

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

INVESTIGAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE MODELO DE ESTRUTURA DE
CULTIVO DE OSTRAS

por

Paulo Fiuza Lamarão

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Mecânica

Porto Alegre, Setembro de 2020

INVESTIGAÇÃO DA RESPOSTA DINÂMICA DE MODELO DE ESTRUTURA DE
CULTIVO DE OSTRAS

por

Paulo Fiuza Lamarão

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Walter Jesus Paucar Casas

Coorientador: Prof. Dr. Waldir Terra Pinto

Aprovada por:

Prof. Dr^a. Letícia Fleck Fadel Miguel

PROMECC/ UFRGS

Prof. Dr. Paulo Cesar Oliveira Vergne de Abreu

IO/FURG

Prof. Dr. Juan Manuel Vidal Pérez

Departamento de Ciencias y Técnicas de la Navegación y de la Construcción
Naval /UCA - Espanha

Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, Setembro de 2020

AGRADECIMENTOS

À família e amigos, os quais sem eles nada seria possível. Eles que são meus alicerces, que me sustentam e me dão forças em todos os momentos da vida, independentemente da distância física em que se encontram, carregue-os sempre juntos em meu coração.

Aos bolsistas de iniciação científica os quais tive o prazer de conviver, aprender e orientar, durante esse período. Vocês foram fundamentais não só para meu crescimento como profissional, como também como pessoa.

A todos os integrantes do grupo de pesquisa do programa PRONEX (Programa de Apoio aos Núcleos de Excelência), professores, técnicos e bolsistas que integram seus conhecimentos na evolução de um mundo melhor, alinhados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), da ONU. Em especial ao meu orientador e coorientador, pela confiança e a liberdade no desenvolvimento da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pelo suporte financeiro para a elaboração deste trabalho.

RESUMO

A aquicultura vem sendo desenvolvida há muitos anos, entretanto, a engenharia por trás das estruturas de cultivo de ostras é quase inexistente no Brasil. Ademais, o aumento do consumo de ostras na alimentação, somado a uma competição por espaços em baías e áreas protegidas próximas à costa (*nearshore*), com atividades de outros setores, estimula o progresso da ostreicultura em mar aberto (*offshore*). Mantendo como foco o crescimento da espécie, a engenharia deve trabalhar de forma harmoniosa com outras áreas de conhecimento, como a oceanografia e a biologia. Essa interdisciplinaridade é necessária, posto que a hidrodinâmica das estruturas é capaz de afetar a distribuição de alimentos e a capacidade de filtração destes organismos. Em resposta a esses estímulos, a pesquisa investiga a resposta dinâmica de modelo de estrutura de cultivo de ostras sob excitação de ondas. No modelo numérico da estrutura de cultivo, desenvolvido no *software* ANSYS AQWA®, foram utilizados dados de ondas do município de Rio Grande - RS, assim como as características do cultivo da espécie *Crassostrea gigas*. Inicialmente, um modelo pendular elástico com uma massa esférica submersa é simulado e ensaiado em um tanque de ondas, a fim de validar o procedimento empregado e extrapolar a metodologia para uma linha de cultivo. Para a etapa de validação, foram variados os parâmetros de rigidez, profundidade e onda incidente. A solução numérica foi modelada como um sistema massa-mola-amortecedor sob excitação das forças hidrodinâmicas de Morison e Froude-Krylov, com o uso do método dos painéis, passando pelas etapas de convergência de refino de malha e a validação do passo de integração. As soluções foram comparadas no domínio do tempo e da frequência, indicando a confiabilidade da modelagem. Dessa forma, o mesmo procedimento foi empregado ao modelo pendular com mais esferas conectadas por cabos lineares. Após resultados preliminares de grande movimentação horizontal na investigação da resposta dinâmica, duas configurações de pêndulos foram ensaiadas. Os resultados demonstraram que todas as massas do pêndulo apresentaram as mesmas frequências de oscilação, diferenciando-se apenas com relação à amplitude. Além disso, indicaram a ocorrência do fenômeno de batimento. Para mais, a velocidade relativa foi quantificada, e aponta o provável fechamento das conchas em parte do tempo, diminuindo a velocidade de crescimento da ostra. Por fim, com o aumento no comprimento do cabo de sustentação da linha de cultivo uma atenuação de aproximadamente 60% no movimento horizontal foi alcançada. Sendo assim, o procedimento utilizado para a validação do modelo,

mostrou-se uma ferramenta eficiente. Já com relação à estabilidade da estrutura, foi observada a característica de baixas frequências naturais do sistema, aproximando-se da excitação das ondas. Em suma, o estudo demonstrou a complexidade e a interdisciplinaridade do tema, não apenas pelos fenômenos envolvidos, mas também pela dificuldade de separar as influências de cada um dos parâmetros do problema.

Palavras-chave: Dinâmica de estruturas; Cultivo de ostras; Ondas; Modelagem numérica; Modelagem experimental.

ABSTRACT

Aquaculture has been developing for many years, however, the engineering behind oyster farming structures is almost non-existent in Brazil. In addition, the increase in consumption of oysters in the food, added to a competition for spaces in bays and protected areas nearshore, with activities from other sectors, stimulates the progress of oyster farming offshore. Aiming at the growth of the species, engineering must work harmoniously with other areas of knowledge, such as oceanography and biology. This is due to the fact that the hydrodynamics of the structures are capable of affecting the distribution of food and the filtering capacity of these organisms. In response to these stimuli, the study investigates the dynamic response of oyster culture structure models under wave excitation. In the numerical model of the cultivation structure, developed in the ANSYS AQWA® software, wave data from the municipality of Rio Grande - RS were used, as well as the characteristics of the cultivation of the *Crassostrea gigas* species. Initially, an elastic pendulum model with a submerged spherical mass is simulated and tested in a wave tank, in order to validate the procedure used and extrapolate the methodology to a culture line. For the validation, the parameters of stiffness, depth and incident wave were varied. The numerical solution was modelled as a mass-spring-damper system under excitation of the hydrodynamic forces of Morison and Froude-Krylov, using the panel method, going through the mesh refining convergence steps and the validation of the integration stage. The solutions were compared in the domain of time and frequency, indicating the reliability of the modelling. Thus, the same procedure was used for the pendulum model with more spheres connected by linear cables. After preliminary results of great horizontal movement in the investigation of the dynamic response, two pendulum configurations were tested. The results demonstrated that all the pendulum masses presented the same oscillation frequencies, differing only in relation to the amplitude. In addition, they indicated the occurrence of beat phenomenon. Furthermore, the relative speed was quantified, and points to the probable closure of the shells in part of the time, slowing the growth rate of the oyster. Finally, with the increase in the length of the cable supporting the cultivation line, an attenuation of approximately 60% in the horizontal movement was achieved. Therefore, the procedure used to validate the model proved an efficient tool. Regarding the stability of the structure, the low natural frequency characteristic of the system was observed, approaching the excitation of the waves. In summary, the study has

demonstrated the complexity and interdisciplinarity of the theme, not only due to the phenomena involved, but also due to the difficulty of separating the influences of each of the parameters of the problem.

Keywords: Structural dynamics; Oyster culture; Waves; Numerical modeling; Experimental modeling.

RESUMEN

La acuicultura se está desarrollando desde hace muchos años, sin embargo, la ingeniería por detrás de las estructuras de cultivo de ostras es casi inexistente en Brasil. Además, el incremento en el consumo de ostras para alimentación, asociado a la competencia por espacios en bahías y áreas protegidas cercanas a la costa, con actividades de otros sectores, estimula el avance del cultivo de ostras en mar abierto. Manteniendo el crecimiento de la especie como foco, la ingeniería debe trabajar en armonía con otras áreas del conocimiento, como la oceanografía y la biología. Esa mirada interdisciplinaria se hace necesaria, puesto que la hidrodinámica de las estructuras es capaz de afectar la distribución de alimentos y la capacidad de filtración de dichos organismos. En respuesta a esos estímulos, este estudio investiga la respuesta dinámica de modelos de estructura de cultivo de ostras bajo excitación de ondas. En el modelo numérico de la estructura de cultivo, desarrollado en el *software* ANSYS AQWA®, se utilizaron datos de oleaje del municipio de Rio Grande - RS, así como las características del cultivo de la especie *Crassostrea gigas*. Inicialmente, se simula y se prueba un modelo de péndulo elástico con un cuerpo esférico sumergido en un tanque de olas, con el propósito de validar el procedimiento utilizado y de extrapolar la metodología a una línea de cultivo. Para la etapa de validación se variaron los parámetros de rigidez, profundidad y oleaje incidente. La solución numérica se modeló como un sistema masa-resorte-amortiguador bajo excitación de las fuerzas hidrodinámicas de Morison y Froude-Krylov, utilizando el método de los paneles, pasando por los pasos de convergencia de refinamiento de malla y la validación del paso de integración. Las soluciones se compararon en el dominio del tiempo y de la frecuencia, lo que indica la confiabilidad del modelado. Así, se utilizó el mismo procedimiento para el modelo de péndulo con más esferas conectadas por cables lineales. Después de los resultados preliminares de un gran movimiento horizontal en la investigación de la respuesta dinámica, se probaron dos configuraciones de péndulo. Los resultados mostraron que todas las masas del péndulo han presentado las mismas frecuencias de oscilación, difiriendo solo en relación a la amplitud. Además, indicaron la ocurrencia del fenómeno de batimiento. Además, se cuantificó la velocidad relativa, lo que apunta al probable cierre de las conchas en parte del tiempo, desacelerando la velocidad de crecimiento de la ostra. Finalmente, con el aumento de la longitud del cable de soporte de la línea de cultivo, se logró una atenuación de aproximadamente un 60% en el movimiento horizontal. Por lo tanto, el procedimiento utilizado para validar el modelo

se ha mostrado una herramienta eficaz. En cuanto a la estabilidad de la estructura, se observó la característica de bajas frecuencias naturales del sistema, acercándose a la excitación de las ondas. En definitiva, el estudio demostró la complejidad e interdisciplinariedad del tema, no solo por los fenómenos involucrados, sino también por la dificultad de separar las influencias de cada uno de los parámetros del problema.

Palabras llave: Dinámica estructural; Cultivo de ostras; Olas; Modelado numérico; Experimentación.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos	5
1.2. Organização do Trabalho	5
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1. O Cultivo de Ostras	8
2.2. Ondas Oceânicas	13
2.3. Hidrodinâmica de Estruturas <i>Offshore</i>	20
2.3.1. Forças Hidrodinâmicas	20
2.3.2. Equação do Movimento	25
3. MODELAGEM EXPERIMENTAL DA ESTRUTURA PENDULAR.....	28
3.1. Condições Dimensionais Preliminares	29
3.2. Determinação da Altura de Onda	34
3.3. Construção do Modelo	37
3.4. Execução do Ensaio	38
3.5. Processamento dos Dados	39
4. MODELAGEM NUMÉRICA DA ESTRUTURA PENDULAR.....	44
4.1. O <i>Software</i>	44
4.2. Construção do Modelo	49
4.2.1. Equacionamento	50
4.2.2. Definição das Constantes	54
4.3. Convergência de Refino de Malha	55
4.4. Definição do <i>Time Step</i>	57
4.5. Execução das Simulações	58
5. VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO	59
5.1. Avaliação no Domínio do Tempo	60
5.2. Avaliação no Domínio da Frequência	63
5.3. Avaliação em Escala Logarítmica no Domínio da Frequência	68
5.4. Considerações da Comparação	71

6. MODELAGEM NUMÉRICA DA ESTRUTURA DE CULTIVO	75
7. RESULTADOS E DISCUSSÃO	82
7.1. Resultados da Estrutura Alternativa.....	83
7.2. Resultados da Linha de Cultivo	87
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
8.1. Trabalho Futuros	99
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101
APÊNDICE A	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Exemplo de classificação das espécies de (a) ostra (b) mexilhão (c) vieira [WoRMS, 2020].	8
Figura 2.2	Variação da temperatura e da salinidade durante o período de 20/02/2019 a 31/08/2020 [SiMCosta, 2020].	10
Figura 2.3	Exemplos de estruturas de ostras encontradas na literatura. (a) Estrutura fixa de cultivo em corda [Adaptado de Gangnery <i>et al.</i> , 2003] (b) Estrutura fixa de mesa com travesseiros [Adaptado de Silva e Silva, 2007] (c) Estrutura suspensa de <i>long-lines</i> com lanternas [Adaptado de Neto, 2010] (d) Estrutura suspensa <i>raft</i> com lanternas [Adaptado de Junior <i>et al.</i> , 2012] (e) estrutura suspensa <i>raft</i> com cultivo em corda [Adaptado de Huang e Lee <i>et al.</i> , 2014] e (f) estrutura suspensa <i>raft</i> com cultivo em corda [Adaptado de Aslan <i>et al.</i> , 2015].	11
Figura 2.4	Sistemas que oferecem proteção física contra predadores. (a) Lanterna e (b) Travesseiros, em manutenção [Silva e Silva (2007)].	12
Figura 2.5	Representação da área de geração de ondas por vento [Pecher e Kofoed ,2017].	13
Figura 2.6	Variáveis de uma onda progressiva [Adaptado de Sorensen, 2006].	15
Figura 2.7	(a) Gradiente de velocidade em relação à fase da onda. (b) Trajetória da partícula teórica da onda, com indicação do ponto médio $P(xI, zI)$ [Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991].	16
Figura 2.8	Variação do formato da trajetória da partícula com a variação da profundidade relativa e conseqüentemente o regime de água [Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991].	17
Figura 2.9	Representação do perfil de elevação das teorias de ondas com os limites de parâmetros de Ursell [Adaptado de Teixeira, 2017].	18
Figura 2.10	Diagrama de aplicação das forças de ondas para um cilindro vertical [Chakrabarti, 1987].	22
Figura 2.11	Variação do coeficiente de inércia com o KC , para diferentes velocidades do escoamento ($Re\beta$) [Adaptado de Patel, 1989].	23
Figura 2.12	Variação do coeficiente de arrasto com o KC , para diferentes velocidades do escoamento ($Re\beta$) [Adaptado de Patel, 1989].	23

Figura 2.13	Exemplo de estrutura com vários graus de liberdade (a) Estrutura de um prédio de 3 andares. (b) Modelo massa mola da estrutura [Rao, 2011]....	26
Figura 3.1	Configuração de montagem do ensaio.	28
Figura 3.2	<i>Wave probe</i> (WP) instalado no canal para medição de elevação da superfície da onda.	29
Figura 3.3	Processo de diminuição de sobressaltos e rugosidades da esfera.....	31
Figura 3.4	Esquema experimental para verificação da rigidez das molas.....	32
Figura 3.3.5	Imagem da realização do ensaio de determinação da força elástica.	32
Figura 3.6	Força x deformação com reta ajustada e correlação para mola de 187,17 N/m.....	33
Figura 3.7	Força x deformação com reta ajustada e correlação para a mola de 360,72 N/m.....	33
Figura 3.8	<i>Wave probe</i> com marcações de elevação indicadas em círculos vermelhos.	35
Figura 3.9	Recorte do sinal de elevação de onda para frequência de 1,25 Hz, com os ajustes de cosseno por Fourier e também pelas diferenças das médias das cavas e das cristas.....	36
Figura 3.10	Ampliação do recorte da onda de 1,25 Hz, com curvas de ajustes.	37
Figura 3.11	Imagem da fixação da célula de carga e união do cabo de aço com a mola do experimento.	38
Figura 3.12	Mapa mental da organização dos ensaios.	39
Figura 3.13	Representação do processo de janelamento, no domínio da frequência [Ingle e Proakis, 2010]......	41
Figura 3.14	Representação esquemática do processo da Transformada de Fourier [Amuchastegui, 2016].	42
Figura 4.1	Configuração do ANSYS Workbench. Com os <i>solver</i> (<i>Toolbox</i>) <i>Hydrodynamic Diffraction</i> , <i>Hydrodynamic Response</i> , <i>Static Structural</i> e o bloco de variações paramétricas <i>Parameter Set</i>	45
Figura 4.2	Representação do sistema de referência global com letras maiúsculas (esquerda) e local, no centro de gravidade, com letras minúsculas (direita) [ANSYS, 2017b].	46
Figura 4.3	Representação dos painéis, com o sistema de referência local para uma embarcação [Retirado de ANSYS 2017a]......	48

Figura 4.4	Modelo reproduzido no AQWA com esfera a uma profundidade relativa de 20%.....	49
Figura 4.5	Representação da massa com o referencial adotado na determinação das energias.....	52
Figura 4.6	Montagem com a superfície da esfera após cada etapa de refinamento....	55
Figura 4.7	Convergência de malha, na qual o refino desejado foi alcançado com a quantidade de 1120 elementos.	56
Figura 4.8	Aba de construção de malha no AQWA, com parâmetros configurados para 1120 elementos.....	56
Figura 4.9	Posição da esfera em relação à coordenada “z” para diferentes <i>time step</i> .	57
Figura 5.1	Ampliação da resposta do pêndulo de rigidez igual a 100000 N/m, excitado por onda 1 (0,75 Hz) para as distintas profundidades.	61
Figura 5.2	Ampliação das respostas da força nos modelos numérico e experimental para o caso de rigidez 2, onda 3 e uma profundidade de 40%.	62
Figura 5.3	Comparação da resposta no tempo para o caso de cabo com rigidez de 187.17 N/m, sob efeito de onda de 100 Hz e com esfera posicionada a 30% da profundidade do canal.	62
Figura 5.4	Ampliação da resposta do cabo de rigidez 187.17, excitado por onda de 0,75 Hz em uma profundidade de 30%.	63
Figura 5.5	Espectro de frequência para os parâmetros de rigidez igual a 360,72 /m, com excitação de onda de 0,75 Hz.....	65
Figura 5.6	Ampliação do espectro de frequência para os parâmetros de rigidez igual a 360,72 N/m, com excitação de onda de 0,75 Hz a uma profundidade de 20%.	66
Figura 5.7	Espectro de frequência para onda de 1,5 Hz, rigidez de 100.000 N/m em uma profundidade de 40%.....	66
Figura 5.8	Espectro de frequência dos parâmetros de onda igual a 1,5 Hz, cabo com rigidez de 187,17 N/m e com esfera posicionada em de 20% da profundidade.....	67
Figura 5.9	Espectro de frequência do cenário de onda de 1,5 Hz, rigidez de 360,72 N/m e corpo em uma profundidade de 30%.....	67
Figura 5.10	Espectro de frequência em escala logarítmica para o cenário com rigidez igual a 100.000 N/m, onda de 1,5 Hz e profundidades de 40% e 30%.....	69

Figura 5.11	Expansão da Figura 5.10, com visualização da região de transição do filtro utilizado e indicação da atenuação.	70
Figura 5.12	Espectro em frequência em escala logarítmica, para a situação de onda 2, rigidez 2 e profundidade de 20%.....	70
Figura 5.13	Espectro em frequência em escala logarítmica, para a situação de onda de 1,25 Hz, cabo de 187,17 N/m em uma profundidade de 20%.....	71
Figura 5.14	Espectro em frequência em escala logarítmica para a situação de onda de 0,75 Hz, cabo de 187,17 N/m em uma profundidade de 30%.....	71
Figura 5.15	Perfil de elevação e espectro de frequência da onda de 1,5 Hz, com rigidez 1, em uma profundidade de 20%.....	73
Figura 6.1	Mapa da área de estudo utilizada como exemplo de aproximação às condições reais, com identificação do posicionamento da boia meteorológica RS-4.	75
Figura 6.2	(a) Curva normal com área de distribuição de probabilidade de 68,2% dos dados, entre os limites de período de 4,05 s e 6,29 s. (b) Curva normal com área de distribuição de probabilidade de 67,8% dos dados, entre os limites de altura de 0,44 m e 1,01 m.	76
Figura 6.3	Representação do critério utilizado como base para a escolha da dimensão da esfera do cultivo.	77
Figura 6.4	Representação do modelo da estrutura de cultivo.....	78
Figura 6.5	Convergência do refino de malha para as esferas da linha de cultivo.....	79
Figura 6.6	Posição horizontal e vertical das esferas superior e inferior e tração no cabo de sustentação da linha, para os passos de 0,008 s e 0,005 s (a), 0,005 s e 0,002 s (b) e 0,002 s e 0,0009 s (c).....	80
Figura 7.1	Posições horizontais (1° teste) para os períodos de 4,05 s e 5,17 s.....	82
Figura 7.2	Posição x e z para todas as massas do caso modificado. Estímulo de onda de 4,05 s e 1,01 m.	83
Figura 7.3	Ampliação do espectro de frequências da posição x e z para todas as massas do caso modificado. Estímulo de onda de 4,05 s e 1,01 m.	84
Figura 7.4	Posição x da oitava esfera, com onda de 6,29 s e alturas de 1,01 m, 0,72 m e 0,44 m.	84
Figura 7.5	Comparação da resposta temporal das esferas 1 e 8 para a onda 6,29 s e altura de 1,01 m.	85

Figura 7.6	Comparação da posição horizontal da esfera 8, sob estímulo de onda de 4,05 s, 5,17 s e 6,29 s e altura de 1,01 m.....	86
Figura 7.7	Esquema de refino dos períodos de ondas.	86
Figura 7.8	Máxima amplitude da resposta horizontal da esfera 8, para diferentes frequências de excitação, de ondas de Airy.	87
Figura 7.9	Máxima amplitude da resposta horizontal da esfera 7, para diferentes frequências de excitação.....	88
Figura 7.10	Ampliação da posição x e z das sete esferas, sob onda de 6,29 s, com altura de 1,01 m.	88
Figura 7.11	Espectros de frequência da posição horizontal da sétima esfera, para a excitação de 0,1934 Hz, 0,1745 Hz, 0,1664 Hz, 0,159 Hz, 0,1522 Hz e 0,1460 Hz.	89
Figura 7.12	Tração para o cabo de sustentação da linha de cultivo (cabo 1) e cabo entre as esferas 6 e 7 (cabo 7). Onda de período de 5,17 s e altura 1,01 m.	90
Figura 7.13	Gradiente de amplitude de velocidade e posição da partícula teórica da onda de 5,17 s e altura de 1,01 m.....	91
Figura 7.14	Posição horizontal das esferas 1 e 7 e das partículas de água para a respectiva profundidade.....	91
Figura 7.15	Ampliação da comparação de fase entre o estímulo e a resposta da esfera 7, sob onda de 5,17 s e 1,01 m.	92
Figura 7.16	Velocidades da esfera, do corpo e relativa para a excitação da onda de 5,17 s e altura 1,01 m.	93
Figura 7.17	Posição horizontal da sétima esfera para diferentes comprimentos do cabo de sustentação.....	95
Figura 7.18	Espectro de frequência da coordenada “ x ” da sétima esfera para diferentes comprimentos do cabo de sustentação.	95
Figura 7.19	Variação das frequências naturais estimadas (círculos vermelhos) por comprimento do cabo de sustentação da estrutura.	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 5.1	Correspondência da nota média com a qualidade dos resultados de forma geral.....	59
Quadro 5.2	Padrões de análise dos resultados do domínio do tempo.	61
Quadro 5.3	Padrões de análise dos resultados do espectro em frequência	65
Quadro 5.4	Padrões de análise dos resultados do espectro em frequência em escala logarítmica.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Coeficientes C_H e C_V para diferentes geometrias [Adaptado de Chakrabarti, 1987].....	25
Tabela 3.1	Dados de geração de onda experimental.	30
Tabela 3.2	Variações dos parâmetros de experimentação.	34
Tabela 3.3	Valores de referência em mm para cada marcação do WP.	35
Tabela 3.4	Período, frequência e amplitude das ondas em contato com a esfera.	37
Tabela 4.1	Propriedades do pêndulo, utilizadas na modelagem numérica.	54
Tabela 5.1	Avaliação comparativa entre os resultados do experimento e da simulação.	72
Tabela 6.1	Dados das linhas de cultivo.	81
Tabela 7.1	Valor médio das velocidades relativas absolutas em cada esfera.	94

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>CAD</i>	<i>Computer-Aided Design</i>
<i>Cbs</i>	Cabo de sustentação da linha de cultivo
<i>CFD</i>	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
<i>DAQ</i>	Dispositivo de Aquisição
<i>FFT</i>	<i>Fast Fourier Transform</i>
<i>FIR</i>	<i>Finite Impulse Response</i>
<i>FURG</i>	Universidade Federal do Rio Grande
<i>HyD</i>	<i>Hydrodynamic Diffraction</i>
<i>HyR</i>	<i>Hydrodynamic Response</i>
<i>LIFE</i>	Laboratório de Interação Fluido-Estrutura
<i>LSA</i>	<i>Local Systems Axes</i>
<i>MP</i>	Método dos painéis.
<i>PA</i>	Ponto Absorvedor
<i>PIV</i>	<i>Particle Image Velocimetry</i>
<i>UFRGS</i>	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
<i>UFSC</i>	Universidade Federal de Santa Catarina
<i>UNIVALI</i>	Universidade do Vale do Itajaí
<i>WP</i>	<i>Wave Probe</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

η	Elevação da superfície da onda de gravidade, m
\emptyset	Potencial de velocidade do fluido
k	Número de onda, m^{-1}
σ	Frequência angular da onda, s^{-1}
T	Período de oscilação da onda, s
L	Comprimento da onda, m
h	Profundidade local durante a passagem de onda, m
u	Componente horizontal da velocidade da partícula teórica, m/s
w	Componente vertical da velocidade da partícula teórica, m/s
V_r	Velocidade relativa entre o fluido e o corpo submerso, m/s
C	Velocidade de propagação de uma onda, também chamada celeridade, m/s
ζ	Deslocamento horizontal da trajetória da partícula teórica da onda, m
ξ	Deslocamento vertical da trajetória da partícula teórica da onda, m
P	Pressão em um ponto submerso na água, durante a passagem de onda, somatório pressão dinâmica e hidrostática, Pa
ρ	Massa específica, kg/m^3
g	Aceleração gravitacional, m/s^2
K_p	Fator de resposta de pressão
KC	Número de Keulegan-Carpenter
U_r	Número de Ursell
Ry	Números de Reynolds
β	Razão adimensional que relaciona o número de Reynolds e o número de KC
F_m	Força de Morison, N
F_{kv}	Força de Froude-Krylov, N
C_M	Coefficientes de inércia
C_D	Coefficiente de arrasto
C_A	Coefficiente de massa adicional
C_H	Coefficiente horizontal de Froude-Krylov
C_V	Coefficiente vertical de Froude-Krylov
D	Diâmetro característico da estrutura, m

m	Massa do corpo, kg
t	Tempo, s
r	Vetor posição de uma coordenada, m
M	Matriz de massa, podendo ser o somatório de massa estrutural com massa adicional
K	Matriz de rigidez
C	Matriz de amortecimento
k	Rigidez da mola ou do cabo, N/m
Δx	Deslocamento realizado em uma mola, m
I_{xx}, I_{yy} e I_{zz}	Momentos de inércia de massa, kg/m ²
l_0	Comprimento indeformado do cabo, m
l_f	Comprimento final do cabo, m
Δ_{est}	Descolamento estático do cabo, m
$\ddot{\theta}$	Aceleração angular, rad/s ²
L_{ag}	Lagrangiano, J
E_c	Energia cinética, J
E_p	Energias potenciais, J
M	Ordem do filtro digital
ω_c	Frequência de corte do processo de filtragem, rad/s
ΔS	Área da superfície de um painel da malha, m
α	Constante multiplicativa da linearização do arrasto de Morison
R	Raio da esfera, m
V	Volume do corpo, no caso, da esfera submersa, m ³
g_{ap}	Gravidade aparente, utilizada para no cálculo do peso aparente, m/s ²

1. INTRODUÇÃO

A produção de alimentos distribui-se em diversos setores, os quais vêm sendo desenvolvidos desde o início da civilização através de diferentes formas de cultivo e extração. Devido ao constante crescimento populacional e à diminuição das áreas aptas ao cultivo, a ciência é sempre estimulada a pesquisar formas ecologicamente mais rentáveis, eficientes e seguras para a produção de alimentos.

No que diz respeito a pescados e a frutos do mar, o seu consumo tem aumentado com o passar dos anos [FAO, 2018]. Junto a isso, um esforço para diminuir o percentual de extração destes animais é buscado [Silva e Silva, 2007], tornando tal condição argumento suficiente para que estudos sobre aquacultura venham a ser abordados de maneira interdisciplinar, integrando aspectos de áreas como engenharia, biologia, oceanografia, economia e geografia.

Mantendo-se restrito ao cultivo de moluscos, mais especificamente, de ostras, os locais de maior concentração de produção são baías ou áreas abrigadas mais próximas à costa (*near shore*). Entretanto, a taxa de ocupação desses ambientes também vem sofrendo seguidos incrementos, devido a atividades marinhas do setor de óleo e gás, comunicação e, mais recentemente, geração de energia, bem como à própria aquacultura [Holland, 1998; NOAA, 2008]. Por tudo isso, a implementação de fazendas para cultivos (*sea farming*) de ostras, mais afastadas da costa, apresenta-se como uma alternativa de solução a esse problema.

Além do aspecto de alimentação, atualmente a aquacultura também pode agregar soluções para a proteção da costa, conforme o trabalho de Zhu *et al.* (2020), no qual estruturas de cultivos são utilizadas para atenuação das ondas. Para mais, as ostras contribuem ainda como “biossequestradoras” de carbono, incorporando-o em suas conchas por longos anos [Baker *et al.*, 2015].

No Brasil, o nascimento da aquacultura data do começo do século XX. No entanto, foi apenas no início da década de 90 que esta atividade apresentou crescimento significativo, indo de 30.000 t para mais de 278.128 t em 2003 [FAO, 2004]. O estado de Santa Catarina é o grande produtor de moluscos, sendo responsável por 90% da produção do país. Nele, as ostras de maior importância econômica pertencem ao gênero *Crassostrea*, devido ao valor alimentício de sua carne e ao uso da concha como matéria prima para a fabricação de produtos industriais e medicinais [Silva e Silva, 2007].

Em 2010, Santa Catarina detinha a produção comercial de duas espécies predominantes, a ostra japonesa (*Crassostrea gigas*) e o mexilhão nativo (*Perna perna*). Contudo, o estado também apresentava outras espécies, como a ostra nativa *Crassostrea rhizophorae*, *Crassostrea braziliiana*. Por outro lado, recentemente tem-se investido na produção de vieiras *Nodipecten nodosus* [Wolf, 2007; Alburquerque, 2010].

No país, a ostreicultura é trabalhada de forma artesanal e grande parte das vezes, com limitada informação, resultando em uma baixa produção, falta de garantia de qualidade para o consumidor e sem o rendimento financeiro que a atividade pode retornar, quando se compara a produção nacional à de outros países [SEBRAE, 2015].

Diante disso, pode-se dizer que no país, a modalidade de cultura de ostras, principalmente em regiões de mar aberto, é quase inexistente, com grande potencial de desenvolvimento, e item de pouco conhecimento. No que tange à engenharia das estruturas, os esforços hidrodinâmicos causados pelas ondas e correntes são fundamentais na determinação das respostas dinâmicas destas estruturas.

Devido ao valor comercial do gênero *Crassostrea* e também aos fatores ambientais relacionados com a área de estudo escolhida como exemplo de aplicação, o município de Rio Grande – RS, neste trabalho serão abordadas características ligadas à espécie *C. Gigas* (ostra japonesa), indicada para a região sul do Brasil [Silva e Silva, 2007] e uma das mais produzidas no mundo [FAO, 2006].

O cultivo da ostra japonesa pode ser realizado em diversas estruturas, abordadas no Capítulo 2. Nesta pesquisa será modelado o cultivo em linhas, no qual as ostras são fixadas em um cabo orientado verticalmente na coluna de água. Portanto, tal estrutura será modelada como um pêndulo elástico com massas concentradas.

Além da função estrutural, a hidrodinâmica das estruturas é importante também para o crescimento das espécies. Em sua revisão sobre o tema, Campbell e Hall (2019) afirmam que até o momento pouco se conhece sobre a engenharia por trás das estruturas de cultivo, mas que, ainda assim, ela é capaz de modificar diretamente a saúde das ostras, em qualquer fase de crescimento. Para mais, apontam que a hidrodinâmica do local de instalação pode alterar indiretamente outros fatores ambientais essenciais, como o oxigênio, a temperatura, a salinidade, a turbidez e o suprimento de alimentos, visto que as ostras são organismos filtradores.

Na prática, Stevens *et al.* (2008) enumeram dois efeitos físicos importantes do cultivo de bivalves a serem estudados. O primeiro deles é o efeito do fluxo sobre a estrutura, que controla a sobrevivência estrutural e o ambiente em que a cultura deve

desenvolver-se. O segundo é o efeito da estrutura sobre o fluxo, o qual também é importante para a avaliação correta do impacto ambiental, especialmente por meio de sua influência na redistribuição de resíduos e de água pobre em nutrientes. A densidade de linhas influencia no segundo efeito [Heasman et al, 1998; Strohmeier *et al.*, 2005].

De forma complementar, Snyder *et al.* (2017) utilizam ferramentas de sensoriamento remoto aplicadas a imagens LANDSAT na escolha do local para a instalação de uma planta, identificando o gradiente de temperatura e da concentração de clorofila na superfície de uma região. Tal ferramenta também possibilita descobrir os fluxos de correntes.

Em consonância com Campbell e Hall (2019), poucos estudos são encontrados sobre resposta dinâmica das estruturas de ostras, as quais se diferem dos mexilhões pelo distanciamento entre os pontos de fixação. As ostras possuem no mínimo 10 cm de espaçamento [Aslan *et al.*, 2015], já os mexilhões são grudados. Por isso, muitas linhas de cultivos são modeladas por meio de cilindros, como no trabalho de Kubelka *et al.* (2017).

Raman-Nair *et al.* (2008) modelaram um sistema de cultivo de molusco em *long lines*, sob efeito de ondas de Stokes de segunda ordem, através de um sistema massa-mola-amortecedor. Para a solução da equação diferencial foi utilizado o método de Runge-Kutta, no MATLAB®. O sistema de produção foi de uma lanterna, então, foram modelados cilindros sob arrasto. Ao final, os autores sugeriram a realização de um experimento, com o intuito de determinar, de melhor forma, os coeficientes hidrodinâmicos usados no modelo.

Em pesquisa semelhante, a resposta do cultivo de mexilhões em *long-lines* utilizou-se de uma abordagem de massa concentrada. Nele, Pribadi *et al.* (2019) aplicaram o carregamento de Morison para ondas regulares e irregulares. A solução também foi obtida por meio de Runge-Kutta e comparada ao modelo desenvolvido no *software* ORCAFLEX®.

Além destes estudos, outras estruturas pendulares oceânicas podem ser utilizadas como referências no trabalho, como, por exemplo, o caso dos pontos absorvedores (PA), em que o princípio de corpo oscilante é empregado na geração de energia devido à ação de ondas [Campbell e Hall, 2019]. Existe grande similaridade entre ambas as estruturas, isso por que as duas são representadas por pêndulos tracionados – no caso do PA, pelo empuxo, e no caso do cultivo, pelo peso – regidos predominantemente pela força de Morison.

A grande diferença entre elas é que, para o ponto absorvedor uma maior oscilação é desejada. Já, para a linha de cultivo, quanto menos oscilação, melhor.

Sergiienko *et al.* (2017) investigaram a oscilação de um mecanismo de ponto absorvedor. Na modelagem, utilizou-se da força de Morison e também de Froude-Krylov, resolvendo a equação de movimento no domínio do tempo, por meio da função “ode23s” do Simulink/MATLAB®

No que tange ao *software* ANSYS AQWA®, alguns estudos foram desenvolvidos. Meng *et al.* (2017) utilizaram o *software* como ferramenta para a verificação de modelo numérico de ponto absorvedor esférico submerso. No trabalho, eles identificaram as condições nas quais a amplitude da resposta era incrementada, com o objetivo de otimizar a conversão de energia. Ding *et al.* (2017) também estudaram o mecanismo de conversão de energia de um ponto absorvedor e compararam os resultados de um modelo numérico com o experimental. Ao final, indicaram que, para corpos com geometrias mais complexas, os coeficientes hidrodinâmicos poderiam ser resolvidos por meio de elementos de contorno no AQWA. Da mesma forma Lamarão *et al.* (2019) utilizaram o *software* e quantificaram o potencial conversor de energia de um ponto absorvedor alternativo, sob a excitação de diferentes parâmetros de ondas regulares. Operando com o método dos painéis, metodologia utilizada pelo ANSYS AQWA®, Alves *et al.* (2002) determinaram o carregamento e a resposta de uma placa pendular de geração de energia.

Diante do exposto e da notória característica multidisciplinar do problema, o trabalho apresentado discorre sobre a investigação da resposta dinâmica de uma estrutura de cultivo de ostras, modelada por meio de um pêndulo elástico de massas esféricas concentradas, sob excitação de forças hidrodinâmicas geradas por ondas monocromáticas de Airy.

Portanto, ao longo da pesquisa, serão abordados os diversos fatores físicos envolvidos, desde a definição da teoria de onda a ser utilizada, os cuidados tomados durante a etapa de experimentação e de modelagem da estrutura de validação, até as considerações dimensionais adotadas para a extrapolação do modelo validado. Além do fator de extrapolação, visando uma aproximação do modelo à realidade, as dimensões praticadas foram definidas com base em dados do cultivo de *Crassostrea gigas*, e os resultados, avaliados no âmbito da engenharia, comparando-os com fatores biológicos de possíveis ostras a serem produzidas na área de estudo exemplificada.

1.1. Objetivos

O presente trabalho tem como propósito principal investigar a dinâmica das estruturas de cultivo de ostras, por meio de modelo pendular elástico de massas concentradas, discutindo os fenômenos envolvidos na busca de uma linha de ostreicultura estável e produtiva. Para mais, busca servir de estímulo e referência a trabalhos futuros em uma área de aplicabilidade, mas pouco explorada em face da multidisciplinariedade envolvida.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, metas específicas devem ser atingidas, as quais, se relacionam com os objetivos específicos listados a seguir:

- Identificar os fenômenos físicos envolvidos durante a realização do experimento e processamento dos dados do modelo pendular elástico, com uma massa esférica, visando a sua aplicação durante o desenvolvimento do modelo numérico.
- Obter a resposta da oscilação do modelo numérico pendular com o uso do *software* ANSYS AQWA®, de maneira a representar as condições do experimento.
- Alcançar a validação do modelo numérico desenvolvido.
- Aproximar os parâmetros do modelo numérico da estrutura de cultivo de condições reais,
- Avaliar a estabilidade da estrutura e relacionar os resultados a fatores de crescimento da espécie.

1.2. Organização do Trabalho

O trabalho apresenta-se dividido em 8 capítulos, os quais foram separados de acordo com o desenvolvimento da pesquisa.

No primeiro capítulo, parte inicial do trabalho, é realizada a contextualização da dissertação, indicando a importância de se abordar aspectos de engenharia junto ao cultivo de ostras, como suporte para o desenvolvimento desta atividade no país. A seguir, é apresentada uma pesquisa bibliográfica de como o assunto é tratado em outros estudos prévios. Finalmente, são expostos os objetivos do trabalho e a sua divisão.

No segundo capítulo, é feita uma fundamentação teórica, explanando os três principais conteúdos envolvidos na pesquisa. O cultivo de ostras discorre sobre as propriedades físicas, químicas e biológicas do crescimento do animal e os tipos de estruturas utilizadas na produção. Na parte de ondas oceânicas, são abordadas as teorias de ondas regulares de Airy e Stokes de 2º ordem, bem como a região de aplicabilidade de cada uma delas. Na hidrodinâmica de estruturas *offshore*, os carregamentos dos corpos submetidos às forças de ondas são equacionados, e os métodos para a obtenção da equação de movimento são apresentados.

No terceiro capítulo, dá-se início à metodologia, demonstrando os procedimentos e as considerações utilizadas durante a modelagem experimental de um pêndulo elástico com uma massa esférica. Além disso, são apresentados os aspectos construtivos do modelo, as variações paramétricas realizadas e, por fim, a abordagem empregada de processamento dos dados.

No quarto capítulo, é feita a modelagem numérica do ensaio previamente executado. Para isso, inicialmente é apresentado o *software* ANSYS AQWA®, a construção e o equacionamento do modelo a ser resolvido pelo *solver*. Em seguida, as etapas de convergência de refino de malha, a validação do *time-step* e a execução das simulações são desenvolvidas.

No quinto capítulo, uma forma de avaliação dos resultados do experimento e da simulação é estruturada e padronizada. Em seguida, uma análise comparativa individual é realizada para todos os casos modelados, e uma validação do modelo numérico é conferida.

No sexto capítulo, são verificadas as condições hidrodinâmicas da extrapolação para um modelo com mais graus de liberdades. Além disso, dados do estado de mar da área de estudo exemplificada são utilizados como base para a definição das ondas regulares a serem simuladas. De forma seguinte, aproximações às condições reais do cultivo de ostras são aplicadas ao modelo e as etapas de convergência de refino de malha e validação do *time-step* são efetuadas. Ao final deste capítulo, um modelo de linha de cultivo alternativa é sugerido para análise de estabilidade.

