

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

**DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE GRÁFICA *WAVE KINEMATICS* PARA
ANÁLISE DA CINEMÁTICA DE ONDAS REGULARES E IRREGULARES**

JOSÉ CICERO DE ASSIS SILVA JUNIOR

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Nobre
Lages

Coorientador: Prof. Me. Heleno
Pontes Bezerra Neto

Maceió

2021

JOSÉ CICERO DE ASSIS SILVA JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE GRÁFICA *WAVE KINEMATICS* PARA
ANÁLISE DA CINEMÁTICA DE ONDAS REGULARES E IRREGULARES

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia
de Petróleo da Universidade Federal de Alagoas
como parte dos requisitos para a obtenção do título
de Bacharel em Engenharia de Petróleo.

Maceió

2021

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Lívia Silva dos Santos – CRB-4 – 1670

S586d Silva Júnior, José Cícero de Assis.

Desenvolvimento da interface gráfica Ware Kinematics para análise da cinemática de ondas regulares e irregulares / José Cícero de Assis Silva Júnior. – 2021.
75 f.:il.

Orientador: Eduardo Nobre Lages.

Coorientador: Heleno Pontes Bezerra Neto.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia de Petróleo) –
Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2021.

Bibliografia: f. 74-75

1. Tecnologia – Simulação e análise. 2. Ondas regulares e irregulares 3. Ambiente offshore. 4. Interface gráfica. I. Título.

CDU: 622.2

JOSÉ CICERO DE ASSIS SILVA JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE GRÁFICA *WAVE KINEMATICS* PARA
ANÁLISE DA CINEMÁTICA DE ONDAS REGULARES E IRREGULARES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Petróleo.

Aprovado em 17 de setembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Nobre Lages (Orientador)

Prof. Me. Heleno Pontes Bezerra Neto (Coorientador)

Me. Eduardo da Silva Paranhos Sobrinho

Dr. Fábio Martins Gonçalves Ferreira

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado forças e discernimento para conseguir caminhar até este momento. Também agradeço à minha família; meus pais que me deram totais condições para me manter durante todo esse tempo, minha irmã pelos momentos de compreensão e apoio e agradeço, também, a todos os meus familiares que sempre se fizeram presentes em minha vida, especialmente a meus dois avôs: Francisco Chicuta da Silva e Moisés Alves Nicácio, que hoje não estão mais aqui entre nós, mas sempre me passaram valores de vida e os sigo até hoje. Agradeço também à minha noiva Priscila, a qual conheci durante minha graduação e me ajudou a nunca desistir e chegar até o final.

RESUMO

SILVA JUNIOR, J. C. de A. Desenvolvimento da Interface Gráfica *Wave Kinematics* para Análise da Cinemática de Ondas Regulares e Irregulares. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

O cenário exploratório de petróleo no Brasil é dado em sua maioria em território *offshore*. A necessidade de entender o comportamento do mar em diversos cenários e aspectos se tornou cada vez mais primordial, porém o acesso a softwares especializados no assunto ainda é escasso. Então, a comunidade acadêmica trabalha para desenvolver ferramentas para que esses estudos sejam feitos de maneira mais simples e fácil. Nesta linha, o trabalho apresenta a interface *Wave Kinematics* em uma linguagem nova, antes desenvolvida em MATLAB® e agora em Python™, e aumenta sua área de atuação. Além da Teoria linear de Airy para ondas regulares que já estava presente, adiciona-se a Teoria de Stokes para ondas regulares e a teoria de ondas irregulares, englobando o espectro de onda de Pierson-Moskowitz e JONSWAP, no intuito de enriquecer o cenário acadêmico. A nova interface tem como objetivo trazer a resposta gráfica do comportamento do mar que se deseja estudar de maneira simples e intuitiva. Ao longo do trabalho, são realizados estudos de caso para dois tipos de cenários, para os quais a ferramenta se mostrou eficaz na interpretação de dados e exibição de resultados para as teorias de onda implementadas.

Palavras-chave: *ambiente offshore, teorias de ondas, interface gráfica.*

ABSTRACT

SILVA JUNIOR, J. C. de A. Development of the Graphic Interface Wave Kinematics for Analysis of the Kinematics of Regular and Irregular Waves. Course Conclusion Paper (Graduation in Petroleum Engineering) - Federal University of Alagoas, Maceió.

