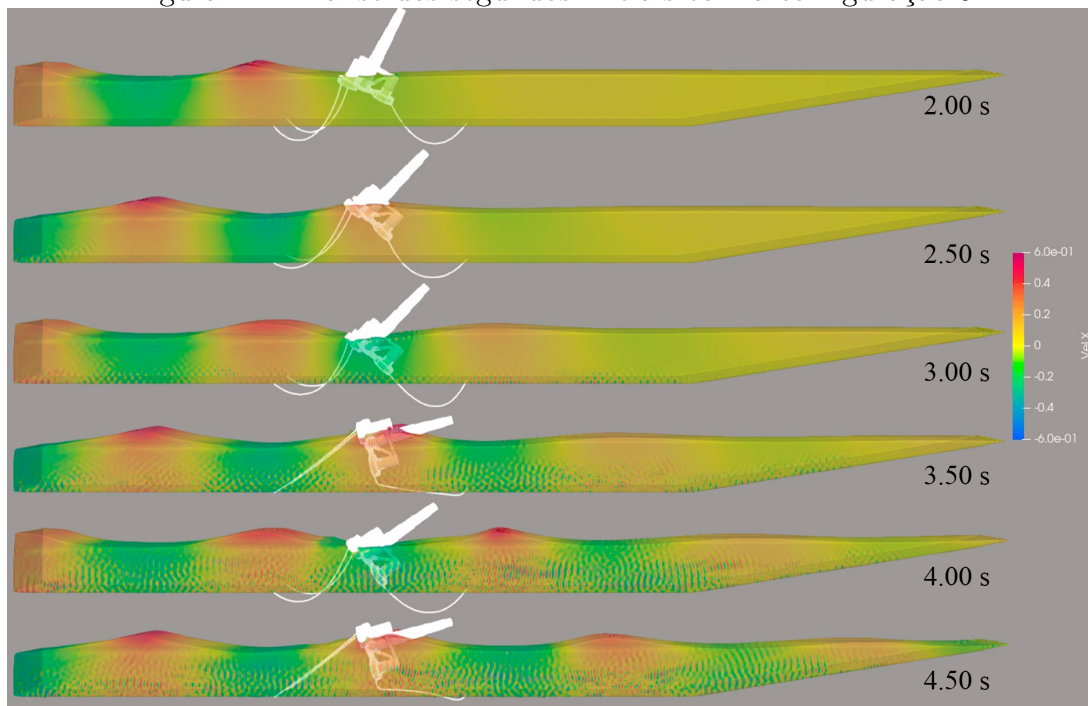
O tempo total da simulação (*TimeMax*) foi determinado através da tentativa e erro para um tempo em que a estrutura apresentou um comportamento estável e periódico. A distância entre as partículas (*dp*) utilizada foi determinada pelo poder computacional disponível, combinando um bom resultado da simulação com um tempo considerado apto para a conclusão do estudo.

3 Resultados e discussões

3.1 Consolidação do software na captura de alguns fenômenos fluidodinâmicos

Por meio da análise do gráfico construído a partir dos dados obtidos para o ângulo *Pitch*, verifica-se um comportamento de tombamento da estrutura, ou seja, uma angulação próxima a 80° , a partir do ponto com um centro de gravidade da configuração 5, como mostra a sequência de instantes capturados na Figura 11, o que demonstra que o software vai de acordo com o esperado pela literatura (da Silva Coelho 2007), em que uma estrutura com um centro de gravidade mais elevado, tende a fortes oscilações passíveis de provocar danos a estrutura e a sua funcionalidade.

Figura 11: Análise dos segundos iniciais com a configuração 5.



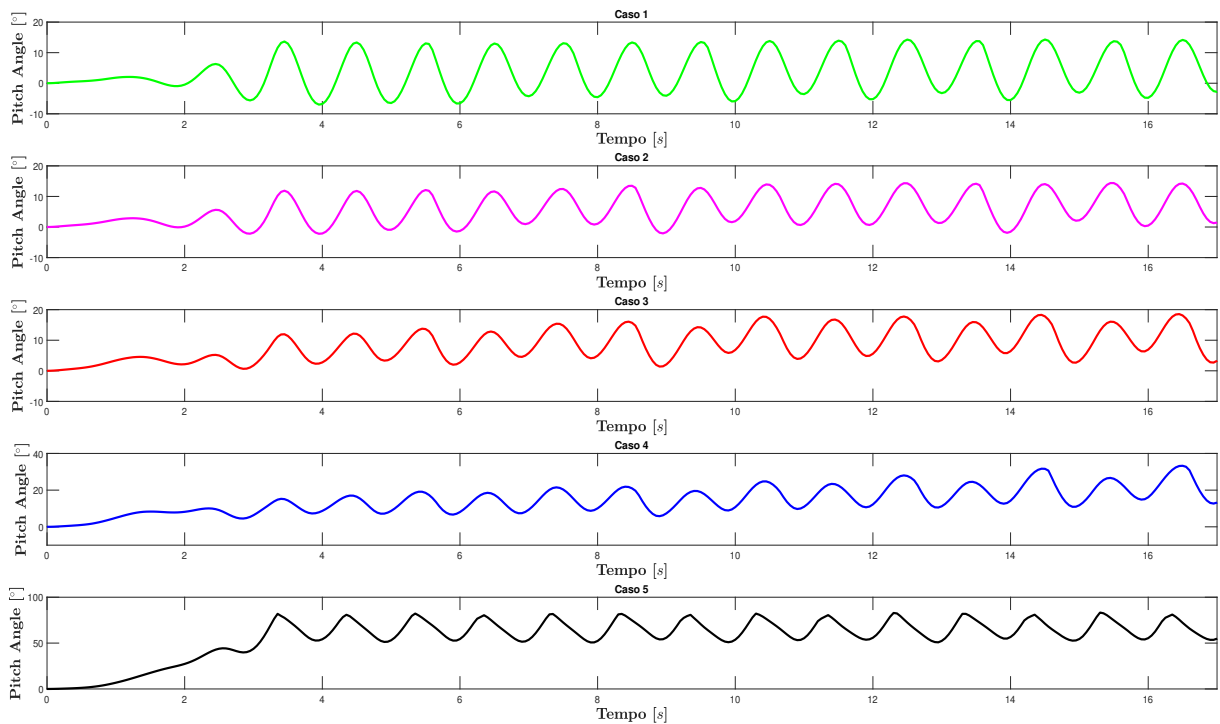
Fonte: elaborado pelo autor.