No sétimo capítulo, são apresentados os resultados das posições das massas no domínio do tempo, discutindo sobre a amplitude dos movimentos e a defasagem entre estímulo e resposta. No domínio da frequência, a identificação do fenômeno de batimento em alguns casos é confirmada. Logo após, a velocidade relativa entre o fluido e a esfera

é utilizada na verificação da taxa de filtragem das ostras. Por fim, o resultado do acréscimo no comprimento da linha de cultivo é apresentado.

No oitavo e último capítulo, as considerações finais sobre a pesquisa desenvolvida são apresentadas na forma de conclusões e sugestões para trabalhos posteriores.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão dos principais fundamentos concernentes à pesquisa, desenvolvidos em outros trabalhos e que serão utilizados durante a etapa de metodologia da pesquisa. Os três tópicos tratados são: O cultivo de ostras; ondas oceânicas; hidrodinâmica de estruturas *offshore*.

2.1. O Cultivo de Ostras

Conforme apresentado na introdução, a aquacultura *offshore* é uma atividade em expansão. Entretanto, especificamente o cultivo de ostras ainda tem muito a evoluir, principalmente no que diz respeito à engenharia. Diante disso, o ponto de essencial conhecimento refere-se à diferenciação de organismos, como, por exemplo, ostras, vieiras, mexilhões, os quais muitas vezes são tratados como semelhantes por profissionais de áreas distantes.

Segundo taxonomia de um animal, classificação de uma espécie, cada organismo é basicamente alocado por conjuntos de suas semelhanças fenotípicas e genotípicas, das mais gerais às mais específicas, seguindo a sequência de reino, filo, classe, ordem, família, gênero e espécie. Com isso, as ostras, os mexilhões e as vieiras possuem a mesma classe, bivalves, mas não as mesmas características para as divisões de ordem e níveis inferiores, como exemplificado na Figura 2.1:

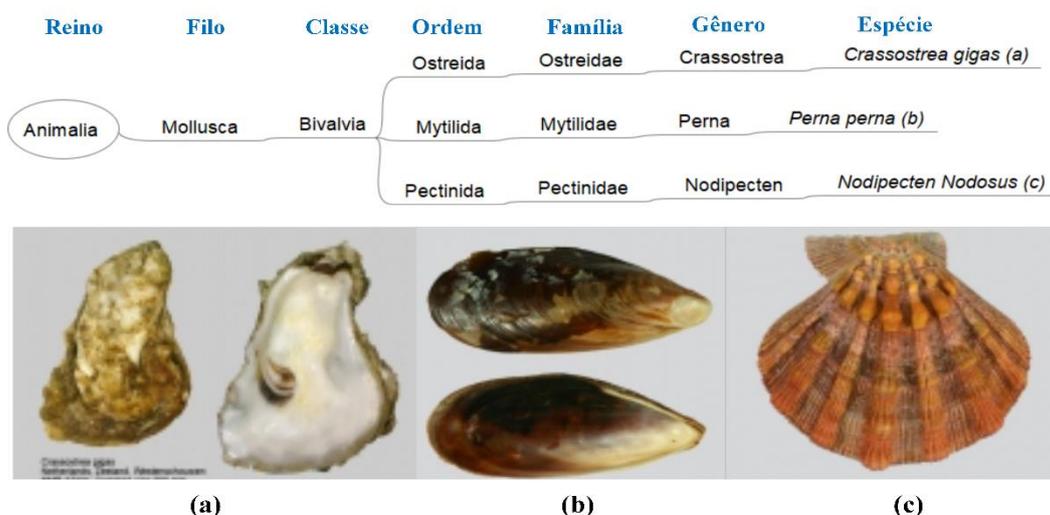


Figura 2.1 – Exemplo de classificação das espécies de (a) ostra (b) mexilhão (c) vieira [WoRMS, 2020].

Grande parte dos bivalves são organismos filtradores e se alimentam de fitoplânctons (algas) retirados da água [Ruppert e Barnes, 1996]. Como benefício ecológico, as ostras são responsáveis por acumular carbono em suas conchas após o processo de filtração. No caso das ostras *C. gigas*, Hickey (2008) estimou que a cada 100 g de concha, 12 g de carbono eram “sequestrados”.

A concentração de clorofila, produto da fotossíntese, é empregada na determinação da quantidade de biomassa de fitoplâncton (comida) disponível em uma região [Mitchell, 2001]. Além da concentração de clorofila, fatores como a temperatura – que impulsiona os processos de filtração, o metabolismo, a respiração e as taxas de excreção [Miossec *et al.*, 2009] –, a salinidade – que é responsável pelo controle osmótico [Burton, 1983] – e a velocidade do escoamento – que controla a pressão, a jusante e a montante da concha [Ackerman, 1999] – também são essenciais para o crescimento de uma espécie.

Segundo FAO (2006), a ostra japonesa, também conhecida como ostra pacífico, por possuir grande resistência a tais fatores ambientais e rápido potencial de crescimento (18 - 30 meses), tornou-se a espécie preferida em muitas regiões do mundo. Em 2003, a produção global desta espécie havia se expandido para 4,38 milhões de toneladas, mais do que qualquer outra espécie de peixes, moluscos ou crustáceos, sendo que, quase 84 % da produção global era oriunda da China. Como resultado desta expansão, mundialmente foram movimentados US\$ 3,69 bilhões.

A faixa de salinidade ideal para o cultivo da ostra japonesa é entre 20 e 25 psu, embora possa ocorrer em pontos abaixo de 10 psu e acima de 35 psu. Com relação à faixa de temperatura, a espécie apresenta maior crescimento para valores de 15° a 25°, sobrevivendo a maiores limites. No que se refere à concentração de clorofila, a quantidade mínima é de 1 mg/l. [Stromeier *et al.*, 2005; FAO, 2006; Silva e Silva, 2007; Miossec *et al.*, 2009).

De posse dos dados de salinidade e temperatura provenientes do Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta), para a boia RS-4, do município de Rio Grande – RS (Figura 2.2) e também da distribuição de clorofila, no trabalho de Ciotti *et al.* (1995), a viabilidade da ostreicultura é verificada. Devido a isso, tal espécie é utilizada como base na modelagem da estrutura de cultivo de ostras.

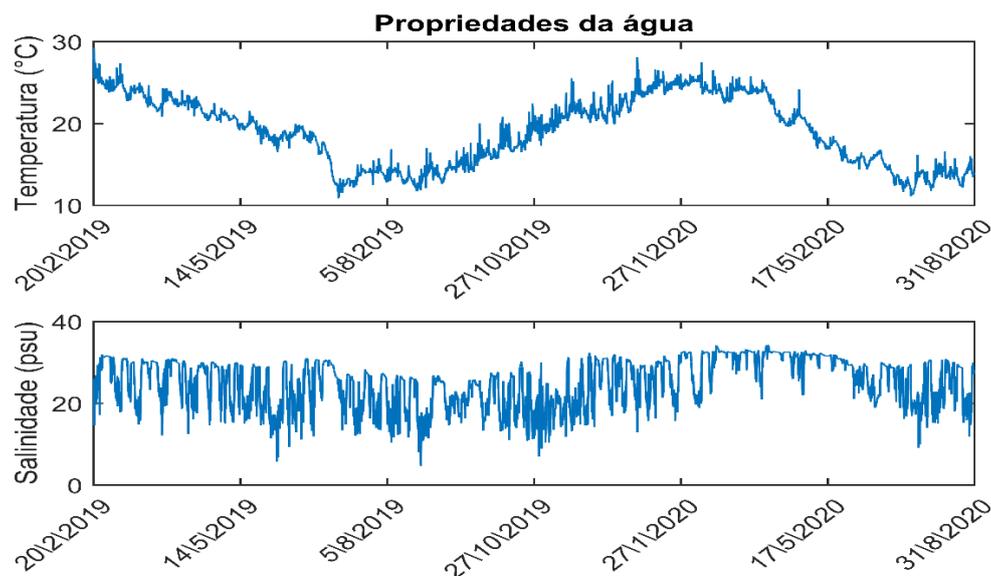


Figura 2.2 – Variação da temperatura e da salinidade durante o período de 20/02/2019 a 31/08/2020 [SiMCosta, 2020].

Com base na Figura 2.2 é possível observar a sazonalidade da temperatura na região. Diante disso, é natural que a taxa de crescimento também apresente variações em determinadas épocas do ano [Gangnery *et al.*, 2003; Góngora-Gómeset *et al.*, 2017].

Na ostreicultura, diferentes estruturas são empregadas, desde a coleta das sementes, como são chamados os filhotes de 5 mm a 7 mm, até o recolhimento em tamanhos comercializáveis (acima de 70 mm e de 70 g a 100 g por indivíduo) [FAO, 2006]. Como foco da pesquisa, serão abordados apenas aspectos da estrutura final de cultivo. Para esse caso, as sementes devem ser adquiridas junto a um laboratório de reprodução. No Brasil, segundo Silva e Silva (2007), podem ser obtidas nos laboratórios da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e da Universidade do Vale do Itajaí (UNIVALI).

As principais estruturas de cultivo podem ser divididas em fixas ou suspensas. As estruturas fixas são utilizadas para regiões com baixa profundidade, onde as ostras passam parte do tempo submersas e parte do tempo fora da água, diminuindo a taxa de crescimento, mas, facilitando o manejo da espécie. Tal característica é favorável para a subtração de parasitas, principalmente na cultura com travesseiros (Figura 2.3b), em que, além deste processo, necessita-se ainda de limpeza e manejo de um operador [Silva e Silva, 2007].

As estruturas suspensas são aplicadas em regiões de maior profundidade e possuem o benefício de estarem mais protegidas contra predadores do fundo e incrustações. Entretanto, em regiões de meso-maré, é necessário um maior cuidado para

o controle da profundidade, com o intuito de evitar que o cultivo arraste no chão [FAO, 2006]. As estruturas suspensas podem ser do tipo *raft*, como balsas flutuantes (Figuras 2.3d, 2.3e e 2.3f) ou pelo sistema *long-lines* (Figura 2.3c). A produção pelo tipo *raft* permite facilmente a troca de posição de toda a planta de cultivo, visando proteção da estrutura em situações de eventos extremos e otimização no crescimento dos animais. Já o cultivo em *long-line* oferece menor solicitação mecânica e conseqüentemente menos danos ao sistema de ancoragem.

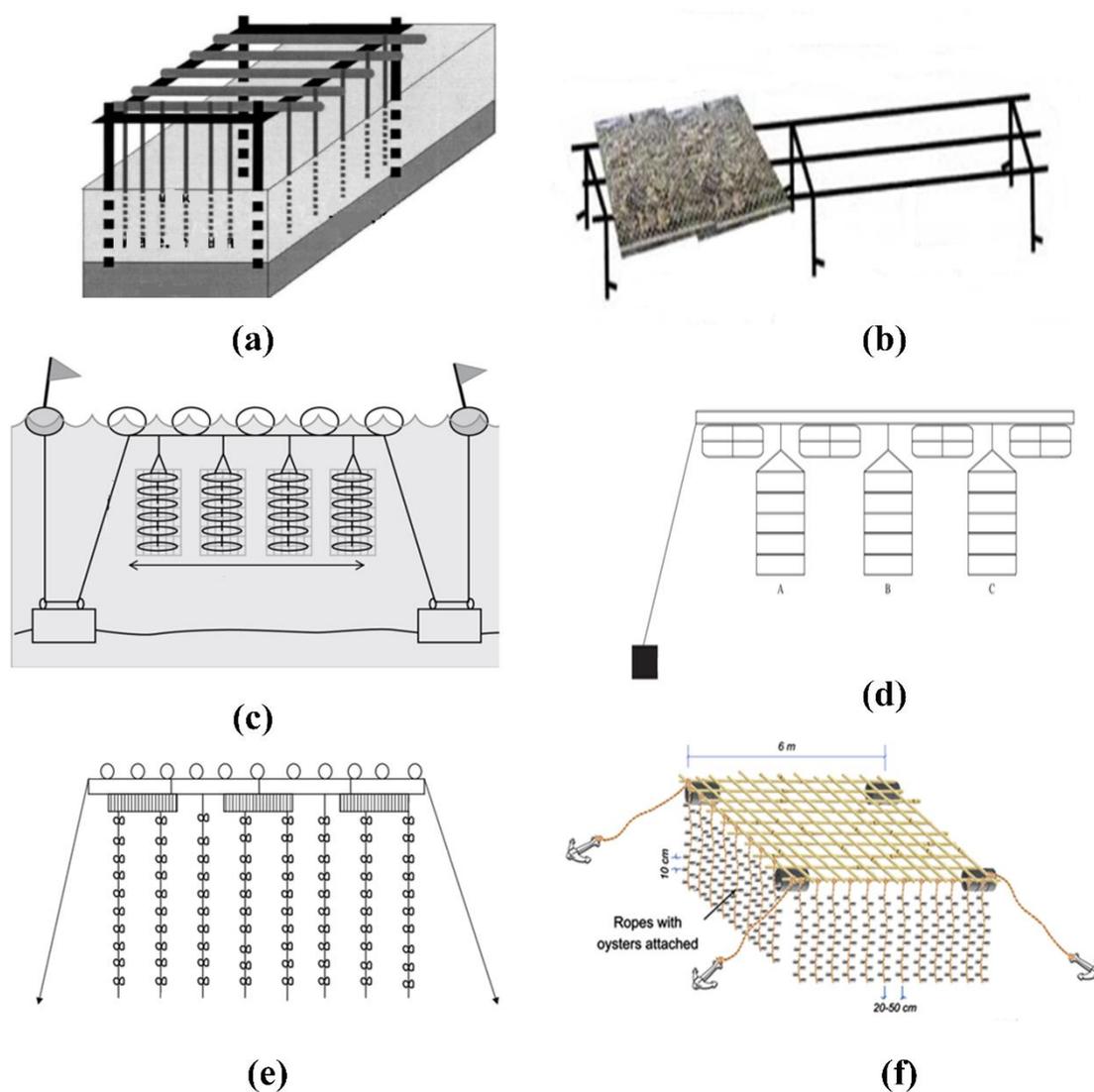


Figura 2.3 – Exemplos de estruturas de ostras encontradas na literatura. (a) Estrutura fixa de cultivo em corda [Adaptado de Gangnery *et al.*, 2003] (b) Estrutura fixa de mesa com travesseiros [Adaptado de Silva e Silva, 2007] (c) Estrutura suspensa de *long-lines* com lanternas [Adaptado de Neto, 2010] (d) Estrutura suspensa *raft* com lanternas [Adaptado de Junior *et al.*, 2012] (e) estrutura suspensa *raft* com cultivo em corda [Adaptado de Huang e Lee *et al.*, 2014] e (f) estrutura suspensa *raft* com cultivo em corda [Adaptado de Aslan *et al.*, 2015].

No que se refere às linhas, os animais podem ser fixados diretamente no cabo ou alocados em lanternas, sistema de organização em bandejas espaçadas verticalmente e cercadas por rede (Figura 2.4a). Assim como nos travesseiros, o cultivo em lanternas possui uma proteção física contra predadores. Todavia, à medida que as ostras crescem, é necessária a limpeza da rede e também o manejo das ostras para compartimentos com menor densidade de animais (Figura 2.4b).

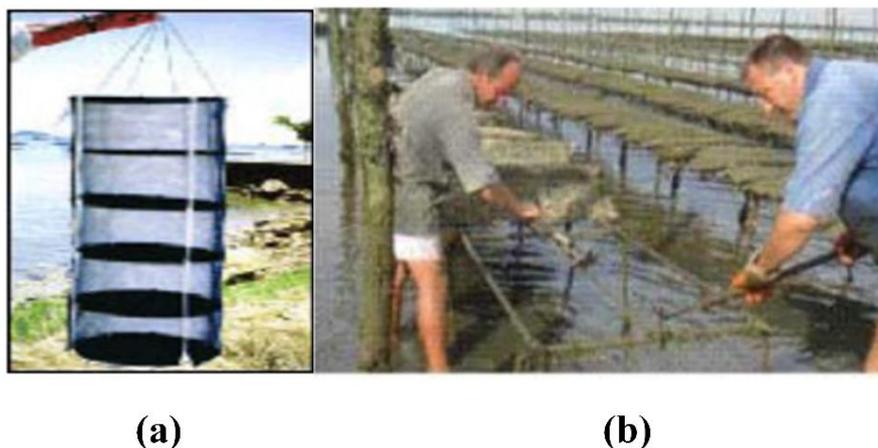


Figura 2.4 – Sistemas que oferecem proteção física contra predadores. (a) Lanterna e (b) Travesseiros, em manutenção [Silva e Silva (2007)].

No caso de as espécies serem fixadas diretamente na corda, os animais são colocados de forma a manterem um espaçamento de 10 cm a 30 cm entre os pontos de fixação, sendo permitidos até 3 ostras por ponto. Essa configuração demanda maior trabalho inicial, porém, reduz a quase zero a necessidade de manejo posterior. [Aype, 1990; Delmendo, 1989; Garrido-Hand, 1990; Gangnery *et al.*, 2003; Aslan *et al.*, 2015].

Diante do exposto, nota-se que a diversidade das estruturas existe por conta de uma melhor adequação de cada uma delas ao local de cultivo, dependendo da profundidade, das forças locais e da condição de manejo e manutenção. Considerando tais pontos, será realizada a modelagem de uma linha de cultivo com ostras pressas diretamente à corda.

Além da estrutura ideal a cada situação, em uma fazenda, a densidade e a orientação das linhas influenciam diretamente na eliminação de resíduos e na circulação de alimento, de modo que esses itens devem ser estudados. Ademais, o estudo da hidrodinâmica faz-se fundamental na obtenção da resposta da estrutura, possibilitando determinar os fluxos máximos atuantes sobre as ostras e comparar tais valores à capacidade de filtração da espécie, mantendo-a mais tempo aberta e aumentando sua

velocidade de crescimento [Ackerman, 1999; Heasman *et al.*, 1998; Strohmeier *et al.*, 2005; Campbell e Hall, 2019].

2.2. Ondas Oceânicas

Diversos são os fatores que podem gerar uma onda no mar e, dependendo do agente, ela possuirá características diferentes. No caso de ondas geradas por movimentação de placas tectônicas, por exemplo, uma grande massa de água é movimentada, gerando ondas de grandes períodos. As ondas ainda podem ser formadas por movimentações de embarcações, desprendimento de calotas polares, por atração gravitacional do sol e da lua (marés), e, principalmente, por ação do vento – o presente objetivo de estudo [Stewart, 2008].

Na geração por vento, as ondas são criadas através da interação do vento com a superfície do mar. Em uma tempestade, a massa de ar é movimentada, acarretando zonas locais (pistas) de baixa e alta pressão (Figura 2.5). À medida que a movimentação se mantém, e a energia continua sendo transferida à água por um determinado tempo, as ondas são formadas, tornam-se estáveis e se propagam a regiões distantes da criação, sendo denominadas *swell* [Sorensen 2006; Pecher e Kofoed, 2017; Stewart, 2008].

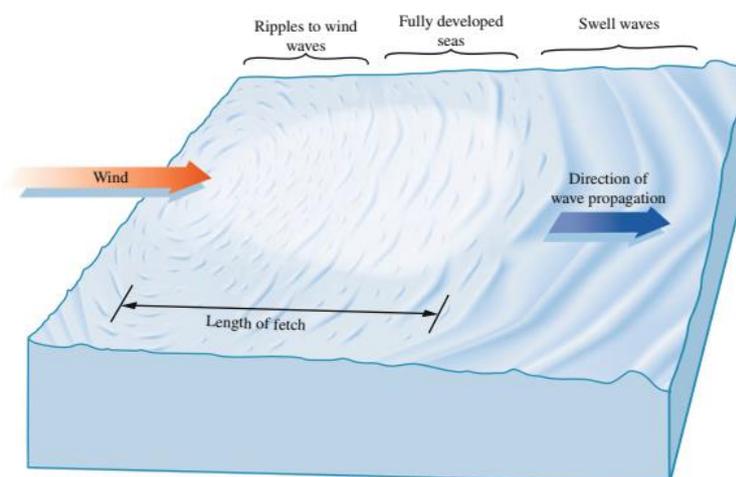


Figura 2.5 – Representação da área de geração de ondas por vento [Pecher e Kofoed ,2017]

Segundo Pecher e Kofoed (2017), uma das formas de dividir os diferentes tipos de ondas é com relação aos seus períodos. Nesta classificação, as ondas com períodos de até 1 s são denominadas capilares – tensão superficial como força restauradora – e as de 1 a 30 s, gravidade. Em seguida, aquelas que possuem entre 30 s e 5 min são chamadas

de infragravidade, as de 5 min até 12 horas são tsunamis e, finalmente, as maiores de 12 h, marés.

Para o caso de ondas unidirecionais, de pequena amplitude, também conhecidas como Airy, a formulação governante do escoamento é a equação da continuidade, Laplace (Equação 2.1). A partir dela, considerando um escoamento incompressível e irrotacional, são aplicadas as condições de contorno dinâmicas e cinemáticas da superfície livre, a condição cinemática do fundo e as condições de contorno laterais, responsáveis pela periodicidade no tempo e no espaço [Dean e Dalrymple, 1991].

$$\Delta^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \quad (2.1)$$

As etapas do desenvolvimento das equações de ondas utilizadas no trabalho foram baseadas em Dean e Dalrymple (1991), Sorensen (2006), Journée e Massie (2001) e Sawaragi *et al.* (1995). Após manipulação algébrica, a elevação da superfície η é escrita como função da posição x e do tempo t . Já o potencial de velocidade do fluido ϕ , durante passagem de uma onda progressiva, além de x e t , é também escrito como função das posições z .

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.2)$$

$$\phi(x, z, t) = -\frac{Hg \cosh(k(h+z))}{2\sigma \cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t) \quad (2.3)$$

Onde, H é a altura da onda, g é a gravidade e h a profundidade local, segundo o sistema de referência da Figura 2.6. Ademais, k é o número de onda e σ , a frequência angular, parâmetros que dependem respectivamente do comprimento de onda L e do período de oscilação T (Equação 2.4).

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad \text{e} \quad \sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (2.4)$$

$$\sigma^2 = gk \tanh(kh) \quad (2.5)$$

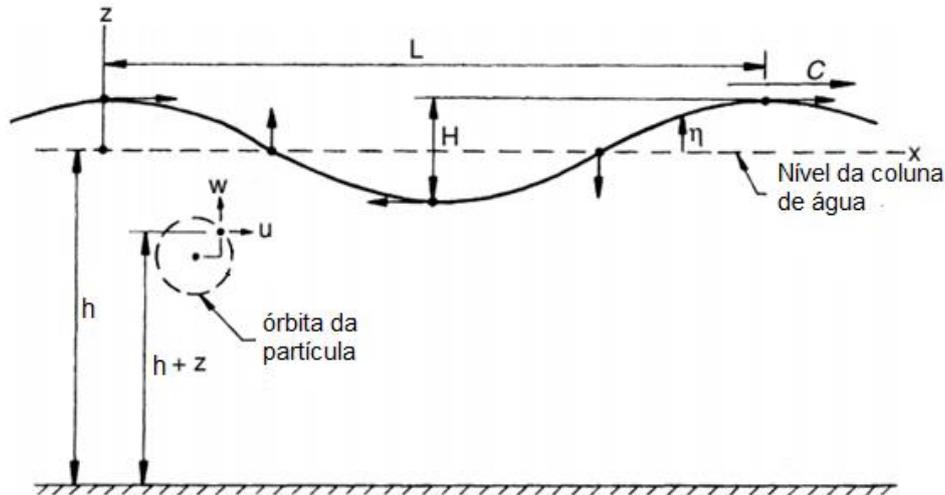


Figura 2.6 – Variáveis de uma onda progressiva [Adaptado de Sorensen, 2006].

Uma das maneiras de obter-se o comprimento de onda é por meio da solução da equação de dispersão (Equação 2.5). Entretanto, por tratar-se de uma equação transcendental, ou seja, a variável a ser determinada, nesse caso k , encontra-se multiplicando uma função trigonométrica em que ela é argumento, não é simplesmente resolvível. Diante disso, uma das formas de solução deste problema é por meio da equação proposta por Eckart (1951) (Equação. 2.6).

$$\sigma^2 = gk \sqrt{\tanh\left(\frac{\sigma^2 h}{g}\right)} \quad (2.6)$$

Utilizando a relação de dispersão (Equação 2.5), o potencial (Equação 2.3) pode ser reescrito como:

$$\phi(x, z, t) = -\frac{H\sigma \cosh(k(h+z))}{2k \sinh(kh)} \text{sen}(kx - \sigma t) \quad (2.7)$$

Com o potencial, as componentes horizontais u e vertical w da velocidade de uma partícula teórica imersa no fluido podem ser encontradas por derivação, conforme as Equações 2.8 e 2.9. É importante diferenciar a velocidade horizontal da partícula u da velocidade da onda, também chamada de celeridade C , a qual é a razão entre o comprimento e o período (Figura 2.6).

$$u = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{H\sigma \cosh(k(h+z))}{2 \sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (2.8)$$

$$w = -\frac{\partial\phi}{\partial z} = \frac{H\sigma\sinh(k(h+z))}{2\sinh(kh)}\sin(kx - \sigma t) \quad (2.9)$$

De forma a complementar o entendimento acerca da velocidade da partícula, observa-se que a componente vertical w tem defasagem de 90° em relação à horizontal u , resultando em um vetor velocidade sempre tangente à órbita da partícula (Figura 2.6). Além disso, mais dois fatores são importantes de serem apresentados. O primeiro é que u encontra-se em fase com a elevação, o segundo é que a amplitude da velocidade diminui de forma hiperbólica com a profundidade (Figura 2.7).

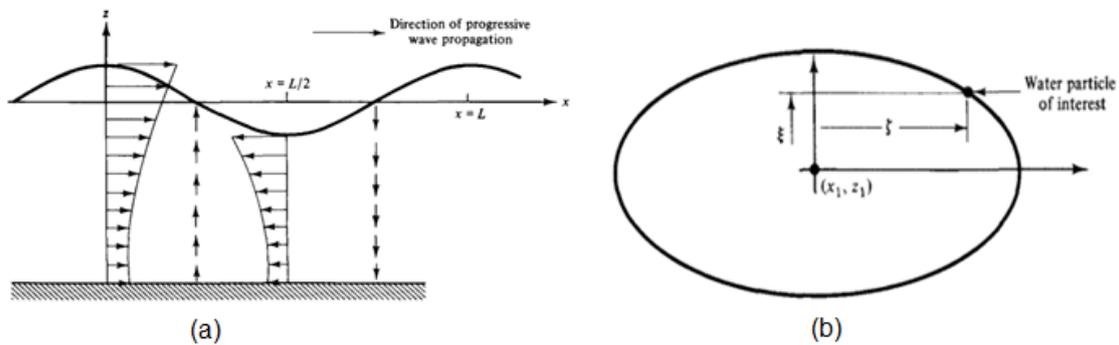


Figura 2.7 – (a) Gradiente de velocidade em relação à fase da onda. (b) Trajetória da partícula teórica da onda, com indicação do ponto médio $P(x_1, z_1)$ [Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991].

Dando seguimento, a determinação da trajetória da partícula é obtida integrando a velocidade no tempo. Assim sendo, as coordenadas horizontal e vertical são respectivamente as Equações 2.10 e 2.11. Nas quais, x_1 e z_1 correspondem ao ponto médio da partícula (Figura 2.7).

$$\zeta(x_1, z_1, t) \cong \int u(x_1, z_1) t = -\frac{H\cosh(k(h+z_1))}{2\sinh(kh)}\sin(kx_1 - \sigma t) \quad (2.10)$$

$$\xi(x_1, z_1, t) \cong \int w(x_1, z_1) t = \frac{H\sinh(k(h+z_1))}{2\sinh(kh)}\cos(kx_1 - \sigma t) \quad (2.11)$$

A partir da trajetória, são definidos os regimes de propagação das ondas, que demonstram a variação no formato do deslocamento da partícula. No regime de águas profundas ($kh > \pi$), a partícula descreve uma circunferência e a medida que a profundidade relativa diminui – relação entre profundidade e comprimento de onda –, tem-se o aumento

da interação com o fundo, resultando em um achatamento da órbita, no qual a trajetória passa a ser elíptica, conforme os limites definidos na Figura 2.8

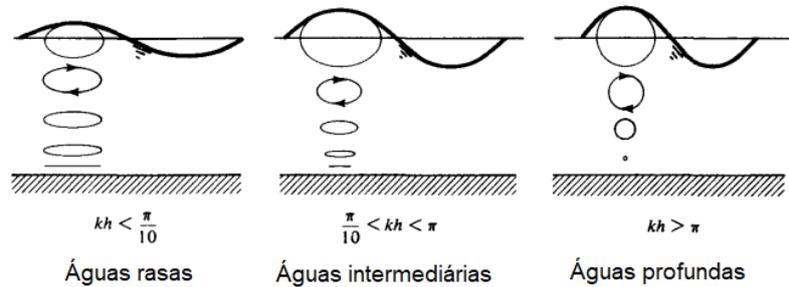


Figura 2.8 – Variação do formato da trajetória da partícula com a variação da profundidade relativa e consequentemente o regime de água [Adaptado de Dean e Dalrymple, 1991].

Além da posição e da velocidade, o gradiente de pressão também é modificado durante a passagem de uma onda, isso porque, além da pressão hidrostática, tem-se também uma pressão dinâmica, variando no tempo e no espaço. Para a determinação das pressões, é utilizada a formulação de Bernoulli e, ao final, o gradiente de pressão é escrito em duas parcelas, conforme a equação seguinte.

$$P(x, z, t) = \underbrace{-\rho g z}_{\text{Hidrostática}} + \underbrace{\rho g \frac{H \cosh(k(h+z))}{2 \cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t)}_{\text{Dinâmica}} \quad (2.12)$$

$$P(x, z, t) = -\rho g z + \rho g \eta K_p(z) \quad (2.13)$$

$$K_p(z) = \frac{\cosh(k(h+z))}{\cosh(kh)} \quad (2.14)$$

Nas quais ρ é a massa específica da água. Conforme escrito na Equação 2.13, a pressão pode ser escrita em relação ao fator de resposta de pressão K_p . Nessa formulação, a influência do tempo fica dentro da elevação η , e a variação vertical, junto ao K_p (Equação 2.14)

Os conceitos e as formulações aplicadas até então são referentes às ondas de Airy. Entretanto, outras teorias também são utilizadas, como por exemplo, ondas de Stokes 2º, 3º, 4º e 5º ordem, cnoidais e solitárias. Na literatura, são comumente utilizados, de forma indireta, os parâmetros de profundidade relativa e esbeltez como critérios classificadores para aplicação das teorias de ondas. A esbeltez, também chamada de inclinação, é a razão

entre a altura e o comprimento da onda. De forma geral, quando menor a profundidade relativa, maior é o grau da formulação de Stokes. Já a formulação de Cnoidal é utilizada para ondas de maior esbeltez.

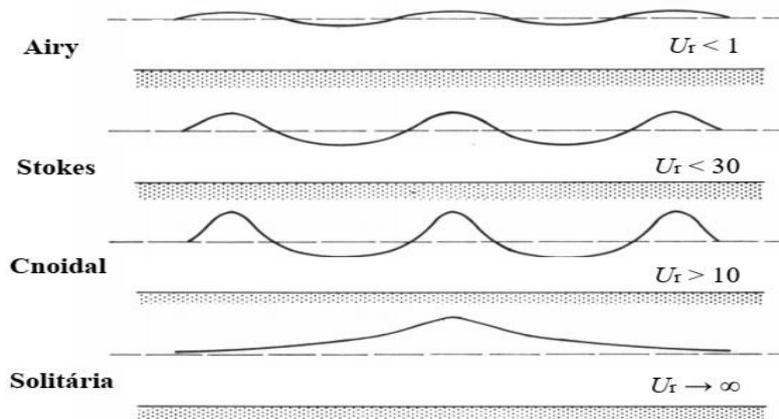


Figura 2.9 – Representação do perfil de elevação das teorias de ondas com os limites de parâmetros de Ursell [Adaptado de Teixeira, 2017].

Para o estudo em questão, o parâmetro de Ursell (Equação 2.15) é empregado na verificação da teoria mais adequada (Airy ou Stokes 2º ordem) em cada um dos experimentos e simulações. Segundo Dean e Dalrymple (1991), $Ur < 1$ é aplicado às teorias de Airy, também conhecidas como de pequenas amplitudes. Para valores entre 1 e 10, a diferenciação entre as teorias de Stokes e Cnoidal é realizada, de modo geral, de acordo com o regime de propagação, no qual, para regime de águas profundas e uma faixa das intermediárias, são utilizadas Stokes, já para águas rasas, Cnoidal [Pecher e Kofoed, 2017].

$$U_r = \frac{HL^2}{h^3} \quad (2.15)$$

As ondas de Stokes 2º Ordem são apresentadas como ondas de amplitudes finitas. O desenvolvimento das equações das ondas de segunda ordem foi baseado em Chakrabarti (1987), Sorensen (2006) e Wilson (2003). A partir da equação para o potencial da velocidade, o procedimento para a obtenção da velocidade e posição e também o gradiente de pressão é similar às ondas de pequena amplitude. Sendo assim, Sorensen (2006), por meio do método das perturbações, determina o potencial de velocidade de uma onda de Stokes 2º Ordem (Equação 2.16) e o perfil de elevação (Equação 2.17)

$$\begin{aligned} \phi_s(x, z, t) = & -\frac{Hg \cosh(k(h+z))}{2\sigma \cosh(kh)} \sin(kx - \sigma t) \\ & + \frac{\pi\sigma H^2 \cosh(2k(h+z))}{16 \sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \sigma t) \end{aligned} \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} \eta_s(x, t) = & \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \\ & + \frac{\pi H^2 \cosh(kh(h+z))}{8L \operatorname{Senh}^3(kh)} \cos 2(kx - \sigma t) \end{aligned} \quad (2.17)$$

Observa-se que tanto o potencial, quando o perfil, apresentam suas primeiras parcelas iguais às ondas de pequenas amplitudes. Dando seguimento, as componentes de velocidade e trajetória das partículas teóricas são determinadas respectivamente pelas Equações 2.18, 2.19, 2.20 e 2.21

$$\begin{aligned} u_s(x, z, t) = & \frac{\pi H \cosh(k(h+z))}{T \operatorname{senh}(kh)} \cos(kx - \sigma t) \\ & + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh(2k(h+z))}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \sigma t) \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} w_s(x, z, t) = & \frac{\pi H \operatorname{senh}(k(h+z))}{T \operatorname{senh}(kh)} \sin(kx - \sigma t) \\ & + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\pi H}{T} \frac{\operatorname{senh}(2k(h+z))}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \sigma t) \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$\begin{aligned} \zeta_s(x, z, t) = & -\frac{H}{2} \frac{\cosh k(h+z)}{\operatorname{senh} kh} \sin(kx - \sigma t) \\ & + \frac{\pi H^2}{8L \operatorname{senh}^2 kh} \left(1 - \frac{3 \cosh(2k(h+z))}{2 \operatorname{senh}^2(kh)} \right) \sin 2(kx - \sigma t) \\ & + \frac{\pi H^2 \cosh 2k(h+z)}{4L \operatorname{senh}^2 kh} \sigma t \end{aligned} \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} \xi_s(x, z, t) = & \frac{H}{2} \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) \\ & + \frac{3\pi H^2}{16L} \frac{\sinh(2k(h+z))}{\sinh^4(kh)} \cos 2(kx - \sigma t) \end{aligned} \quad (2.21)$$

Uma das grandes diferenças entre os modelos pode ser observada no último termo da fórmula da posição horizontal da partícula (Equação 2.20). Nela, o movimento aumenta com a propagação da onda (tempo). Diante disso, é visto que a trajetória desta onda deixa de ser fechada, apresentando uma característica de transporte, denominada deriva de Stokes [Sorensen, 2006]].

Por fim, o gradiente de pressão, independente do regime de águas (profundas ou intermediárias), é expresso pela Equação 2.22. Nela, dependendo do regime de águas kh , a função geralmente possui os termos de \cosh e \sinh simplificados, sem muito prejuízo aos resultados.

$$\begin{aligned} P_s(x, z, t) = & \rho g z + \rho g \frac{H \cosh(k(h+z))}{2 \cosh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \\ & + \frac{3\pi \rho g H^2}{4L \sinh 2kh} \left[\frac{\cosh(2k(h+z))}{\sinh^2(kh)} - \frac{1}{3} \right] \cos 2(kx - \sigma t) \\ & - \frac{\pi \rho g H^2}{4L \sinh 2kh} (\cosh 2k(h+z) - 1) \end{aligned} \quad (2.22)$$

2.3. Hidrodinâmica de Estruturas *Offshore*

No item anterior foram apresentadas as teorias de ondas, demonstrando como elas modificam o domínio do fluido e transformam o escoamento. Dando seguimento, nesta seção são apresentados como os escoamentos transferem forças às estruturas e a reação destas estruturas imersas na água.

2.3.1. Forças Hidrodinâmicas

Faltinsen (1990) e Chakrabarti (1987) discorrem sobre as diferenças entre as forças atuantes em pequenas e grandes estruturas. Nesta classificação, o comprimento da

estrutura é avaliado em relação ao comprimento da onda. O qual, segundo eles, para estruturas menores, tem-se a predominância da força de Morison F_m , composta por arrasto e inércia. Já para corpos de maior volume, a difração passa a ser importante. Além delas, outra força é a de Froude-Krylov F_{kv} , que se aplica tanto para pequenas estruturas, quanto para grandes. Diante disso, três são as forçantes devido à ação das ondas.

Afim de identificar quais forças devem ser aplicadas em cada situação, o número de Keulegan-Carpenter KC (Equação 2.23) representa uma relação entre os agentes de características inerciais e as forças de arrasto. Portanto, o KC é utilizado em gráficos de coeficientes de inércia C_M (Figura 2.11) e arrasto C_D (Figura 2.12), que serão apresentados mais adiante.

$$KC = \frac{U_0 T}{D} \quad (2.23)$$

Na qual, U_0 é a amplitude da velocidade horizontal da partícula e D o diâmetro característico da estrutura. Na pesquisa em questão, o diâmetro das esferas.

De forma completa, para a identificação das forças sobre as estruturas, Patel (1989), Chakrabarti (1987) e Wilson (2003) propõem a utilização de diagramas. No diagrama proposto por Chakrabarti (1987), os parâmetros de diâmetro característico, comprimento e altura de onda fazem-se necessários no reconhecimento de uma das seis regiões.

Na Figura 2.10, a delimitação do fenômeno de difração ocorre quando o diâmetro característicos da estrutura é de no mínimo 16% do comprimento da onda. Como linhas de cultivo de ostras apresentam dimensões bem menores que esse valor, a difração pode e será negligenciada no trabalho. Diante disso, serão apresentados somente os equacionamentos relacionados às forças de Morison e Froude-Krylov, que foram baseados em Chakrabarti (1987), Patel (1989), Faltinsen (1990), Journée e Massie (2001) e Wilson (2003).

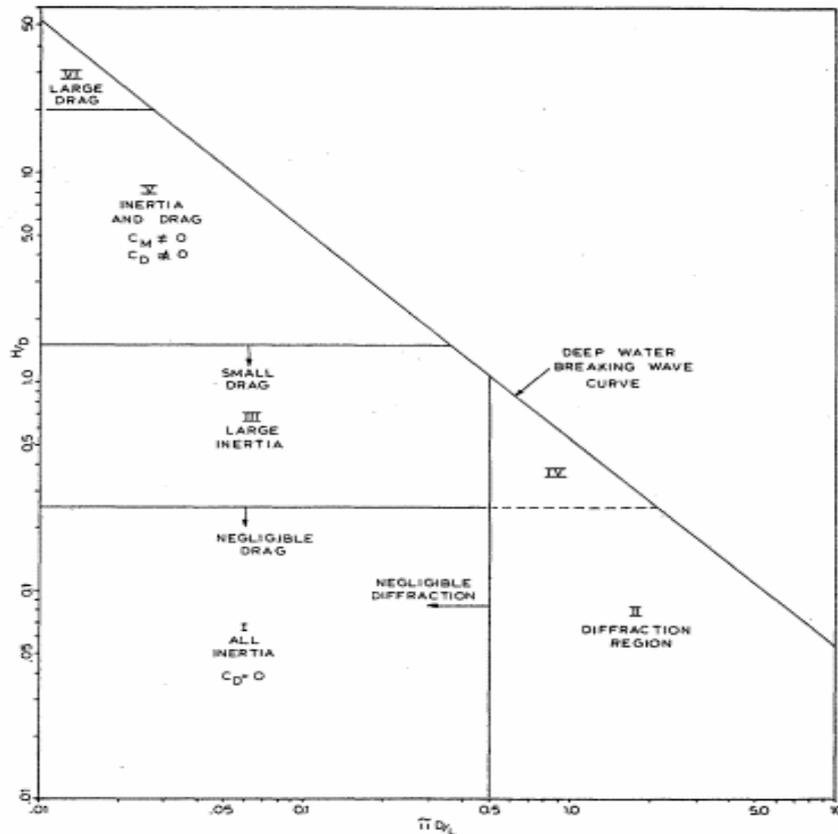


Figura 2.10 – Diagrama de aplicação das forças de ondas para um cilindro vertical [Chakrabarti, 1987].