The exploration scenario for oil in Brazil is mostly in offshore territory. The need to understand the behavior of the sea in different scenarios and aspects has become increasingly essential, but access to specialized software on the subject is still scarce. So, the academic community works to develop tools to make these studies simpler and easier. Along these lines, the work presents the Wave Kinematics interface in a new language, previously developed in MATLAB® and now in Python™, and expands its scope. In addition to Airy's linear theory for regular waves, which was already present, Stokes' theory for regular waves and the theory of irregular waves are added, encompassing the Pierson-Moskowitz and JONSWAP wave spectrum, in order to enrich the academic scenario. The new interface aims to provide the graphical response to the behavior of the sea that you want to study in a simple and intuitive way. Throughout the work, case studies are carried out for two types of scenarios, for which the tool proved to be effective in interpreting data and displaying results for the implemented wave theories.

Keywords: offshore, wave theory, graphical interface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plataforma Draugen, Noruega.	17
Figura 2 - Logotipo oficial do Sistema de Aplicações de Engenharia de Petróleo (SAEP). ...	18
Figura 3 - Demonstração de uma onda harmônica simples se propagando ao longo do tempo.....	21
Figura 4 - Janela inicial da interface gráfica Wave Kinematics.	29
Figura 5 - Wave Kinematics: janela de ondas regulares.	30
Figura 6 - Resposta gráfica de Wave Kinematics para ondas regulares com Teoria de Airy, análise das propriedades ao longo do tempo e velocidades horizontal e vertical selecionadas.....	31
Figura 7 - Resposta gráfica de Wave Kinematics para ondas regulares com Teoria de Stokes, análise das propriedades ao longo da profundidade com acelerações horizontal e vertical selecionadas.....	32
Figura 8 - Wave Kinematics: janela de ondas irregulares.	33
Figura 9 - Resposta gráfica para espectro de energia de Pierson-Moskowitz com 100 ondas selecionadas.....	34
Figura 10 - Resposta gráfica para velocidades horizontal e vertical para o espectro de JONSWAP.	35
Figura 11 - Ocorrências de H_s e T_p na Bacia de Campos.	36
Figura 12 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Elevação de Superfície na teoria linear de Airy.	37
Figura 13 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Velocidade Horizontal na teoria linear de Airy.	38
Figura 14 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Velocidade Vertical na teoria linear de Airy.	38
Figura 15 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Aceleração Horizontal na teoria linear de Airy.	39

Figura 16 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Aceleração Vertical na teoria linear de Airy.	39
Figura 17 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Elevação de superfície na teoria linear de Stokes.	40
Figura 18 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Velocidade Horizontal na teoria linear de Stokes.	41
Figura 19 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Velocidade Vertical na teoria linear de Stokes.	41
Figura 20 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Aceleração Horizontal na teoria linear de Stokes.	42
Figura 21 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Aceleração Vertical na teoria linear de Stokes.	42
Figura 22 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Elevação de Superfície para espectro de Pierson-Moskowitz.	44
Figura 23 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Velocidade Horizontal para espectro de Pierson-Moskowitz.	44
Figura 24 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Velocidade Vertical para espectro de Pierson-Moskowitz.	45
Figura 25 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Aceleração Horizontal para espectro de Pierson-Moskowitz.	45
Figura 26 - Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Aceleração Vertical para espectro de Pierson-Moskowitz.	46
Figura 27 – Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Elevação de Superfície para espectro de JONSWAP.....	47
Figura 28 – Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Velocidade Horizontal para espectro de JONSWAP.....	47
Figura 29 – Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Velocidade Vertical para espectro de JONSWAP.....	48