Com isso, pode-se verificar que o software se mostrou capaz de capturar fenômenos referentes a estabilidade da estrutura em situações críticas de tombamento com seu centro localizado mais ao alto dentre os casos analisados, assim não sendo realizado simulações com o centro em uma posição acima da disposta no caso 5.

3.2 Variação do Pitch com o centro de massa

Devido as configurações utilizadas para a realização das simulações, e após a análise física do problema e de resultados de simulações iniciais, é pertinente a realização de uma simplificação a respeito dos graus de liberdade da estrutura, visto que não há uma variação significativa nos movimentos de *Sway* (Movimento ao longo do eixo Y) e nos ângulos *Roll* e *Yaw* devido a direção da onda gerada e o posicionamento da estrutura no sistema global, e esta simplificação permitiu uma redução no tempo total de simulação de cerca de 4,17%, aproximadamente 3 horas. O comportamento do ângulo *Pitch* de cada caso isolado pode ser observado na [Figura 12](#).

Figura 12: Ângulo *Pitch* em função da variação do centro de gravidade da estrutura.

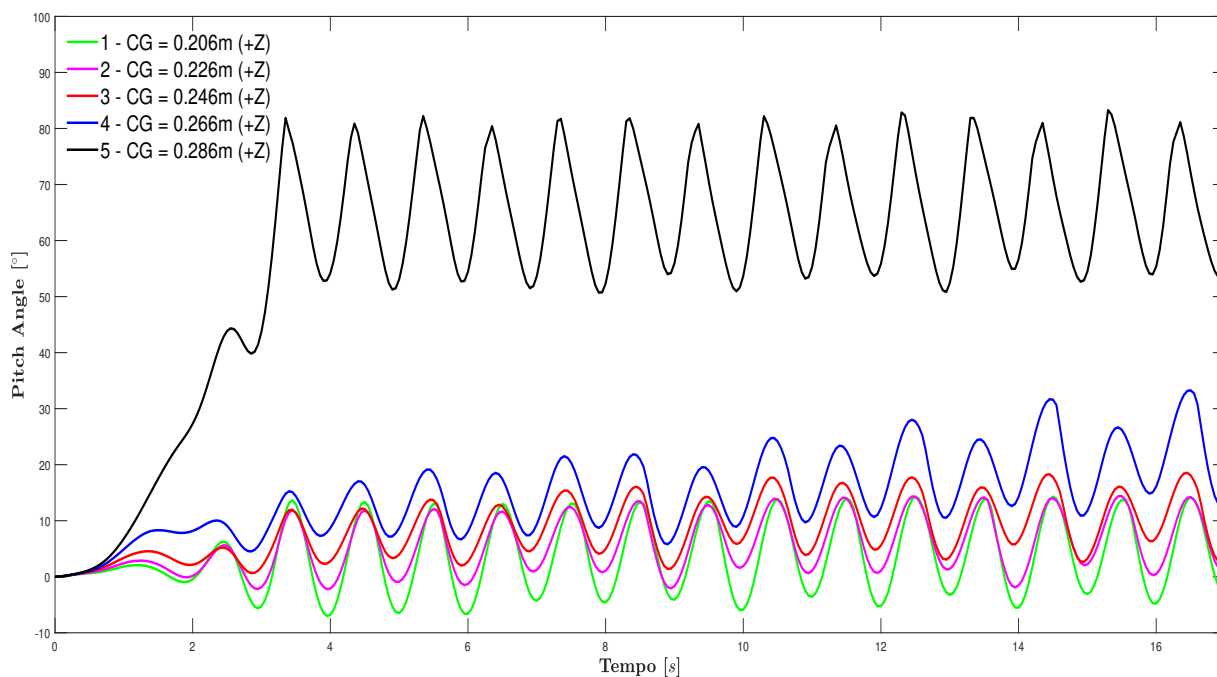


Fonte: elaborado pelo autor.

Assim, foram analisadas as variações acerca das acelerações e posições referentes ao *Surge* e o *Heave*, dado que quando analisadas as acelerações, resulta em um comportamento com um menor erro associado devido as duas integrações realizadas para a obtenção das posições no espaço ([Tan et al. 2023](#)).

Para o estudo acerca da estabilidade da estrutura e também da sua oscilação quando submetida aos esforços das ondas, foi realizado a análise da variação do ângulo *Pitch* (ângulo em torno do eixo Y), para verificar possíveis pontos de tombamento e pontos que acarretem no estado de equilíbrio estável (da Silva Coelho 2007).

Figura 13: Comparação do ângulo *Pitch* para as diferentes configurações.



Fonte: elaborado pelo autor.

Pela análise da Figura 13, é perceptível que quando aplicados centros de gravidade mais próximos a base da estrutura, resultam numa menor variação de *Pitch* ao longo da simulação, até atingir um CG baixo suficiente para que não provoque um excesso de estabilidade e ainda acarrete em uma configuração segura para a atuação da estrutura.

No caso 1, em que o CG resultou em uma estabilidade excessiva, foi possível notar que apesar de não tombar ou afundar, a estrutura apresentou uma oscilação com uma amplitude cerca de 54,5% em relação a configurações 2 e 43,15% maior que a configuração 3 quando comparado os ângulos de pico de um mesmo período (iniciado no segundo 8), mesmo que com um valor máximo do ângulo menor, dado que estruturas com excesso de estabilidade balançam violentamente como ocorrido no caso 1 com amplitudes maiores e

oscilações mais fortes, e isso pode acarretar em danos estruturais e até mesmo acidentes em determinadas aplicações.

Realizando a análise e comparação dos dois casos, o caso 2 e 3, com uma estabilidade mais próxima ao estado de estabilidade ideal, o caso 2 apresentou uma diferença de 16.28% menor no valor máximo do ângulo *Pitch* em comparação com o terceiro.