Na formulação da força de Morison, a parcela de inércia é determinada pela aceleração do fluido, e o arrasto, pelo quadrado da velocidade, tornando o problema não linear. As variáveis A_I e A_D são constantes calculadas respectivamente por $\rho \frac{\pi D^2}{4}$ e $\frac{1}{2} \rho D$.

$$F_m = \underbrace{C_M A_I \dot{u}}_{\text{Inércia}} + \underbrace{C_D A_D |u|u}_{\text{Arrasto}} \quad (2.24)$$

Na expressão, os coeficientes C_M e C_D são obtidos de forma experimental e variam com a rugosidade da superfície e a velocidade do escoamento. Em seus ensaios, Sarpkaya (1986) obteve curvas ajustadas da variação destes parâmetros em função do KC para um cilindro liso. Ele experimentou situações com diferentes números de Reynolds (Equação 2.25) e β ($\beta = \frac{Re}{KC}$). No cálculo de Reynolds, ν é a viscosidade cinemática do fluido e μ a viscosidade dinâmica.

$$Re = \frac{U_0 D}{\nu} = \frac{\rho U_0 D}{\mu} \quad (2.25)$$

Nos gráficos a seguir (Figuras 2.11 e 2.12), observa-se que, quando a inércia diminui ($KC \cong 12$), o arrasto aumenta, e vice-versa. Além disso, é possível notar que sob maiores velocidades de escoamento, tem-se uma menor variação dos coeficientes em relação ao KC .

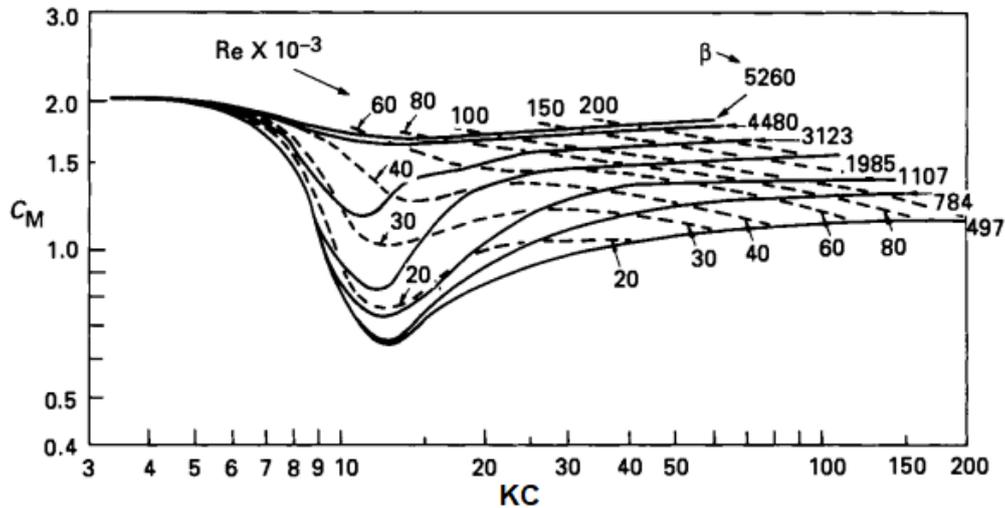


Figura 2.11 – Variação do coeficiente de inércia com o KC , para diferentes velocidades do escoamento (Re e β) [Adaptado de Patel, 1989].

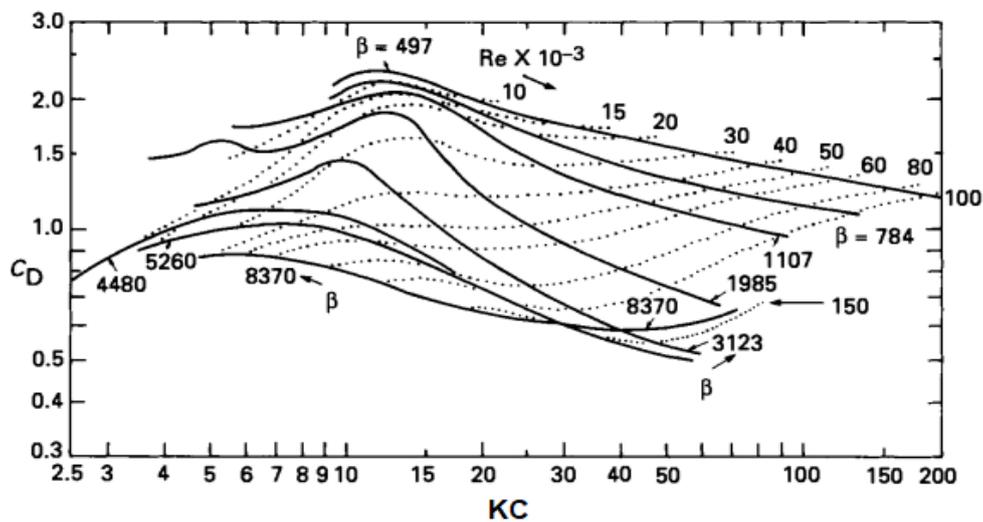


Figura 2.12 – Variação do coeficiente de arrasto com o KC , para diferentes velocidades do escoamento (Re e β) [Adaptado de Patel, 1989].

Para o caso de estruturas livres de movimentação, a equação é reescrita, considerando a diferença entre a velocidade do corpo e do fluido. Onde, C_A é o coeficiente de massa adicional, x a posição horizontal do corpo e V_r a velocidade relativa.

$$F_m = C_M A_l \dot{u} - C_A A_l \ddot{x} + C_D A_D |u|u - C_D A_D |\dot{x}|\dot{x} \quad (2.26)$$

$$F_m = C_M A_l \dot{u} - C_A A_l \ddot{x} + C_D A_D |u - \dot{x}|(u - \dot{x}) \quad (2.27)$$

$$F_m = C_M A_l \dot{u} - C_A A_l \ddot{x} + C_D A_D |V_r|(V_r) \quad (2.28)$$

As equações de Morison apresentadas foram para a direção horizontal (x). Entretanto, ocorrem de forma similar para a direção vertical z . Utiliza-se a velocidade w (Equação 2.9 ou 2.19) da partícula teórica.

Além da força, no sentido do escoamento, outros fenômenos de interação fluido-estrutura podem ocorrer, transformando a força sobre o corpo, como por exemplo, forças transversais, devido ao desprendimento de vórtices. Para o estudo destes fenômenos tornam-se necessárias outras ferramentas de modelos turbulentos e de vorticidades.

Dando seguimento, os carregamentos devido ao esforço de Froude-Krylov são calculados por integração da pressão dinâmica sobre a superfície do corpo. De forma geral, expressões fechadas (analíticas) são obtidas para ondas lineares e estruturas geometricamente simples e simétricas, como por exemplo cilindros, paralelepípedos e esferas [Chakrabarti, 1987]. Ao contrário de Morison, a força de Froude-Krylov só é aplicada para escoamentos oscilatórios dependentes do tempo.

$$F_{fkx} = C_H \iint_S P n_x ds \quad (2.29)$$

$$F_{fkz} = C_V \iint_S P n_z ds \quad (2.30)$$

Sendo, n_x e n_z respectivamente as componente x e z da direção perpendicular à superfície, C_H o coeficiente horizontal e C_V o coeficiente vertical da força. Os coeficientes são determinados de forma experimental, pela força total na estrutura. Tais valores não dependem da teoria de Froude-Krylov e sim da geometria, para uma faixa de velocidade. De acordo com exemplo de Chakrabarti (1987) (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Coeficientes C_H e C_V para diferentes geometrias [Adaptado de Chakrabarti, 1987].

Geometrias	Horizontal	Vertical
Semi-esfera	1,5	1,1
Esfera	1,5	1,1
Meio cilindro horizontal	2,0	1,1
Cilindro horizontal	2,0	2,0
Bloco retangular	1,5	6,0

É importante ressaltar que, mesmo contendo valores próximos, os coeficientes (C_H e C_V) das Equações 2.29 e 2.30 não devem ser confundidos com os coeficientes (C_m e C_D) da Equação 2.28, de Morison. Após o conhecimento de como as forças do fluido são transferidas para estruturas submersas, a seguir, são apresentados os princípios utilizados na obtenção da equação de movimento.

2.3.2. Equação do Movimento

Problemas dinâmicos na engenharia muitas vezes podem ser modelados por um conjunto de massas ligadas por elementos elásticos e/ou dissipativos (amortecedores). Esses modelos podem ser excitados por forças de diferentes características, sendo elas harmônicas, aleatórias, impulsivas, etc.

Em situações nas quais é necessária mais de uma coordenada para a descrição do movimento, se diz que o sistema é de vários graus de liberdade, como, por exemplo, o modelo de vibração vertical em um prédio de 3 andares. Nele são requeridas ao menos 3 variáveis. Entretanto, para o caso de vibração horizontal e vertical para o mesmo prédio, o movimento apresentaria 6 graus de liberdade translacionais, e o sistema conteria 6 frequências naturais.

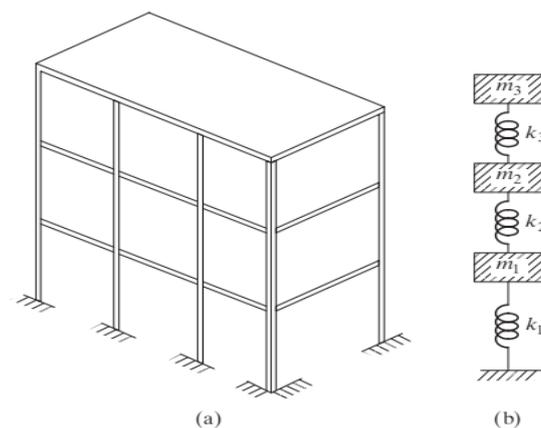


Figura 2.13 – Exemplo de estrutura com vários graus de liberdade (a) Estrutura de um prédio de 3 andares. (b) Modelo massa mola da estrutura [Rao, 2011].

De maneira geral, a definição dos movimentos das massas pode ser obtida por dois diferentes caminhos. O primeiro é através da aplicação da segunda lei de Newton. Para esta forma, inicialmente são elaborados os diagramas de corpo livre e cinéticos para cada uma das massas, resultando na Equação 2.31 [Rao, 2011].

$$m_i \ddot{r}_i = \sum_j F_{ij} \quad (2.31)$$

Onde m_i é a massa i , \ddot{r}_i , a aceleração, e F_{ij} são as forças j sob a massa i . Para um sistema rotacional, a Equação 2.31 é reescrita em função dos momentos de inércia de massa J_i , a aceleração angular $\ddot{\theta}_i$ e o somatório de momentos das forças j sobre o corpo rígido M_{ij} .

$$J_i \ddot{\theta}_i = \sum_j M_{ij} \quad (2.32)$$

A outra maneira de determinação dos movimentos é por meio da formulação de Lagrange, utilizando os princípios de energia. Tal modo costuma ser mais conveniente para deduzir equações com vários graus de liberdade [Rao, 2011].

Na forma a seguir, o Lagrangiano L_{ag} é definido como a diferença entre as energias cinéticas E_c e as energias potenciais E_p . Com ele, a equação do movimento pode ser obtida por meio da expressão do segundo tipo (Equação 2.33). Na qual q_i é a coordenada do grau de liberdade i e Q_k são as forças externas. [Meirovitch, 2001; Rao, 2011].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{ag}}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L_{ag}}{\partial q_i} = Q_k \quad (2.33)$$

Independentemente do caminho utilizado na determinação da equação de movimento, costuma-se escrevê-lo de forma matricial segundo a Equação 2.34. Onde, \mathbf{M} é a matriz de massa, \mathbf{C} , a matriz de amortecimento (para sistemas amortecidos), \mathbf{K} , a matriz de rigidez, e \mathbf{F} , o vetor de forças externas.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{r}} + \mathbf{K}\mathbf{r} = \mathbf{F} \quad (2.34)$$

A partir de então, em posse do sistema matricial, o processo de análise modal pode ser utilizado para a determinação das respostas das coordenadas q_i em relação ao tempo. Além da obtenção da resposta de forma analítica, as equações diferenciais em sistemas mais complexos podem ser solucionadas de forma numérica, como, por exemplo, fazendo uso dos algoritmos de Runge-Kutta.

No trabalho em questão, a equação de movimento será desenvolvida utilizando-se da formulação Lagrangeana, e as forças hidrodinâmicas serão aplicadas à esfera no Capítulo 4.

3. MODELAGEM EXPERIMENTAL DA ESTRUTURA PENDULAR

Neste capítulo, são apresentadas as etapas para a realização do modelo experimental desenvolvido junto ao Laboratório de Interação Fluido Estrutura (LIFE) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Além disso, o capítulo expõe também as considerações, o material e os procedimentos aplicados durante a preparação, a execução dos testes e o processamento dos sinais.

A experimentação é uma ferramenta necessária na etapa de validação do modelo numérico, em razão de representar o fenômeno físico real desejado, ainda que os testes sejam feitos, em sua maioria, com influências externas controladas. Além disso, outro fator que corrobora a importância do modelo experimental é o de servir de forma didática para o entendimento dos fenômenos físicos envolvidos durante a realização do ensaio.

Nesse contexto, com o objetivo de validar o procedimento utilizado na modelagem numérica, montou-se um sistema pendular elástico, submerso em água e sob efeitos de ondas (Figura 3.1).

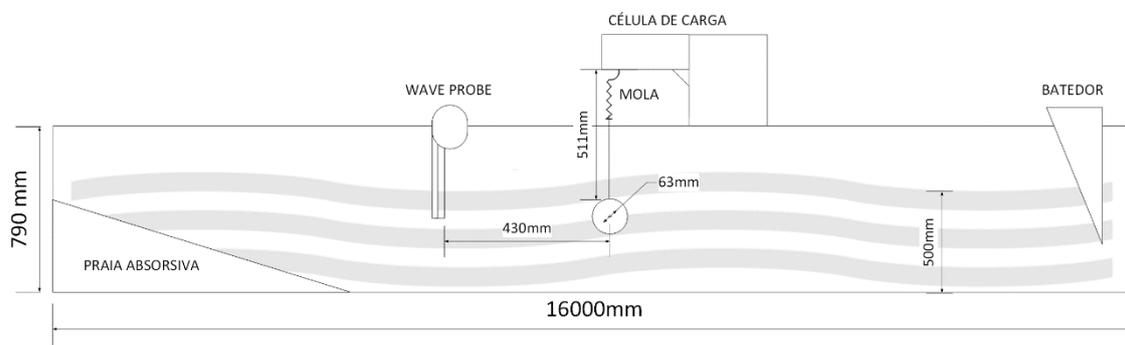


Figura 3.1 – Configuração de montagem do ensaio.

O ensaio foi constituído por uma estrutura de suporte, fixada na borda do canal. Junto a essa estrutura, acoplou-se uma célula de carga, para aquisição de dados de tração do pêndulo elástico. Com um distanciamento, em direção à praia, foi inserido um sistema de medição da elevação do nível da água (*Wave probe*), com o intuito de determinar a amplitude das ondas concebidas pelo gerador (batedor).

Sondas de nível (*Wave probes*) (Figura 3.2) são dispositivos que convertem a variação do nível da água na haste em capacitância, a qual posteriormente é convertida em corrente elétrica e finalmente em tensão elétrica. Em suma, a variação do nível de água na haste em mm (0 até 350 mm) é transformada em variação de Volts (1 até 5 V),

que são medidos pelo dispositivo de aquisição (DAQ). O DAQ utilizado na pesquisa foi o USB-6008 da *National Instruments*.



Figura 3.2 – *Wave probe* (WP) instalado no canal para medição de elevação da superfície da onda.

A célula de carga utilizada foi a SP4M de 10 kg, da *HBM Test and Measurement*. O instrumento possui uma classe de precisão C6, capaz de mensurar microgramas, e dispõe de uma sensibilidade de $2,0 + 0,2 \text{ mV/V}$ [HBM, 2007; HBM, 2020], e foi utilizado junto com o DAQ, a uma taxa de aquisição de 100 Hz.

Ao todo foram ensaiados 36 casos. Dentre eles, os parâmetros que tiveram seus valores combinados foram: profundidade do corpo; rigidez do cabo de sustentação do pêndulo; período e amplitude de onda.

Com base no exposto, o capítulo de modelagem experimental é dividido nas seguintes seções: Cálculos dimensionais preliminares; Condições dimensionais preliminares; Determinação de altura de onda; Construção do modelo; Execução do experimento; Processamento dos dados.

3.1. Condições Dimensionais Preliminares

Prévia à construção dos ensaios, foi necessária a realização de cálculos dimensionais preliminares, para verificar quais parâmetros seriam factíveis à experimentação.

A primeira fase foi de definição de quais seriam os parâmetros de ondas aplicados, correlacionando-os com a altura da coluna de água no tanque. O objetivo desta etapa foi

que ao menos duas ondas desenvolvidas pertencessem ao regime de águas profundas e consequentemente à teoria de onda de Airy.

O canal de ondas do LIFE possui 16 m de comprimento e uma seção transversal retangular de 0,71 m de largura por 0,79 m de altura. As paredes laterais e o fundo do canal são de vidro, permitindo assim uma visão lateral e também a incorporação de métodos de Velocimetria por Imagem de Partículas (*PIV - Particle Image Velocimetry*), a fim de adquirir dados a respeito do ensaio em desenvolvimento [LIFE, 2020].

O canal possui ainda um sistema de geração de ondas do tipo cunha, desenvolvendo oscilações harmônicas de frequências entre 0,3 Hz e 1,5 Hz e amplitude até 15 cm [LIFE, 2020]. O acionamento do batedor é feito por meio de um motor controlado, no qual a relação entre a frequência de rotação é de 972 rpm para cada 1 Hz de frequência de onda. Já o controle da altura da onda é feito de forma mecânica, regulando o quanto o batedor entra na água e verificando, por meio do sistema de aquisição *Wave Probe*, o perfil de elevação de onda gerada.

Observando a faixa de operação do motor, para uma profundidade de 400 mm, calculou-se, por meio da Equação 2.25, que a frequência mínima de geração de ondas lineares seria de 1,34 Hz. Diante disso, optou-se por elevar o nível do canal até 500 mm, para que a frequência mínima passasse a ser de 1,25 Hz, estando dentro da faixa de operação do motor e mais distante da frequência máxima possível.

Após definir a profundidade, por entrave da relação entre as frequências de onda geradas e a altura da coluna de água, foi estabelecido que duas ondas de Airy e duas de Stokes 2° ordem seriam ensaiadas, conforme representado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Dados de geração de onda experimental.

Onda	Rotação do motor (rpm)	Frequência da onda (Hz)	Período da onda (s)	Teoria
1	729	0,75	1,333	Stokes 2° ordem
2	972	1,00	1,000	Stokes 2° ordem
3	1215	1,25	0,800	Airy
4	1458	1,50	0,667	Airy

Considerando também o tamanho do canal, a dimensão característica do corpo submerso deve ocupar um valor máximo de 12% da largura do canal [Ding *et al.*, 2017]. Essa condição é necessária para que não exista interferência da borda durante o experimento.

Além disso, por limitações do *software* utilizado durante a modelagem numérica, a esfera não poderia apresentar uma massa menor do que 1 kg. Diante das condições mencionadas, escolheu-se uma esfera de ferro fundido, utilizada em treinamentos de arremessos de peso. A esfera possuía um diâmetro de 63 mm, sendo aproximadamente 26% menor do que a máxima recomendada por Ding *et al.* (2017), e uma massa de 1 kg.

Contudo, o peso adquirido comercialmente apresentava alta rugosidade, a qual poderia causar grande influência ao escoamento no entorno do corpo, alterando assim a principal força excitadora do sistema, a força de arrasto de Morison (Equação 2.24).

Por conseguinte, com finalidade de diminuir a influência dessa característica, a esfera foi posta em um torno de bancada e teve a sua superfície lixada (Figura 3.3). A etapa de lixamento foi praticada de forma crescente de granulometria até que os ressaltos mais expressivos fossem retirados.



Figura 3.3 – Processo de diminuição de sobressaltos e rugosidades da esfera.

Para a representação do cabo de comportamento linear, fez-se uma associação em série de um cabo de aço revestido – de aproximadamente 2,4 mm de diâmetro com a capa externa e 1,7 mm sem a capa – com uma mola. Deste modo, foi possível manter o comportamento linear apenas para tração e minimizar a influência de arrasto no cabo, visto que a mola permaneceria fora da água.

A escolha de quais molas seriam utilizadas foi feita por um teste inicial. Dito teste teve como propósito tão somente selecionar, dentro de várias possibilidades, molas que apresentassem um alongamento, na condição estática do experimento, visivelmente menor do que a dimensão do raio da esfera de 1 kg. Como resultado, foram indicadas 2 molas, as quais posteriormente tiveram suas rigidezes determinadas por meio de experimentação.

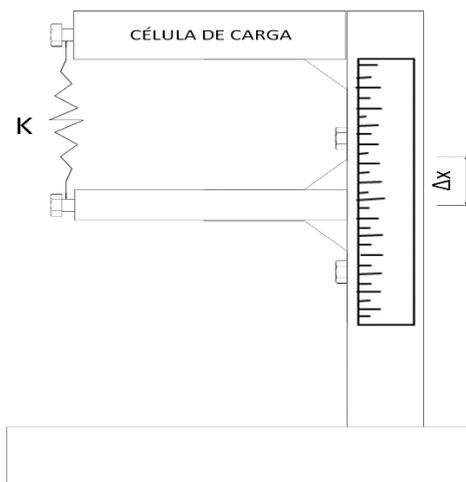


Figura 3.4 – Esquema experimental para verificação da rigidez das molas

Para a avaliação da rigidez de cada mola, utilizou-se o esquema mostrado na Figura 3.4, no qual a célula de carga foi inicialmente calibrada por meio de pesos padrões. Em seguida, foram fixadas as extremidades das molas. O cálculo foi feito marcando-se a condição de comprimento inicial – posição limítrofe, na qual a haste traciona a mola, e a célula de carga recebe o estímulo – e sequencialmente realizando leituras de força a cada avanço Δx igual a 5 mm (Figura 3.3.5).



Figura 3.3.5 – Imagem da realização do ensaio de determinação da força elástica.

Os valores de deslocamento e força foram plotados, e um ajuste linear foi realizado. Em posse dos gráficos de força por deslocamento (Figuras 3.6 e 3.7), segundo a equação para força elástica ($F_e = k \Delta x$), a rigidez da mola foi determinada pelo coeficiente angular da reta ajustada.

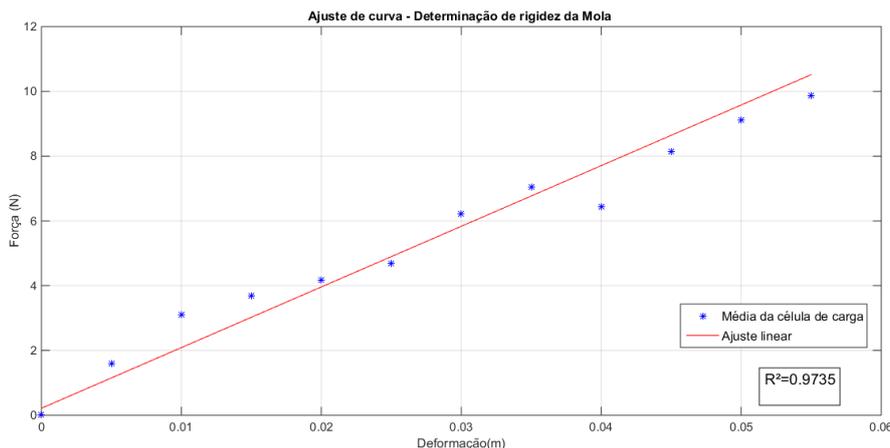


Figura 3.6 – Força x deformação com reta ajustada e correlação para mola de 187,17 N/m.

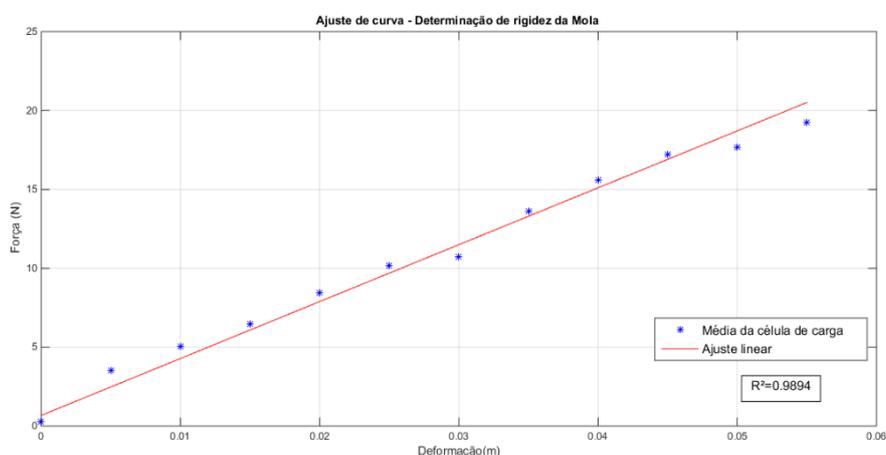


Figura 3.7 – Força x deformação com reta ajustada e correlação para a mola de 360,72 N/m.

No caso da mola da Figura 3.6, com um valor de R^2 igual a 97,35%, a constante de mola resultou em 187,17 N/m. Da mesma forma, o ajuste, na Figura 3.7, apresentou um percentual de correlação de 98,95% e uma rigidez de 360,72 N/m. Com as propriedades das molas resolvidas, optou-se também por experimentar o caso pendular não elástico ($k=100000$ N/m), apenas com o cabo de aço.

Por fim, a última variável a ser ajustada foi a profundidade. Neste caso, atentou-se sobretudo para o fato de que a esfera deveria manter-se submersa em 100% das ondas geradas. Para que essa condição fosse respeitada, o corpo deveria estar em uma profundidade mínima igual à maior amplitude de onda do experimento. Isso posto, foi verificado que, com uma profundidade igual a 20% da altura da coluna de água, tal condição era atendida, sendo esse o primeiro valor desta variável.

Considerando a Equação 2.8, junto às equações das forças excitantes da estrutura (Equações 2.29 e 2.28), observa-se que, para diferentes profundidades, são geradas diferentes intensidades de força. Em vista disso, ensaios com diferentes posições

tornaram-se necessários, de modo que mais duas profundidades (30% e 40%) também foram delimitadas para o experimento.

De posse de todas as variáveis a serem estudadas definidas (Tabela 3.2), a etapa de determinação de altura de onda foi iniciada.

Tabela 3.2 – Variações dos parâmetros de experimentação.

Mola (N/m)	Profundidade Relativa (%)	Frequência de Onda (Hz)
187,17	20	0,75
360,72	30	1,00
100000,00	40	1,25
		1,50

3.2. Determinação da Altura de Onda

Conforme mencionado, o controle da altura da onda gerada é feito de forma manual. Por isso, optou-se por fixar o batedor em apenas uma posição e colocar a velocidade característica de rotação do motor para cada período de onda (Tabela 3.2). Em seguida, foi obtido o perfil de elevação e, através deste, foi calculada a média do período e da amplitude reais em contato com a esfera.

Esse procedimento, além de precisar a altura, também diminui a possibilidade de erro durante a avaliação da resposta da estrutura em relação a uma onda monocromática. Isso porque, caso a onda sofra alguma alteração de suas propriedades no trajeto do batedor até o corpo em análise, *o wave probe* captará de modo mais fiel qual onda está tendo interação com a estrutura. Além disso, não existe uma completa uniformização de que o batedor gere todas as ondas exatamente iguais, ao contrário de uma simulação numérica.

À vista disso, o primeiro passo é executar a calibração do WP. Para tal, o instrumento apresenta marcações ao longo da haste (Figura 3.8), onde cada uma destas retorna uma voltagem relacionada a uma posição predefinida. Por exemplo, caso o nível de água esteja na ponta da haste, o sensor retornará uma tensão de 1 V, e essa voltagem corresponderá a um nível de 0 mm.

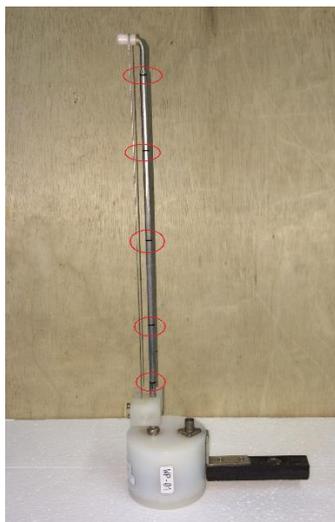


Figura 3.8 – Wave probe com marcações de elevação indicadas em círculos vermelhos.

Assim como no exemplo, a curva de resposta do instrumento é construída posicionando o nível da água em cada uma das marcações e correlacionando a voltagem de saída com os valores de referência (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Valores de referência em mm para cada marcação do WP.

Marcação	1°	2°	3°	4°	5°
Nível (mm)	0	75	175	275	350

Outro fator importante para a etapa de calibração é a temperatura da água. Isso porque, ao se executar testes durante muitas horas ao longo do dia, a temperatura da água pode ser alterada, em especial em locais de grande amplitude térmica diária, modificando assim a capacitância do sensor e o valor de voltagem de saída.

Pensando no exposto, para cada dia de experimentação eram feitas as médias dos valores voltagem colhidos antes e depois da execução do ensaio, e estes eram utilizados na construção da curva de calibração. De posse da curva, através de rotinas de programação elaboradas no MATLAB®, foi realizado o processamento dos dados de elevação, para determinar o período e a altura média das ondas.

Sabendo que a equação da elevação da onda é cossenoidal (Equação 2.2), aplicou-se, aos dados do experimento (sem parte transitória), um ajuste de série de Fourier (Equação 3.1) com truncamento no primeiro termo:

$$F(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) + b_n \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (3.1)$$

Com a série de Fourier foi possível descrever corretamente a frequência do sinal, mas não a amplitude. Portanto, utilizou-se apenas a frequência obtida por Fourier para a composição do ajuste e calculou-se a altura do sinal. Para o cálculo da altura, foi considerada a diferença da média dos valores de cristas e da média dos valores de cavas da onda.

Para uma onda monocromática, conforme pode ser visto nas Figuras 3.9 e 3.10, a curva “cosseno ajustado” descreveu melhor a onda no canal do que a função “cosseno Fourier”.

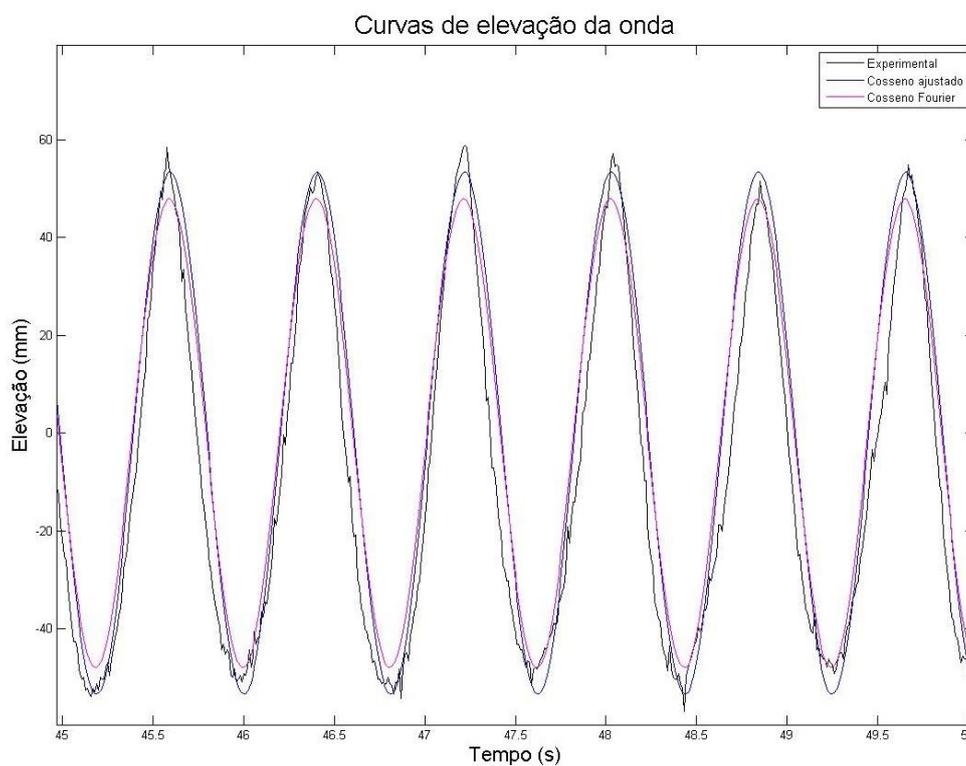


Figura 3.9 – Recorte do sinal de elevação de onda para frequência de 1,25 Hz, com os ajustes de cosseno por Fourier e também pelas diferenças das médias das cavas e das cristas.

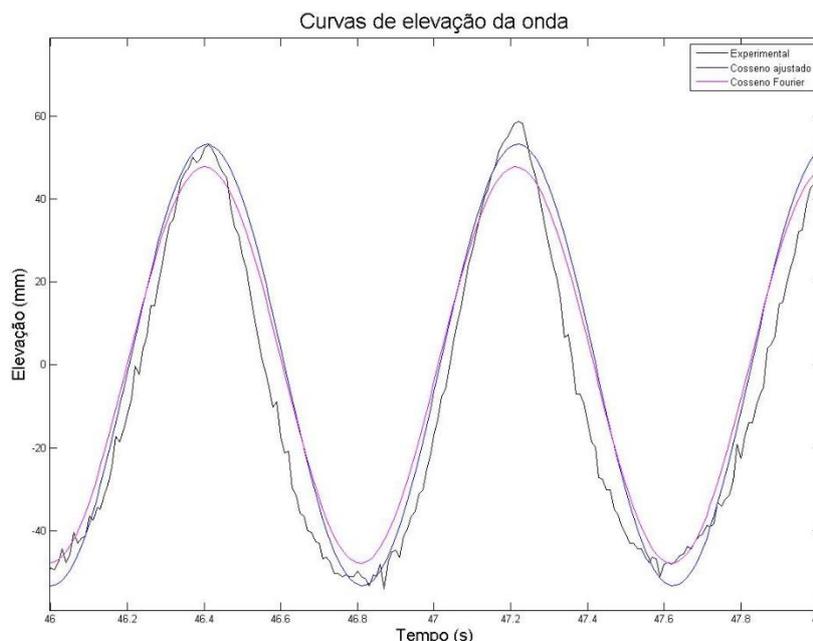


Figura 3.10 – Ampliação do recorte da onda de 1,25 Hz, com curvas de ajustes.

Após o processamento de 36 aquisições, as propriedades das ondas monocromáticas resultantes para o experimento foram estabelecidas (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Período, frequência e amplitude das ondas em contato com a esfera.

Onda	Período (s)	Frequência (Hz)	Amplitude (mm)
1	1,3347	0,749	27,35
2	1,0013	0,998	43,35
3	0,8010	1,248	48,25
4	0,6674	1,498	30,21

Vale comparar as Tabelas 3.1 e 3.4, e notar que não existiu diferença significativa entre o período desejado (consequentemente a frequência também) e o período de interação com o corpo submerso, conferindo o sistema de geração de ondas do LIFE.

3.3. Construção do Modelo

Conforme mencionado no início do capítulo, o ensaio foi composto por duas estruturas de suporte. Uma era responsável por fixar a célula de carga, mais o conjunto pendular (massa, cabo e mola), e a outra por sustentar o sensor *Wave probe*.

As estruturas foram posicionadas a cerca de 6 metros do gerador de ondas e distanciadas entre si 430 mm (Figura 3.1). Além disso, o final do canal possui uma praia dissipativa encarregada de eliminar possíveis reflexões da onda.

Ainda descrevendo a estrutura suporte do pêndulo, a célula de carga foi ligada a uma cantoneira. Essa cantoneira foi fixada com um parafuso a uma haste do suporte, permitindo, assim, a variação da altura do pêndulo e, conseqüentemente, da profundidade da esfera na coluna de água. Devido a isso, a regulagem da profundidade foi possível sem a necessidade de mudança no comprimento do pêndulo (Figura 3.11).

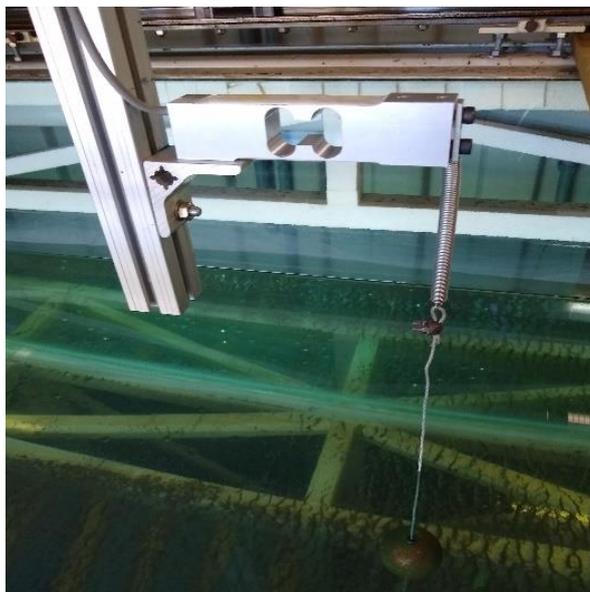


Figura 3.11 – Imagem da fixação da célula de carga e união do cabo de aço com a mola do experimento.

Junto à haste de sustentação também foram feitas as marcações para as diferentes profundidades utilizadas nos ensaios (Tabela 3.2). A fixação da massa junto ao cabo foi realizada por meio de um pequeno furo rosqueado na esfera, e o cabo, preso com um parafuso. Já a união do cabo de aço revestido com a mola foi executada com o auxílio de um grampo (Figura 3.11).

Com relação ao comprimento do pêndulo, estabeleceu-se uma dimensão de 500 mm para o composto de cabo mais mola e, somada a isso, uma medida de 11 mm referente à cabeça do parafuso utilizado para segurar a massa. Sabendo que o raio da esfera é de 31,5 mm, a distância entre o ponto de conexão da célula de carga até o centro da esfera foi de 542,5 mm.

3.4. Execução do Ensaio

As combinações utilizadas para a realização do ensaio foi de estabilizar dois dos três parâmetros e variar o terceiro, conforme a Figura 3.12. A duração de cada

experimento foi de 120 segundos, nos quais os valores brutos do WB e a força da célula de carga eram aquisitados a uma taxa de 100 amostras por segundos.

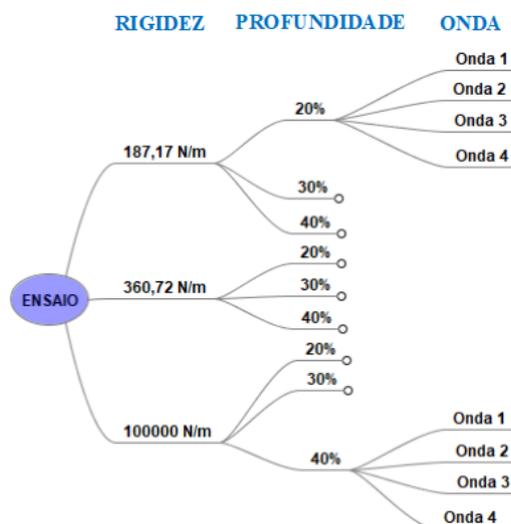


Figura 3.12 – Mapa mental da organização dos ensaios.

É importante salientar que, após cada ensaio, o corpo era recolocado na posição inicial (quando havia mudanças de profundidade ou troca de rigidez), e um período de aproximadamente 5 minutos era aguardado. Os espaços de tempo entre os ensaios foram importantes para garantir que a massa não apresentasse movimentos capazes de influenciar na resposta da próxima simulação.

Com isso, para cada um dos casos ensaiados, os seguintes procedimentos foram adotados: alocação e realocação da posição da esfera; espera para estabilização; inicialização dos sensores por meio dos dispositivos de aquisição; inicialização do sistema de geração de onda; espera do tempo total de aquisição; gravação dos dados. Após a realização de todos os testes, em posse de todos os arquivos brutos, deu-se início à etapa de processamento dos dados.

3.5. Processamento dos Dados

Durante o processamento dos dados, foram realizadas as tarefas de carregamentos dos arquivos no *software* MATLAB®, seguidas das operações de descarte da resposta transiente, a aplicação de filtro digital passa baixa, a reamostragem e a execução da transformada de Fourier.