Figura 30 – Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Aceleração Horizontal para espectro de JONSWAP.....	48
Figura 31 – Comparativo DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para Aceleração Vertical para espectro de JONSWAP.....	49
Figura 32- Teste de sensibilidade para elevação de onda.....	50
Figura 33 - Teste de sensibilidade para Velocidade Horizontal.....	51
Figura 34 - Teste de sensibilidade para Velocidade Vertical.....	51
Figura 35 - Teste de sensibilidade para Aceleração Horizontal.....	52
Figura 36 - Teste de sensibilidade para Aceleração Vertical.....	52
Figura 37 - Plataforma P-55.....	54
Figura 38 - Dados iniciais na Wave Kinematics-Ondas Regulares.....	55
Figura 39 - Wave Kinematics – Resposta das características da onda e a relação percentual entre superfície e metade do comprimento de onda.....	55
Figura 40 - Elevação de superfície para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Airy ao longo do tempo.....	56
Figura 41 - Velocidades horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de	57
Figura 42 - Acelerações horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Airy, ao longo do tempo.....	57
Figura 43 - Velocidades horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, no instante $t = 1$ s, para a teoria de Airy ao longo da profundidade.....	58
Figura 44 - Acelerações horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Airy ao longo da profundidade.....	59
Figura 45 - Elevação de superfície para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Stokes ao longo do tempo.....	60
Figura 46 - Velocidades horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Stokes ao longo do tempo.....	61

Figura 47 - Acelerações horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Stokes ao longo do tempo.	61
Figura 48 - Velocidades horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Stokes ao longo da profundidade.	62
Figura 49 - Acelerações horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Stokes ao longo da profundidade.	63
Figura 50 - Aplicabilidade da teoria de ondas para o estudo de caso.	64
Figura 51 - Comparativo da elevação de superfície teoria de Airy e Stokes.	65
Figura 52 - Comparativo da velocidade horizontal teoria de Airy e Stokes.	65
Figura 53 - Comparativo da velocidade vertical teoria de Airy e Stokes.	66
Figura 54 - Comparativo da aceleração horizontal teoria de Airy e Stokes.	66
Figura 55 - Comparativo da aceleração vertical teoria de Airy e Stokes.	67
Figura 56 - Wave Kinematics – Ondas irregulares para o caso $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s.	68
Figura 57 - Características espectrais para o caso $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s.	68
Figura 58 - Espectro de energia para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s com 200 ondas, com o Espectro de Pierson-Moskowitz.	69
Figura 59 - Elevação de Superfície para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para a Espectro de Pierson-Moskowitz ao longo do tempo.	69
Figura 60 - Velocidades horizontal e vertical $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para a Espectro de Pierson-Moskowitz ao longo do tempo.	70
Figura 61 - Acelerações horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para a Espectro de Pierson-Moskowitz ao longo do tempo.	71
Figura 62 - Espectro de Energia para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s com 200 ondas para o espectro de JONSWAP.	72
Figura 63 – Elevação de superfície para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s com 200 ondas para o espectro de JONSWAP.	72

Figura 64 - Velocidades horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para a Espectro de JONSWAP ao longo do tempo.....	73
Figura 65 - Acelerações horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para a Espectro de JONSWAP ao longo do tempo.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Erros DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para a teoria de Airy.	40
Tabela 2 - Erro DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para a teoria de Stokes.....	43
Tabela 3 - Erro DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para o espectro de Pierson-Moskowitz.	46
Tabela 4 – Erro DOOLINES <i>versus</i> Wave Kinematics para o espectro de JONSWAP.....	49
Tabela 5 - Características das ondas no teste de sensibilidade.....	53
Tabela 6 - Valores máximos e mínimos das propriedades cinemáticas ao longo do tempo para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Airy.....	58
Tabela 7 - Valores máximos e mínimos das propriedades cinemáticas ao longo da profundidade para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Airy.....	59
Tabela 8 - Valores máximos e mínimos das propriedades cinemáticas ao longo do tempo para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s para a Teoria de Stokes.....	62
Tabela 9 - Valores máximos e mínimos das propriedades cinemáticas ao longo da profundidade para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Stokes.	63
Tabela 10 - Valores máximos e mínimos da elevação de superfície ao longo do tempo para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para o espectro de Pierson-Moskowitz.	70
Tabela 11 - Valores máximos e mínimos das propriedades cinemáticas ao longo do tempo para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para o espectro de Pierson-Moskowitz.....	71
Tabela 12 - Valores máximos e mínimos da elevação de superfície ao longo do tempo para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para o espectro de JONSWAP.....	73
Tabela 13 - Valores máximos e mínimos da elevação de superfície ao longo do tempo para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para o espectro de JONSWAP.....	74

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Características das ondas.....	21
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

H – Altura da onda.

H_s – Altura significativa da onda.

T – Período da onda.