A análise desse parâmetro se torna essencial devido a primeiramente, análise de possíveis tombamentos da estrutura, o que acarretaria em falhas do projeto, e também, quando controlada a estabilidade, como essa oscilação poderia afetar a eficiência da turbina eólica *Offshore* na geração de energia, devido a alteração do ângulo de entrada da força provocada pelos ventos, dado que, caso ocorra uma oscilação de grande magnitude na angulação *Pitch*, poderia provocar uma perda de eficiência significativa.

3.3 Variação do centro de gravidade da estrutura analisada

É possível notar que quando o centro de gravidade aumenta (na direção de Z positivo), ocorre uma instabilidade na estrutura dado que fica mais distante da base da estrutura e do metacentro, aumentando a magnitude do esforço realizado devido ao efeito do peso exercido no centro de gravidade alavancar a estrutura para rotacionar em torno do centro de carena (*B*). Nos casos 2 e 3, percebe-se uma estabilidade maior, devido ao posicionamento do centro de gravidade mais próximo da base da estrutura flutuante (na direção de Z negativo, seguindo o eixo de coordenadas da [Figura 9](#)).

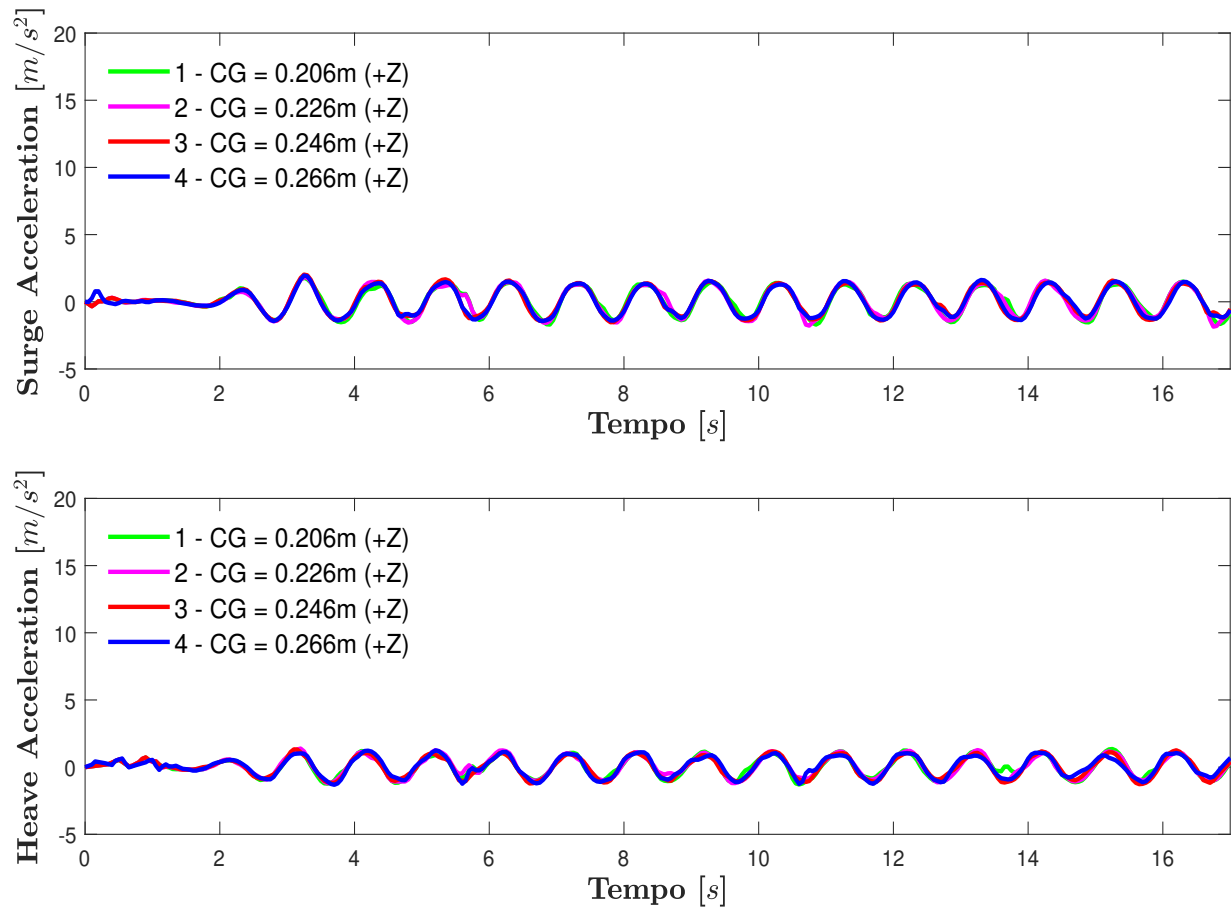
Uma das vantagens na utilização de turbinas de eixo vertical, é que a geração de energia por meio da rotação das pás, será realizada em torno do eixo da própria torre, o que tende a gerar menores oscilações na estabilidade da estrutura quando em atividade, devido a conservação do momento angular.

Por meio da análise dos casos propostos, é perceptível que configurações com o centro de gravidade localizado mais acima que o do caso 4, serão pontos candidatos ao tombamento da estrutura, dado que a variação do ângulo apresentou valores máximos maiores e conseqüentemente no caso 5, provocou o tombamento.

3.4 Variação das variáveis

Além da variação do *Pitch*, também foi feita a análise da variação da aceleração e do posicionamento do *Surge* e *Heave*, que para uma melhor análise, foi desconsiderado o caso em que acarretou no tombamento da estrutura.