Explicitando, logo após o carregamento dos arquivos, fez-se, então, a plotagem da tração no cabo em relação ao tempo para identificar o regime transiente do

experimento. Essa parte do processamento é importante devido ao fato de existir uma lacuna temporal entre iniciar o sistema de aquisição e ligar o gerador de onda. Além disso, existe um tempo de estabilização desde o momento em que a onda é gerada até que ela chegue, de forma regular, ao corpo em análise.

Já sem o regime transiente, o projeto do filtro digital é iniciado. O processo de filtragem é utilizado para retirar do sinal frequências ocasionadas por interferências externas às esperadas no experimento. Para o caso dos ensaios, alguns fatores podem causar tal interferência. Por exemplo, uma folga existente na união entre a cunha do batedor e o motor, ou até a própria propagação de vibração do motor através da estrutura do canal, chegando ao sistema de medição. Além disso, mesmo com os cuidados para a não reflexão de ondas nas bordas e nem no final do canal (praia dissipativa), não se pode desconsiderar, por completo, a hipótese de reflexão de onda.

Diante do exposto, como a maior excitação do corpo é ocasionada por uma onda de 1,5 Hz, o aparecimento de frequências muito acima das harmônicas dessa excitação ocorre provavelmente devido a fatores externos ao experimento. Portanto, essa influência deve ter sua resposta atenuada, por meio de um filtro passa-baixa digital.

Em filtro passa-baixa ideal, o módulo da resposta é igual a 1 para frequências normalizadas ω com módulo menor do que a frequência de corte (ω_c - Frequência média dos limites da faixa de transição) (Equação. 3.2).

$$|H(e^{j\omega})| = \begin{cases} 1, & \text{para } |\omega| \leq \omega_c \\ 0, & \text{para } \omega_c < |\omega| \leq \pi \end{cases} \quad (3.2)$$

Entretanto, em relação à resposta ao impulso, tais filtros não são diretamente realizáveis, visto que eles não possuem uma duração finita. Diante disso, o janelamento é uma aproximação para os filtros digitais com resposta ao impulso de derivação finita (FIR – *Finite Impulse Response*) [Diniz *et al.*, 2014].

Ingle e Proakis (2010) apresentam um diagrama (Figura 3.13) que ilustra bem como é feito o processo do janelamento. Além disso, indicam algumas das características importantes de serem observadas em um projeto de filtro digital. Vale lembrar que, durante uma conversão de analógico-digital o domínio do espectro passa de $-\infty \rightarrow +\infty$ para $-\pi \rightarrow +\pi$, sendo então, o espectro digital periódico.

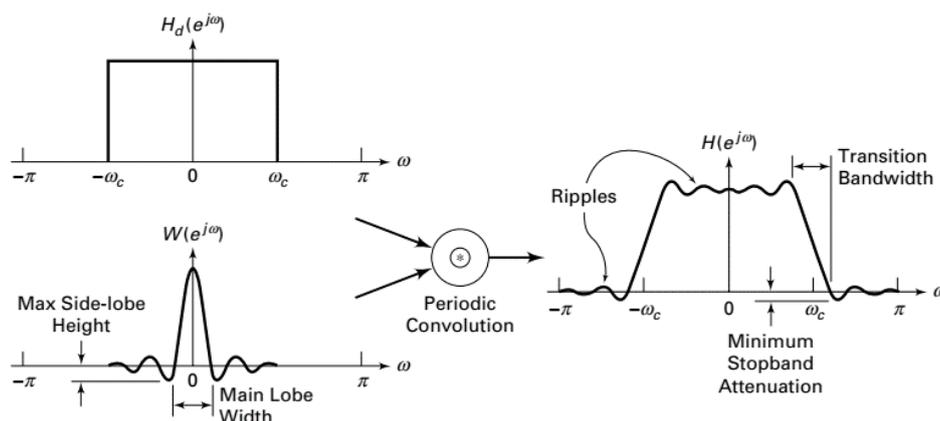


Figura 3.13 – Representação do processo de janelamento, no domínio da frequência [Ingle e Proakis, 2010].

De um modo geral, conforme pode ser observado na Figura 3.13, o janelamento (Função $W(e^{j\omega})$) possui um comprimento definido M , onde a largura do lóbulo principal “*main Lobe Width*” é igual a $1/M$. O comprimento da janela é também conhecido como a ordem do filtro, e a ordem do filtro é diretamente responsável pela largura da faixa de transição “*transition bandwidth*”, mostrada na Figura 3.13 [Ingle e Proakis, 2010].

Em resumo, quanto maior a ordem do filtro, maior o comprimento da janela e menor a largura do lóbulo principal, o que torna o filtro final melhor, ou seja, mais próximo do ideal. Além da ordem, o tipo da janela utilizada influencia na quantidade de atenuação em que as frequências indesejadas são submetidas.

Para o trabalho em questão foi utilizado o janelamento de Hamming, no qual a ordem deste filtro é usualmente definida pelo inteiro da equação a seguir [Ingle e Proakis, 2010]. Onde $\Delta\omega$ é a faixa de transição escolhida, que, para o estudo, foi adotada de 7 Hz a 8 Hz.

$$M = \frac{6,6 \pi}{\Delta\omega} \quad (3.3)$$

Após passagem do filtro, é feita a reamostragem dos dados. Essa reamostragem visa uma melhor comparação entre os modelos numérico e experimental. Isso porque os dados de saída de ambos os métodos apresentam diferentes taxas de amostragem.

A reamostragem foi realizada considerando um limite de taxa suficiente para representar o espectro das frequências, respeitando a frequência de Nyquist, para que não ocorresse o fenômeno de *aliasing* [Diniz *et al.*, 2014].

Segundo Nalon (2009), se um espectro, ao ser amostrado, contiver energia em uma frequência maior do que a metade da taxa de amostragem (Frequência de Nyquist) ocorrerá uma sobreposição entre os espectros replicados, denominada de *aliasing*. Devido a isso, foi utilizada uma taxa de reamostragem de 20 Hz, a qual garante a não ocorrência do fenômeno descrito acima, já que o processo de filtragem foi executado com ω_c igual a 7,5 Hz.

Por fim, a última fase de processamento dos sinais adquiridos durante o ensaio foi a transformada de Fourier. Essa etapa tem como objetivo passar os dados do domínio do tempo para o domínio da frequência [Nalon, 2009]. Na Figura 3.14 é possível observar o funcionamento desta operação, na qual o sinal no tempo é tratado como o somatório de ondas com frequências e amplitudes diferentes, que são representadas no espectro de frequência. Os espectros de frequência da tração no cabo serão utilizados de forma conjunta à resposta no tempo para a comparação e validação dos resultados numéricos.

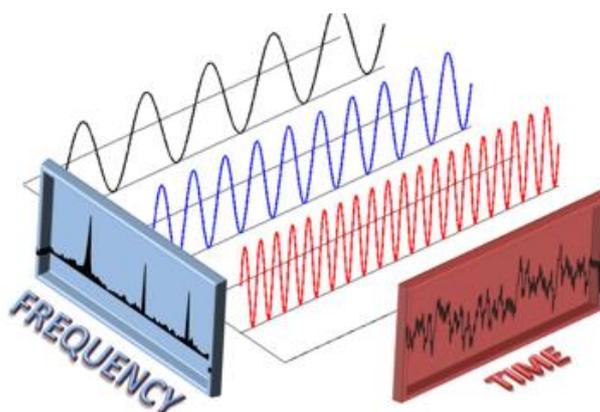


Figura 3.14 – Representação esquemática do processo da Transformada de Fourier [Amuchastegui, 2016].

A transformada de Fourier é descrita pela Equação 3.4 [Nalon, 2009]. Na qual $x[n]$ é o sinal no tempo e $e^{-j\omega n}$, uma exponencial complexa, que também pode ser reescrita como $\cos \omega n - j \sin \omega n$. No entanto, para transformadas discretas, no MATLAB®, a resolução é realizada por meio da função “fft”, onde o algoritmo aplica uma transformada rápida de Fourier (*FFT- Fast Fourier Transformation*):

$$X(\omega) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\omega n} \quad (3.4)$$

Com todo o processamento dos dados executados, a comparação, a discussão e a validação com os resultados do experimento e da simulação é apresentada no Capítulo 5.

4. MODELAGEM NUMÉRICA DA ESTRUTURA PENDULAR

No presente capítulo são expostos os procedimentos e as simplificações utilizadas para a resolução numérica do modelo experimentado no capítulo anterior. Além das considerações, também é apresentada a configuração requerida para o funcionamento do *software*, indicando a metodologia de solução.

Conforme já mencionado, a modelagem feita nesse capítulo visa reproduzir o experimento descrito no capítulo anterior. O cuidado com a simulação é fundamental, pois indica o procedimento adotado como capaz de solucionar problemas envolvendo pêndulos oscilantes sob excitações harmônicas. Da mesma forma, traz confiabilidade para que sejam feitas extrapolações visando representar a estrutura de cultivo completa.

Para a modelagem, foi utilizado o *software* MATLAB®, para cálculos preliminares das condições iniciais do problema, junto ao *solver* AQWA do ANSYS® *workbench*. O ANSYS® foi responsável pela resolução das equações de movimentos nos dois graus de liberdades apresentadas a seguir.

O desenvolvimento deste capítulo ocorre nas seguintes seções: O *software*; Construção do modelo; Convergência de refino de malha; Validação do *time step*; Execução das simulações.

4.1. O *Software*

A escolha do AQWA deu-se após uma pesquisa bibliográfica por *softwares* capazes de solucionar equações de movimentos de estruturas expostas a carregamentos de ondas. Para isso, considerou-se que o programa deveria ser capaz de quantificar os dois principais carregamentos hidrodinâmicos ocasionados por ondas, citados no capítulo 2. Outra consideração é que o *software* deveria ser capaz de incorporar forças prescritas e/ou modelos de amarração e ancoragem, como forma de fixação dos corpos imersos no fluido. Finalmente, após uma comparação final entre os *softwares* pesquisados, OrcaFlex®, ABAQUS® e ANSYS®, em virtude da disponibilidade de licença, foi escolhido o ANSYS AQWA®.

O *solver* AQWA é dividido em duas partes, o *Hydrodynamic Diffraction* (HyD) e o *Hydrodynamic Response* (HyR), que se comunicam através do *workbench* do ANSYS®. Além desta ligação, a interface possibilita ainda a junção com outros *solvers*,

como o *Static Structural*, responsável por fazer análises estruturais estáticas utilizando o método dos elementos finitos (Figura 4.1).

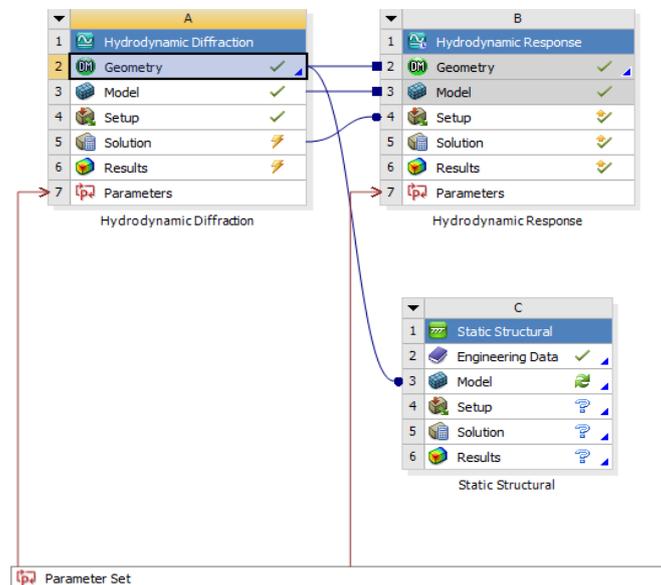


Figura 4.1 – Configuração do ANSYS Workbench. Com os *solver (Toolbox) Hydrodynamic Diffraction, Hydrodynamic Response, Static Structural* e o bloco de variações paramétricas *Parameter Set*.

Todas as informações desta seção que dizem respeito a atribuições dos *solvers* foram retiradas dos manuais teórico, referencial e do usuário [ANSYS, 2017a; ANSYS 2017b; ANSYS 2017c]. Sendo assim, de acordo com o manual do usuário, o *Hydrodynamic Diffraction* é encarregado de calcular parâmetros hidrodinâmicos primários. Um exemplo disto é a matriz de massa adicional e efeitos de interação de radiação e difração de ondas para diversas estruturas. Somado a isso, o cálculo das forças de ondas de segunda ordem, por meio de matrizes de funções de transferências quadráticas, permite ao *solver* ser aplicado em uma maior faixa de profundidades.

Além do mais, como dito anteriormente, o HyD pode também executar o cálculo de carga de pressão e forças inerciais para o uso de uma posterior análise estrutural, em um projeto de casco de embarcações, por exemplo.

Já o módulo *Hydrodynamic Response* fornece recursos de análises dinâmicas no domínio do tempo, com possibilidade de inserção de uma ampla variedade de conexões físicas e ancoragens para modelar restrições impostas aos corpos. Dentro do HyR também é possível a incorporação, além de ondas regulares lineares e de segunda ordem, de condição de corrente, vento e qualquer força prescrita.

Uma das grandes aplicabilidades do HyR é no tocante a estudos transitórios, no qual pode-se impor uma condição inicial de posicionamento e simular casos de estados de mar extremos. O posicionamento das estruturas é desenvolvido em dois referenciais: o global, onde o nível da água, sem ondas, é definido sempre no plano XOY ; e um referencial local, definido no centro de massa da estrutura (x,y,z) (Figura 4.2).

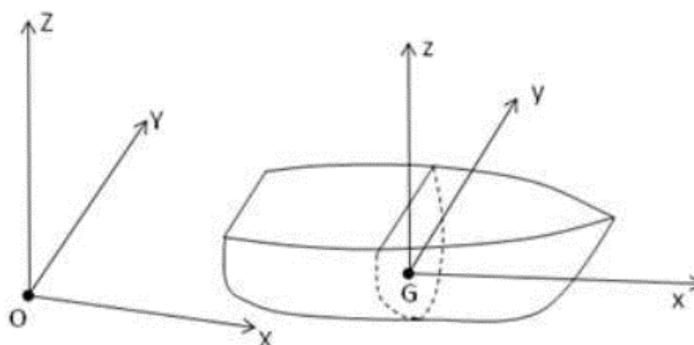


Figura 4.2 – Representação do sistema de referência global com letras maiúsculas (esquerda) e local, no centro de gravidade, com letras minúsculas (direita) [ANSYS, 2017b].

O usuário do programa, então, é responsável por posicionar a estrutura na coluna de água, indicando se o corpo é livre para mover-se, ou se está fixo. A título de exemplo, um pilar fixo de torre eólica *offshore*. Além disso, deve-se informar o centro de massa da estrutura e seus respectivos momentos de inércia, podendo deixar a cargo do *software* o cálculo da massa para um equilíbrio hidrostático (condição inicial). É permitido, ainda, definir a massa para representar um desequilíbrio como condição inicial.

O AQWA, para aplicação dos carregamentos na estrutura, faz uso de um algoritmo híbrido. Neste algoritmo os componentes de grandes volumes (em relação ao comprimento de onda) são tratados pelo método dos painéis (MP). Já para os elementos de pequena seção transversal são utilizados elementos de Morison.

Segundo Wilson (2003), a dinâmica de corpos rígidos e os movimentos dos fluidos são governados por diferentes forças externas e momentos, bem como por inércia do próprio corpo. Por isso, na dinâmica, essas forças não devem ser consideradas como atuantes em um único ponto, e sim de maneira distribuída sobre a superfície do corpo.

Diante disso, por meio do método dos painéis são solucionados principalmente os carregamentos de difração e de Froude-Krylov, através da função de escoamento potencial. Para os elementos de Morison (Equação 2.28) é feita uma etapa de linearização do termo quadrático, da velocidade.

Nesse sentido, de acordo com Vargas (2006), o método dos painéis trata-se de um método de elementos de contorno, que teve seu desenvolvimento fortemente impulsionado pelos trabalhos de Hess e Smith em 1966. Este método é uma ferramenta de solução aplicada à teoria dos escoamentos potenciais, onde a formulação matemática é dada pela equação de Laplace (Equação. 4.1).

$$\Delta^2 \phi = 0 \quad (4.1)$$

As hipóteses simplificativas para a expressão acima consideram um escoamento estacionário, incompressível e irrotacional, condições que se verificam em um escoamento do fluido em questão [Arriaga e Chaves, 2012]. No MP o efeito de separação é negligenciado. Além disso, o método permite reduzir a ordem do problema da condição volumétrica para superfícies, utilizando-se da identidade do teorema de Green [Journeé e Massie, 2001].

No HyD, na Equação 4.1, o potencial $\phi(X, t)$ é reescrito de forma a isolar a dependência do tempo $\phi(X)$, resolvendo de forma instantânea a cada passo de integração (Equação. 4.3).

$$\Delta^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial Z^2} = 0 \quad (4.2)$$

Assim como em Fonfach (2017), o cálculo das forças e momentos no AQWA, após a geração de malha e a determinação das pressões de onda incidente, é realizado por meio da expressão 4.3:

$$F_{ext} = \sum_{i=1}^{n_p} P_i^{t+1} \overrightarrow{n_i^{t+1}} \Delta S_i \quad (4.3)$$

Onde F_{ext} é a força externa aplicada em cada painel i , P_i^{t+1} é a pressão hidrodinâmica instantânea, $\overrightarrow{n_i^{t+1}}$ é o vetor normal à área do painel ΔS .

Conforme a Figura 4.3, o cálculo da área e o vetor normal são dados em coordenadas locais (*LSA - Local Systems Axes*), com origem no centro de gravidade (COG). Em seguida, tais valores são transformados por meio de uma matriz de rotação de Euler, levando-os para o sistema de referências global.

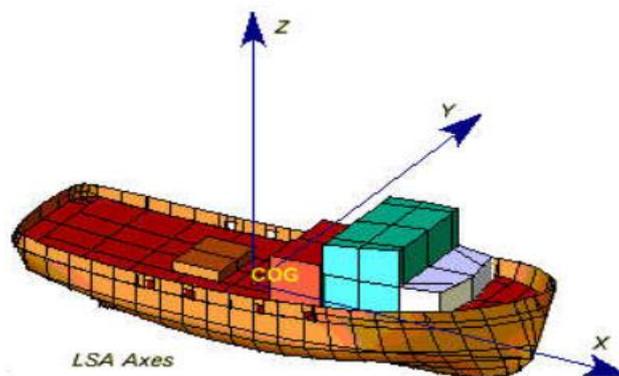


Figura 4.3 – Representação dos painéis, com o sistema de referência local para uma embarcação [Retirado de ANSYS 2017a].

Conhecendo o processo para o cálculo das forças (Difração, Froude-Krylov, Morison), elas são então incorporadas às condições de contorno de restrição (Cabos lineares, Juntas, Catenárias e outras) e agrupadas na equação de movimento para que o *Hydrodynamic Response* a solucione a cada passo de integração.

Dentre os diversos tipos de amarração, na simulação, foram utilizados cabos lineares, os quais possuem comportamento expresso pela Equação 4.4. É importante dizer que, para esse tipo de cabo, o *software* não contabiliza a massa e nem o arrasto.

$$T = \begin{cases} 0, & eL \leq l_0 \\ k(l_f - L_0), & eL > l_0 \end{cases} \quad (4.4)$$

Na Equação 4.4, k é a rigidez, l_f o comprimento deformado e l_0 o comprimento inicial do cabo. Devido a esse comportamento, no capítulo anterior já se pensou em manter o cabo sempre sob tração.

De forma semelhante ao elaborado no Capítulo 2, a equação do movimento a ser resolvida no tempo pelo *solver* é dada a seguir.

$$\mathbf{MA} = \mathbf{F} - \mathbf{KU} \quad (4.5)$$

Na equação, \mathbf{M} é a matriz de massa estrutural mais a massa adicional, \mathbf{A} é o vetor de aceleração desconhecido, \mathbf{F} é o vetor de forças externas, nas quais são somadas as forças hidrodinâmicas e as forças da amarração. Além disso, \mathbf{K} é a matriz de rigidez e \mathbf{U} , o vetor de deslocamento.

É importante salientar que, para o cálculo das forças de Morison (Equação 2.28) são utilizados os valores de velocidade relativa entre o fluido e o corpo. Portanto, a cada passo de integração o sistema da Equação 4.5 é retroalimentado. Para a resolução deste sistema o solver faz uso de uma formulação semi-implícita de dois estágios.

Assim sendo, após uma breve exposição do funcionamento do *software*, são expostas algumas limitações do mesmo. A primeira limitação é que o foco principal do AQWA é direcionado para estruturas grandes e, por isso, apresenta uma impossibilidade de simular corpos com massas menores do que 1 kg.

Outra grande limitação diz respeito à geração de malha. Isso porque, mesmo o AQWA permitindo o processo de malhagem fora do seu bloco, apresenta inconsistências, dependendo da ferramenta utilizada para uma construção de malha mais controlada (ao menos na versão 18.0, utilizada para este trabalho). Deste modo, o uso do gerador de malha interno, torna-se mais convidativo. Porém, este gerador não oferece tantas possibilidades caso o usuário queira malhar estruturas de diferentes tamanhos. Não obstante, esta não foi uma grande limitação para o estudo em questão.

4.2. Construção do Modelo

Visando a extinção de erros de escala durante as comparações, buscou-se a construção de um modelo numérico de forma a reproduzir as dimensões e os parâmetros experimentados. Assim, as variações dos parâmetros utilizados foram as mesmas da Tabela 3.4. Além destes parâmetros, o domínio da água também foi idêntico ao canal de ondas, no qual foram realizados os experimentos (Figura 4.4).

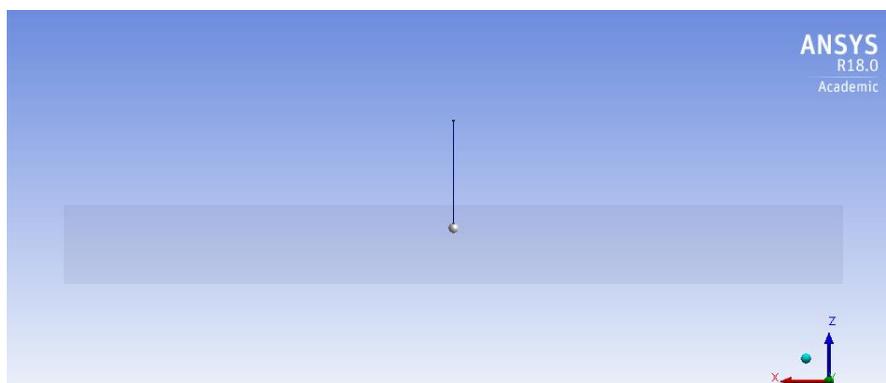


Figura 4.4 – Modelo reproduzido no AQWA com esfera a uma profundidade relativa de 20%.

A seguir, é desenvolvida a equação de movimento, considerando os esforços de Morison e Froude-Krylov, conforme apresentado no Capítulo 2, com auxílio do parâmetro de Ursell (Equação 2.15), KC (Equação 2.23) e o diagrama de aplicação de forças (Figura 2.10). A elaboração das equações diferenciais é importante pois auxilia no entendimento e na avaliação da resposta obtida por meio do AQWA.

4.2.1. Equacionamento

A primeira parte do equacionamento diz respeito às forças hidrodinâmicas aplicadas somente à estrutura esférica, visto que o arrasto sobre o cabo é desconsiderado no modelo. Na força de Morison, para uma estrutura livre à movimentação (Equação 2.27), o passo inicial a ser executado é de linearização do termo quadrático do arrasto. Segundo Chakrabarti (1987), em concordância com Borgman (1967), embasamento teórico utilizado pelo *software*, a equação linearizada resultante é:

$$F_m = C_M A_l \dot{u} - C_A A_l \ddot{x} + C_D A_D \alpha u_{rms} u - C_D A_D \alpha \dot{x}_{rms} \dot{x} \quad (4.6)$$

$$F_m = C_M A_l \dot{u} - C_A A_l \ddot{x} + C_D A_D \alpha (u_{rms} u - \dot{x}_{rms} \dot{x}) \quad (4.7)$$

Na qual, $\alpha = \sqrt{\frac{8}{\pi}}$ é um fator multiplicativo, e u_{rms} e \dot{x}_{rms} são as raízes das médias quadráticas das velocidades (*RMS - Root Mean Square*). De forma semelhante, o processo é aplicado para a componente vertical.

Dando seguimento, a integração da pressão dinâmica sobre a superfície da esfera submersa é realizada (Equações 2.29 e 2.30). Nela, o contorno da geometria é definido inicialmente em coordenadas polares (Equações 4.8 e 4.9):

$$x = R \sen \theta \cos \psi \quad (4.8)$$

$$ds = R^2 \sen \theta d\theta d\psi \quad (4.9)$$

Onde, θ e ψ são respectivamente os ângulos com a horizontal e vertical, R , o raio da esfera e ds , o diferencial de superfície. Substituindo o vetor normal e o diferencial, a Equação 2.29 é reescrita como:

$$F_{fkx} = C_H \iint_s P R^2 \sen \theta^2 \cos \psi d\theta d\psi \quad (4.10)$$

Substituindo ainda a pressão dinâmica (Equação 2.12) e executando a integração de θ e ψ de 0 à 2π , o resultado da força pode ser expresso em função do volume do corpo V e da aceleração horizontal da partícula \dot{u} [Chakrabarti, 1987]:

$$F_{fkx} = C_H \rho V \dot{u} \quad (4.11)$$

Diante do exposto, as forças externas atuantes sobre a esfera, em cada uma das direções, são o somatório das Equações 4.6 e 4.11, resultando nas expressões de força horizontal e vertical, respectivamente:

$$F_{extx} = (C_H \rho V + C_M A_l) \dot{u} - C_A A_l \ddot{x} + C_D A_D \alpha u_{rms} u - C_D A_D \alpha \dot{x}_{rms} \dot{x} \quad (4.12)$$

$$F_{extz} = (C_V \rho V + C_M A_l) \dot{w} - C_A A_l \ddot{z} + C_D A_D \alpha w_{rms} w - C_D A_D \alpha \dot{z}_{rms} \dot{z} \quad (4.13)$$

Determinado o carregamento externo, inicia-se a elaboração da equação de movimento para um pêndulo elástico. O método empregado na obtenção da equação diferencial é através da formulação de Euler-Lagrange segundo tipo (Equação 2.33) [Meirovitch, 2001].

Tendo como base a Figura 4.5 e amparado em Zammit *et al.* (2018), as energias potenciais (elástica e gravitacional), cinética e o Lagrangiano para a massa em questão são definidos respectivamente pelas Equações 4.18, 4.16, 4.15 e 4.20. Onde, g_{ap} é a gravidade aparente, obtida através do peso aparente (diferença entre o peso e o empuxo); g_{ap} é função da massa específica do fluido ρ , massa do corpo m , gravidade g e o volume V (Equação 4.17). Além destas, a variável l_0 representa o comprimento indeformado do cabo e k a rigidez dele.

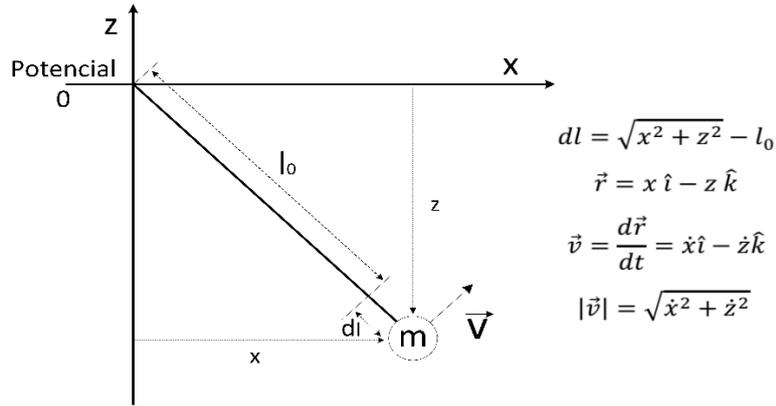


Figura 4.5 – Representação da massa com o referencial adotado na determinação das energias.

$$E_c = \frac{1}{2} m |v|^2 \quad (4.14)$$

$$E_c = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{z}^2) \quad (4.15)$$

$$E_{pg} = m g_{ap} z \quad (4.16)$$

$$g_{ap} = g \left(1 - \frac{\rho V}{m} \right) \quad (4.17)$$

$$E_{pe} = \frac{1}{2} k (\sqrt{x^2 + z^2} - l_0)^2 \quad (4.18)$$

$$L_{ag} = \sum E_c - (\sum E_{pg} + \sum E_{pe}) \quad (4.19)$$

$$L_{ag} = \frac{1}{2} m (\dot{x}^2 + \dot{z}^2) - \frac{1}{2} k \left[(x^2 + z^2) - 2\sqrt{x^2 + z^2} l_0 + l_0^2 \right] - m g_{ap} z \quad (4.20)$$

Utilizando o *software* WxMaxima®, as derivadas da formulação de Euler-Lagrange (Equação 2.33) foram obtidas para os graus de liberdade x e z , resultando nas expressões a seguir.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{ag}}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial L_{ag}}{\partial x} = Q_x \Rightarrow m \ddot{x} + k \left(x - \frac{l_0 x}{\sqrt{x^2 + z^2}} \right) = F_{extx} \quad (4.21)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L_{ag}}{\partial \dot{z}} \right) - \frac{\partial L_{ag}}{\partial z} = Q_z \Rightarrow m\ddot{z} + k \left(z - \frac{l_0 z}{\sqrt{x^2 + z^2}} \right) + g_{ap} m = F_{extz} \quad (4.22)$$

Substituindo as forças externas (Equações 4.12 e 4.13) e rearranjando os termos, com o objetivo de escrever as expressões no formato de um sistema massa-mola-amortecedor (Equação 2.34), a equação do movimento para cada grau de liberdade é apresentada abaixo.

$$\begin{aligned} (m + C_A A_l) \ddot{x} + (C_D A_D \alpha \dot{x}_{rms}) \dot{x} + \left(k - \frac{kl_0}{\sqrt{x^2 + z^2}} \right) x \\ = \\ (C_H \rho V + C_M A_l) \dot{u} + C_D A_D \alpha u_{rms} u \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} (m + C_A A_l) \ddot{z} + (C_D A_D \alpha \dot{z}_{rms}) \dot{z} + \left(k - \frac{kl_0}{\sqrt{x^2 + z^2}} \right) z \\ = \\ (C_V \rho V + C_M A_l) \dot{w} + C_D A_D \alpha w_{rms} w - mg_{ap} \end{aligned} \quad (4.24)$$

Reescrevendo na força matricial.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B \dot{x}_{rms} & 0 \\ 0 & B \dot{z}_{rms} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ z \end{Bmatrix} \\ = \\ \begin{bmatrix} A_H & 0 \\ 0 & A_V \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} B \dot{u}_{rms} & 0 \\ 0 & B \dot{w}_{rms} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ w \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ P_{ap} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Sendo:

$$\begin{aligned} M &= m + C_A A_l & A_H &= C_H \rho V + C_M A_l \\ B &= C_D A_D \alpha & A_V &= C_V \rho V + C_M A_l \\ K &= k \left(1 - \frac{l_0}{\sqrt{x^2 + z^2}} \right) & P_{ap} &= mg_{ap} \end{aligned}$$

Diante do sistema matricial, é possível observar a separação do movimento do corpo (lado esquerdo) e a da partícula teórica da onda (lado direito). Além disso, nota-se que a matriz de massa é composta pela soma da massa estrutural com uma parcela

denominada de massa adicional. Essa parcela não deve ser entendida como uma massa física acrescentada ao sistema, e sim como um efeito de inércia ocasionado pela aceleração relativa do corpo [Faltinsen, 1990]. Por fim, observa-se o surgimento de uma matriz de amortecimento, ocasionada pelo fenômeno de arrasto.

Para a resolução do modelo, os valores das constantes do problema a serem inseridos no AQWA são apresentados a seguir.

4.2.2. Definição das Constantes

O posicionamento da esfera foi inicialmente inserido com as profundidades em análise (40%; 30% e 20%), sem considerar o deslocamento estático na condição inicial. Entretanto, a diferença para o equilíbrio gerava uma carga impulsiva que interferia na resposta, fazendo que o corpo demorasse a atingir o regime permanente.

Sendo assim, foram feitos cálculos para determinar o deslocamento estático das duas molas menos rígidas e posicioná-las em uma condição inicial, com o cabo já tracionado. O deslocamento estático para os cabos em questão foi determinado por meio da razão entre o peso aparente e a rigidez da mola, expressados na tabela a seguir (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Propriedades do pêndulo, utilizadas na modelagem numérica.

PROPRIEDADES			
Esfera		Cabo	
Diâmetro	63 mm	l_0	511 mm
Massa	1 kg	$\Delta_{est}C_1$	45,37 mm
$I_{xx} = I_{yy} = I_{zz}$	$3,969 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$	$\Delta_{est}C_2$	23,56 mm
Peso Aparente	8,4935 N		

Onde I_{xx} , I_{yy} e I_{zz} , são os momentos de inércia, l_0 , o comprimento inicial do cabo, $\Delta_{est}C_1$, o deslocamento estático para o cabo de rigidez igual a 187,17 N/m, e $\Delta_{est}C_2$, o deslocamento estático para o cabo de 360,72 N/m. Com todos os valores definidos, deu-se início então ao processo de convergência do refino de malha.

4.3. Convergência de Refino de Malha

Na modelagem numérica, o processo de geração de malha é fundamental para a qualidade e a convergência dos resultados. Conhecendo o funcionamento do *software* e como são aplicadas as equações dominantes do fenômeno, essa importância fica ainda mais evidente.

De acordo com Journée e Massie (2001), a melhor forma de encontrar o número ideal de painéis é realizando seguidas simulações com o acréscimo de elementos, até o ponto em que os resultados converjam, de modo a encontrar o refino de malha correto. Diante disso, neste trabalho, o processo de convergência de malha desenvolveu-se por meio da solução hidrostática do HyD. Onde, após o desenho assistido por computador (*CAD - Computer-Aided Design*), a superfície da esfera foi dividida em painéis (malha).

A primeira etapa de resolução do AQWA diz respeito ao equilíbrio hidrostático, no qual, o usuário pode deixar como responsabilidade do *software* a determinação da massa do corpo para o equilíbrio na posição desejada. Para isso, o HyD realiza uma integração da pressão em cada um dos painéis, malhados sobre a superfície e calcula a massa do corpo. Justamente, utilizando este mecanismo, a análise de convergência foi executada.

Empregando algumas ferramentas de construção de malha, foram feitos seguidos refinamentos, conforme a Figura 4.6, e as massas retornadas foram salvas.

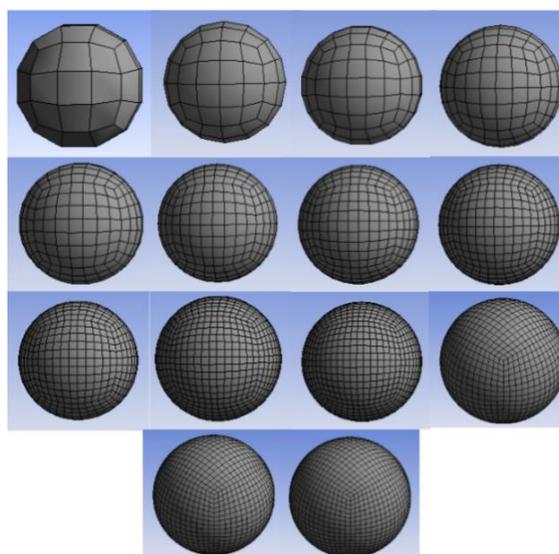


Figura 4.6 – Montagem com a superfície da esfera após cada etapa de refinamento.

De posse das massas, foi determinado o erro percentual entre o valor retornado pelo *solver* e o valor obtido de forma analítica. Tais valores foram plotados em relação ao número de elementos de cada refino, até o momento em que o erro estabilizado fosse menor do que 1% (Figura 4.7).

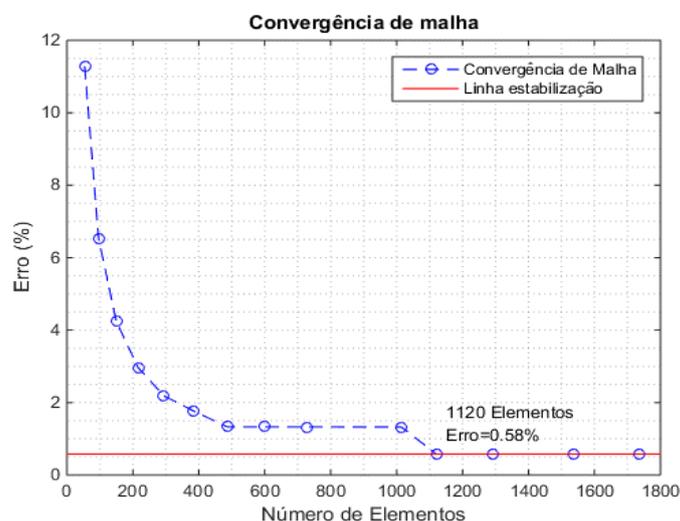


Figura 4.7 – Convergência de malha, na qual o refino desejado foi alcançado com a quantidade de 1120 elementos.

Diante disso, a quantidade de elementos considerada ideal foi de 1120. Por fim, a configuração utilizada para a geração da malha ideal foi de mínima dimensão de elemento igual a 0,0006 m e de face máxima igual a 0,0028, apenas para elementos quadriláteros.

Details	
[-] Details of Mesh	
[-] Defaults	
Control Type	Advanced Controls
[-] Mesh Parameters	
Maximum Allowed Frequency	7.602 Hz
Meshing Type	Program Controlled
[-] Sizing	
Relevance	0
Advanced Size Function	Curvature
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	Medium
Span Angle Centre	Coarse
Curvature Normal Angle	30 °
Minimum Size Definition	Manual Definition
Minimum Size	0.0006 m
Maximum Face Size Definition	Manual Definition
Maximum Face Size	0.0028 m
Growth Rate Definition	Program Controlled
Growth Rate	1.2
Minimum Edge Length	-1 m
[-] Inflation	

Figura 4.8 – Aba de construção de malha no AQWA, com parâmetros configurados para 1120 elementos.

4.4. Definição do *Time Step*

Seguido do estudo de convergência de malha, foi realizada a etapa de validação do passo de integração, utilizado no HyR. Para esta fase, foi necessária a escolha de uma das combinações a serem simuladas, a fim de ser testada quanto à convergência dos resultados em relação ao tempo.

Os parâmetros utilizados para esta verificação foram de profundidade igual a 0,2 m (40%), cabo de rigidez de 360,72 N/m, ação de onda de 1,25 Hz (Onda 3) e com o restantes dos valores, iguais à Tabela 4.1, sem o deslocamento estático.

De acordo com o manual do usuário [ANSYS, 2017c] o *time step* máximo recomendado é em torno de um décimo do período de onda utilizado na simulação. Com isso, iniciou-se o processo com um passo de integração de 0,15 s, ou seja, cerca de 1/10 do maior período a ser simulado (Onda 1). Porém, para este valor não foi possível obter a convergência da simulação, o que está em consonância ao manual, visto que a onda utilizada nesta simulação (Onda 3) apresenta um período de 0,8010 s.

O primeiro valor do passo de integração a alcançar convergência dos resultados foi de 0,01 s. Após, foram feitos seguidos decrementos no tempo, até o momento em que visivelmente a resposta da estrutura em relação à posição z não se modificasse com o *time step* (Figura 4.9).

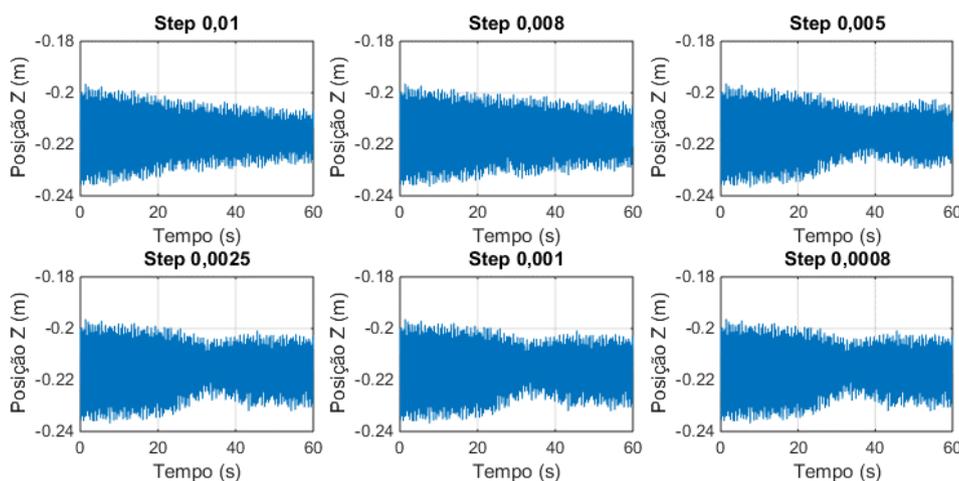


Figura 4.9 – Posição da esfera em relação à coordenada “z” para diferentes *time step*.