T_p – Período de pico da onda.

d – Profundidade.

t – Tempo.

x – Posição de propagação da onda.

z – Coordenada relacionada a profundidade.

g – Aceleração da gravidade.

ω – Frequência angular.

k – Número de onda.

c – Velocidade de fase.

η – Elevação de superfície.

u – Velocidade horizontal.

v – Velocidade vertical.

\dot{u} – Aceleração horizontal.

\dot{v} – Aceleração vertical.

S – Esbeltez.

μ – Profundidade relativa.

$S_{(w)}$ – Espectro de Energia.

σ – Fator de forma.

λ – Comprimento de onda.

φ – Ângulo de Fase.

γ – Fator de pico.

A – Amplitude.

Σ – Somatório.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	COMENTÁRIOS INICIAIS	16
1.2	TEMA E OBJETIVO	16
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	JUSTIFICATIVA	17
1.4	PROPOSTA DO PROJETO	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	ONDAS	20
2.1.1	Caracterização das Ondas	21
2.1.2	Ondas Regulares	22
2.1.2.1	Teoria Linear de Airy	22
2.1.2.2	Teoria de Stokes	23
2.1.3	Ondas Irregulares	25
2.1.3.1	Espectro de Pierson-Moskowitz	26
2.1.3.2	Espectro de JONSWAP	27
3	MÉTODOS E MATERIAIS	29
3.1	ONDAS REGULARES	29
3.2	ONDAS IRREGULARES	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1	VERIFICAÇÃO DA INTERFACE	36
4.2	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA FERRAMENTA	50
4.3	ANÁLISE DA FERRAMENTA	53
4.3.1	Ondas Regulares	54
4.3.2	Ondas Irregulares	67
5	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS

Com o aumento da demanda de petróleo e seus derivados, a exploração de hidrocarbonetos em situações mais desafiadoras se tornou cada vez mais necessária. Um desses cenários é a exploração *offshore*, a qual demanda a instalação de estruturas (móveis e fixas) no oceano e aumenta a complexidade do processo de extração de hidrocarbonetos. Entender como as ações ambientais agem sobre estruturas inseridas no ambiente marinho, permite a evolução da exploração *offshore*.

A coleta de dados das ações ambientais é extremamente importante e, devido a aleatoriedade desses eventos, é necessária uma abordagem estatística para determinação de parâmetros que caracterizam esses fenômenos. Com a definição das características dos eventos ambientais, são feitos os estudos de comportamento das unidades de operação (PARANHOS SOBRINHO, 2016). Embora sejam realizados ensaios de modelos reduzidos em tanques de prova ou em escala real no mar, as simulações numéricas vêm sendo cada vez mais utilizadas para criação dos projetos *offshore* (BARREIRA, 2008), pois apresentam uma grande versatilidade.

Ao longo do tempo, vários estudos foram realizados para tentar descrever as ações ambientais sobre as estruturas presentes no oceano, tanto teorias de onda de comportamento regular, pode-se citar Airy (1845 apud RIVAS, 1981) e Stokes (1847, apud RIVAS, 1981), quanto comportamento irregular (aleatório) que descreve de maneira real o estado de mar, como o espectro de Pierson-Moskowitz (PIERSON e MOSKOWITZ, 1964) e o espectro de JONSWAP (BHATTACHARYYA, 1978). Com o avanço tecnológico a criação de softwares para simulações e análises do estado de mar ficou cada vez mais simples e eficaz, em paralelo, a criação de uma interface gráfica simples e intuitiva se tornou algo possível.

1.2 TEMA E OBJETIVO

A determinação das condições ambientais em plataformas marítimas, como mostra a Figura 1, ajuda na análise do projeto de dimensionamento dessas estruturas e de manutenção ao longo do tempo. As ações de onda, corrente e vento agem diretamente sobre a plataforma em operação, e, conseqüentemente, o seu comportamento depende dos carregamentos gerados por esses agentes ao longo das atividades da unidade.

Figura 1 - Plataforma Draugen, Noruega.



Fonte: OFFSHORE (2020).

Uma interface gráfica que reúne várias metodologias distintas ajudaria nas análises de resultados e, também, em uma melhor interpretação desses dados.

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como principal objetivo fortalecer a comunidade acadêmica voltada à engenharia de petróleo e naval, trazendo consigo uma interface gráfica e de uso facilitado para estudos de cinemática de onda para o estado de mar.