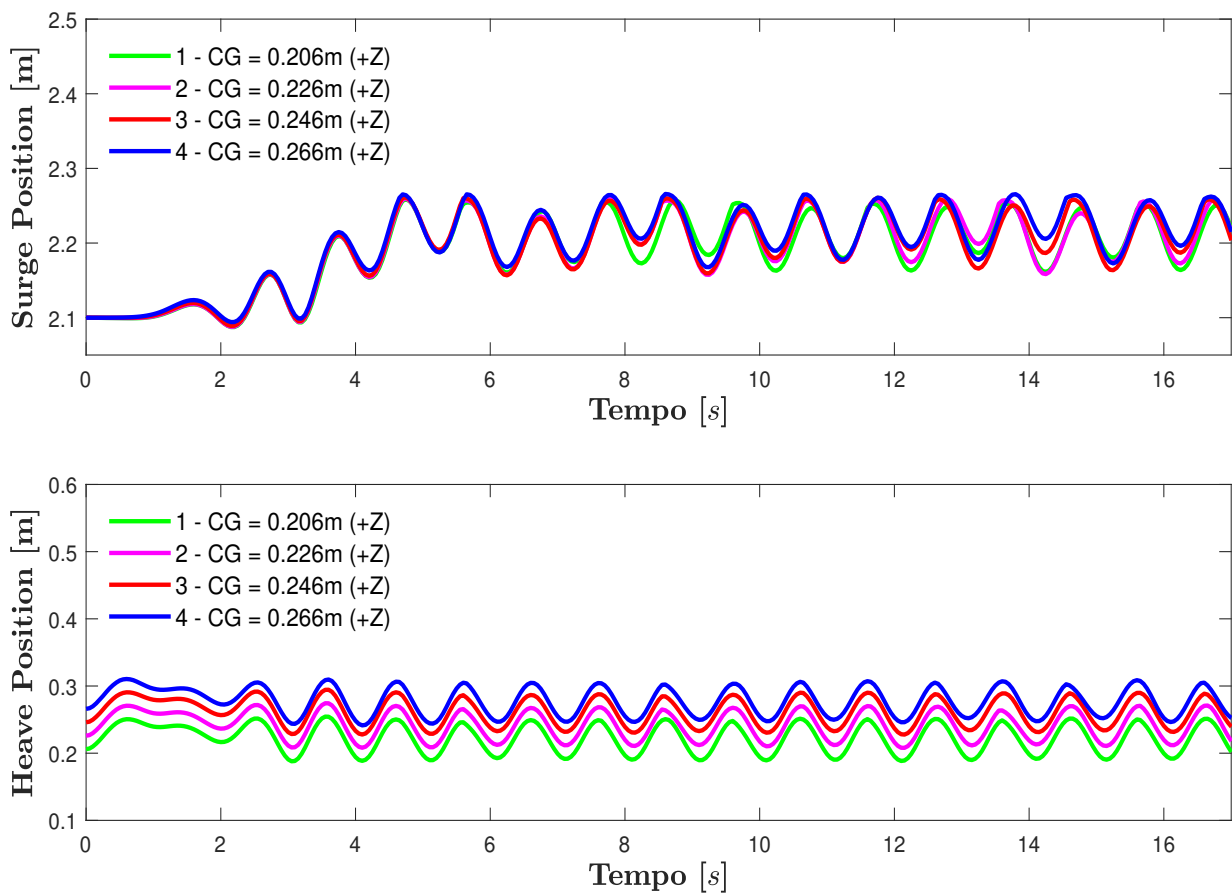
Figura 14: Comparação das acelerações de *Surge* e *Heave* para as diferentes posições do centro de gravidade.



Fonte: elaborado pelo autor.

Pela análise dos gráficos da aceleração de avanço e de elevação, *Surge* e *Heave* respectivamente, presentes na [Figura 14](#), foi possível notar que a modificação do centro de gravidade não provocou uma alteração significativa nos valores das acelerações e muito menos no comportamento delas, dado que a intensidade da onda foi mantida constante em todos os casos.

Figura 15: Comparação das posições em relação a X (*Surge*) e Z (*Heave*) para as diferentes configurações.



Fonte: elaborado pelo autor.

Já na análise dos gráficos referentes ao posicionamento do centro de gravidade da estrutura, [Figura 15](#), é perceptível que a alteração da coordenada do CG também não provocou alterações no comportamento da estrutura, variando somente a coordenada da posição de elevação, dado a alteração da coordenada do centro de massa da estrutura, porém com um mesmo comportamento. Vale ressaltar também, que por se tratar de uma estrutura ancorada ao solo, a coordenada do avanço, *Surge Position*, não ultrapassa o valor de 2.2675 m (+X), dado que a ancoragem é responsável por segurar a estrutura e retorná-la para próximo a posição de origem.

4 Conclusões

O objetivo do presente trabalho foi realizar estudos acerca de técnicas em torno da dinâmica dos fluidos computacional para avaliar a performance de estruturas *Offshore* ancoradas submetidas a esforços da interação fluido-estrutura por meio da geração de ondas regulares, visando contribuir com a literatura científica da área em questão.

A geração dos códigos utilizados (arquivos .XML) na simulação assim como a discretização das geometrias foram realizadas por meio do *DualSPHysics* e seus acoplamentos.

Nas condições específicas configuradas para um centro de gravidade em (2.100,0.200, 0.226) m, foram obtidos resultados que mostram um estado possivelmente mais próximo ao estado estável, dado que apresenta uma variação menor no ângulo *Pitch*. Este caso apresentou uma diferença de 16.28% menor no valor máximo do ângulo *Pitch* em comparação com o caso 3, o que é convergente com o esperado após análises realizadas acerca de estudos de estabilidade encontrados na literatura, enquanto configurações com *CGs* com a coordenada *Z* maior, apresentou instabilidades e até mesmo tombamentos (no caso 5).

Com isso, é possível concluir que para configurações em que o centro de gravidade se localiza muito distante da base da estrutura, tem-se uma estrutura com um estado de instabilidade, com fortes oscilações ao longo da simulação, enquanto *CGs* mais baixos, tendem a apresentar um comportamento mais estável, contanto que não provoquem um estado de excesso de estabilidade, o que poderia acarretar em danos estruturais e falhas, visto que provoca uma oscilação violenta na estrutura.

Para futuros trabalhos, propõe-se estender a análise do comportamento de estruturas submetidas a geração de onda realizando a variação em diferentes parâmetros e otimizando os a geometria utilizada para os parâmetros apresentados neste trabalho.

No quesito da metodologia empregada, visa-se realizar um aprofundamento dos parâmetros utilizados, assim como simulações mais refinadas com um poder computacional maior. Sugere-se, também, estudos acerca da variação de parâmetros definidos dentro do software, que apresentaram bons resultados, a fim de otimizar alguns aspectos da simulação e promover resultados cada vez mais fiéis com os ocorridos experimentalmente.