Com a visualização dos gráficos (Figura 4.9), é possível avaliar que, a partir do passo de 0,0025 segundos, a resposta da estrutura não sofre alteração. Diante do exposto,

definiu-se que tal valor é suficientemente pequeno para representar as oscilações do corpo e conseqüentemente, calcular de forma adequada a tração no cabo.

Diante das condições de malha e *time step* determinadas, todos os parâmetros para que as simulações sejam executadas foram definidos. Assim sendo, o próximo estágio de operação do estudo é a execução das simulações.

4.5. Execução das Simulações

De forma similar ao ocorrido durante o processo de experimentação, as simulações foram realizadas sequencialmente com as variações paramétricas da Figura 3.12. Para as variações paramétricas das ondas, foi utilizado o *toolbox* “*Parametre Set*” (Figura 4.1) no qual é possível a inserção de diversos valores de uma variável a ser modificada entre as simulações. Esse arranjo permite ao usuário rodar mais casos, configurando apenas uma vez a simulação, e diminuindo assim o tempo necessário para a execução da tarefa.

A modelagem numérica teve como tempo total de duração 200 segundos. Considerando o passo de integração de 0,0025, o programa seria então responsável por calcular o valor da tração no cabo para 80.0000 passos a cada nó dos 1120 elementos quadriláteros da malha.

Os arquivos contendo os valores de tração no cabo do pêndulo elástico foram salvos em formato de texto, para posteriormente serem carregados juntos ao MATLAB®. Neste *software* os dados são levemente processados, com o objetivo de serem melhor comparados aos arquivos oriundos da modelagem experimental.

A primeira etapa do processamento tem como objetivo retirar possível resquício de regime transiente, ocasionado por uma diferença numérica no posicionamento do corpo e também no processo de geração de ondas do *solver* Hyd. Além disso, os dados também são filtrados, reamostrados e uma FFT é executada. Finalmente, os dados são plotados junto aos arquivos dos ensaios e comparados. Essa comparação é responsável por validar a modelagem numérica desenvolvida e permitir a extrapolação para o caso da estrutura de ostreicultura.

5. VALIDAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

Tendo em vista os resultados dos modelos, este capítulo discorre sobre a validade dos procedimentos utilizados no ANSYS® AQWA para solucionar problemas envolvendo pêndulos elásticos imersos em água, conforme equacionado no Capítulo 4. Esta validação é feita por meio de uma análise comparativa entre os 36 casos, distribuídos em três tipos de gráficos. Além das respostas de tração em relação ao tempo, são utilizadas as respostas em frequência e frequência em escala logarítmica. O gráfico logarítmico torna-se importante para a avaliação de frequências de escalas diferentes da frequência dominante, as quais muitas vezes não são visíveis em outros gráficos.

Concomitante a isso, do mesmo modo, são discorridos aspectos associados aos fenômenos físicos, às fontes de interferência nos resultados, às modificações resultantes do processamento, entre outros. Como forma de padronizar e de tornar a avaliação das respostas menos subjetiva, elaborou-se um sistema de nota, atribuída à qualidade na comparação entre os resultados.

Nesta avaliação, as notas utilizadas foram: 1 - Muito ruim; 2 - Ruim; 3 - Regular; 4 - Bom; 5 - Muito bom. Na avaliação dos resultados, um padrão para atribuição das notas foi identificado. Para este padrão, nenhum dos casos foi avaliado como “muito ruim”. Com isso, as notas atribuídas variaram de 2 a 5. Todos os gráficos podem ser visualizados no Apêndice A. Ao final da avaliação dos 106 gráficos, um cálculo de média é realizado, para indicar, de forma global, um parecer qualitativo sobre os casos estudados (Quadro 5.1).

Nota média (N_m)	Qualidade
$N_m < 1,5$	Muito ruim
$1,5 \leq N_m < 2,5$	Ruim
$2,5 \leq N_m < 3,5$	Regular
$3,5 \leq N_m < 4,5$	Bom
$4,5 \leq N_m$	Muito bom

Quadro 5.1– Correspondência da nota média com a qualidade dos resultados de forma geral.

O padrão utilizado para avaliar cada cenário dos resultados no tempo, na frequência e também na frequência em escala logarítmica é apresentado nos quadros a seguir. É importante salientar que, além dos padrões identificados, devido à grande

variação paramétrica, tais modificações podem interferir de forma diferente nos resultados e, conseqüentemente, nas qualificações. Por isso, o sistema utilizado para a avaliação não tem como função quantificar estatisticamente uma correlação entre os resultados.

5.1. Avaliação no Domínio do Tempo

Nesta seção, e também nas duas seguintes, são apresentados os quadros com os padrões utilizados durante as avaliações dos resultados de oscilação na força de tração no cabo do pêndulo. Além dos quadros, alguns casos analisados são expostos, como exemplo, para um completo entendimento da tarefa realizada e também para a discussão sobre os fenômenos físicos envolvidos. O quadro a seguir elucida os fatores considerados durante o procedimento.

Nota	Padrão de análise.
1	Quando os dados não aparentam nenhuma semelhança em relação aos períodos das oscilações, e os sinais apresentam amplitudes em escalas diferentes, indicando fenômenos completamente diferentes entre a simulação e o experimento.
2	Cenário em que as oscilações da carga indicam períodos predominantes diferentes entre os resultados.
3	Situação na qual os gráficos demonstram um período predominante igual. Entretanto, os dados destoam com relação a fenômenos físicos diferentes dos períodos de excitação da onda e harmônicas. Como exemplo, possível fenômeno de batimento.

4	Caso em que os períodos dominantes do evento são iguais, porém apresentam uma diferença com relação à amplitude da força.
5	Caso considerado de ótima relação. No qual os dados apresentam ótima correlação no período e também na amplitude.

Quadro 5.2 – Padrões de análise dos resultados do domínio do tempo.

Conforme já mencionado, durante a análise dos gráficos de tração no cabo, nenhuma avaliação foi mensurada como “muito ruim”. Devido a isso, os exemplos apresentados possuem notas variando de 2 a 5. Com o objetivo de explicitar os padrões do Quadro 5.2, as Figuras 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4 são discutidas.

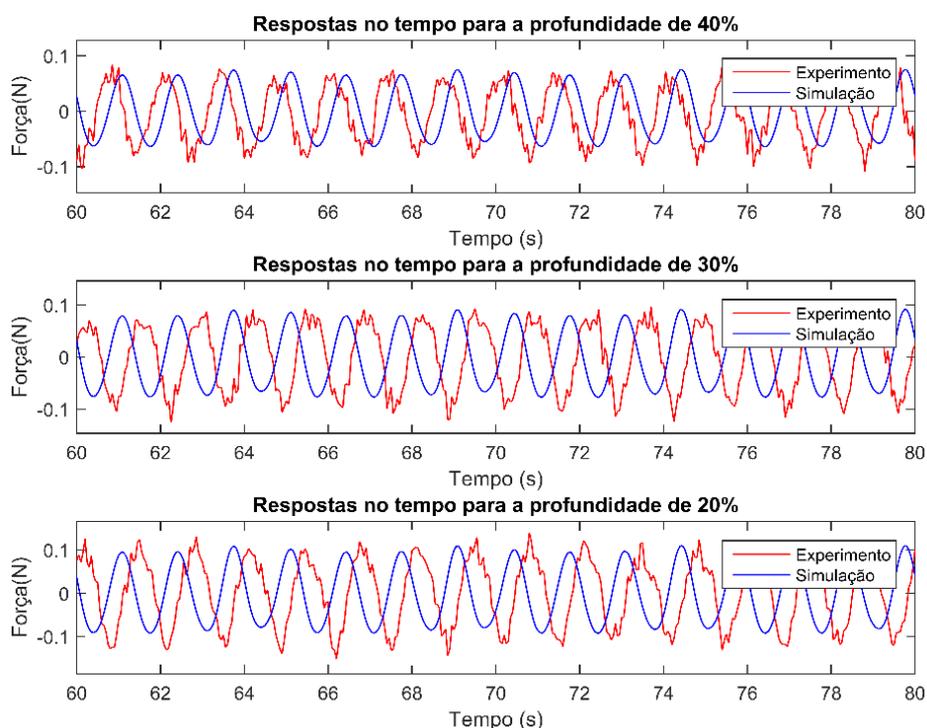


Figura 5.1 – Ampliação da resposta do pêndulo de rigidez igual a 100000 N/m, excitado por onda 1 (0,75 Hz) para as distintas profundidades.

Na Figura 5.1, as oscilações nas forças apresentam períodos predominantes iguais, nos quais as amplitudes para as três diferentes profundidades também são bem semelhantes, configurando assim a delegação da nota 5. No que concerne à defasagem entre os dois sinais, é importante dizer que ela ocorre por conta de uma diferença entre a

posição inicial da aquisição dos dados do experimento, em relação ao modelo numérico e não a uma diferença no comportamento da resposta.

Um dos casos que obtiveram conceito igual a 4 foi do cabo com rigidez 2 (360,72 N/m), onda 3 (1,25 Hz), em uma profundidade 40% (Figura 5.2). Esta situação apresenta somente uma pequena diferença no que tange à amplitude. O período dominante, bem como oscilações secundárias demonstram mesmo valor. O que pode ser confirmado com auxílio do gráfico de resposta em frequência do Apêndice A.

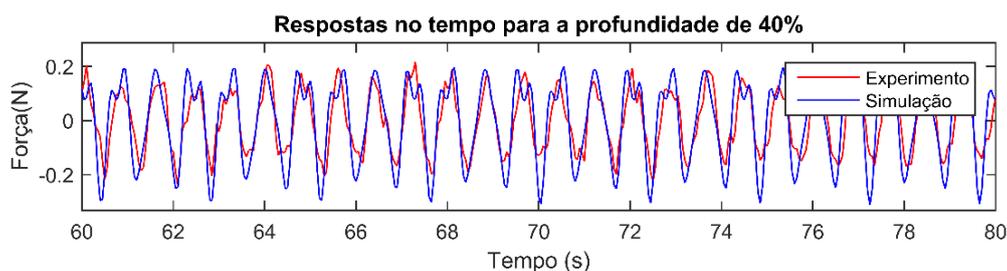


Figura 5.2 – Ampliação das respostas da força nos modelos numérico e experimental para o caso de rigidez 2, onda 3 e uma profundidade de 40%.

Exemplificando agora a qualificação “regular”, tem-se a Figura 5.3, na qual é possível visualizar o fenômeno de batimento para ambas as respostas (gráfico superior da Figura 5.3) e com grande similaridade para os períodos iguais aos da onda excitadora e períodos secundários (gráfico inferior da Figura 5.3).

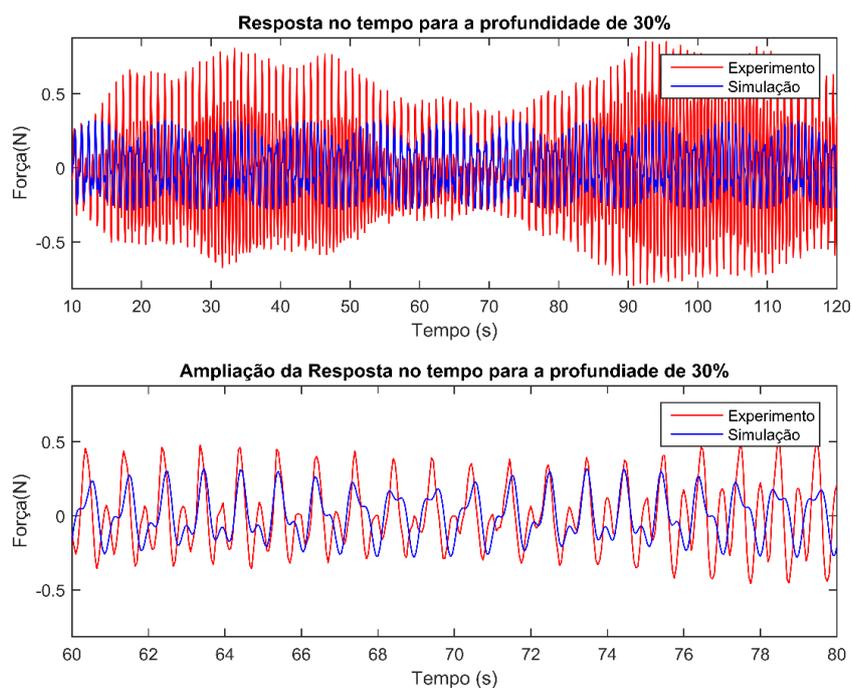


Figura 5.3 – Comparação da resposta no tempo para o caso de cabo com rigidez de 187.17 N/m, sob efeito de onda de 100 Hz e com esfera posicionada a 30% da profundidade do canal.

O batimento é um fenômeno ocasionado pelo somatório de 2 movimentos harmônicos de frequências próximas, ocasionando um comportamento de acréscimo e diminuição da amplitude da vibração ao longo do tempo. Nessa situação, o período do batimento pode ser determinado pela distância entre dois pontos consecutivos de maior amplitude [Rao, 2011].

Como último exemplo da referência empregada, ao visualizar a Figura 5.4, não é possível afirmar que o período de maior energia é similar para ambos os modelos. Neste resultado, tal fenômeno fica visível somente com a realização da transformada de Fourier. Devido a isto, tal situação foi classificada como ruim.



Figura 5.4 – Ampliação da resposta do cabo de rigidez 187.17, excitado por onda de 0,75 Hz em uma profundidade de 30%.

Dando seguimento ao processo de análise comparativa dos resultados, na seção seguinte, são definidos os padrões para a distribuição das qualificações em relação ao espectro de frequência.

5.2. Avaliação no Domínio da Frequência

De forma semelhante à seção anterior, as observações a respeito dos gráficos de espectro de frequência foram tomadas como base nas definições do Quadro 5.3. A análise dos gráficos a seguir é de extrema importância para revelar outros modos de oscilações que não foram possíveis de serem identificados com os resultados no tempo. Ademais, também indicam uma relação de energia existente em cada uma das ondas elementares, que somadas são responsáveis por formar o sinal no tempo (Figura 3.14).

Nota	Padrão de análise
------	-------------------

1	Caso no qual as frequências do espectro são distintas e apresentam amplitudes totalmente diferentes, não indicando qualquer semelhança entre os fenômenos de ambos os modelos.
2	Quadro em que as frequências de excitação são iguais, inclusive para o segundo harmônico. Entretanto, apresentam quantidades de energias invertidas, ou seja, em um dos dois modelos, a frequência de maior amplitude é igual à de excitação e, no outro, a frequência de maior energia é uma harmônica da excitação.
3	Nesse critério, as frequências de excitação são iguais, porém tem-se o surgimento de frequências secundárias, levemente deslocadas umas das outras. Essas frequências secundárias apresentam energias bem menores do que a de excitação.
4	Padrão em que a força no cabo apresenta oscilação na frequência de estímulo, igualmente para os métodos numérico e experimental, com diferenças na amplitude. Em alguns dos casos estudados, também é possível a visualização da mesma característica para as harmônicas, mesmo em gráficos não logarítmicos.
5	Caso considerado de ótima relação entre os resultados, no qual as frequências de maior energia são iguais à de excitação e

	<p>apresentam uma pequena diferença no que tange à amplitude. Além deste comportamento, para a frequência dominante, em algumas configurações dos parâmetros, também é possível observar as mesmas características nas harmônicas.</p>
--	--

Quadro 5.3 – Padrões de análise dos resultados do espectro em frequência

Além dos fatores que indicam uma boa correlação entre os resultados, com a Figura 5.5 foi possível visualizar outra característica existente no fenômeno, durante a apuração de quase todos os dados do ensaio e da simulação. A característica já esperada é a relação entre a profundidade da esfera e a amplitude do movimento, mostrando um acréscimo de energia à medida que se diminui a profundidade do corpo, ou seja, quando ele se aproxima da superfície do fluido.

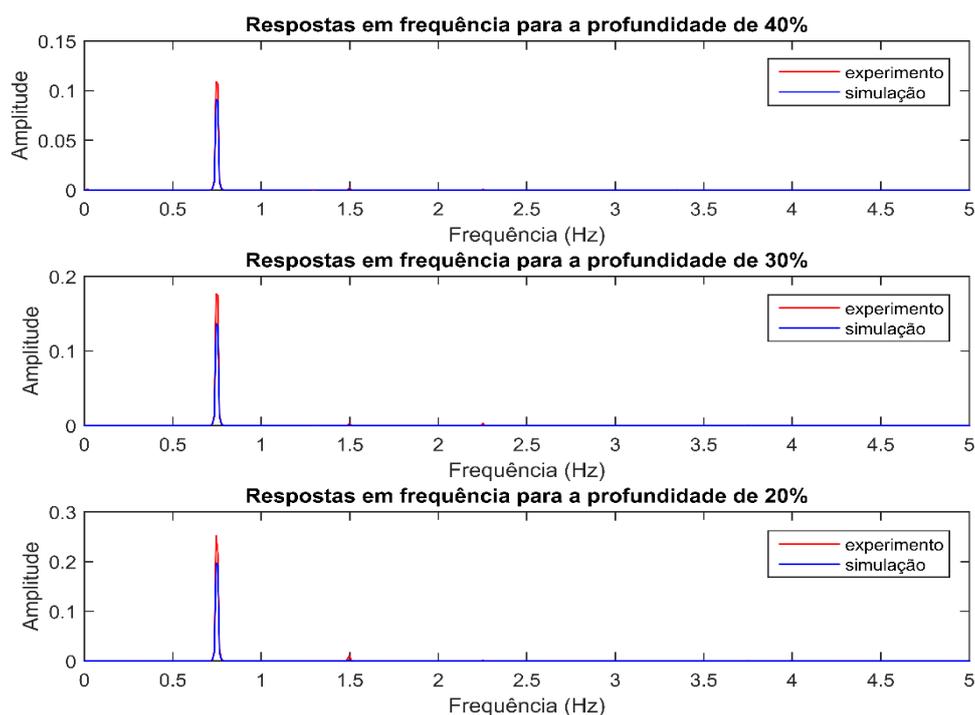


Figura 5.5 – Espectro de frequência para os parâmetros de rigidez igual a 360,72 /m, com excitação de onda de 0,75 Hz.

Esse comportamento ocorre devido ao fato da força hidrodinâmica predominante no estudo ser o arrasto de Morison (Equação 2.24). Tal força é calculada por meio da velocidade da partícula na onda (Equação 2.8 ou 2.18), a qual varia de forma crescente com a diminuição da profundidade.

Dando seguimento, o padrão de análise para a atribuição da qualificação “muito bom” pode ser observado na Figura 5.5. Ademais, ampliando a região de interesse para o caso de profundidade de 20%, o gráfico a seguir (Figura 5.6) atesta equivalência também para as frequências múltiplas da excitação.

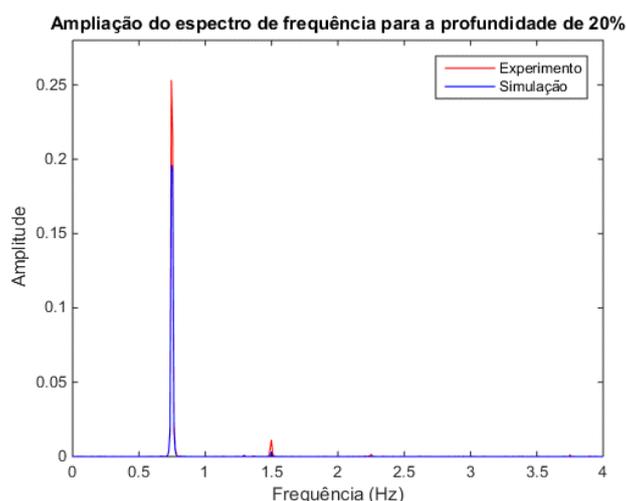


Figura 5.6 – Ampliação do espectro de frequência para os parâmetros de rigidez igual a 360,72 N/m, com excitação de onda de 0,75 Hz a uma profundidade de 20%.

Exemplificando a nota 4, um dos cenários avaliados que se enquadraram nesta qualificação foi o da onda de 1,5 Hz (onda 4) e cabo de 100.000 N/m (rigidez 3). Nota-se na Figura 5.7 a congruência no valor da frequência e uma considerável diferença entre as amplitudes. Devido a isso, a ela não é atribuída a denominação “muito bom”.

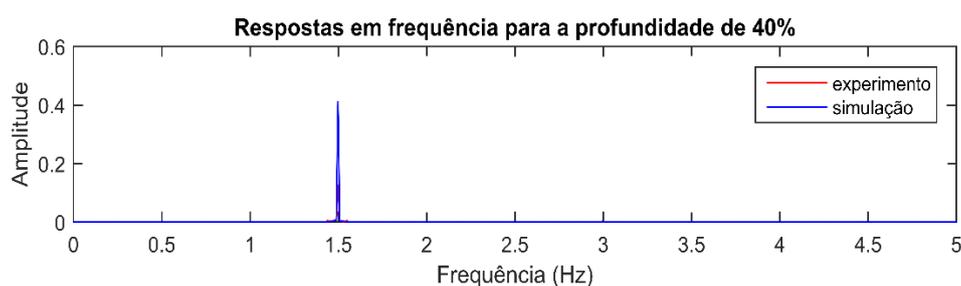


Figura 5.7 – Espectro de frequência para onda de 1,5 Hz, rigidez de 100.000 N/m em uma profundidade de 40%.

Prosseguindo com o raciocínio utilizado, pode-se observar, em alguns dos casos analisados, o surgimento de frequências secundárias, de energia consideravelmente menores do que a excitação, conforme demonstrado na Figura 5.8. O gráfico do espectro dos parâmetros de onda 4, pêndulo de rigidez 1 em uma profundidade relativa de 20% da coluna de água, aponta uma boa semelhança para a frequência predominante de 1,5 Hz.

Além disso, mostra o surgimento de oscilações secundárias, em torno de 2 Hz, não relacionadas com possíveis harmônicas.

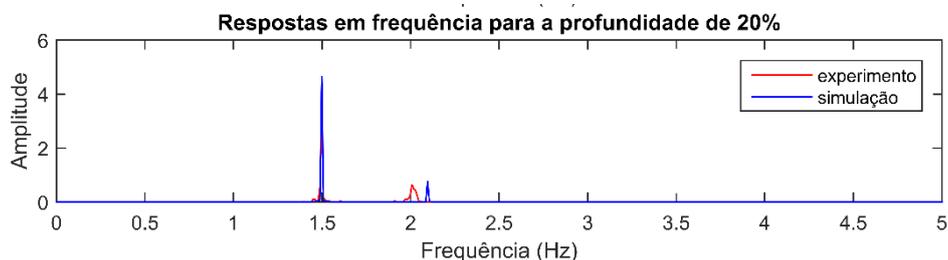


Figura 5.8 – Espectro de frequência dos parâmetros de onda igual a 1,5 Hz, cabo com rigidez de 187,17 N/m e com esfera posicionada em de 20% da profundidade.

Conforme mencionado no Quadro 5.3, a principal diferença na atribuição da nota 2 e 3 é com relação à quantidade de energia em que frequências secundárias se apresentam nos resultados. Em uma comparação “ruim”, a energia destas frequências é maior ou próxima à energia na frequência do estímulo. Já em uma comparação “regular”, ditas energias são substancialmente menores. Diante disso, o gráfico da Figura 5.8 é um típico exemplo avaliado com a nota 3. Da mesma forma, a Figura 5.9 possui a nota 2.

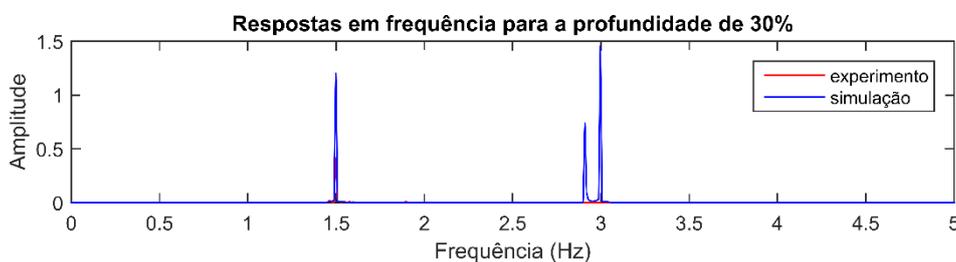


Figura 5.9 – Espectro de frequência do cenário de onda de 1,5 Hz, rigidez de 360,72 N/m e corpo em uma profundidade de 30%.

Como pode ser visto nas Figuras 5.5 a 5.8, as situações modeladas muitas vezes apresentam fenômenos oscilatórios em diferentes escalas, que dificultam a visualização em gráficos normais de espectro. Pensando nisso e, principalmente, em identificar valores de frequências que podem estar sendo omitidos por questão de escala, na visualização dos gráficos até então utilizados, são analisados, a seguir, os espectros em frequência com escala logarítmica.

5.3. Avaliação em Escala Logarítmica no Domínio da Frequência

Seguindo o mesmo procedimento empregado anteriormente, foi elaborado o Quadro 5.4 com os padrões utilizados durante a avaliação dos resultados. Vale acrescentar que, para a pesquisa em questão, os gráficos em escala não têm a função de quantificar com precisão a amplitude dos pontos dominantes, e sim identificar quais são os valores das frequências, e se eles são iguais em ambos os modelos.

Nota	Padrão de análise
1	Caso no qual os dados não apresentam semelhança entre os valores das frequências, ou seja, não indicam nenhuma relação entre os dois modelos.
2	Situação na qual tem-se correspondência para o valor da frequência de excitação, porém frequências secundárias têm picos maiores do que do estímulo.
3	Cenário no qual existe igualdade na frequência de excitação e harmônicas, mas, além disso, tem-se o aparecimento de picos menores em locais diferentes.
4	Situação em que se tem congruência nos valores de excitação e pequenos deslocamentos em torno do ponto das frequências harmônicas.
5	Comparação que demonstra marcações bem definidas para picos de frequências iguais ao estímulo e também múltiplas. Ademais, os picos apresentam decréscimo de tamanho à medida que se afastam da frequência excitadora.

Quadro 5.4 – Padrões de análise dos resultados do espectro em frequência em escala logarítmica

Exemplificando as características listadas no Quadro 5.4 e as respectivas qualificações, a Figura 5.10 representa um dos casos que possui pontos de frequências bem definidos para ambos os modelos. Além do valor igual à excitação, é possível visualizar também os picos nas posições referentes às harmônicas e a tendência de diminuição dos valores desses pontos até a frequência de 4,5 Hz.

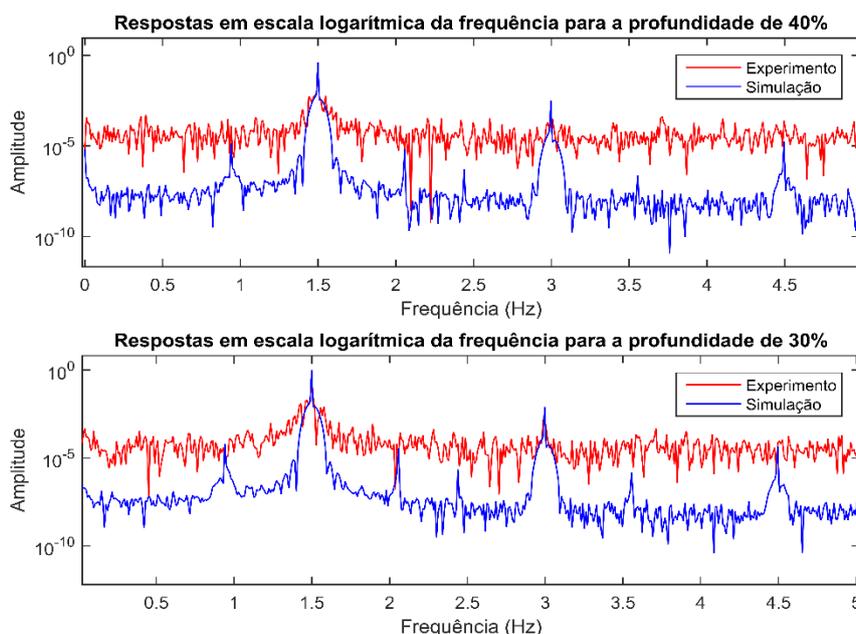


Figura 5.10 – Espectro de frequência em escala logarítmica para o cenário com rigidez igual a 100.000 N/m, onda de 1,5 Hz e profundidades de 40% e 30%.

Em posse da Figura 5.10, nota-se uma característica intrínseca aos modelos de solução (experimental e numérico) do pendulo elástico, sob ação de ondas. O sinal oriundo do experimento apresenta-se, na Figura 5.10, com uma altura média mais elevada do que o sinal originário do modelo numérico. Tal característica deriva do fato do sistema de aquisição de dados (experimento) possuir ruídos de ordem de grandezas maiores (aproximadamente 10^{-5}) quando comparado ao modelo numérico utilizado (aproximadamente 10^{-7}).

Diante desta particularidade dos sinais, a avaliação das respostas leva em consideração apenas os valores de picos do modelo numérico, que passaram da linha “base” do sinal do experimento. Isso porque, para valores menores, não é possível a comparação. Ainda assim, vale lembrar que o faixa vertical demonstrado nos gráficos é grande, conseqüentemente, a amplitude dos ruídos é próxima a zero.

Utilizando-se ainda do gráfico em escala, outra análise que pode ser feita diz respeito à atenuação adquirida após a passagem do filtro passa-baixa, de janelamento de

Hamming. O filtro foi dimensionado com uma faixa de transição entre 7 Hz e 8 Hz, conforme mencionado anteriormente no Capítulo 4. Com essas propriedades, o janelamento utilizado retornou uma atenuação de aproximadamente 10^5 (Figura 5.11).

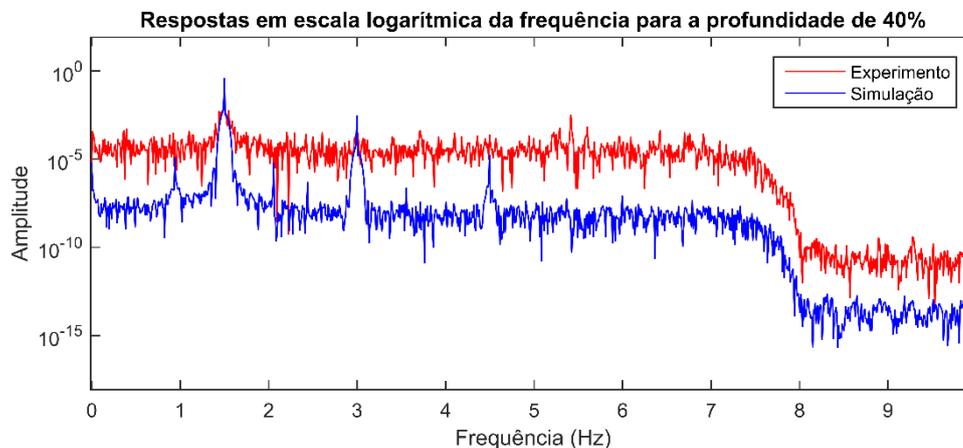


Figura 5.11 – Expansão da Figura 5.10, com visualização da região de transição do filtro utilizado e indicação da atenuação.

Para as situações qualificadas como “bom”, um dos casos foi o de onda de 1 Hz, com cabo de rigidez de 360,72 N/m a uma profundidade de 20% (Figura 5.12). Nele é possível visualizar dois picos de frequências de menor altura, quando comparado à excitação, ao redor do valor de 3 Hz, que é múltiplo do estímulo.

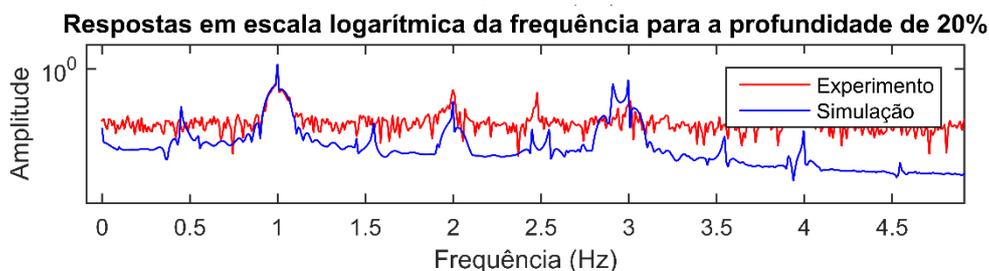


Figura 5.12 – Espectro em frequência em escala logarítmica, para a situação de onda 2, rigidez 2 e profundidade de 20%.

Em seguida, o gráfico da Figura 5.13 apresenta marcações definidas nos pontos da frequência do estímulo e também harmônicas. Entretanto, nele aparece também um pico de intensidade menor em relação à harmônica, próximo ao valor de 2 Hz. Em vista disso, cenários de configuração semelhantes a essas foram classificados como “regular”, recebendo a nota 3.

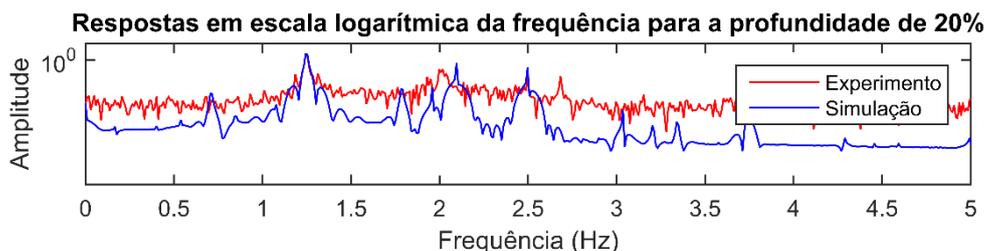


Figura 5.13 – Espectro em frequência em escala logarítmica, para a situação de onda de 1,25 Hz, cabo de 187,17 N/m em uma profundidade de 20%.

Finalmente, o único caso a ser avaliado como “ruim” foi o de configuração de onda de 0,75 Hz, constituído de uma rigidez igual a 187,17 N/m, para a profundidade de 30%. De acordo com o escrito na Quadro 5.4, o resultado da simulação, de aproximadamente 2,2 Hz, apresentou um pequeno deslocamento em relação ao experimento. Além disso, como fator predominante para a qualificação de nota 2, tal ponto possui uma altura maior do que a frequência de excitação.

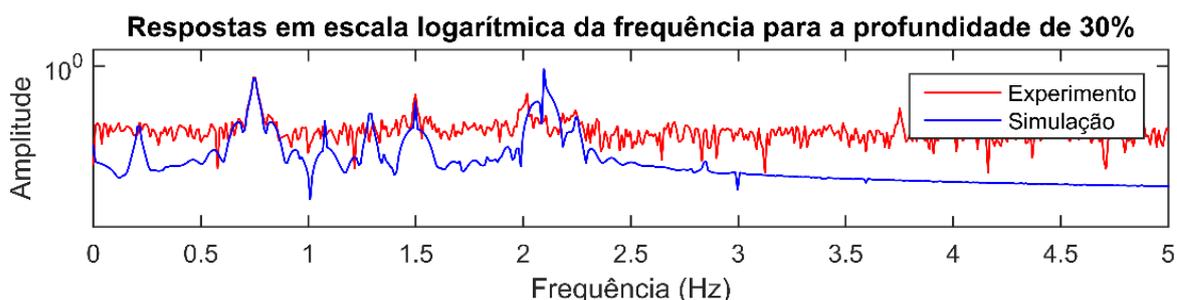


Figura 5.14 – Espectro em frequência em escala logarítmica para a situação de onda de 0,75 Hz, cabo de 187,17 N/m em uma profundidade de 30%.

Com o término das três formas dos resultados, pode-se avaliar de maneira mais completa a aplicação do modelo numérico, tomando como base o experimento realizado. Na seção seguinte, a tabela completa de ponderação é apresentada e características gerais do fenômeno são discutidas.

5.4. Considerações da Comparação

Em posse de toda a Tabela 5.1, resultante da avaliação dos gráficos, nesta seção são discutidas algumas particularidades observadas para os casos estudados. Além disso, é executado o cálculo de média, para indicação da qualidade do modelo numérico utilizado, tomando como referência a realização do experimento.

Tabela 5.1 – Avaliação comparativa entre os resultados do experimento e da simulação.

Simulação	Rigidez (N/m)	Onda	Profundidade relativa (%)	Avaliação no tempo	Avaliação em frequência	Avaliação em frequência - escala logarítmica
1	187,17	1	40	5	5	4
2	187,17	1	30	2	2	2
3	187,17	1	20	4	5	4
4	187,17	2	40	3	2	4
5	187,17	2	30	3	2	4
6	187,17	2	20	3	2	4
7	187,17	3	40	4	4	3
8	187,17	3	30	5	4	3
9	187,17	3	20	5	4	3
10	187,17	4	40	3	3	3
11	187,17	4	30	3	3	3
12	187,17	4	20	4	3	3
13	360,72	1	40	5	5	4
14	360,72	1	30	5	5	4
15	360,72	1	20	5	4	4
16	360,72	2	40	5	5	4
17	360,72	2	30	4	5	4
18	360,72	2	20	3	4	4
19	360,72	3	40	4	4	3
20	360,72	3	30	5	4	3
21	360,72	3	20	4	4	3
22	360,72	4	40	3	2	4
23	360,72	4	30	3	2	4
24	360,72	4	20	3	2	4
25	100000	1	40	5	5	5
26	100000	1	30	5	5	5
27	100000	1	20	5	5	5
28	100000	2	40	5	5	5
29	100000	2	30	5	5	5
30	100000	2	20	5	5	5
31	100000	3	40	5	5	5
32	100000	3	30	5	5	5
33	100000	3	20	5	5	5
34	100000	4	40	3	4	5
35	100000	4	30	4	4	5
36	100000	4	20	4	5	5

A tabela acima serve como uma ferramenta “mapa geral” para uma visualização completa de como o modelo numérico utilizado respondeu em cada cenário. Conforme mencionado anteriormente, e passível de visualização na tabela acima, as respostas para

diferentes profundidades apresentaram comportamentos semelhantes. Esse parâmetro apenas alterou a amplitude dos movimentos.

Com relação à variação paramétrica das ondas e, por conseguinte, das teorias e do equacionamento utilizados pelo *software*, o modelo numérico mostrou-se capaz de solucionar, com boa relação, todas as quatro frequências. Para ondas de Stokes de segunda ordem, o *solver* faz uso de uma função de transferência quadrática, logo após, lineariza o termo da velocidade no arrasto de Morison (Equações 4.12 e 4.13).

Ainda a respeito das ondas, observaram-se maiores diferenças nos gráficos de ondas de 1,5 Hz. Acredita-se que tal diferença esteja atrelada à não constante elevação do nível da água durante a geração de ondas no experimento, como mostra a Figura 5.15:

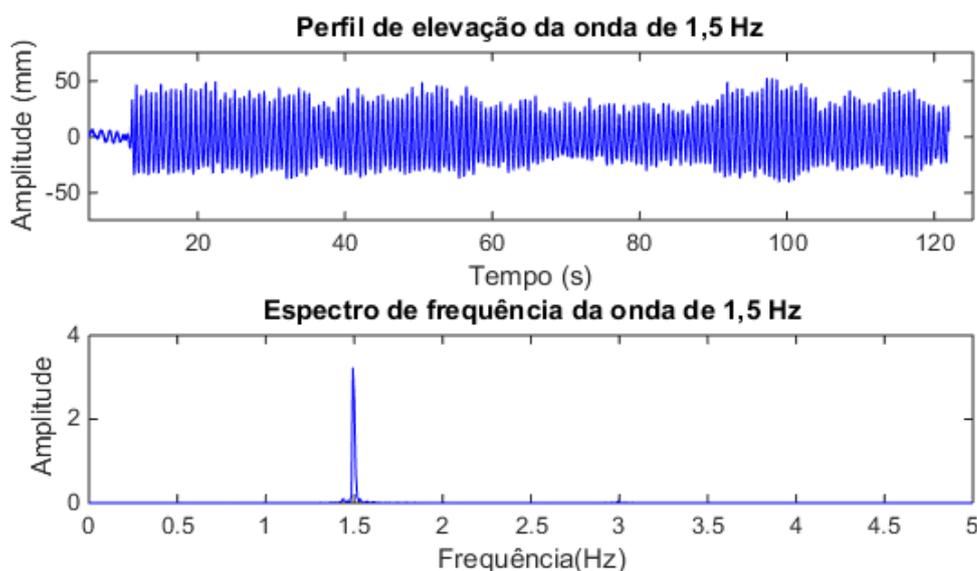


Figura 5.15 – Perfil de elevação e espectro de frequência da onda de 1,5 Hz, com rigidez 1, em uma profundidade de 20%.