1.2.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos podemos citar:

- Desenvolver uma interface gráfica em PythonTM para o estudo da cinemática da onda;
- Aplicar as formulações da cinemática de onda para as teorias de ondas regular (Airy e Stokes) e irregular (Pierson-Moskowitz e JONSWAP);

1.3 JUSTIFICATIVA

Os *softwares* disponíveis na indústria de petróleo e gás na atualidade, em sua grande maioria, são de caráter pago, principalmente na área de sistemas oceânicos, citando como exemplo OrcaFlex (ORCINA, 2021) e ANSYS Aqwa (ANSYS, 2021), outros são feitos por

meio de parcerias de empresas com universidades, como o Dynasim (COELHO et al., 2001) e o Dynamic Of Offshore Lines (DOOLINES) (SILVEIRA et al., 2011), sendo restrito a poucos usuários. A ideia desse projeto é facilitar o acesso, principalmente, a estudantes de graduação, professores e pesquisadores, com o objetivo de ajudar no desenvolvimento destes.

A comunidade acadêmica de engenharia de petróleo da Universidade Federal de Alagoas vem trabalhando no desenvolvimento de *softwares* desse tipo, este trabalho visa enriquecer o que já foi construído ao longo desse projeto, trazendo novos recursos e abordagem.

1.4 PROPOSTA DO PROJETO

O presente trabalho tem como proposta principal auxiliar a comunidade acadêmica em geral: estudantes, pesquisadores e professores; disponibilizando uma ferramenta computacional para auxiliar na análise de dados para o estudo da cinemática de onda. Sendo assim, poderá ser incorporado ao SAEP (PARANHOS SOBRINHO, BEZERRA NETO e MARTINS, 2019), Figura 2.

O SAEP é um projeto recente e demanda uma continuidade do corpo acadêmico, uma vez que, atualmente, conta apenas com as aplicações StatWave e CalcWave foi desenvolvido por Paranhos Sobrinho (2016), na área *offshore*. Outras aplicações criadas para o SAEP foram CWELL (COSTA, 2016), DWELL (SILVA, 2017) e TWELL (VITORINO, 2018) para a temática de poço e CIPetro, GIPetro e VGraf na área de apoio.

Figura 2 - Logotipo oficial do Sistema de Aplicações de Engenharia de Petróleo (SAEP).



Fonte: Paranhos Sobrinho (2016).

Com a pretensão de ser incorporado ao SAEP, este projeto foi escrito e desenvolvido em PythonTM, com o auxílio das bibliotecas personalizadas PySimpleGUI, Matplotlib, PANDAS, NUMPY e SCIPY.

Python™ é uma linguagem orientada a objetos, interpretada e compilada em tempo de execução, possui suporte a tratamento de exceções e de erros, tipagem dinâmica e ampla documentação. Isso transforma o Python™ em uma linguagem apropriada para desenvolvimento rápido de aplicações e, ao mesmo tempo, permite que o código seja mantido facilmente. A biblioteca PySimpleGUI serve para a criação da interface gráfica a partir de comandos previamente salvos dentro dessa biblioteca. A biblioteca Matplotlib auxilia o programa na criação de gráficos. Já a biblioteca PANDAS, serve para o armazenamento e criação de arquivos csv ou xlsx, neste trabalho foram utilizados apenas os arquivos no formato xlsx para o armazenamento dos pares ordenados que geraram os gráficos. Utiliza-se a biblioteca NUMPY para a criação de vetores para o cálculo das elevações, velocidades e acelerações presentes no estudo. SCIPY realiza de maneira simples cálculos diferenciais e integrais, no trabalho utiliza-se a biblioteca para cálculo integral.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está dividido da seguinte forma:

- Capítulo 2 – Aborda os conceitos teóricos que embasaram nas aplicações do trabalho, como teoria de ondas e a cinemática de onda para ondas regulares e ondas irregulares;
- Capítulo 3 – Apresenta a interface e suas funcionalidades;
- Capítulo 4 – Apresenta a verificação do programa e a análise de dados pré-estabelecidos e comentários a respeito da literatura;
- Capítulo 5 – Mostra as considerações finais a respeito do trabalho.