Referências

- A. J. C. Crespo, M. Gómez-Gesteira, R. A. D. (2007), ‘Boundary conditions generated by dynamic particles in sph methods’, *Computers, Materials & Continua* **5**(3), 173–184.
URL: <http://www.techscience.com/cmc/v5n3/23429>
- Altomare, C., Crespo, A., Rogers, B., Dominguez, J., Gironella, X. & Gómez-Gesteira, M. (2014), ‘Numerical modelling of armour block sea breakwater with smoothed particle hydrodynamics’, *Computers Structures* **130**, 34–45.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045794913002824>
- Birro, T. V. (2017), ‘Resolução do problema da cavidade bidimensional adimensional utilizando o método SPH’, *UFES - Universidade Federal do Espírito Santo* .
URL: encr.pw/GK9sl
- Chen, L., Basu, B. & Nielsen, S. R. (2018), ‘A coupled finite difference mooring dynamics model for floating offshore wind turbine analysis’, *Ocean Engineering* **162**, 304–315.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801818307005>
- Colagrossi, A. (2004), ‘A meshless lagrangian method for free–surface and interface flows with fragmentation’.
- Crespo, A., Altomare, C., Domínguez, J., González-Cao, J. & Gómez-Gesteira, M. (2017), ‘Towards simulating floating offshore oscillating water column converters with smoothed particle hydrodynamics’, *Coastal Engineering* **126**, 11–26.
- da Silva Coelho, A. (2007), ‘Módulo de estabilidade – est – unidade de estudo autônomo’, *DIRETORIA DE PORTOS E COSTAS, ENSINO PROFISSIONAL MARÍTIMO - Marinha do Brasil* .
- Dalrymple, R. & Rogers, B. (2006), ‘Numerical modeling of water waves with the sph method’, *Coastal Engineering* **53**(2).
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383905001304>

de Carvalho Brito, P. P. (2017), ‘Método Lattice-Boltzmann aplicado a aerodinâmica externa’, *UFU - Universidade Federal de Uberlândia* .

URL: encr.pw/ikQ5R

Dehnen, W. & Aly, H. (2012), ‘Improving convergence in smoothed particle hydrodynamics simulations without pairing instability’, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **425**(2), 1068–1082.

URL: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21439.x>

Domínguez, J. M., Fourtakas, G. & Altomare, C. t. (2021), ‘DualSPHysics: from fluid dynamics to multiphysics problems’, *Computational Particle Mechanics* pp. 2196–4386.

URL: <https://doi.org/10.1007/s40571-021-00404-2>

Fox, R. W., Pritchard, P. J. & McDonald, A. T. (2000), *Introdução À Mecânica Dos Fluidos* ., Grupo Gen-LTC.

FreeCAD (2023), ‘FreeCAD’.

URL: <https://www.freecad.org/>

Gingold, R. A. & Monaghan, J. J. (1977), ‘Smoothed particle hydrodynamics: Theory and application to non-spherical stars’, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **181**, 375–389.

URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:125000835>

Hall, M. & Goupee, A. (2015), ‘Validation of a lumped-mass mooring line model with deepwind semisubmersible model test data’, *Ocean Engineering* **104**, 590–603.

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801815002279>

Khayyer, A., Gotoh, H. & Shimizu, Y. (2022), ‘On systematic development of fsi solvers in the context of particle methods’, *Journal of Hydrodynamics* **34**(3), 395–407.

Leble, V. & Barakos, G. (2016), ‘Demonstration of a coupled floating offshore wind turbine analysis with high-fidelity methods’, *Journal of Fluids and Structures* **62**, 272–293.

- Liu, M. B. & Liu, G. R. (2010), ‘Smoothed particle hydrodynamics (sph): an overview and recent developments’, *Archives of Computational Methods in Engineering* **17**(1), 25–76.
- LIU, M.-B. & ming LI, S. (2016), ‘On the modeling of viscous incompressible flows with smoothed particle hydro-dynamics’, *Journal of Hydrodynamics, Ser. B* **28**(5), 731–745.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1001605816606765>
- Lucy, L. B. (1977), ‘A numerical approach to the testing of the fission hypothesis.’, **82**, 1013–1024.
- Monaghan, J. J. (1992), ‘Smoothed particle hydrodynamics’, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **30**(1), 543–574.
URL: <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.30.090192.002551>
- Monaghan, J. J. (2005), ‘Smoothed particle hydrodynamics’, *Reports on Progress in Physics* **68**, 1703 – 1759.
URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:5987481>
- Pavan, D. & Pantaleão, A. V. (2023), AplicaÇÃo de computational fluid dynamics/smoothed particle hydrodynamics em problemas de engenharia, in ‘XXXV Congresso de Iniciação Científica Unesp’.
- Peres, L. G. F. (2013), O sistema de posicionamento dinâmico, Master’s thesis, CENTRO DE INSTRUÇÃO ALMIRANTE GRAÇA ARANHA, Rio de Janeiro.
- Shi, W., Li, Y., Dong, Y., Xin, M., Zhang, X. & Xu, Q. (2021), ‘The effect of ocean acidification on the enzyme activity of *apostichopus japonicus*’, *Fish Shellfish Immunology* **108**, 1–6.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1050464820307087>
- Tan, Z., Sun, P.-N., Liu, N.-N., Li, Z., Lyu, H.-G. & Zhu, R.-H. (2023), ‘Sph simulation and experimental validation of the dynamic response of floating offshore wind turbines in waves’, *Renewable Energy* **205**, 393–409.