Uma das possíveis fontes de uma inconstante geração de amplitude pode ter sido a existência de uma folga na união do motor com o batedor. Isso porque, na formação desta ondulação, o motor operou com 1458 rotações por minuto (Tabela 3.1), valor próximo à sua capacidade máxima. Mesmo assim, o mecanismo foi capaz de reproduzir, de forma consistente, o período da onda, como observado na Figura 5.15. Com isso, a força final do cabo não sofreu grandes alterações que desabilitassem esse experimento.

No tocante às alterações de rigidez dos cabos simulados, o modelo numérico provou uma maior similaridade com as respostas do experimento para os cabos considerados indeformados (100.000 N/m). Nele, grande parte das qualificações para os três tipos de gráficos analisados foram “muito bom”.

Dentre os valores de rigidez (187,17 N/m e 360,72 N/m), a menor apresentou pior avaliação com base nos padrões definidos. Mesmo assim, obteve a maioria das qualificações “bom”. É importante salientar que a incorporação de uma menor rigidez do cabo causa uma maior movimentação vertical. Portanto, quando comparados aos resultados das condições indeformadas, podem apresentar frequências de oscilações diferentes da excitação e harmônicas para ambos os modelos. Devido a isso, tais gráficos podem ter sido avaliados com nota 4, ou até 3, em vez de 5. Tal afirmação pode ser verificada na Figura 5.13, a qual apresenta uma frequência diferente do estímulo e também de possíveis harmônicas, tanto para o experimento, quanto para a simulação. Por esse motivo, foi avaliada como “regular”.

Por fim, ao se realizar o cálculo de média para todos os valores da Tabela 5.1, a nota resultante para a avaliação comparativa entre ambos os modelos foi de aproximadamente 4, indicando uma qualificação global “bom”, para todos os parâmetros testados (Quadro 5.1).

Considerando que alguns dos padrões definidos para a análise dos dados levaram em consideração a relação de amplitude, casos com onda de 1,5 Hz receberam menores notas. Na hipótese de desconsiderar os dados oriundos desta onda, a média final obtida seria de 4,23. Diante desse valor, fica evidente uma pequena diferença ao não se considerar estes gráficos. Entretanto, tal diferença não é capaz de alterar a qualidade final (bom) como um todo.

Após o processo completo de avaliação dos resultados, é factível uma boa confiabilidade do modelo numérico desenvolvido mesmo com as simplificações e ressalvas apresentadas ao longo dos Capítulos 3, 4 e 5. Com isso, o capítulo a seguir discorre sobre a extrapolação deste modelo, aplicando-o na obtenção da resposta de uma estrutura de ostreicultura sob ação de ondas características do município de Rio Grande - RS.

6. MODELAGEM NUMÉRICA DA ESTRUTURA DE CULTIVO

Neste capítulo, são abordados os aspectos construtivos do modelo de cultivo de ostras em linha. Para isso, ao longo do desenvolvimento, são expostas as considerações e simplificações utilizadas. Além disso, outro fator de extrema importância, discutido nesta parte do trabalho, diz respeito a indicativos de semelhança das principais características físicas envolvidas no modelo pendular simples e também no modelo da estrutura de cultivo. Ademais, estes indicativos são empregados para fundamentar a extrapolação no tocante ao aumento de graus de liberdades.

Os dados de algumas variáveis ao problema foram definidos com o intuito de aproximar as simulações executadas a situações reais. Para isso, foram aplicados valores do estado de mar do município de Rio Grande – RS, aproximações para cabos de polietileno, extraídos de catálogos de fabricantes. Para mais, também foram avaliados fatores biológicos e operacionais do cultivo. Ainda assim, é significativo informar que a utilização de tais parâmetros não possui o carácter de assegurar a construção e a implementação de uma planta produtiva de ostras.

Conforme mencionado, a primeira etapa foi a de determinação das ondas simuladas. Para isso, foi empregada uma série histórica com dados de períodos e alturas médias das ondas da praia do Cassino (Figura 6.1).

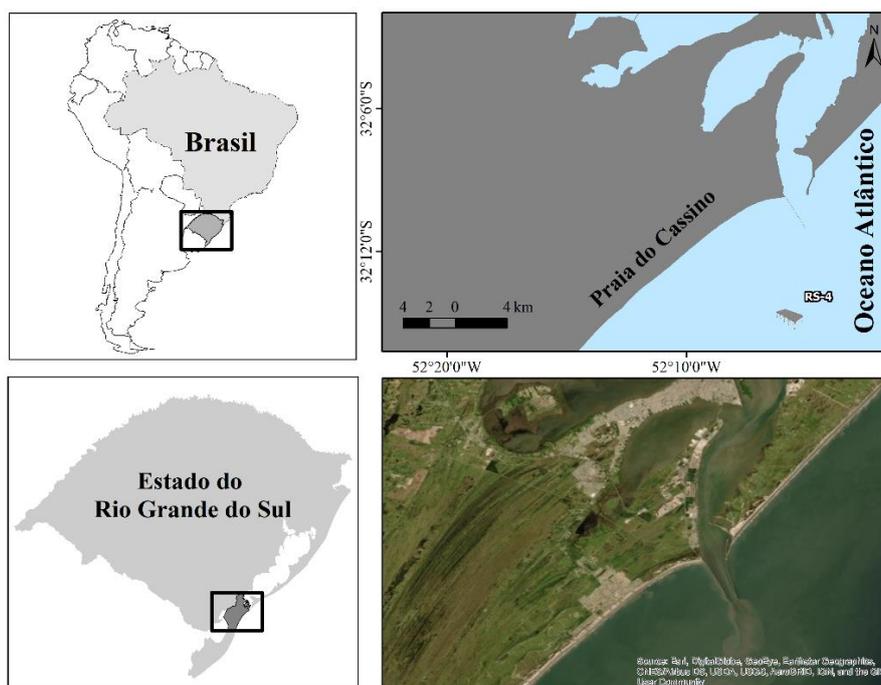


Figura 6.1 – Mapa da área de estudo utilizada como exemplo de aproximação às condições reais, com identificação do posicionamento da boia meteo-ocenográfica RS-4.

Os dados em questão foram retirados do projeto de Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCosta) e correspondem ao período de 19/02/2019 a 28/04/2020, para a boia meteo-oceanográfica RS-4, instalada a uma profundidade de 13 m [SiMCosta, 2020].

A partir da obtenção dos dados, a curva de distribuição normal foi realizada, os valores de média, e também limites superiores e inferiores com medida de desvio padrão em torno da média, foram escolhidos. De acordo com Triola (2009) e verificado no cálculo do *software* MATLAB® (Figura 6.2 (a)), os valores escolhidos preenchem uma faixa de 68,26% das ondas características da região para o período analisado.

Diante do exposto, definiu-se que os períodos médios das ondas estudadas seriam de 4,05 s, 5,17 s e 6,29 s. Da mesma forma, foram analisados os dados de altura média, sendo definidos como 0,44 m, 0,72 m, 1,01 m (Figura 6.2 (b)). As combinações de período e altura de onda foram testadas e classificadas segundo o parâmetro de Ursell (Equação 2.15). O resultado dessa classificação retornou a teoria de Airy para a profundidade de 13 m.

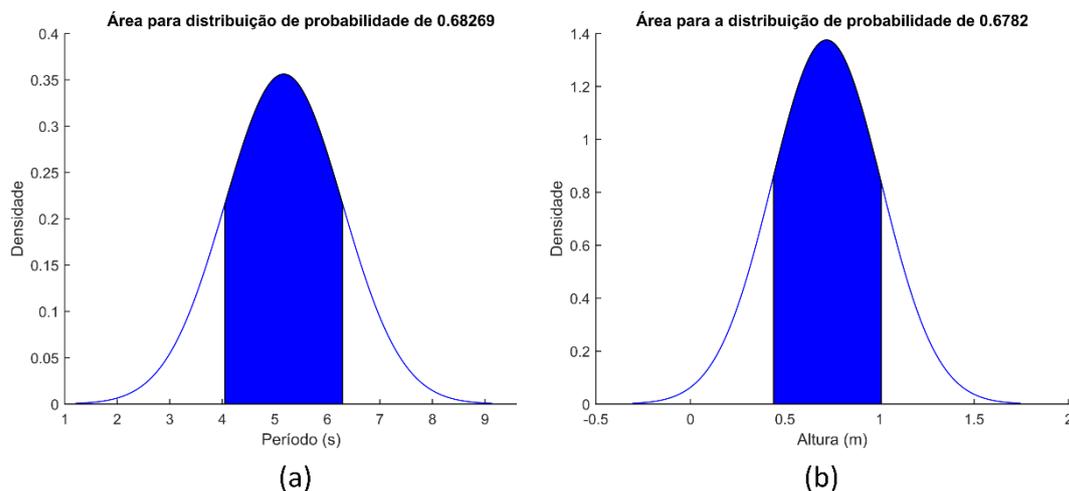


Figura 6.2 – (a) Curva normal com área de distribuição de probabilidade de 68,2% dos dados, entre os limites de período de 4,05 s e 6,29 s. (b) Curva normal com área de distribuição de probabilidade de 67,8% dos dados, entre os limites de altura de 0,44 m e 1,01 m.

A seguir, foram analisados quais seriam os tamanhos das esferas utilizadas na estrutura de cultivo, visando que não se distanciassem muito dos tamanhos das ostras propriamente ditas, conforme discorrido na seção 2.1 sobre o cultivo de ostras. Sabendo que o tamanho de uma ostra adulta é de aproximadamente 70 mm e que a estrutura de cultivo (ostras fixas em cordas) pode apresentar de 2 a 3 animais fixos no mesmo ponto,

elaborou-se uma configuração na qual o comprimento do organismo fosse de aproximadamente o raio da esfera (Figura 6.3).

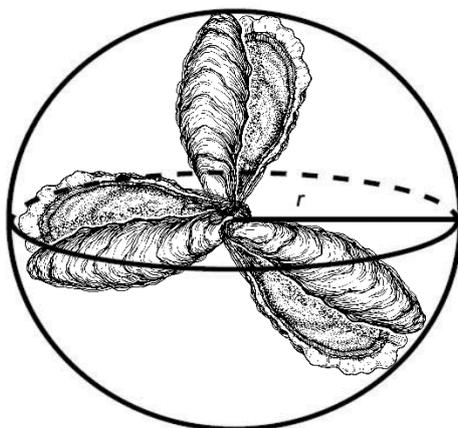


Figura 6.3 – Representação do critério utilizado como base para a escolha da dimensão da esfera do cultivo.

Além da busca por uma proximidade dimensional com a espécie, também é fundamental a busca por uma correlação entre o modelo validado e o modelo da estrutura de cultivo, no que diz respeito às forças hidrodinâmicas envolvidas. Isso quer dizer que, pensando nos fenômenos físicos da linha de cultivo, é importante que as forças excitantes da estrutura de cultivo sejam compostas predominantemente por força de Morison e também Froude-Krylov, assim como o modelo pendular elástico desenvolvido nos Capítulos 3 e 4.

Para a verificação de quais são as forças predominantes, inicialmente foram calculados os comprimentos de onda (Equação 2.6). Os valores foram 25,5 m, 40,9 m e 57,5 m, para respectivamente as ondas de 4,05 s, 5,17 s e 6,29 s. Em posse dos comprimentos, utilizando o diagrama proposto por Chakrabarti (1987) (Figura 2.10), verificou-se que uma esfera de 126 mm de diâmetro também se encontraria na região VI do diagrama, a mesma do modelo pendular simples. Essa região indica a não existência de forças de difração, como era de se esperar pela relação de comprimento da onda e diâmetro característico da estrutura. Além disso, aponta que os equacionamentos utilizados são de Morison e Froude-Krylov, com grande predominância para a parcela de arrasto.

Determinado o diâmetro da esfera, passou-se para a definição do comprimento da linha de cultivo. Ainda pensando na concordância com o modelo validado experimentalmente, colocou-se como restrição a condição de comprimento máximo de aproximadamente 40% da profundidade local. Tal percentual é semelhante ao maior valor

utilizado no experimento. Ademais, outra condição verificada foi a concentração de clorofila. Conforme explicado na seção 2.1, as ostras são organismos filtradores que têm sua alimentação atrelada à concentração de clorofila. Devido a isto, na hipótese de um cultivo real, é importante garantir que o animal mais ao fundo também tenha nutrientes disponíveis para o crescimento.

Strohmeier (2005) estudou o crescimento de moluscos bivalves filtradores em uma fazenda de produção na costa da Noruega. Com concentrações de clorofila de 0,4 mg/m³ a 3,3 mg/m³, e indicou que valores menores que 1 mg/m³ são considerados baixos para o crescimento da espécie. Mesmo sabendo que a quantidade de fitoplâncton (alimento) em uma determinada massa de água depende de vários fatores como temperatura, luminosidade, salinidade, e que essas propriedades estão em constantes mudanças, possuir um valor como base é importante.

Nesse sentido, Ciotti *et al.* (1995) conseguiram obter perfis de distribuição de clorofila na coluna de água para a região de Rio Grande. Nos referidos perfis não foram obtidos valores menores do que 1 mg/m³ até a profundidade de 13 m. Com isso, em relação à disponibilidade de comida, não foi encontrada nenhuma restrição quanto ao tamanho da linha, podendo esta ser desenvolvida até o fundo (13 m).

Com as condições iniciais definidas, iniciou-se o processo de modelagem. O processo utilizado durante esta etapa seguiu o mesmo padrão do Capítulo 4, apenas foram acrescentados mais graus de liberdade à configuração final. Uma representação do modelo final pode ser vista na Figura 6.4, na qual as esferas foram numeradas de forma crescente com a profundidade, sendo 1 a massa mais próxima à superfície.



Figura 6.4 – Representação do modelo da estrutura de cultivo.

A definição da rigidez do cabo foi feita com base no catálogo da fabricante Mordec. Neste catálogo, o cabo de polipropileno com 3 pernas é indicado para uso em

mar, em atividades com baixa responsabilidade, como para a pesca comercial. Nessa indicação, são levadas em conta também a baixa absorção de água e o baixo preço de mercado [Mordec, 2020].

Outra informação importante dada pelo fabricante é a de que a carga de trabalho deve ser de no máximo 1/6 da mínima carga de ruptura do material. Com essa perspectiva e sabendo que cabos sintéticos não apresentam comportamento linear – o que é utilizado no modelo, em se tratando de pequena deformação – foi realizada uma aproximação à rigidez linear. Com isso, o valor adotado inicialmente foi de 30 kN.

Por uma questão de limitação, no *software* são permitidas no máximo 8 estruturas. Devido a isso, a massa de cada corpo foi calculada considerando o peso total da linha de cultivo, dividido pelo número de esferas. Conforme explanado no início do estudo, o espaçamento entre os pontos de fixação dos animais varia de 100 a 200 mm. Considerando uma quantidade máxima de 3 indivíduos por ponto, em uma linha de 3 m é possível cultivar até 90 organismos. Finalmente, ponderando fatores como incrustação e uma possível cimentação, utilizada para a colagem do animal junto a corda, fatores que podem dobrar o peso total da linha de cultivo, estimou-se o valor mínimo de 1,875 kg por esfera.

Após a etapa de CAD, foi executado o processo de refino de malha para cada esfera. A análise de convergência resultou em um gráfico do erro percentual pela quantidade de elementos (Figura 6.5). No gráfico abaixo, é possível visualizar que, a partir de 1100 elementos, o erro torna-se menor do que 1%, com indicação de estabilização. Diante disso, tal valor é determinado como ideal.

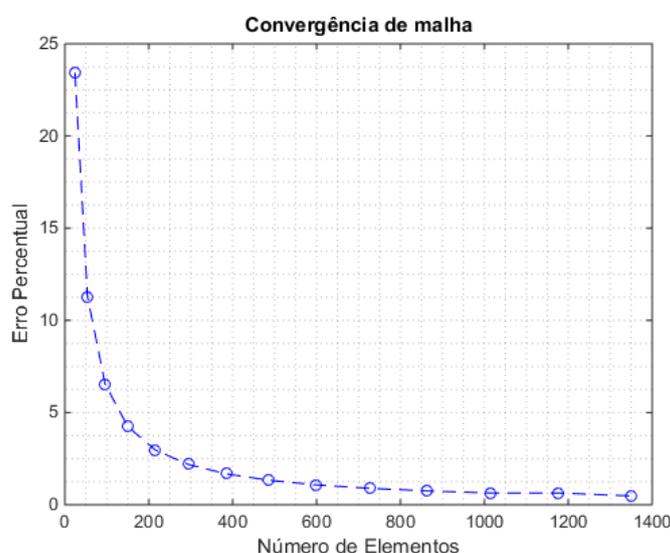


Figura 6.5 – Convergência do refino de malha para as esferas da linha de cultivo.

Dando seguimento, a etapa de validação do *Time-Step* foi realizada para onda de 6,29 s com altura de 1,1 metros. De acordo com indicação do próprio *solver*, o passo de integração utilizado deve ser de pelo menos um décimo do menor período de oscilação. Porém, só foi obtida a convergência da simulação para números menores do que 0,008 s.

Com a diminuição do passo, observou-se que um possível fator de não convergência seria a carga impulsiva inicial. Essa constatação pode ser visualizada ao se comparar os gráficos de posição horizontal, vertical e a tração no cabo para diferentes passos (Figura 6.6). Diante da sobreposição das respostas das esferas – esfera superior, mais próxima à superfície e esfera mais ao fundo – para diferentes passos de integração, duas a duas, a única diferença observada foi no tocante ao gráfico de tração no cabo de sustentação. É possível observar ainda a ocorrência do fenômeno de batimento, que posteriormente é discutido.

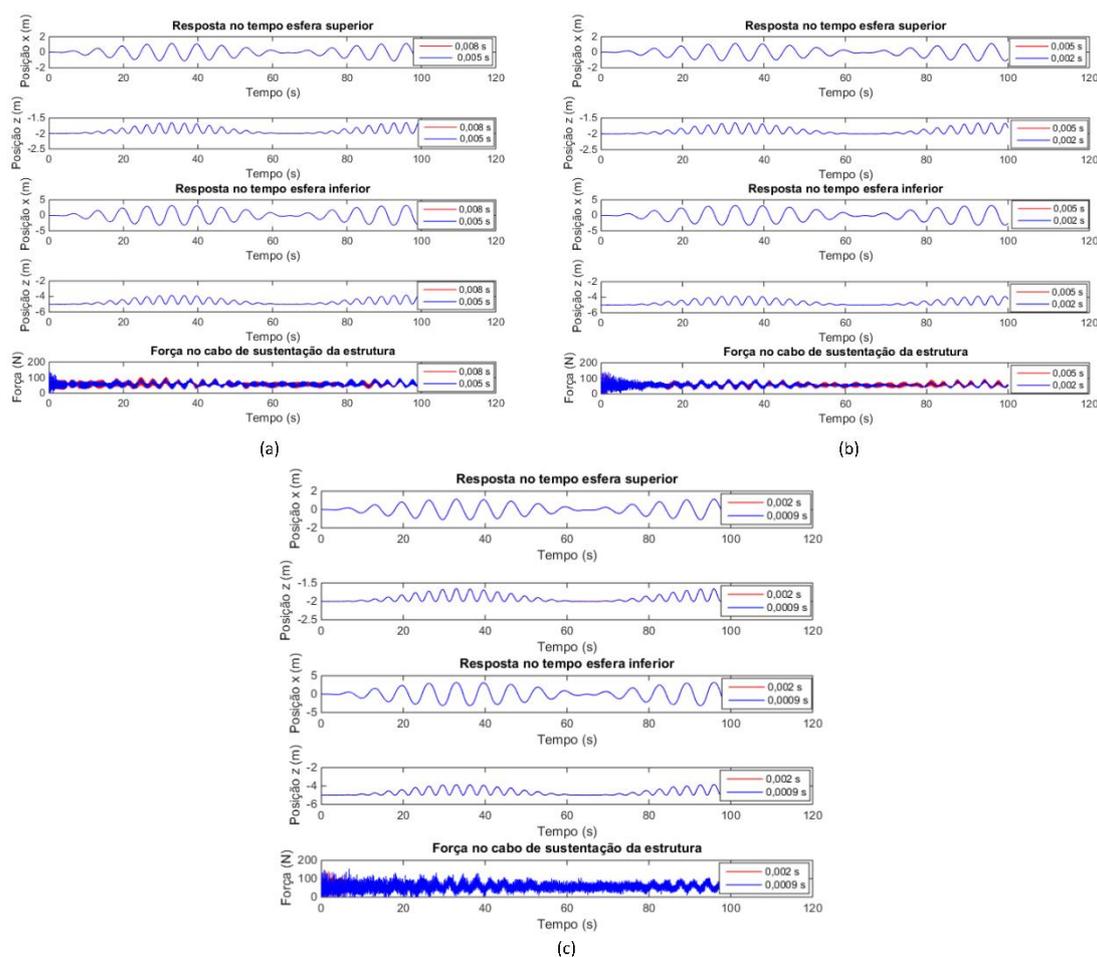


Figura 6.6 – Posição horizontal e vertical das esferas superior e inferior e tração no cabo de sustentação da linha, para os passos de 0,008 s e 0,005 s (a), 0,005 s e 0,002 s (b) e 0,002 s e 0,0009 s (c).

Analisando os gráficos da Figura 6.6, nota-se que para a tração do cabo, existe uma pequena diferença para os valores de 0,008 s e 0,005 s (a), que diminui entre os pontos de 0,005 e 0,002 s (b) e, quando o passo é diminuído até 0,0009 s (c), a resposta já começa a apresentar considerável ruído numérico. Assim sendo, optou-se por escolher o valor de 0,002 s para executar as simulações.

De antemão, também foi possível notar a instabilidade da estrutura, por meio da esfera mais próxima ao fundo, que alcançou deslocamentos horizontais com amplitudes próximas a 5 m, condição não estável para o cultivo. Essa instabilidade será discutida durante a apresentação dos resultados e discussões.

Terminada a definição do *time-step*, deu-se início a execução das simulações. À medida que os resultados iam sendo obtidos, análises preliminares eram realizadas. A partir destas, eram feitas modificações que tinham como objetivo principal entender o fenômeno ocorrido e encontrar, por tentativa e erro, combinações de parâmetros da linha de cultivo que o afastassem de um possível fenômeno de ressonância.

Ao final, foram testadas várias configurações, modificando os parâmetros de comprimento de corda, rigidez do cabo e distribuição das massas na linha de cultivo originalmente proposta. O resultado dos testes retornou uma configuração dos parâmetros da estrutura estável para os 3 períodos e as 3 alturas desejadas. Até que, por fim, a estabilidade foi alcançada para o caso “modificado” (Tabela 6.1).

Tabela 6.1 – Dados das linhas de cultivo.

Estrutura	Número de esferas	Comprimento linha de cultivo	Massa esferas (kg)	Rigidez (kN/m)	Profundidade esfera 1	Massa extra (kg)
Linha de cultivo	7	5	1,875	30	-2	0
Alternativa	8	4,45	3,3	53	-2	12

As modificações realizadas foram essenciais para instigar maior investigação a respeito do agente causador da instabilidade. A investigação possibilitou identificar algumas características típicas da estrutura. No capítulo seguinte, tais aspectos são discutidos.

Dando seguimento, o pós-processamento dos dados da estrutura “linha de cultivo” foi executado em rotina de programação na linguagem MATLAB®. Nesta etapa, os dados de deslocamento e velocidade das esferas foram relacionados com a trajetória e a velocidade da partícula teórica do fluido, aprofundando a análise dos resultados.

7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo, inicia-se com os resultados de posição das esferas 1 e 7, da linha proposta. Ao mesmo tempo em que eles são apresentados, também são discutidas as observações que levaram às remodelações, sempre buscando não se distanciar das considerações utilizadas no Capítulo 6. Como exemplo dessas premissas, tem-se o diâmetro das esferas, o máximo comprimento da linha e o peso mínimo.

O primeiro teste, utilizado para a etapa de refino, expõe grande oscilação do último corpo (esfera 7), com deslocamentos horizontais próximo a 5 m para o período de onda igual a 6,29 s, conforme dito anteriormente e observado na Figura 6.6. Além deste período, também foram simulados os valores de 4,05 s e 5,17 s com a altura de onda de 1,01 m. Com os gráficos a seguir (Figura 7.1) é possível observar que as amplitudes dos movimentos aumentaram com o acréscimo do período.

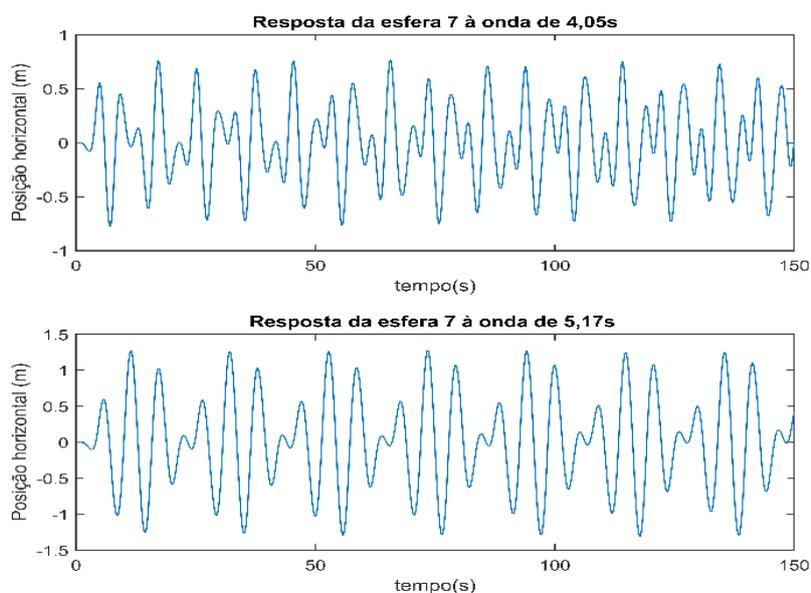


Figura 7.1 – Posições horizontais (1º teste) para os períodos de 4,05 s e 5,17 s.

Como o comprimento de onda (Equação 2.6) e consequentemente a trajetória da partícula da água (Equação 2.10) são diretamente proporcionais ao período, não era possível garantir que o incremento da amplitude estava relacionado com a proximidade das frequências, naturais e de excitação. Isso ocorre pelo fato de que maiores períodos também geram maiores velocidades do escoamento, ocasionando mais arrasto (Equação 2.24) [Dean e Dalrymple, 1991; Chakrabarti, 1987].

Diante do exposto, utilizou-se da análise dos resultados da estrutura “alternativa” como ganho de experiência e critério de comparação das análise da linha de cultivo proposta. Na seção a seguir discutem-se os resultados da estrutura alternativa.

7.1. Resultados da Estrutura Alternativa

Após as alterações da Tabela 6.1, as respostas da posição horizontal x e vertical z para todas as esferas do caso modificado apresentaram o mesmo comportamento, sem defasagem, variando apenas com relação à amplitude do movimento, conforme pode ser visualizado na Figura 7.2. Vale ressaltar que, a oscilação de todas as massas, com as mesmas frequências (Figura 7.3), ocorre para todas as combinações de período e altura de onda incidente, não apenas para ondas de 4,05 s e altura 1,01 m, que são mostradas nos gráficos.

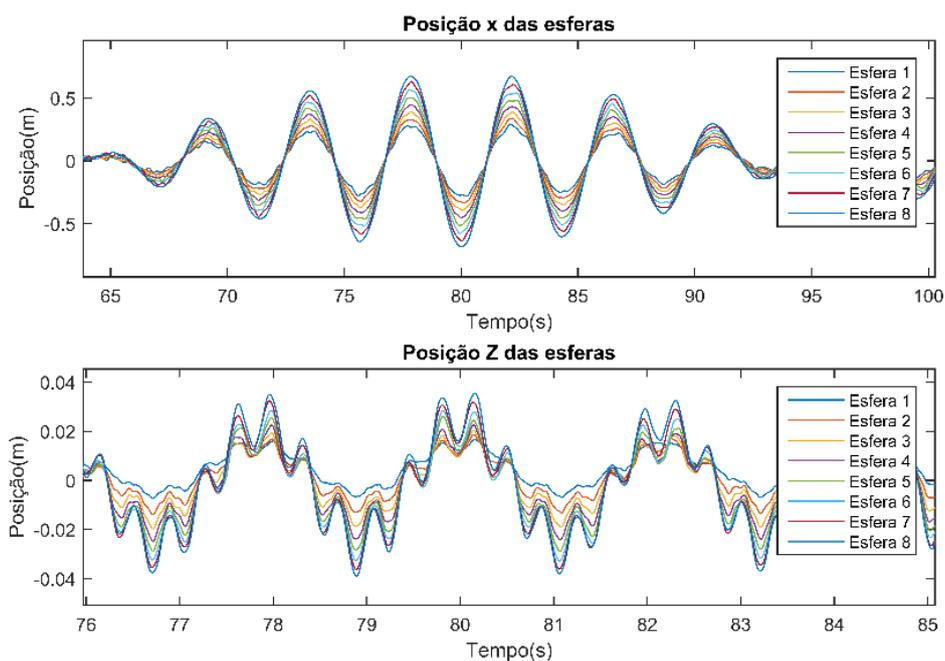


Figura 7.2 – Posição x e z para todas as massas do caso modificado. Estímulo de onda de 4,05 s e 1,01 m.

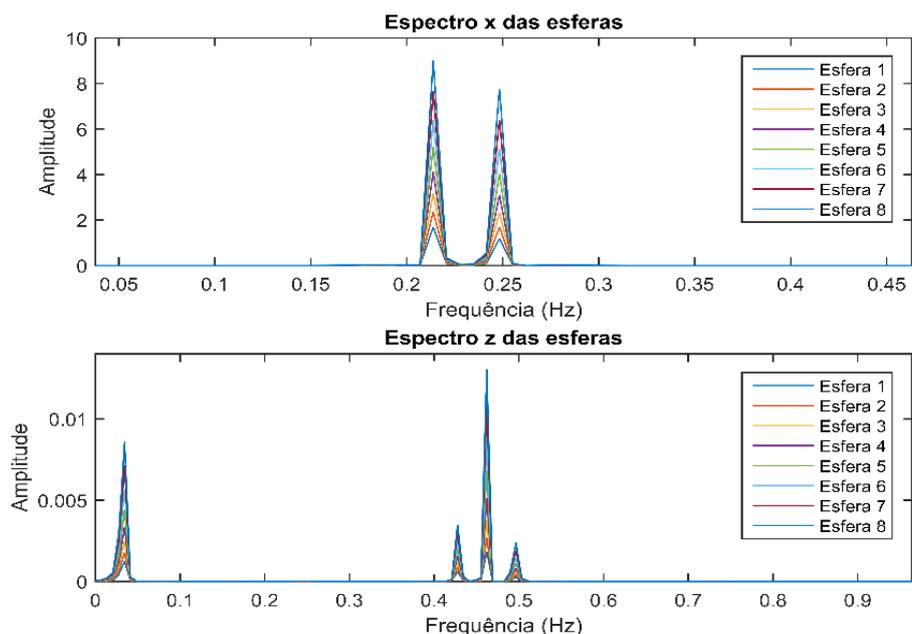


Figura 7.3 – Ampliação do espectro de frequências da posição x e z para todas as massas do caso modificado. Estímulo de onda de 4,05 s e 1,01 m.

Com isso, para análises futuras são utilizadas apenas as respostas da esfera 1, mais próxima à superfície, e da esfera mais ao fundo. Isso porque ao representar-se as duas massas, automaticamente o comportamento de uma massa intermediária terá amplitude intermediária.

Ademais, analisando todas as combinações, notou-se outra importante propriedade, no que se refere às variações das alturas de onda. A Figura 7.4 exhibe as respostas da oitava esfera para uma onda de 6,29 segundos para todas as alturas (1,01 m, 0,72 m e 0,44 m).

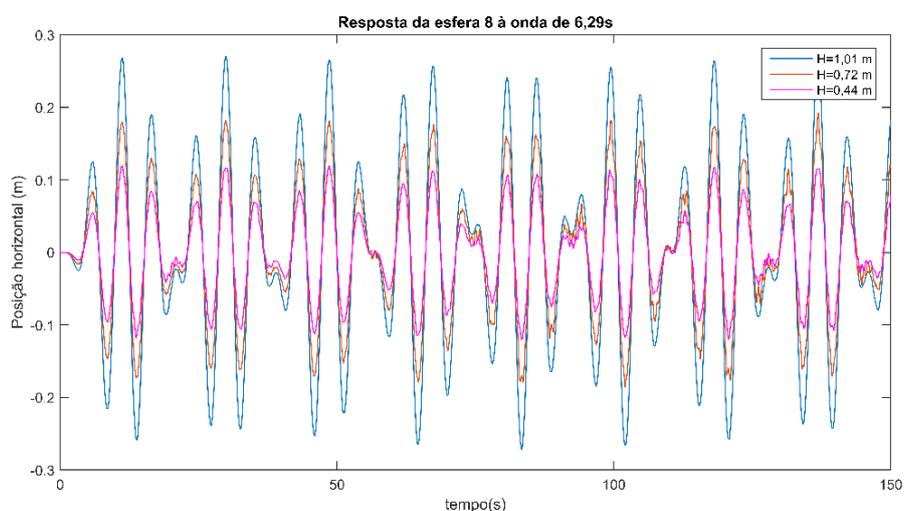


Figura 7.4 – Posição x da oitava esfera, com onda de 6,29 s e alturas de 1,01 m, 0,72 m e 0,44 m.

Com o auxílio da Equação 2.8 é possível verificar que a altura da onda é um fator multiplicativo na expressão da velocidade da partícula e , devido a isso, quando maior a altura de onda, maior a força, e, conseqüentemente, a amplitude do movimento da esfera, estando de acordo com Wilson (2003). Entretanto, ao se confrontar os resultados da Figura 7.5 com o discutido no Capítulo 5 (Figuras 5.1 e 5.5), no que diz respeito à relação de profundidade do corpo e sua amplitude de movimento, uma diferença é percebida.

A diferença constatada é que para o modelo pendular com várias esferas (linha de cultivo), a massa posicionada mais ao fundo da coluna de água apresentou maior deslocamento do que o corpo próximo à superfície. Esse aspecto pode ser explicado por ação do movimento pendular, ou seja, duas esferas ligadas por um cabo – uma posicionada mais ao fundo, e outra mais alta, na coluna de água – são deslocadas pelas forças hidrodinâmicas e também pela tração no cabo. Com isso, à medida que a força hidrodinâmica das esferas mais ao fundo diminui, a força de tração do cabo aumenta, fazendo com que ela continue seu movimento e desloque mais do que a esfera superior.

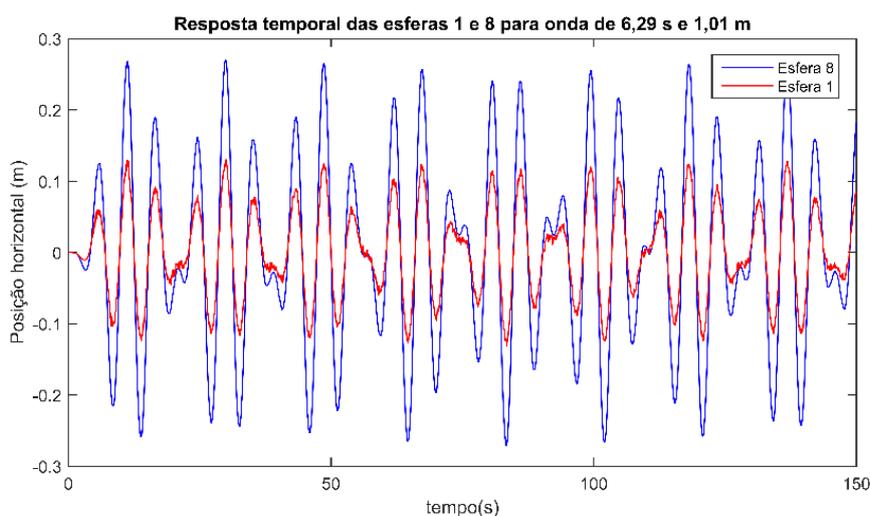


Figura 7.5 – Comparação da resposta temporal das esferas 1 e 8 para a onda 6,29 s e altura de 1,01 m.

Finalmente, comparando os resultados da estrutura alternativa para diferentes períodos (Figura 7.6) fica evidente que o fenômeno ocorrido para a linha de cultivo é de batimento. Isso porque a estrutura alternativa, mesmo com massas maiores e peso extra no fundo da linha, obteve resposta típica de batimento.

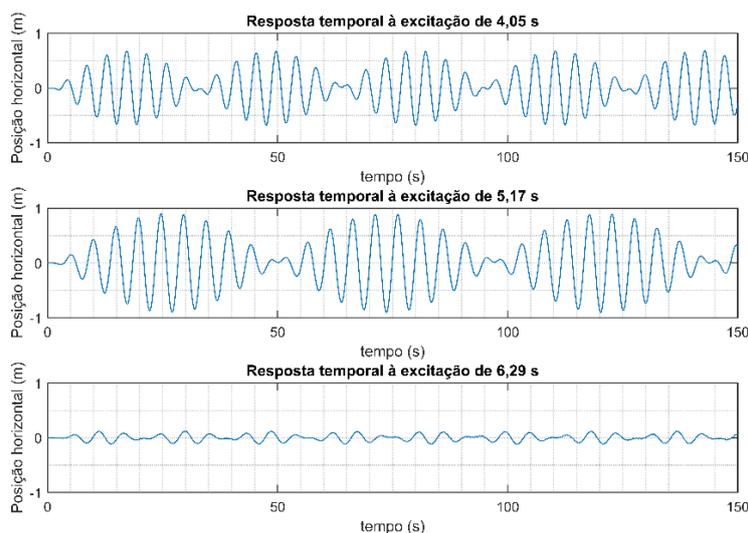


Figura 7.6 – Comparação da posição horizontal da esfera 8, sob estímulo de onda de 4,05 s, 5,17 s e 6,29 s e altura de 1,01 m.

Além disso, o fato de ter apresentado maior amplitude de movimento para ondas menores (4,05 e 5,15 s) indica que tal amplitude não é causada por uma simples relação entre força de arrasto e peso. Assim como no trabalho de arrasto em rede de uma estrutura pendular (Tanque de gravidade), Lader e Enerhaug (2005) perceberam que para baixas velocidades de escoamento, o peso de fundo, que possui a função de manter a rede esticada, é pouco responsável por mudanças significativas na amplitude dos movimentos.

Diante disso, ainda com o gráfico (Figura 7.6), é possível imaginar que uma das frequências críticas para a estrutura “alternativa” estaria entre os valores de 0,193 Hz (5,17 s) e 0,247 Hz (4,05 s). Com a finalidade de investigar dito valor, foram realizadas mais simulações para períodos médios, com menor espaçamento para a região entre 4,05 s e 5,17 s.



Figura 7.7 – Esquema de refino dos períodos de ondas.

A cada rodada de simulação eram avaliadas as amplitudes máximas do batimento, e a região de maior refino era decidida. Esse procedimento seguiu as cores preto, azul, vermelho e verde. No final, um gráfico da máxima amplitude em relação à frequência de excitação foi elaborado. Com isso, determinou-se que uma das frequências naturais da linha de cultivo possivelmente estaria próxima ao valor de 0,217 Hz (onda de 4,61 s). O gráfico da Figura 7.8, mostra que mesmo para pequenas variações de frequência, existem grandes crescimentos na amplitude, aspecto de natureza semelhante ao esperado para

sistemas de um grau de liberdade, sob vibração forçada e com baixo fator de amortecimento [Rao, 2011].

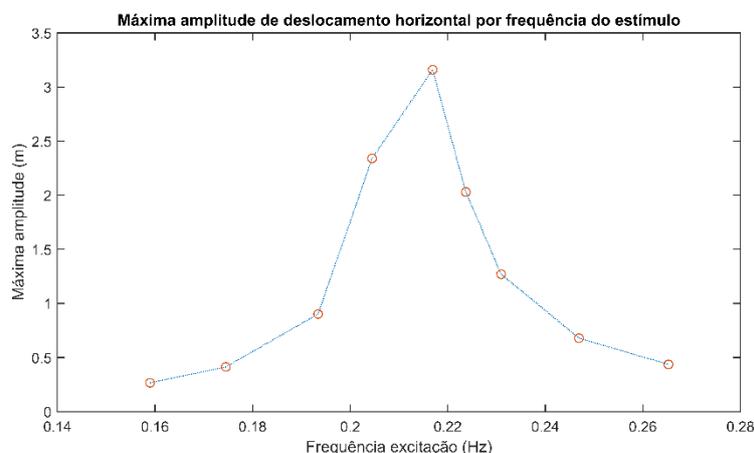


Figura 7.8 – Máxima amplitude da resposta horizontal da esfera 8, para diferentes frequências de excitação, de ondas de Airy.

Diante do exposto, todo o estudo executado para a linha de cultivo alternativa, além de possibilitar um melhor entendimento dos fenômenos envolvidos, principalmente no que tange às frequências naturais, elucidou que a resposta da linha de cultivo está sob efeito de batimento. Deste modo, na seção seguinte, retorna-se à configuração original e dá-se seguimento à análise dos resultados e às discussões.