- Valencio, N. (2023), ‘Turbinas – Energia nas plataformas depende de modelos aeroderivados e movidos a gás’, *Portal Petróleo e Energia* .
URL: encr.pw/hLNKw
- Vasco, J. R. G. (2014), ‘Desenvolvimento de software utilizando a técnica sph (smoothed particle hydrodynamics) na geração de ondas de submersão’.
- Verbrugghe, T., Stratigaki, V., Altomare, C., Domínguez, J. M., Troch, P. & Kortenhaus, A. (2019), ‘Implementation of open boundaries within a two-way coupled sph model to simulate nonlinear wave–structure interactions’, *Energies* **12**(4).
URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/4/697>
- Versteeg, H. K. & Malalasekera, W. (2007), *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*, Pearson education.
- Vila, J.-P. (1998), ‘Méthodes particulières régularisées. développements récents et nouvelles applications’, *Esaim: Proceedings* **3**, 131–146.
URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:120055499>
- Wendland, H. (1995), ‘Piecewise polynomial, positive definite and compactly supported radial functions of minimal degree’, *Advances in Computational Mathematics* **4**(1), 389–396.
URL: <https://doi.org/10.1007/BF02123482>
- Xue, M.-A., Dou, P., Zheng, J., Lin, P. & Yuan, X. (2022), ‘Pitch motion reduction of semisubmersible floating offshore wind turbine substructure using a tuned liquid multicolumn damper’, *Marine Structures* **84**, 103237.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951833922000764>
- Y.M. Lo, E. & Shao, S. (2002), ‘Simulation of near-shore solitary wave mechanics by an incompressible sph method’, *Applied Ocean Research* **24**(5), 275–286.
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118703000026>

Zijlema, M., Stelling, G. & Smit, P. (2011), 'Swash: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters', *Coastal Engineering* **58**(10), 992–1012.

URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378383911000974>

APÊNDICE A - Parâmetros e configurações utilizadas

```
1 <!-- Case name: FOWT_05_Ext -->
2 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8" ?>
3 <case app="GenCase v5.0.278 (24-04-2023)" date="27-11-2023 09:27:18
4     ">
5     <casedef>
6         <constantsdef>
7             <lattice bound="1" fluid="1" />
8             <gravity x="0.0" y="0.0" z="-9.81" comment="
9 Gravitational acceleration" units_comment="m/s^2" />
10            <rhop0 value="1000.0" comment="Reference density of the
11 fluid" units_comment="kg/m^3" />
12            <rhopgradient value="3.0" comment="Initial density
13 gradient 1:Rhop0, 2:Water column, 3:Max. water height (default
14 =2)." units_comment="-" />
15            <hswl value="0.0" auto="true" comment="Maximum still
16 water level to calculate speedofsound using coefsound"
17 units_comment="metres (m)" />
18            <gamma value="7.0" comment="Polytropic constant for
19 water used in the state equation" />
20            <speedsystem value="0.0" auto="true" comment="Maximum
21 system speed (by default the dam-break propagation is used)" />
22            <coefsound value="20.0" comment="Coefficient to
23 multiply speedsystem" />
24            <speedsound value="43.8" auto="false" comment="Speed of
25 sound to use in the simulation (by default speedofsound=
26 coefsound*speedsystem)" />
27            <coefh value="1.25" comment="Coefficient to calculate
28 the smoothing length (h=coefh*sqrt(3*dp^2) in 3D)" />
29            <cflnumber value="0.4" comment="Coefficient to multiply
```

```

    dt" />
17     <h value="0.0" auto="true" units_comment="metres (m)" />
18     <b value="0.0" auto="true" units_comment="Pascal (Pa)"
/>
19     <massbound value="0" auto="true" units_comment="kg" />
20     <massfluid value="0" auto="true" units_comment="kg" />
21 </constantsdef>
22 <mkconfig boundcount="241" fluidcount="9" />
23 <geometry>
24     <definition dp="0.004" comment="Initial inter-particle
distance" units_comment="metres (m)">
25         <pointref x="0.0" y="0.0" z="0.0" />
26         <pointmin x="0.0" y="-0.2" z="0.0" />
27         <pointmax x="7.0" y="1.0" z="2.0" />
28     </definition>
29     <commands>
30         <mainlist>
31             <setshapemode>actual | dp | bound</setshapemode
>
32             <setmkbound mk="4" />
33             <drawfilestl file="Wedge.stl" objname="Wedge"
autofill="false">
34                 <drawscale x="0.001" y="0.001" z="0.001" />
35             </drawfilestl>
36             <setmkbound mk="3" />
37             <setdrawmode mode="face" />
38             <drawbox objname="Contorno">
39                 <boxfill>front | back | bottom | right</
boxfill>
40                 <point x="0.0" y="0.0" z="0.0" />

```

```

41         <size x="6.5" y="0.4" z="2" />
42     </drawbox>
43     <setmkbound mk="2" />
44     <setdrawmode mode="solid" />
45     <drawbox objname="Wave Padle">
46         <boxfill>solid</boxfill>
47         <point x="0.07" y="0.0" z="0.0" />
48         <size x="0.03" y="0.4" z="0.5" />
49     </drawbox>
50     <setmkbound mk="1" />
51     <drawfilestl file="external_FOWT_01001.stl"
objname="FOWT_01" autofill="false">
52         <drawscale x="0.001" y="0.001" z="0.001" />
53     </drawfilestl>
54     <move x="0.08" y="0.0" z="0" />
55     <setmkfluid mk="0" />
56     <fillbox x="0.15" y="0.2" z="0.15" objname="
FillBox">
57         <modefill>void</modefill>
58         <point x="0" y="0" z="0" />
59         <size x="6.35" y="0.4" z="0.3" />
60     </fillbox>
61     <matrixreset />
62     <shapeout file="" />
63     </mainlist>
64 </commands>
65 </geometry>
66 <floatings>
67     <floating mkbound="1">
68         <massbody value="2.166" />

```

```

69         <center x="2.1" y="0.2" z="0.226" />
70         <inertia x="0.0386" y="0.0386" z="0.0331" />
71         <rotationDOF x="0" y="1" z="0" />
72     </floating>
73 </floatings>
74 <motion>
75     <objreal ref="2">
76         <begin mov="1" start="0" />
77         <mnull id="1" />
78     </objreal>
79 </motion>
80 </casedef>
81 <execution>
82     <special>
83         <initialize />
84         <wavepaddles>
85             <piston>
86                 <mkbound value="2" comment="Mk-Bound of
selected particles" />
87                 <start value="0" comment="Start time (default
=0)" />
88                 <duration value="25.0" comment="Movement
duration, Zero is the end of simulation (default=0)" />
89                 <depth value="0.3" comment="Water depth (
default=0)" />
90                 <pistondir x="1.0" y="0.0" z="0.0" comment="
Movement direction (default=(1,0,0))" />
91                 <waveorder value="2" comment="Order wave
generation 1:1st order, 2:2nd order (default=1)" />
92                 <waveheight value="0.1" comment="Wave height" /

```

```

>
93         <waveperiod value="1.0" comment="Wave period" /
>
94         <gainstroke value="1.0" comment="Gain factor to
amplify/reduce the paddle stroke (default=1)" />
95         <phase value="0.0" comment="Initial wave phase
in function of PI (default=0)" />
96         <ramp value="0.0" comment="Periods of ramp (
default=0)" />
97         <savemotion periods="24" periodsteps="20" xpos=
"2.0" zpos="-0.15" comment="Saves motion data. xpos and zpos are
optional. zpos=-depth of the measuring point" />
98         </piston>
99     </wavepaddles>
100     <moorings>
101         <savevtk_moorings value="true" comment="Saves vtk
with moorings (default=true)" />
102         <savecsv_points value="true" comment="Saves csv
with link points (default=true)" />
103         <savevtk_points value="false" comment="Saves vtk
with link points (default=false)" />
104         <mooredfloatings>
105             <floating mkbound="1" comment="Mkbound of the
Floating body the mooring is linked to" />
106         </mooredfloatings>
107         <moordyn comment="MoorDyn configuration">
108             <solverOptions>
109                 <waterDepth value="0.3" comment="Water
depth" units_comment="(m)" />
110                 <freesurface value="0.0" comment="Z

```

```

position of the water free surface.(default=0)" />
111         <kBot value="3.0e6" comment="Bottom
stiffness constant. (default=3.0e6)" units_comment="Pa/m" />
112         <cBot value="3.0e5" comment="Bottom damping
constant. (default=3.0e5)" units_comment="Pa*s/m" />
113         <dtM value="0.0001" comment="Desired
mooring model time step. (default=0.0001)" />
114         <waveKin value="0" comment="Wave kinematics
flag ( 0: neglect [the only option currently supported] ). (
default=0)" />
115         <writeUnits value="yes" comment="Write
units line. value=[yes|no]. (default=yes)" />
116         <frictionCoefficient value="0.0" comment="
General bottom friction coefficient, as a start. (default=0.0)"
/>
117         <fricDamp value="200.0" comment="Damping
coefficient used to model the friction with speeds near zero. (
default=200.0)" />
118         <statDynFricScale value="1.0" comment="
Ratio between static and dynamic friction (mu_static/mu_dynamic)
. (default=1.0)" />
119         <dtIC value="1.0" comment="Period to
analyze convergence of dynamic relaxation for initial conditions
. (default=1.0)" units_comment="s" />
120         <cdScaleIC value="5.0" comment="Factor to
scale drag coefficients during dynamic relaxation for initial
conditions. (default=5)" />
121         <threshIC value="0.01" comment="Convergence
threshold for for initial conditions. (default=0.001)" />
122         <tmaxIC value="10.0" comment="Maximum time

```

```

for initial conditions without convergence.(default=0)"
units_comment="s" />
123         </solverOptions>
124         <bodies>
125             <body ref="1" comment="Fluid driven object
to attach mooring lines." />
126         </bodies>
127         <lines>
128             <linedefault>
129                 <ea value="7.42e5" comment="Line
stiffness, product of elasticity modulus and cross-sectional
area." units_comment="N" />
130                 <diameter value="0.002213" comment="
Volume-equivalent diameter of the line." units_comment="m" />
131                 <massDenInAir value="0.0305" comment="
Mass per unit length of the line." units_comment="kg/m" />
132                 <ba value="-0.8" comment="Line internal
damping (BA/-zeta). (default=-0.8)" units_comment="Ns" />
133                 <can value="1.0" comment="Transverse
added mass coefficient (with respect to line displacement). (
default=1.0)" />
134                 <cat value="0.0" comment="Tangential
added mass coefficient (with respect to line displacement). (
default=0.0)" />
135                 <cdn value="1.6" comment="Transverse
drag coefficient (with respect to frontal area, d*1). (default
=1.6)" />
136                 <cdt value="0.05" comment="Tangential
drag coefficient (with respect to surface area,      *d*1). (
default=0.05)" />

```

```

137         <breaktension value="0.0" comment="
Maximum value of tension for the lines. value=0 Break Tension is
not used. (default=0)" units_comment="N" />
138         <outputFlags value="pvc" comment="Node
output properties.(default=-) [-:None|p:Positions|v:Velocities|
U:Wave Velocities|t:Tension|D:Hydrodynamic Drag Force|c=Internal
Damping|s:Strain of each segment|d: rate of strain of each
segment]" />
139     </linedefault>
140     <line>
141         <vesselconnection bodyref="1" x="2.3" y
="0.2" z="0.18" />
142         <fixconnection x="2.7" y="0.2" z="0.0"
/>
143         <length value="0.6" comment="(m)" />
144         <segments value="50" />
145     </line>
146     <line>
147         <vesselconnection bodyref="1" x="2" y="
0.028" z="0.18" />
148         <fixconnection x="1.6" y="0.025" z="0.0
" />
149         <length value="0.6" comment="(m)" />
150         <segments value="50" />
151     </line>
152     <line>
153         <vesselconnection bodyref="1" x="2" y="
0.372" z="0.18" />
154         <fixconnection x="1.6" y="0.375" z="0.0
" />

```

```

155         <length value="0.6" comment="(m)" />
156         <segments value="50" />
157     </line>
158 </lines>
159     <savedata comment="Saves CSV with the
connection properties">
160         <tension value="true" comment="Store
tensions.(default: value=false)" />
161         <force value="true" comment="Store forces.(
default: value=false)" />
162         <velocity value="true" comment="Store
velocities.(default: value=false)" />
163         <position value="true" comment="Store
positions.(default: value=false)" />
164     </savedata>
165 </moordyn>
166 </moorings>
167 </special>
168 <parameters>
169     <parameter key="SavePosDouble" value="0" comment="Saves
particle position using double precision (default=0)" />
170     <parameter key="Boundary" value="1" comment="Boundary
method 1:DBC, 2:mDBC (default=1)" />
171     <parameter key="StepAlgorithm" value="2" comment="Step
Algorithm 1:Verlet, 2:Symplectic (default=1)" />
172     <parameter key="VerletSteps" value="40" comment="Verlet
only: Number of steps to apply Euler timestepping (default=40)"
/>
173     <parameter key="Kernel" value="2" comment="Interaction
Kernel 1:Cubic Spline, 2:Wendland (default=2)" />