7.2. Resultados da Linha de Cultivo

A primeira fase destes resultados é a localização da região de frequências críticas para a estrutura, frequências que ocasionam o fenômeno de batimento ao se aproximarem das naturais do sistema. Além do modo executado para a estrutura “alternativa”, nesta seção são discutidos os resultados de mais duas formas de análise.

A principal diferença entre a análise das estruturas “alternativa” e “linha de cultivo” é de que as ondas de grande período e baixa frequência, para a profundidade de 13 metros, apresentam-se na faixa de utilização da teoria de Stokes 2° ordem (Equação 2.15). Devido a esse fato, procurou-se não executar simulações para períodos muito maiores do que o 6,29 s, frequência de 0,159 Hz. Com isso, para essa investigação os períodos foram de 4,05 s, 5,17 s, 5,73 s, 6,01 s, 6,29 s, 6,57 s e 6,85 s.

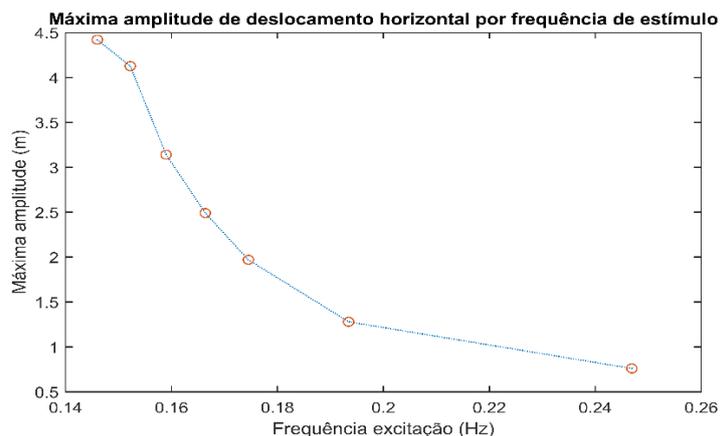


Figura 7.9 – Máxima amplitude da resposta horizontal da esfera 7, para diferentes frequências de excitação.

Observando o gráfico (Figura 7.9), é possível dizer que uma das frequências naturais do sistema provavelmente é menor do que 0,146 Hz. De acordo com Rao (2011) e Meirovitch (2001), na presença de batimento, a frequência natural pode ser aproximada pela diferença da frequência de batimento e de excitação. Sendo este outro modo de avaliação.

O gráfico a seguir (Figura 7.10), além de demonstrar a característica de não defasagem nas respostas das 7 esferas (para x e z), como no caso anterior, também pode ser utilizado para estimar uma das frequências naturais do sistema. Conforme as delimitações (azul e vermelho), o período de batimento para o estímulo de 0,159 Hz é igual a 63,7 s (0,0157 Hz). Logo, a frequência natural estimada é 0,143 Hz.

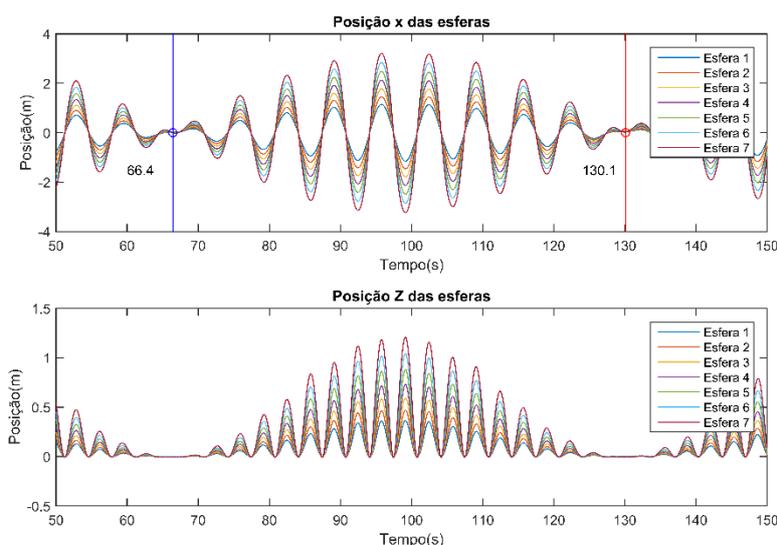


Figura 7.10 – Ampliação da posição x e z das sete esferas, sob onda de 6,29 s, com altura de 1,01 m.

O fenômeno de batimento ocorrido na pesquisa também é comum em outros estudos de interação fluido estrutura. Em um trabalho de vibração induzida por vórtices, para um duto submarino suspenso, Zhao *et al.* (2015) identificaram, no espectro de frequência de um batimento, dois picos, sendo um relacionado ao estímulo e outro à frequência natural.

Para além dessa área, a mesma análise do batimento também é executada em acústica e no diagnóstico de desbalanceamento de rotores [Eshleman, 2019]. Em vista disso, plotaram-se os espectros de frequência da posição x , da sétima esfera, da linha de cultivo para os estímulos de 0,1934 Hz a 0,1460 Hz (Figura 7.11).

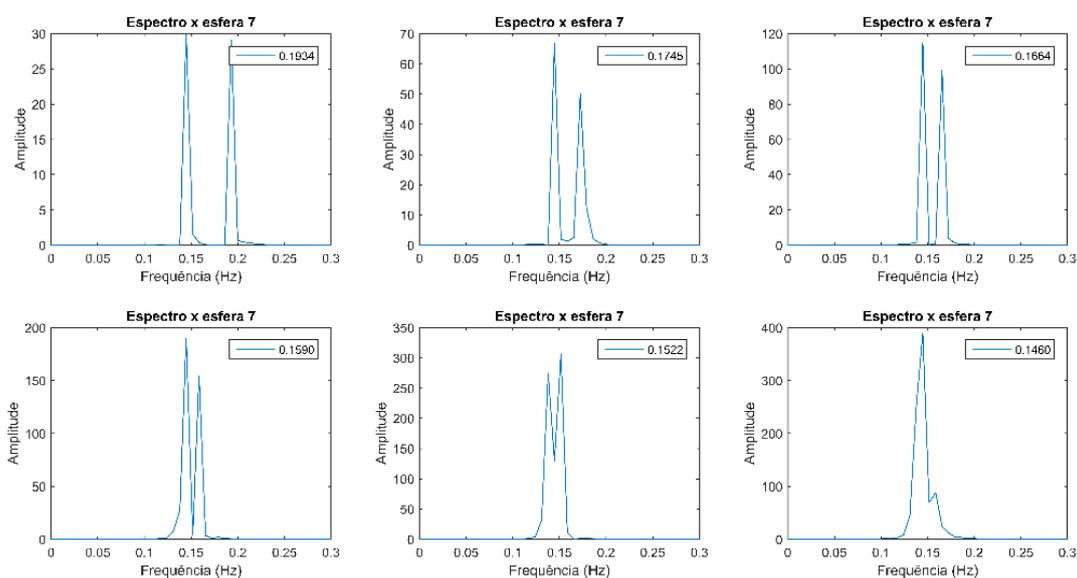


Figura 7.11 – Espectros de frequência da posição horizontal da sétima esfera, para a excitação de 0,1934 Hz, 0,1745 Hz, 0,1664 Hz, 0,159 Hz, 0,1522 Hz e 0,1460 Hz.

A análise dos gráficos, traz à percepção a existência de 2 picos predominantes de frequência, sendo um fixo para todos os casos (próximo ao valor de 0,146 Hz) e outro, semelhante aos valores de excitação. Além disso, é importante avaliar que, à medida que os dois picos aproximam-se – a frequência de excitação vai ao encontro da frequência natural –, tem-se o aumento da energia do espectro, devido à maior amplitude do movimento no domínio do tempo (Figura 7.9).

Diante disso, todos os resultados demonstram convergir para que uma das frequências naturais do sistema esteja no entorno de 0,143 Hz. Assim sendo, para a estabilidade da linha de cultivo, torna-se necessária a modificação da estrutura, visando diminuir essa frequência crítica, o que se discute no final do capítulo. Devido ao fato de

que o fenômeno de batimento não se apresenta como uma condição normal de operação em cultura de ostras, a seguir, não serão discutidos aspectos relacionados ao cultivo para os resultados do estímulo de 6,29 s.

Dando continuidade à análise dos resultados, no que diz respeito à variação de altura de onda e posição da massa na coluna de água, a linha de cultivo proposta apresentou o mesmo comportamento do caso “modificado”. Isso significa que os maiores deslocamentos foram para ondas de maior altura e para as massas posicionadas mais ao fundo, seguindo a mesma justificativa do caso anterior.

Para a avaliação do carregamento nos cabos, apenas das situações sem batimento evidente, plotou-se o gráfico da tração nos trechos de sustentação e de ligação entre as duas esferas mais ao fundo sob onda de 5,17 s e altura de 1,01 m (Figura 7.12). Os valores médios que indicam o carregamento estático foram de 55,7 N e 8,1 N, respectivamente, para os cabos 1 e 7. Além disso, observou-se um pico de força no início do gráfico.

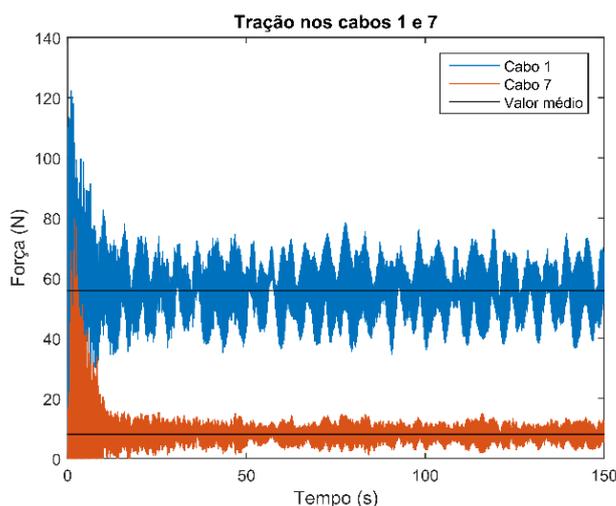


Figura 7.12 – Tração para o cabo de sustentação da linha de cultivo (cabo 1) e cabo entre as esferas 6 e 7 (cabo 7). Onda de período de 5,17 s e altura 1,01 m.

Para interpretação deste fato, é necessário recordar o funcionamento do *software*, no qual o usuário pode inserir uma condição inicial desbalanceada (peso diferente do empuxo). Essa condição fez com que, no início da simulação, apresentasse uma carga de característica impulsiva, sendo esta, justamente, a maior de toda a modelagem. Mesmo considerando o valor máximo (deformação 4 mm), pode-se dizer que o alongamento para o cabo comercial utilizado, – aproximação de comportamento linear para pequenas deformações – poderia ser desprezado em futuras investigações.

Conforme mencionado por Mitchell (2001), um dos fatores essenciais para o crescimento das ostras é a velocidade do escoamento. Com isso, a investigação de fase entre o corpo e o escoamento é importante. Ademais, tal gráfico (Figura 7.14) possibilita a verificação de características inerciais no problema, consideradas inicialmente por meio do número de Keulegan-Carpenter KC (Equação 2.23) e do diagrama de aplicação das forças (Figura 2.10). Para o cálculo do KC , é utilizada a velocidade do escoamento na profundidade desejada (Figura 7.13).

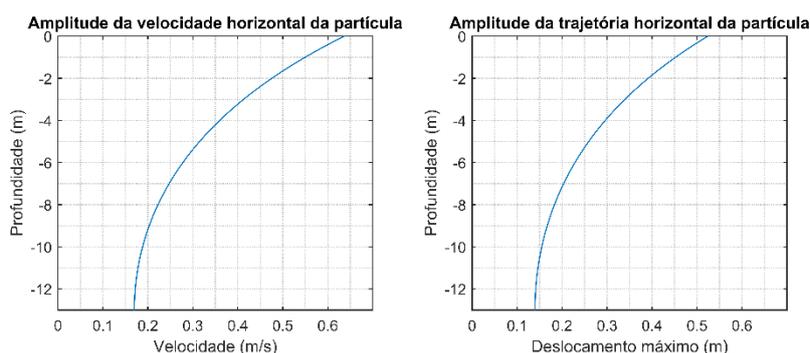


Figura 7.13 – Gradiente de amplitude de velocidade e posição da partícula teórica da onda de 5,17 s e altura de 1,01 m.

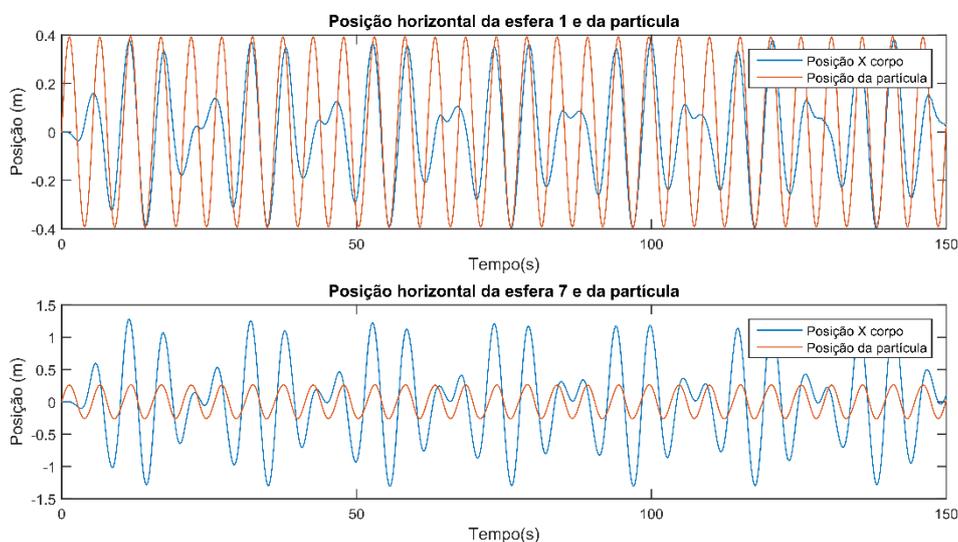


Figura 7.14 – Posição horizontal das esferas 1 e 7 e das partículas de água para a respectiva profundidade.

O gráfico da Figura 7.13 demonstra que a velocidade e a trajetória da partícula possuem gradiente hiperbólico, confirmando o mencionado anteriormente. No gráfico da esfera 7 (Figura 7.14), nota-se que ela apresenta um movimento maior do que o da partícula teórica, indicando a existência de características inerciais para o problema analisado. Com os valores do gráfico, outra forma de apresentar a formulação do número

de Keulegan – Carpenter KC é por meio da razão entre a amplitude do deslocamento da partícula de água x_p e o diâmetro da esfera D (Equação 7.1) [Journée e Massie, 2001; Sumer e Fredsøe, 2006; Patel, 1989].

$$KC = \frac{2\pi x_p}{D} \quad (7.1)$$

Os resultados aproximados de KC para as esferas 1 e 7 são 19 e 12, respectivamente. Confrontando esses valores com os diagramas de coeficiente de arrasto (Figura 2.11) e coeficiente de inércia (Figura 2.12) em Chakrabarti (1987) confirma-se que o fenômeno realmente é dominado por arrasto, com parcela de inércia, principalmente para as esferas mais ao fundo. Outra informação que pode ser retirada do gráfico 7.14 e comparada com o gráfico 7.15 é a defasagem entre a excitação e a resposta.

Sabendo que as forças de arrasto atuantes na estrutura estão em fase com a velocidade da partícula (Equação 2.24) e, além disso, que a velocidade e a trajetória da partícula teórica apresentam defasagem de $\frac{\pi}{2}$, a diferença entre o estímulo e a resposta fica mais clara ao analisar-se a Figura 7.15.

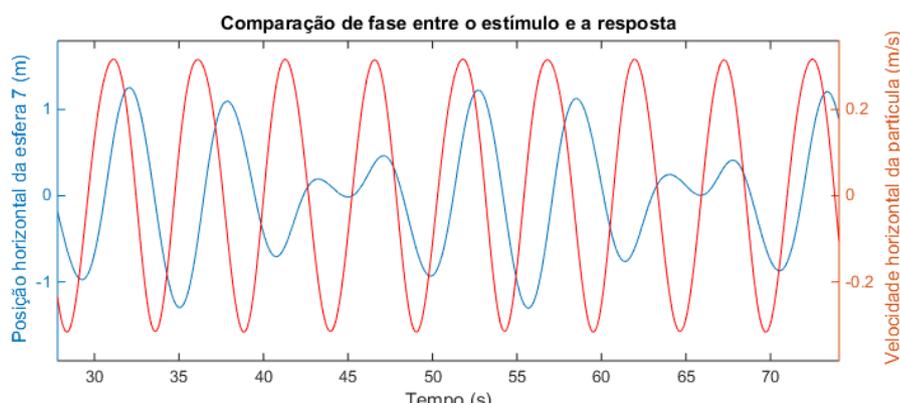


Figura 7.15 – Ampliação da comparação de fase entre o estímulo e a resposta da esfera 7, sob onda de 5,17 s e 1,01 m.

Com relação à velocidade do escoamento à qual a ostra estaria exposta, é preciso avaliar a velocidade relativa entre a esfera e o fluido. Devido ao fato de existir uma defasagem, essas velocidades podem, em alguns momentos da série temporal, ser somadas e resultarem em um pico significativamente maior do que o considerado apenas a velocidade da partícula teórica. É importante ressaltar que, a determinação de tal velocidade não leva em consideração alguns aspectos da interação fluido estrutura, como

vibrações transversais e geração de vórtices. Esses aspectos poderiam modificar o comportamento da resposta da linha de cultivo e, assim, alterar o valor da velocidade relativa.

De acordo com o mencionado, a Figura 7.16 mostra as velocidades horizontais do corpo, do fluido e relativa entre os dois para as esferas 1 e 7, sob onda de 5,17 s e 1,01 m. Analisando os dados, observa-se que a esfera mais próxima à superfície apresenta menores picos de velocidade relativa, em comparação à esfera mais profunda. Esse comportamento foi observado para todas as alturas simuladas.

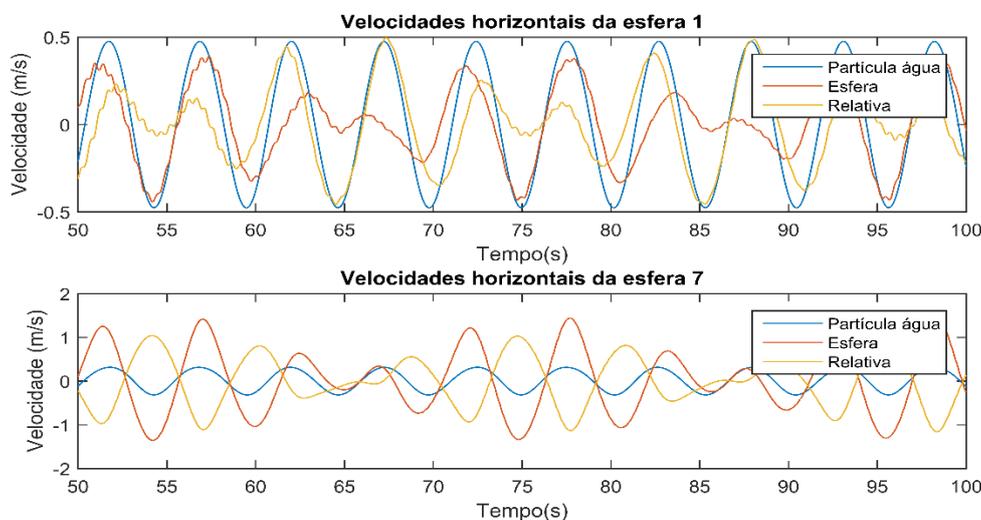


Figura 7.16 – Velocidades da esfera, do corpo e relativa para a excitação da onda de 5,17 s e altura 1,01 m.

Outro fator é que, ao avaliarem-se os sinais, nota-se que a esfera 1 tem velocidade relativa com menor diferença de fase da partícula da água, devido a uma menor movimentação da massa. Entretanto, como o deslocamento da massa mais ao fundo é maior, e ela apresenta maior reação inercial, a velocidade relativa encontra-se mais defasada da velocidade da partícula.

Buscando quantificar a situação mais crítica, os módulos das velocidades relativas absolutas, soma vetorial da componente horizontal e vertical, foram obtidos, e a média foi calculada. Os resultados para as ondas de 5,17 s e 4,05 s com alturas de 1,01 m, 0,72 m e 0,44 m, para cada uma das esferas, são apresentados na Tabela 7.1.

Os dados demonstram que o valor máximo das médias foi de 0,5056 m/s. Ademais, outra observação é que para o período de 5,17 s a maior média foi alcançada para a esfera mais ao fundo. Já para o período de 4,05 s o maior valor foi para a massa próxima à superfície.

Tabela 7.1 – Valor médio das velocidades relativas absolutas em cada esfera.

Período (s)	Altura (m)	Média das velocidades relativas absolutas para as massas (m/s)						
		1	2	3	4	5	6	7
4,05	0,44	0,1848	0,1613	0,1387	0,1195	0,1098	0,1176	0,1495
4,05	0,72	0,3024	0,2635	0,2261	0,1949	0,1795	0,1921	0,2447
4,05	1,01	0,4250	0,3701	0,3167	0,2727	0,2529	0,2714	0,3481
5,17	0,44	0,1602	0,1515	0,1495	0,1464	0,1712	0,1944	0,2248
5,17	0,72	0,2615	0,2462	0,2430	0,2370	0,2777	0,3147	0,3637
5,17	1,01	0,3675	0,3461	0,3413	0,3339	0,3884	0,4389	0,5056

Com efeito, de acordo com Cranford *et al.* (2011), vários estudos comparando o escoamento unidirecional constante à taxa de filtragem dos organismos bivalves foram feitos. Os pesquisadores, além de citar que os limites de filtragem variam de acordo com a espécie, salientam que não existe um consenso para velocidades limites de sobrevivência das ostras. Ackerman (1999) relacionou os escoamentos nos animais com o número de Reynolds, indicando, de forma geral, que processos turbulentos tendem a ser prejudiciais ao crescimento dos organismos.

Os valores de Reynolds para as velocidades da Tabela 7.1 apresentam-se na escala de 10^4 , onde todos os escoamentos são classificados como turbulentos, segundo Sumer e Fredsøe, (2006). Esse resultado indica que possivelmente as conchas das ostras se manteriam fechadas para estas velocidades.

Vale ressaltar que essa análise serve apenas como base de comparação, pois, em uma fazenda de cultivo de ostras, os diâmetros usados no cálculo de Reynolds seriam menores. Além disso, a colocação de várias linhas de cultivo próximas umas das outras modificaria o campo de velocidades ao qual os animais estariam submetidos, de acordo com o estudo de Strohmeier *et al.* (2005) e Drapeau *et al.* (2007) para correntes de maré.

Após a análise dos resultados para a linha de cultivo, decidiu-se elaborar mais 8 simulações, modificando apenas o comprimento do cabo de sustentação (Cbs) (Figura 6.4). Essas simulações tinham como foco a busca por um distanciamento entre as frequências natural e de excitação, principalmente para as ondas de 6,29 segundos. O comprimento variou de 0,25 m, com início em 1,5 m e término em 3,5 m.

Para esta investigação utilizou-se o caso de maior amplitude de movimento, ou seja, a onda de 6,29 s e a altura 1,01 m. Os gráficos da posição horizontal da sétima esfera

(Figura 7.17) indicaram uma atenuação de aproximadamente 2,5 m (60,7%) na amplitude do movimento, devido ao acréscimo na dimensão da estrutura. Além disso, com a resposta temporal, o valor da frequência natural em cada um dos casos pode ser estimado por meio do período de batimento (Figura 7.19).

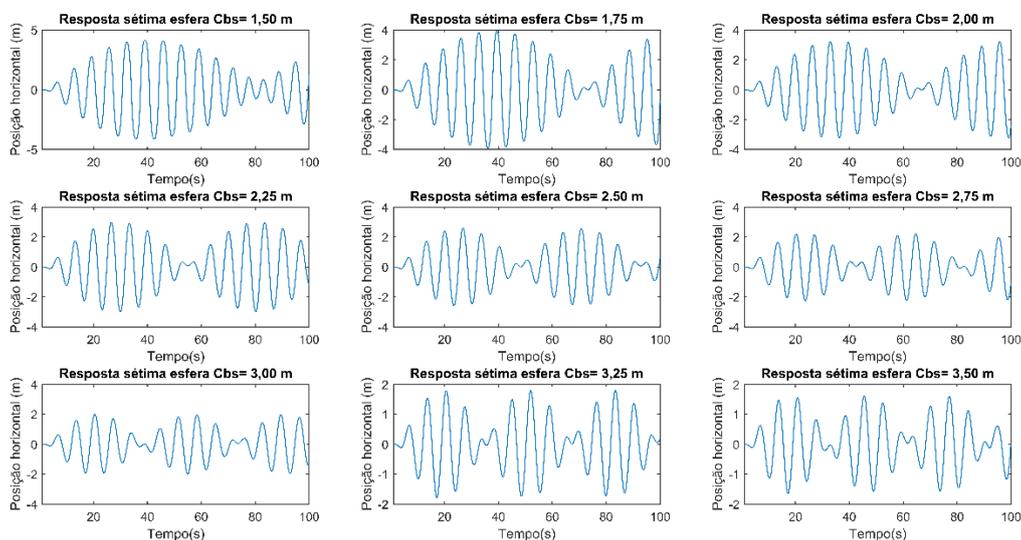


Figura 7.17 – Posição horizontal da sétima esfera para diferentes comprimentos do cabo de sustentação.

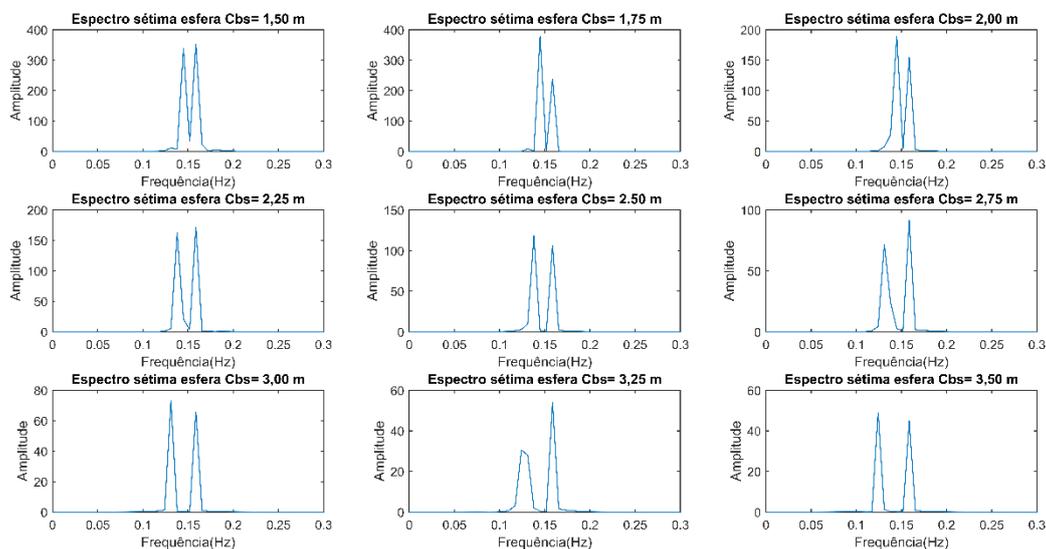


Figura 7.18 – Espectro de frequência da coordenada “x” da sétima esfera para diferentes comprimentos do cabo de sustentação.

De forma similar ao já analisado, os espectros da coordenada x foram plotados. Diante dos gráficos (Figura 7.18) foi possível visualizar o afastamento das frequências, justificando a diminuição na amplitude do movimento. Entretanto, confrontando a diminuição da amplitude (Figura 7.17), variação das frequências estimadas (Figura 7.19)

e também o gradiente vertical da velocidade (Figura 7.13) é importante considerar que parte da atenuação do movimento esteja relacionada à diminuição da força sobre a estrutura, já que as esferas apresentam maior profundidade.

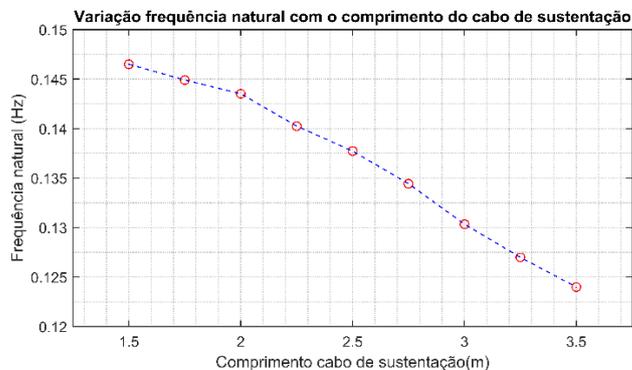


Figura 7.19 – Variação das frequências naturais estimadas (círculos vermelhos) por comprimento do cabo de sustentação da estrutura.

Diante do exposto, fica evidente que problemas envolvendo pêndulos submersos excitados por ondas oceânicas possuem muitas variáveis interligadas, que dificultam o processo de identificação de como cada uma delas influencia separadamente a resposta da estrutura. Ademais, após todas as análises feitas, os resultados caminham no sentido de que a faixa de frequências naturais de estruturas pendulares semelhantes às testadas apresentam valores baixos e, portanto, próximos às frequências das ondas.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No desenvolver da pesquisa, foram realizados experimentos e simulações da estrutura de uma esfera de massa concentrada, sob efeitos das forças hidrodinâmicas de Morison e Froude-Kylov, com o propósito de validar os procedimentos efetuados na modelagem numérica e permitir a extrapolação para o modelo aproximado de uma estrutura de ostreicultura. A investigação da resposta da linha de cultivo elucidou aspectos importante da dinâmica de estruturas *offshore*, possibilitando a potencialização do crescimento das ostras.

Após a realização de várias simulações, desde estrutura pendular elástica com dois graus de liberdade até a investigação de linhas de cultivos com dezesseis, acredita-se que a modelagem numérica utilizada tenha retornado resultados consistentes.

Inicialmente, entende-se que o procedimento utilizado na validação do modelo de uma esfera apresenta-se como uma boa ferramenta para casos com muitas variações paramétricas – variações de período e altura de onda, rigidez do cabo, profundidade do corpo e formulação de onda. Isso porque, além de indicar de forma geral a equivalência dos resultados, a Tabela 5.1 demonstra para quais situações o resultado do modelo numérico distancia-se do experimento, como no caso de ondas de Stokes ou de menor rigidez do cabo.

A modelagem junto ao *software* utilizado mostra grandes possibilidades. Entretanto, estas possibilidades podem apresentar-se como uma dificuldade para a obtenção de resultados específicos. Um exemplo é o caso de análise de regimes permanentes, no qual, dependendo do passo de integração, do posicionamento inicial e também da duração da simulação, uma resposta inconclusiva pode ser obtida. Por isso, no estudo em questão, em cabos com baixa rigidez, é importante que o usuário faça o posicionamento das estruturas com os elementos fixadores (cabos) pré-tracionados. Essa condição diminui o tempo de simulação, bem como o erro do *time-step*.

Buscando atenuação na amplitude do movimento da estrutura da linha de cultivo, sob ondas de 6,29 s, foram realizadas modificações nos parâmetros construtivos (comprimento, espaçamento das esferas e massa) até a estabilização. Entretanto, após serem simulados valores intermediários, notou-se que a estrutura alternativa também apresentou grandes oscilações horizontais, indicando proximidade entre uma das frequências naturais e o estímulo. Diante disso, conclui-se que, em aplicações de ondas

monocromáticas baseadas em dados de estados de mar, é necessário um maior número de testes, com espaçamento de período menor do que 1 segundo entre ondas.

Nas estruturas analisadas, a relação entre peso e empuxo apresentou-se menos crítica do que a relação de comprimento da estrutura e da onda (frequência da onda e frequência natural). Além disso, tendo como base os resultados da estrutura originalmente proposta, confirmou-se que a altura de onda não influenciou na forma de vibração, apenas na amplitude do movimento.

Conforme mencionado nos resultados, em fenômenos de batimento, a utilização do espectro mostrou-se eficiente na aproximação da frequência natural do sistema, não necessitando de cálculos do período de batimento.

Para mais, utilizando-se de materiais comerciais, ficou evidente a não necessidade da incorporação da elasticidade dos cabos nos modelos, devido ao fato de que, mesmo em cabos com baixa rigidez, a força de tração e a amplitude dos carregamentos cíclicos se mostraram pequenas.

Com relação às características dos carregamentos hidrodinâmicos, a estrutura de cultivo apresentou características inerciais significativas, principalmente para as esferas com maior profundidade, devido à ação do movimento pendular.

No que se refere à análise de possíveis organismos a serem cultivados em sítios de características semelhantes às encontradas na área de estudo, pode-se dizer que não foram descobertas limitações quanto à concentração de clorofila (alimento) na coluna de água. Isso quer dizer que a estrutura poderia apresentar um comprimento próximo à profundidade local. Vale ressaltar que a concentração de clorofila pode ser facilmente alterada de acordo com as propriedades físico-químicas da massa de água em circulação.

Já com relação à velocidade do escoamento, de forma geral, as ostras apresentam limitações fisiológicas na velocidade de escoamento, as quais realizam a etapa de filtragem e obtenção do alimento. Pensando nisso, as velocidades relativas calculadas mostram que provavelmente as conchas se manteriam fechadas, não sendo as ostras capazes de se alimentarem. Acredita-se que, também por esse motivo, a maioria dos cultivos encontrados estejam em baías. Isso ocorre porque, além de uma questão de proteção à estrutura, tais ambientes podem apresentar menos processos turbulentos e um maior crescimento dos organismos. Tais considerações são tomadas com base nos modelos desenvolvidos. Todavia, conforme mencionado na discussão dos resultados, em fazendas de cultivos, a densidade das linhas e outros processos de interação fluido-

estrutura podem modificar o campo de velocidades e conseqüentemente a resposta da estrutura.

O acréscimo de 2 m no comprimento do cabo de sustentação foi responsável por uma atenuação no movimento horizontal da linha de cultivo de aproximadamente 60,7%. Mesmo assim, ainda foram observadas evidências do fenômeno de batimento para o caso de onda de 6,29 s.

Com tudo isso, devido à quantidade de variáveis interligadas, o problema investigado mostrou-se de grande complexidade, não somente pelos fenômenos envolvidos, como também pela interdisciplinaridade do assunto, relacionando aspectos de engenharia, biologia e oceanografia.

Por fim, acredita-se que o trabalho tenha cumprido seu papel na investigação da resposta dinâmica de um modelo de estrutura de cultivo de ostras, aproximando o modelo a condições reais e direcionando os principais fatores multidisciplinares a serem avaliados em trabalhos futuros.

8.1. Trabalho Futuros

Por se tratar de uma abordagem ainda pouco utilizada, pesquisas futuras são estimuladas, de forma a complementar o estudo realizado e aprimorar o cultivo de moluscos em regiões de mar aberto. Para tanto, os trabalhos futuros a seguir são sugeridos:

- Realização de modelagem numérica considerando a separação do fluido e a utilização de modelos de turbulência, incorporando os resultados de movimentação da estrutura, obtidos na atual pesquisa.
- Experimentação do modelo de estrutura de cultivo desenvolvido em maiores tanques de onda, com intuito de validação de resultados obtidos para linhas com até 8 esferas, desenvolvidos nesta pesquisa.
- Estudo CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para análise do escoamento oscilatório ao redor da concha, tendo como dado de entrada, a velocidade relativa obtida no trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ackerman, J. D. Effect of velocity on the filter feeding of dreissenid mussels (*Dreissena polymorpha* and *Dreissena bugnesis*): Implications for trophic dynamics. **Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science**, v. 56, p. 1551-1561, 1999.

Albuquerque, M. C. P. **Novas opções de cultivo de moluscos bivalves marinhos no Brasil: *Pteria hirundo* (Linnaeus, 1758) e *Cyrtopleura costata* (Linnaeus, 1758)**. Doutorado em Aquicultura, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 218. 2010.

Alves, M.; Brit-melo, A.; Sarmiento, A. J. N. A. **Numerical Modeling of the Pendulum Ocean Wave Power Converter Using a Panel Method**. International Offshore and Polar Engineering Conference. Kitakyushu. 2002. p. 8.

Amuchastegui, J. G. Análise de Vibração – Tipos de Sinais, Transformada de Fourier e PSD. **ENSUS Advanced Engineering**, 18 Abril 2016. Disponível em: <<https://ensus.com.br/analise-de-vibracao-tipos-de-sinais-transformada-de-fourier-e-psd/>>. Acesso em: 06 jun. 2020.

ANSYS. **Reference Manual**. Canonsburg - USA: ANSYS, inc, 2017a.

ANSYS. **Theory Manual**. Canonsburg - USA: ANSYS, inc, 2017b.

ANSYS. **User manual**. Canonsburg - USA: ANSYS, inc, 2017c.

Arriaga, D.; Chaves, C. M. **Método de Painel para o Cálculo do Escoamento Potencial em Torno de Vários Perfis Sustentadores**. Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, p. 95. 2012.

Aslan, L. O. M. et al. Mariculture in SE Sulawesi, Indonesia: Culture practices and the socio economic aspects of the major commodities. **Ocean & Coastal Management**, v. 116, p. 44-57, 2015.

Ayape, S. M. Mussle Culture. **Selected papers on Mollusc Culture, UNDP/FAO Regional Seafarming Development and Demonstration Project (RAS/90/002)**,

Bangkok, 1990. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/ab737e/AB737E04.htm#ch4>>. Acesso em: 19 jul. 2019.

Baker, S.; Grogan, K.; Stumer, L. **"Green" Clams: Estimating the Value of Environmental Benefits (Ecosystems Services) Generated by the Hard Clam Aquaculture Industry in Florida**. Florida Department of Agriculture and Consumer Services, Aquaculture Program, University of Florida. p. 10. 2015.

Borgman, L. E. Random hydrodynamic force on objects. **Annal of Mathematical Statistics**, v. 38, p. 37-51, 1967.

Burton, R. F. Ionic regulation and water balance. **The Mollusca-Physiology**, New York, v. 5, p. 291-352, 1983.

Campbell, M. D.; Hall, S. G. Hydrodynamic effects on oyster aquaculture systems: A review. **Reviews in aquaculture**, v. 11, p. 896-906, 2019.

Chakrabarti, S. K. **Hydrodynamics of Offshore Structure**. Plainfield: WIT press, 1987. ISBN 0-905451-66-X.

Ciotti, Á. M. et al. Freshwater outflow and Subtropical Convergence influence on phytoplankton biomass on the southern Brazilian Continental shelf. **Continental Shelf Research**, v. 15, p. 1737-1756, 1995.

Cranford, P. J.; Ward, J. E.; Shumway, S. E. Bivalve Filter Feeding: Variability and Limits of the Aquaculture. In: _____ **Shellfish Aquaculture and the Environment**. Wiley-Blackwell, 2011. Cap. 4.

Dean, R. G.; Dalrymple, R. A. **Water wave mechanics for engineering and scientists**. Singapore : World Scientific , v. 2, 1991.

Delmendo, M. N. **Bivalve farming: An alternative economic activity for small-scale coastal fishermen in the Asean region**. ASEAN/UNDP/FAO Regional Small-Scale Coastal Fisheries Development Project. Manila, p. 17. 1989.

Ding, B. et al. **Study of fully submerged point absorber wave energy converter- Modelling, simulation and scaled experiment.** The 32nd International Workshop on Water and Floating Bodies. Dalian. Abril 2017. p. 23-26.

Diniz, P. A. S.; Silva, E. A. B.; Netto, S. L. **Processamento digital de sinais: Projeto e análise de sistemas.** 2^a. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014. 965 p.

Drapeau, A. et al. **The effect of sock spacing on the productivity of mussel on a longline system.** Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Science, Department of Fisheries and Oceans. New Brunswick, p. 31. 2007.

Eshleman, R. L. **Understanding Non-Linear Signals-Beats.** Proceedings of the 43rd Annual Meeting of the Vibration Intitute. Lexington. 2019.

Faltinsen, O. M. **Sea loads on ship and offshore structure.** Cambrigde: Cambrigde University Press, 1990. 324 p. ISBN 0521 45870 6.

FAO. **National Aquaculture Sector Overview: BRAZIL.** Fisheries and Aquaculture Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2004.

FAO. **Cultured Aquatic Specie Information Programme : Crassostrea gigas (Thumberg,1793).** Fisheries and Aquaculture Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. Rome. 2006.

FAO. **The state of world fisheries and aquaculture: Meeting the sustainable development goals.** Food and Agriculture Oganization of the United Nations - FAO. p. 227. 2018.

Fonfach, J. M. A. **Modelo numérico de efeitos hidrodinâmicos em escoamentos internos e externos.** Doutorado em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio De Janeiro, p. 151. 2017.