```

```

174         <parameter key="ViscoTreatment" value="1" comment="
Viscosity formulation 1:Artificial, 2:Laminar+SPS (default=1)" /
>
175         <parameter key="Visco" value="0.01" comment="Viscosity
value" />
176         <parameter key="ViscoBoundFactor" value="0" comment="
Multiply viscosity value with boundary (default=1)" />
177         <parameter key="DensityDT" value="2" comment="Density
Diffusion Term 0:None, 1:Molteni, 2:Fourtakas, 3:Fourtakas(full)
(default=0)" />
178         <parameter key="DensityDTvalue" value="0.1" comment="
DDT value (default=0.1)" />
179         <parameter key="Shifting" value="0" comment="Shifting
mode 0:None, 1:Ignore bound, 2:Ignore fixed, 3:Full (default=0)"
/>
180         <parameter key="ShiftCoef" value="-2.0" comment="
Coefficient for shifting computation (default=-2)" />
181         <parameter key="ShiftTFS" value="0.0" comment="
Threshold to detect free surface. Typically 1.5 for 2D and 2.75
for 3D (default=0)" />
182         <parameter key="RigidAlgorithm" value="1" comment="
Rigid Algorithm 1:SPH, 2:DEM, 3:CHRONO (default=1)" />
183         <parameter key="FtPause" value="0.0" comment="Time to
freeze the floatings at simulation start (warmup) (default=0)"
units_comment="seconds" />
184         <parameter key="CoefDtMin" value="0.05" comment="
Coefficient to calculate minimum time step dtmin=coefdtmin*h/
speedsound (default=0.05)" />
185         <parameter key="#DtIni" value="0.0001" comment="Initial
time step (default=h/speedsound)" units_comment="seconds" />

```

```

186         <parameter key="#DtMin" value="1e-05" comment="Minimum
time step (default=coefdtmin*h/speedsound)" units_comment="
seconds" />
187         <parameter key="DtAllParticles" value="0" comment="
Velocity of particles used to calculate DT. 1:All, 0:Only fluid/
floating (default=0)" />
188         <parameter key="TimeMax" value="21.0" comment="Time of
simulation" units_comment="seconds" />
189         <parameter key="TimeOut" value="0.05" comment="Time out
data" units_comment="seconds" />
190         <parameter key="PartsOutMax" value="1.0" comment="%/100
of fluid particles allowed to be excluded from domain (default
=1)" units_comment="decimal" />
191         <parameter key="RhopOutMin" value="700" comment="
Minimum rhop valid (default=700)" units_comment="kg/m^3" />
192         <parameter key="RhopOutMax" value="1300" comment="
Maximum rhop valid (default=1300)" units_comment="kg/m^3" />
193         <simulationdomain comment="Defines domain of simulation
(default=Uses minimum and maximum position of the generated
particles)">
194             <posmin x="default" y="default" z="default" comment
="e.g.: x=0.5, y=default-1, z=default-10%" />
195             <posmax x="default" y="default" z="default" />
196         </simulationdomain>
197     </parameters>
198     <particles np="10804118" nb="2010969" nbf="1912456"
mkboundfirst="10" mkfluidfirst="1">
199         <_summary>
200             <positions units_comment="metres (m)">
201                 <posmin x="0" y="0" z="0" />

```

```

202         <posmax x="6.5" y="0.4" z="1.996" />
203     </positions>
204     <fixed count="1912456" id="0-1912456" mkcount="2"
mkvalues="13-14" />
205     <moving count="75888" id="1912456-1988343" mkcount=
"1" mkvalues="12" />
206     <floating count="22625" id="1988344-2010968"
mkcount="1" mkvalues="11" />
207     <fluid count="8793149" id="2010969-10804117"
mkcount="1" mkvalues="1" />
208     </_summary>
209     <fixed mkbound="3" mk="13" begin="0" count="1836127" />
210     <fixed mkbound="4" mk="14" begin="1836127" count="76329
" />
211     <moving mkbound="2" mk="12" begin="1912456" count="
75888" refmotion="0" />
212     <floating mkbound="1" mk="11" begin="1988344" count="
22625">
213     <massbody value="2.166" units_comment="kg" />
214     <masspart value="6.4e-05" units_comment="kg" />
215     <center x="2.1" y="0.2" z="0.226" units_comment="
metres (m)" />
216     <inertia x="0.0386" y="0.0386" z="0.0331"
units_comment="kg*m^2" />
217     <rotationDOF x="0" y="1" z="0" comment="Use 0 to
restrict Degrees Of Freedom for rotation (default=(1,1,1))" />
218     </floating>
219     <fluid mkfluid="0" mk="1" begin="2010969" count="
8793149" />
220     </particles>

```

```

221     <constants>
222         <data2d value="false" />
223         <gravity x="0" y="0" z="-9.81" units_comment="m/s^2" />
224         <cflnumber value="0.4" />
225         <gamma value="7" />
226         <rho0 value="1000" units_comment="kg/m^3" />
227         <dp value="0.004" units_comment="metres (m)" />
228         <h value="0.0086602540378" units_comment="metres(m)" />
229         <b value="274062.85714" units_comment="Pascal (Pa)" />
230         <massbound value="0.000064" units_comment="kg" />
231         <massfluid value="0.000064" units_comment="kg" />
232     </constants>
233     <uservars>
234         <varnum name="MResId" value="0" />
235     </uservars>
236     <motion>
237         <objreal ref="0">
238             <begin mov="1" start="0" />
239             <mvnull id="1" />
240         </objreal>
241     </motion>
242     <vtkout mkboundfirst="10" mkfluidfirst="1">
243         <vtkfile name="FOWT_05__Dp.vtk" mk="11-14" mkbound="1-4
244 " />
245         <vtkfile name="FOWT_05__Actual.vtk" mk="11-14" mkbound=
246 "1-4" />
247     </vtkout>
248 </execution>
249 </case>

```

Listing 1: Exemplo XML