Gangnery, A. et al. Growth model of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*, cultured in Thau Lagoon (Méditerranée, France). **Aquaculture**, v. 215, p. 267-290, 2003.

Garrido-Handog, L. OYSTER CULTURE. **Selected papers on Mollusc Culture, UNDP/FAO Regional Seafarming Development and Demonstration Project (RAS/90/002)**, Bangkok, 1990. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/ab737e/AB737E03.htm#ch3>>. Acesso em: 19 jul. 2019.

Góngora-Gómez, A. M. et al. Modeling the individual growth of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* cultivated in the Gulf of California using the von Bertalanffy. **Biología Marina y Oceanografía**, v. 52, n. 1, p. 181-185, abril 2017.

HBM. **Data sheet - SP4M-Single point load cells**. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH. Darmstadt · Germany, p. 1-5. 2007.

HBM. **Classe de Precisão OIML explicadas**, 2020. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/2637/classes-de-preciso-oiml-exatido-das-celulas-de-carga/>>. Acesso em: 12 abr. 2020.

Heasman, K. G. et al. Shellfish maricultura in the Benguela system: Raft culture of *Mytilus galloprovincialis* and the effect of rope spacing on food extraction growth rate, production, and condition of mussels. **Journal of Shellfish Research**, v. 17, p. 33-39, 1998.

Hickey, J. P. **Carbon sequestration potential of shellfish**. Technical report, School of Natural and Built Environments, LMES, University of South Australia. Seminars in Sustainability. 2008.

Holland, G. L. The role of intergovernmental organizations in the coastal zone management. **Ocean & Coastal Management**, v. 39, 1998.

Huang, J. F.; Lee, J. M. Production economics and profitability analysis of horizontal rack culture and horizontal rack culture methods: A case study of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) farming in Chiayi and Yunlin Counties, Taiwan. **Aquacult Int**, v. 22, n. Spring Science, p. 1131-1147, December 2014.

Ingle, V. K.; Proakis, J. G. **Digital Signal Processing Using MATLAB®**. 3. ed. Stamford- USA: Cengage Learning, 2010.

Journée, J. M. J.; Massie, W. W. **Offshore Hydromechanics**. 1. ed. Delft University of Technology, 2001.

Junior, L. O. C. et al. Crescimento da estra *Crassostrea rhiphorae* cultivada em diferentes densidades de estocagem no Litoral Norte de Pernambuco. **Pesquisas Agropecuárias Pernambucadas, Piscicultura**, v. 17, p. 10-14, dez 2012.

Kubelka, B. G.; Olinto, C. R.; Pinto, W. T. **Modeling of hydrodynamics of sub-sea floating structure for mollusc offshore cultivation**. Proceedings of the XXXVIII Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering CILAMCE, 2017. Florianopolis, SC Brazil, p. 9. 2017.

Lader, P. F.; Enerhaug, B. Experimental Investigation of Force and Geometry of a net Net Cage in Uniform Flow. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 30, n. 1, 2005.

Lamarão, P. F. et al. **Numerical Analysis of a Point Absorber Under Regular Wave**. 25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering. Uberlândia: ABCM. October 2019. p. 7.

LIFE. Estrutura. **LIFE.FURG**, 2020. Disponível em: <<https://life.furg.br/laboratorio/estrutura>>. Acesso em: 12 mar. 2020.

Meirovitch, L. **Fundamentals of Vibrations**. New York: McGraw-Hill, 2001. 789 p. ISBN 0-07-041345-2.

Meng, F. et al. **Model validation of the submerged spherical point absorber with asymmetric mass distribution**. Technical Report, School of Mechanical Engineering, University of Adelaide. p. 9. 2017.

Miossec, L.; Le Deuff, R.; Gouletquer, P. **Alien Species Alert: *Crassostrea gigas* (Pacific Oyster)**. International Council For the Exploration of the Sea - ICES. Cooperative Research Report No 299. Copenhagen, p. 44. 2009.

Mitchell, I. M. **Relationship between water quality parameters (nutrients, seston, chlorophyll A), hydrodynamics and oyster growth in three major Pacific**

oyster (*Crassostrea gigas*) growing areas in southern Tasmania (Australia). Master of science , University of Tasmania. p. 22. 2001.

Mordec. **Synthetic Ropes.** Mordec International Pte Ltd. Singapura, p. 10. 2020.

Nalon, J. A. **Introdução ao Processamento Digital de Sinais.** Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2009.

Neto, R. L. B. **Ictiofauna associada às lanternas de cultivo de ostras do gênero *Crassostrea* na Baía de Guaratuba (PR)-Brasil.** Monografia em Oceanografia, Universidade Federal do Paraná. Pontal do Paraná, p. 52. 2010.

NOAA. **Offshore Aquaculture in the United States: Economic Considerations, Implications & Opportunities.** NOAA Technical Memorandum NMFS F/SPO-103, U.S. Department of Commerce National Oceanic & Atmospheric Administration. Silver Spring, p. 272. 2008.

Patel, M. H. **Dynamics of Offshore Structure.** Frome: Butterworth, 1989. 402 p. ISBN 0-408-01074-6.

Pecher, A.; Kofoed, J. P. **Handbook of Ocean Wave Energy.** New Orleans: Springer, v. 7, 2017.

Pribadi, A. B. K.; Donatini, L.; Lataire, E. Numerical Modelling of a Mussel Line System by Means of Lumped - Mass Approach. **Journal of Marine Science and Engineering**, 5 Sept 2019. 24 p.

Raman-Nair, W.; Colbourne, B.; Bergeron, P. Numerical Model of a mussel longline system: Coupled dynamics. **Ocean Engineering**, v. 35, p. 1372-1380, 2008.

Rao, S. S. **Mechanical Vibrations.** 5. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 2011. 1077 p.

Ruppert, E. E.; Barnes, R. D. **Zoologia dos invertebrados.** 6. ed. São Paulo: Roca, 1996.

Sarpkaya, T. Force on a circular cylinder in viscouso oscillatory flow at low Keulegan-Carpenter number. **Journal of Fluid Mechanics**, 165, 1986. 61-71.

Sawaragi, T. et al. **Coastal Engineering - Waves, Beaches, Wave-Structure Interactions**. 1. ed. Elsevier Science, 1995. 478 p.

SEBRAE. **OSTREICULTURA, Manual de boas praticas: Qualidade e segurança para bons negócios**. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequena Empresas - SEBRAE. Brasília- DF, p. 33. 2015.

Sergiienko, N. Y. et al. Performance comparison of the floating and fully submerged quasi-point absorber wave energy converters. **Renewable Energy**, March 2017.

Silva, C. C.; Silva, J. C. **Cultivo de Ostras**. Dossiê técnico, REDTEC - Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 20. 2007.

SiMCosta. Download de dados. **Portal SiMCosta**, 2020. Disponível em: <<http://www.simcosta.furg.br/downloads>>. Acesso em: 02 maio 2020.

Snyder, J. et al. Oyster Aquaculture Site Selection Using Landsat 8-Derived Sea Surface Temperature, Turbidity and Chlorophyll a. **Frontiers in Marine Science**, 29 June 2017. 11.

Sorensen, R. M. **Basical Coastal Engineering**. 3. ed. New York: Springer, 2006. 330 p.

Stevens, C. et al. The physics of open-water shellfish aquaculture. **Aquacultural Engineering**, Jan 2008. 145-160.

Stewart, R. **Introduction to Physical Oceanography**. Texas: Texas A & M University, 2008.

Strohmeier, T. et al. Flow reduction, seston depletion, meat content and distribution of diarrhetic shellfish toxins in a long line blue mussel (*Mytilus edulis*) farm. **Journal of Shellfish Research**, v. 24, p. 15-23, 2005.

Sumer, B. M.; Fredsøe, J. **Hydrodynamics Around Cylindrical Structures**. Singapore: World Scientific, v. 26, 2006. 327 p. ISBN 981-270-039-0.

Teixeira, P. R. **Mecânica das ondas - Ondas de Amplitudes Finitas**. Material de aula do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica. Rio Grande - RS, p. 40. 2017.

Triola, M. F. **Estadística**. 10. ed. Atlacomulco: Pearson Educación, 2009. 904 p.

Vargas, L. A. T. **Desenvolvimento e implementação de procedimento numérico para cálculo de conjuntos asa-empenagens de geometria complexa em regime de vôo subsônico, assimétrico e não linear**. Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 124. 2006.

Wilson, J. F. **Dynamics of Offshore Structures**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2003. 343 p.

Wolf, R. A. **Avaliação de parâmetros oceanográficos em áreas de produção de ostras nas águas da Baía Sul (SC)-Brasil**. Doutorado em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 247. 2007.

WORMS. Name details. **Word Register of Marine Species**, 2020. Disponível em: <<http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=140656>>. Acesso em: 08 jul. 2020.

Zammit, C. et al. **The dynamics of the elastic pendulum**. Mathematical modeling, University of Arizona. 2018.

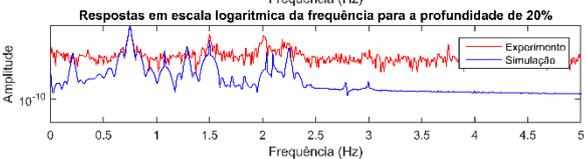
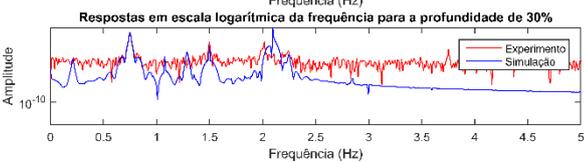
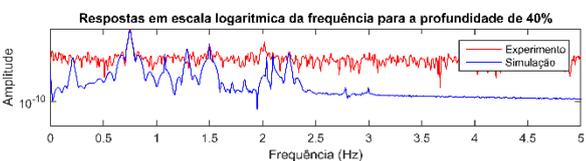
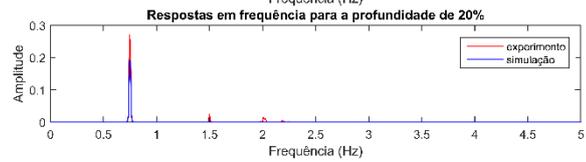
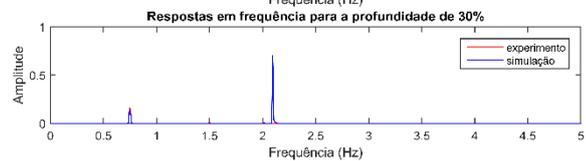
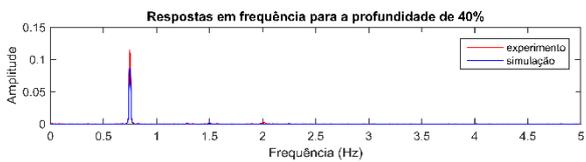
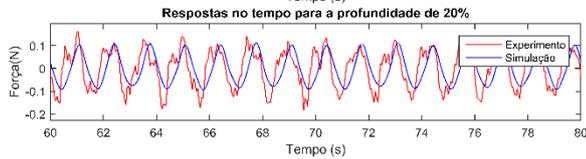
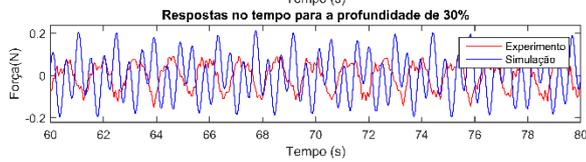
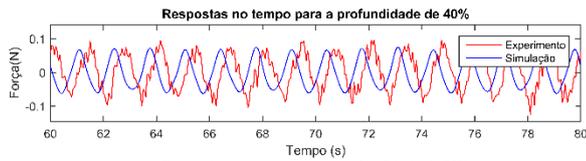
Zhao, E. J. et al. **Numerical Simulation of Mass Ratio's Effect on Vortex-Induced Vibration of Suspended Submarine Pipeline**. International Conference on Computer Information Systems and Industrial Applications. CISIA. 2015.

Zhu, L. et al. Aquaculture farms as nature-based coastal protection: Random wave attenuation by suspended and submerged canopies. **Coastal Engineering**, 30 May 2020. 17

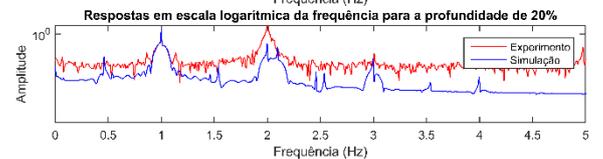
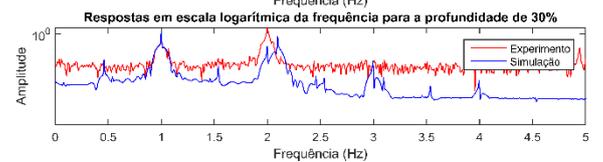
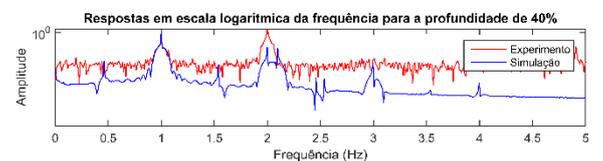
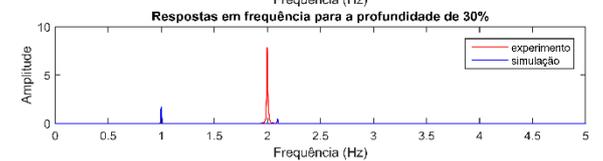
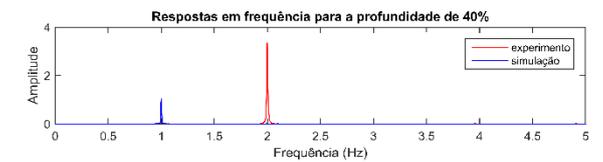
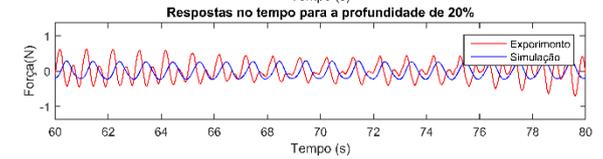
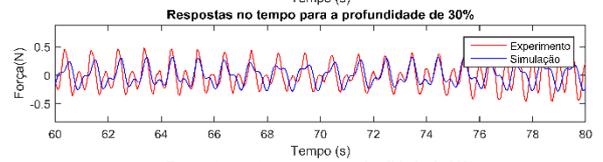
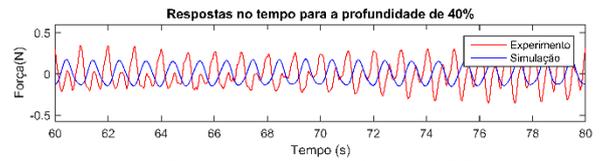
APÊNDICE A

Gráficos comparativos das respostas da estrutura pendular elástica sob onda, utilizados no Capítulo 5, organizados em colunas.

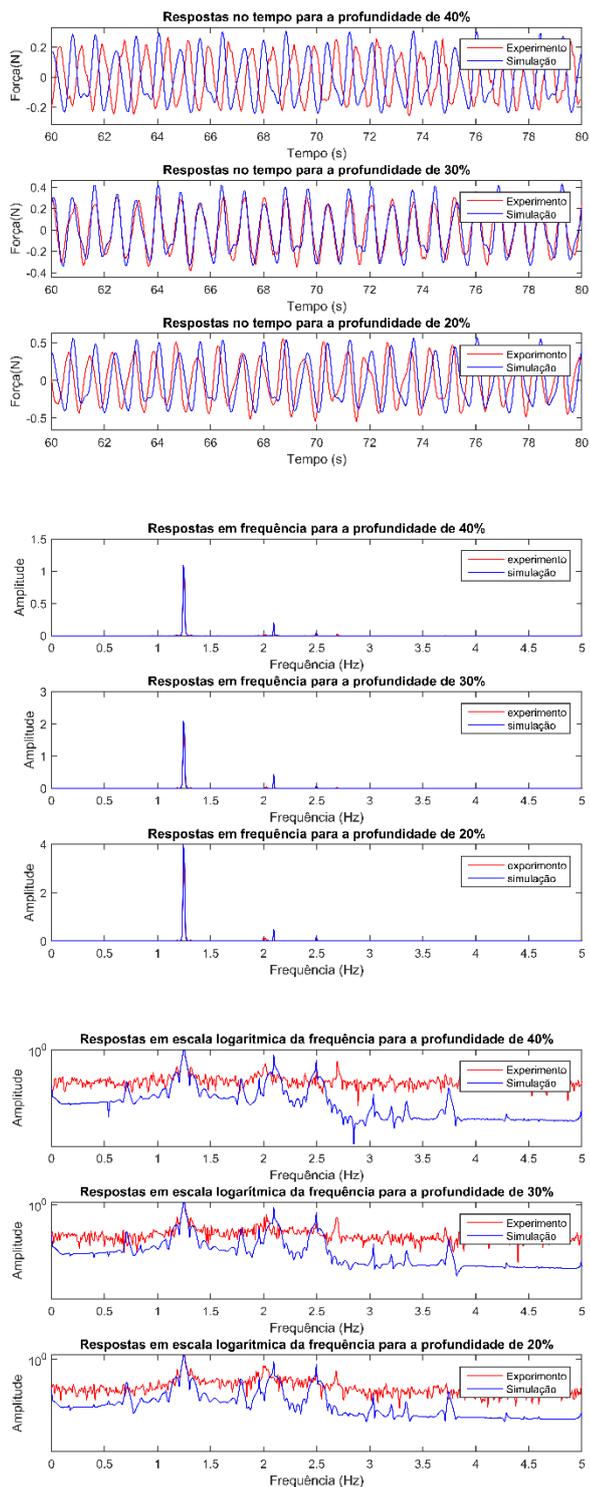
Rigidez 187,17 N/m – Onda 0,75 Hz



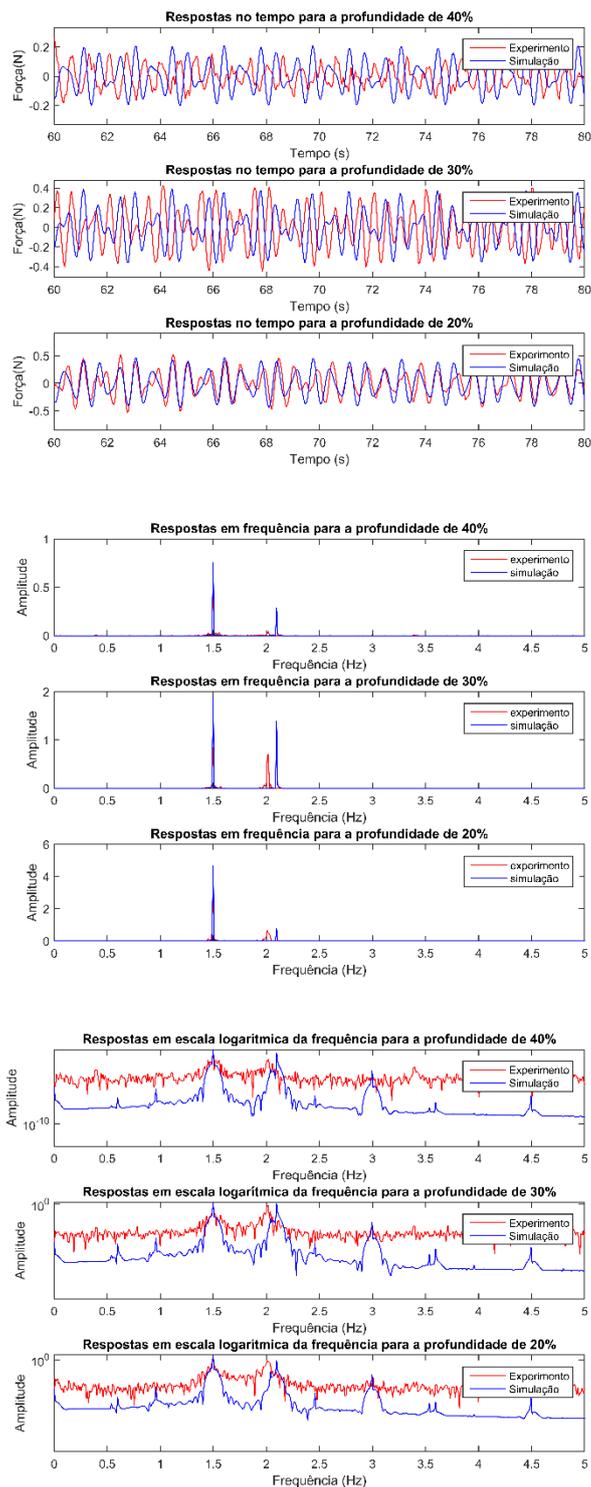
Rigidez 187,17 N/m – Onda 1 Hz



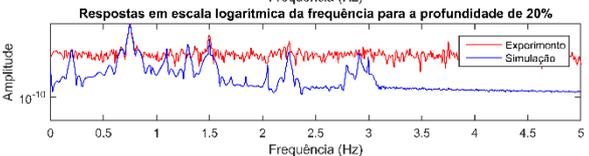
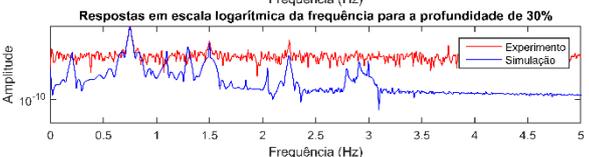
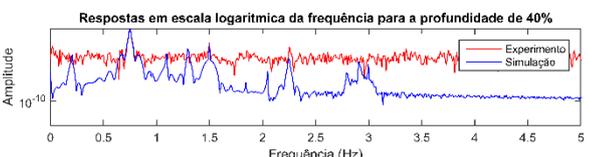
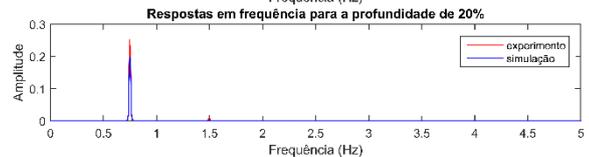
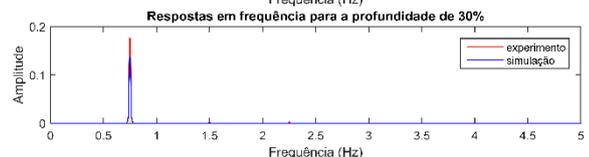
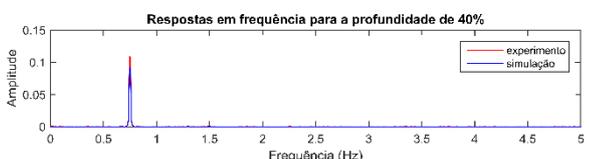
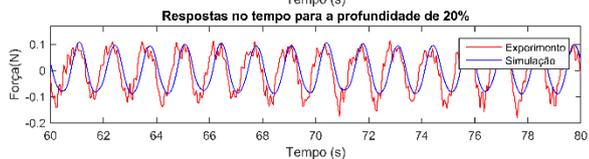
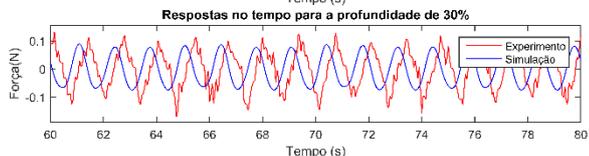
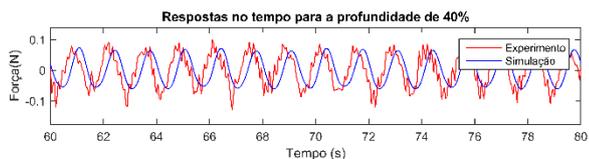
Rigidez 187,17 N/m – Onda 1,25 Hz



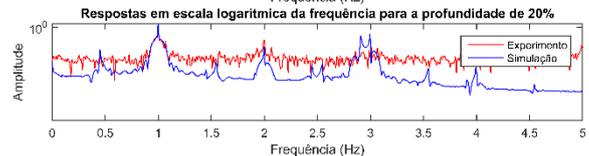
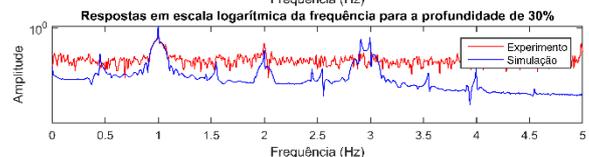
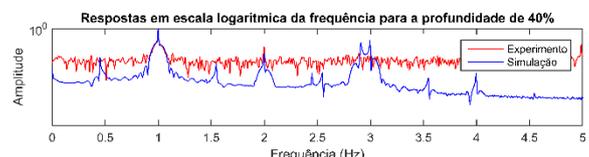
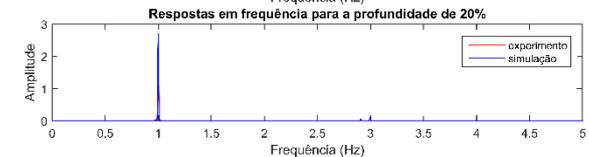
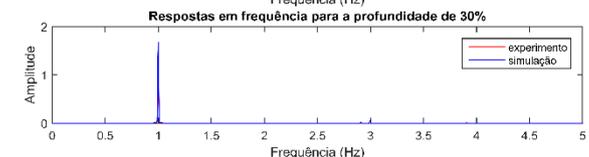
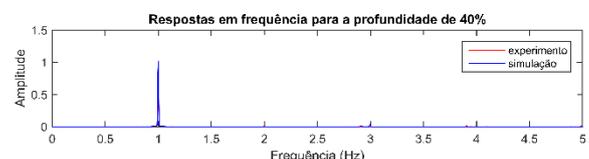
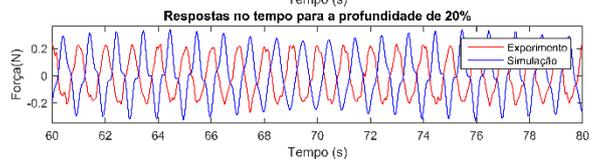
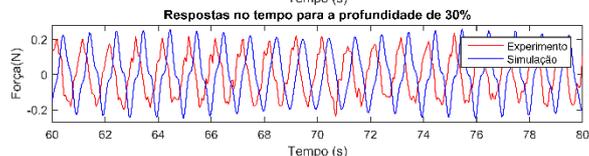
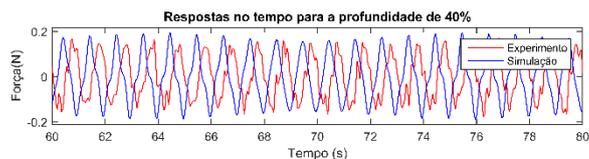
Rigidez 187,17 N/m – Onda 1,5 Hz



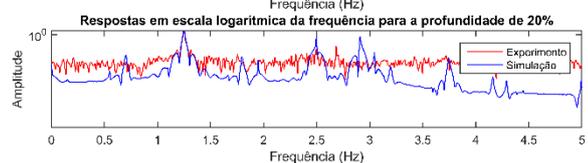
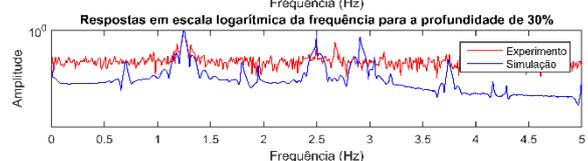
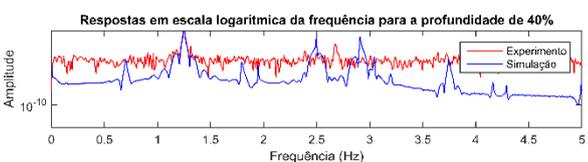
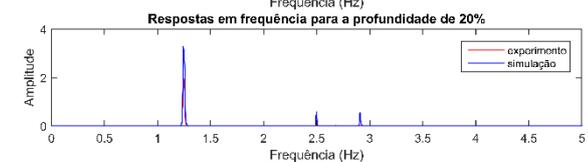
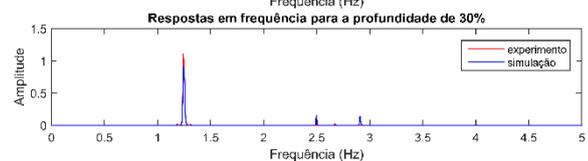
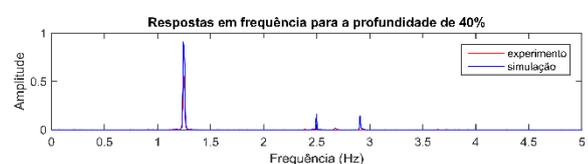
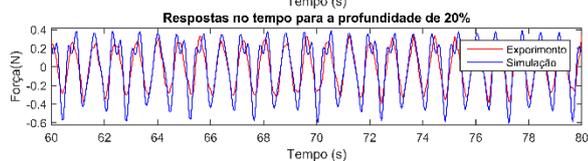
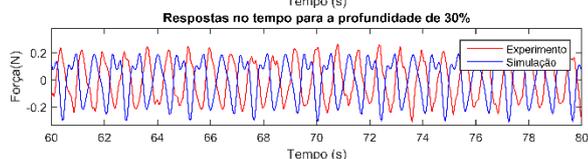
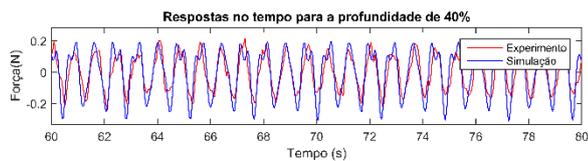
Rigidez 360,72 N/m – Onda 0,75 Hz



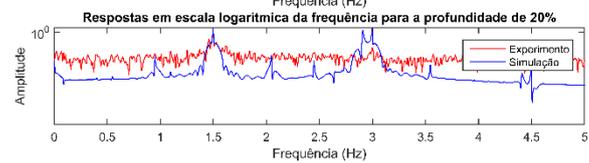
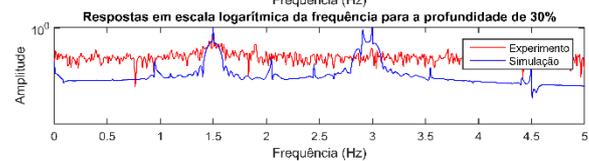
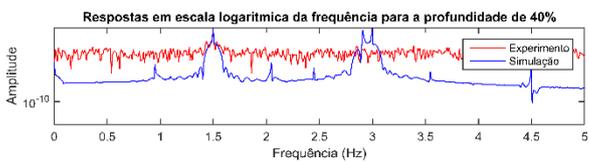
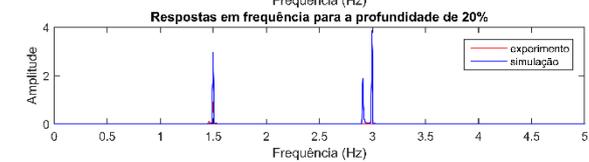
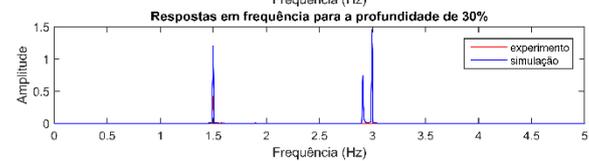
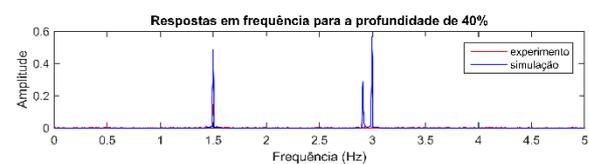
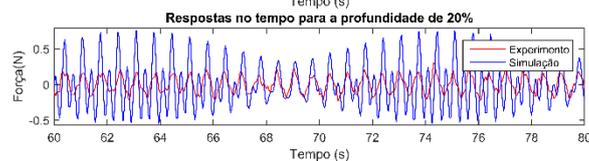
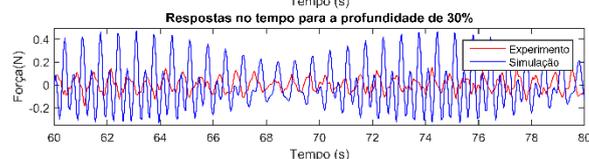
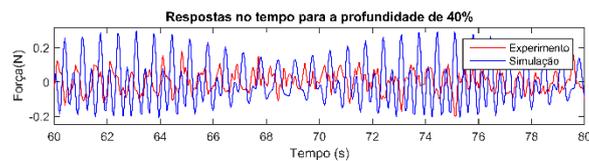
Rigidez 187,17 N/m – Onda 1 Hz



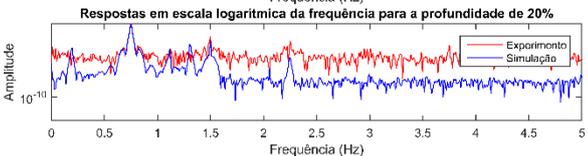
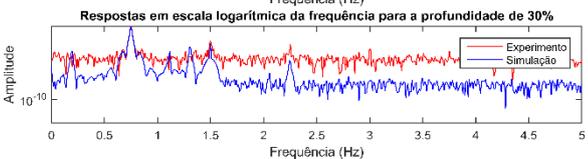
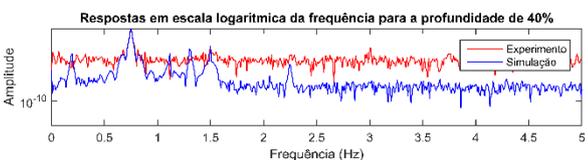
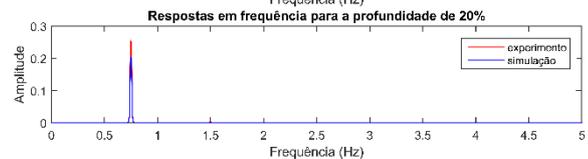
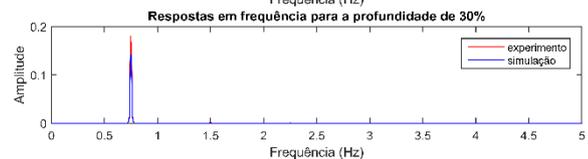
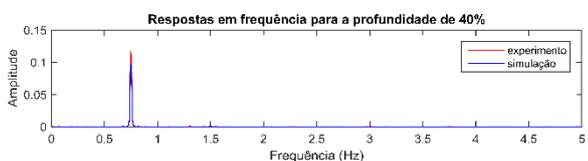
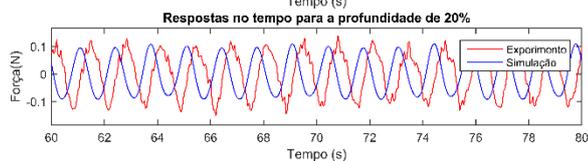
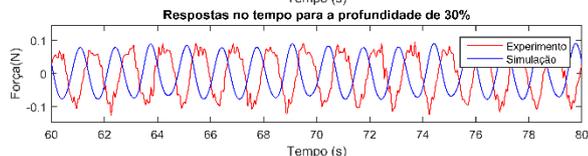
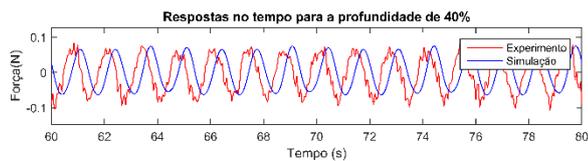
Rigidez 360,72 N/m – Onda 1,25 Hz



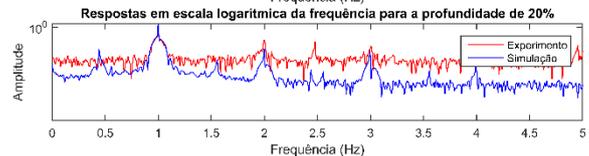
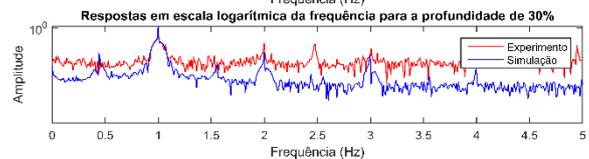
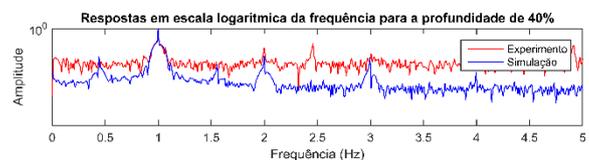
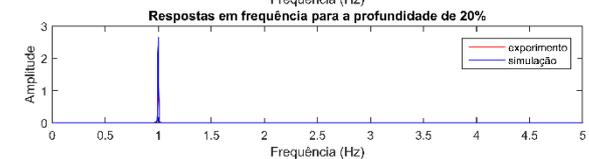
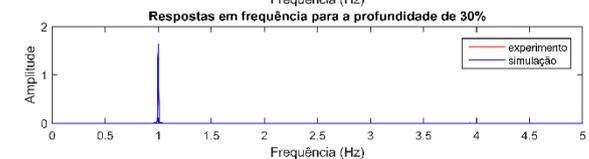
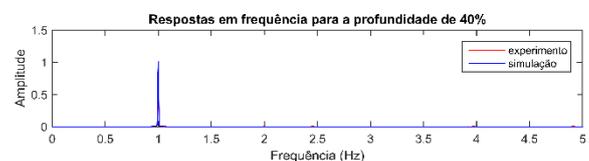
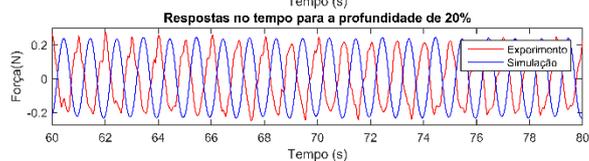
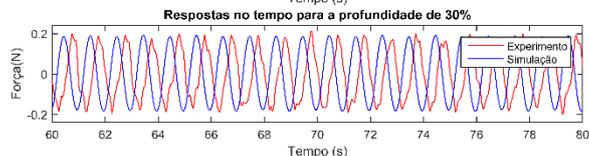
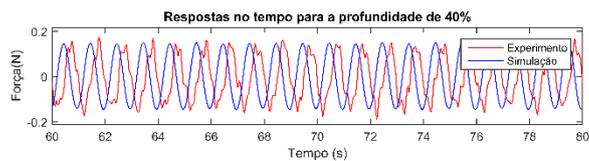
Rigidez 360,72 N/m – Onda 1,5 Hz



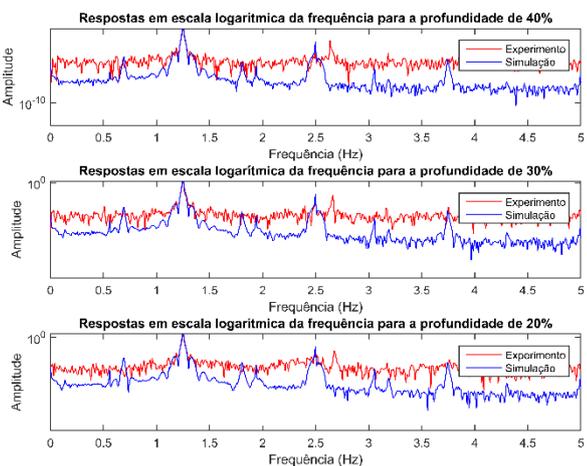
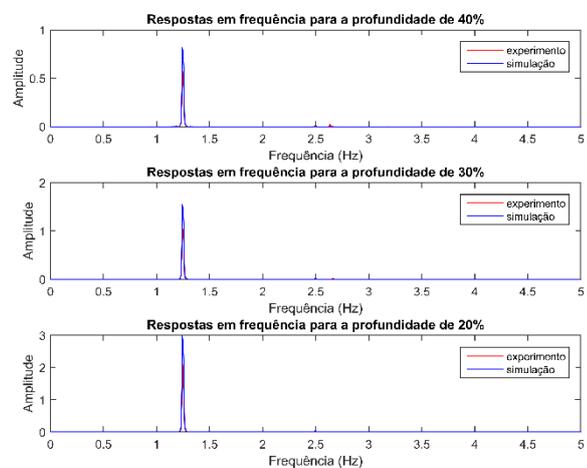
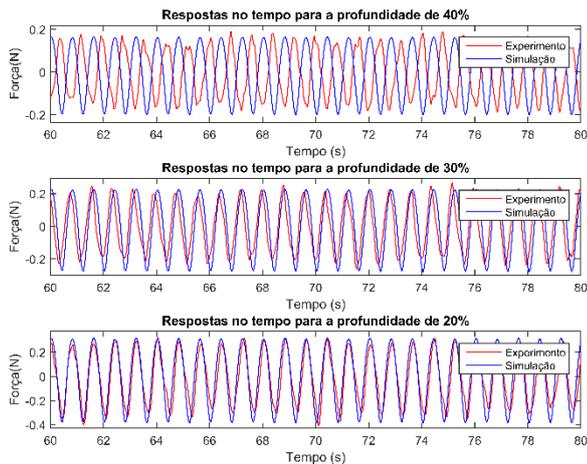
Rigidez 100000 N/m – Onda 0,75 Hz



Rigidez 100000 N/m – Onda 1 Hz



Rigidez 100000 N/m – Onda 1,25 Hz



Rigidez 100000 N/m – 1,5 Hz