2 REVISÃO DA LITERATURA

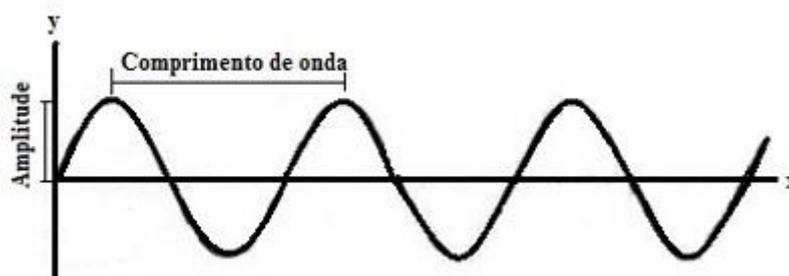
2.1 ONDAS

Fisicamente, uma onda pode ser definida como uma perturbação oscilante de alguma grandeza física no espaço e periódica no tempo (COSTA, 2008). As ondas podem ser classificadas em dois grupos: aquelas que necessitam de um meio físico para se propagar, as chamadas ondas mecânicas (ondas sonoras, sísmicas, ondas em oceanos), e as que não necessitam desse meio, ondas eletromagnéticas (luz visível) (HALLIDAY, RESNICK & WALKER, 1996).

Esse trabalho tem como foco as ondas mecânicas que se propagam em águas oceânicas, sendo assim, todo o embasamento teórico será direcionado às ondas marinhas. Para o campo *offshore*, ondas ocorrem de forma aleatória e incidem diretamente em estruturas montadas para a exploração e produção de petróleo. A origem destas pode ser explicada devido, principalmente, às ações do vento sobre as águas, embora outros fenômenos da natureza podem ser agentes causadores, como abalos sísmicos ou deslizamentos de terra.

No cenário real, as ondas se comportam de maneira irregular, essas podem ser descritas como um somatório de ondas regulares harmônicas (MARTINS, 2016). O que torna uma onda regular é o fato de ter suas características invariáveis; como amplitude (**a**), que corresponde à distância do ponto de equilíbrio da onda até uma crista ou vale; comprimento de onda (**λ**), que é a distância entre dois vales ou duas cristas sucessivas; o número de onda (**k**), o qual corresponde ao número de ondas por unidade de comprimento; a frequência (**f**), que corresponde ao número de oscilações da onda em determinado intervalo de tempo; e período (**T**), que corresponde ao tempo de um comprimento de onda como é mostrado na Figura 3 (GOUVEIA, 2020).

Figura 3 - Demonstração de uma onda harmônica simples se propagando ao longo do tempo.



Fonte: ONDAS-BRASIL ESCOLA (2020).

2.1.1 Caracterização das Ondas

Além das características de onda já citadas, outras grandezas podem ser determinadas (Quadro 1), as quais são abordadas nesta seção.

Quadro 1 - Características das ondas.

Velocidade de fase (c)	é a representação da velocidade da propagação de uma onda.
Elevação de onda (η)	representa a distância da superfície livre ao ponto de equilíbrio da onda do nível da água.
Profundidade (d)	é a distância do fundo do mar até a superfície.
Velocidade (u)	representa a velocidade de uma partícula do fluido nas direções (u, v), sendo u e v as velocidades nas direções x e z , respectivamente.
Aceleração (a)	representa a aceleração de uma partícula do fluido nas direções (\dot{u}, \dot{v}), sendo \dot{u} e \dot{v} as acelerações nas direções x e z , respectivamente.

As ondas oceânicas são formadas pela superposição de diferentes ondas, justificando o seu comportamento aleatório e de difícil representação matemática. Porém, grandes ondas em uma série de ondas aleatórias podem ser determinadas na forma de ondas regulares, podendo então ser descritas por meio de teorias determinísticas (CHAKRABARTI, 2005).

2.1.2 Ondas Regulares

Ondas regulares são aquelas que se repetem em um ciclo, podendo, assim, serem representadas matematicamente por funções periódicas, como uma função senoidal. Por causa dessa repetição, as propriedades da onda podem ser calculadas de maneira mais simples e mais fácil que ondas irregulares, porém não expressam o estado de mar que possa ser encontrado em um cenário real.

Para estruturas com respostas quase estáticas, é suficiente o uso de modelos determinísticos. Os principais parâmetros utilizados nesses modelos, como altura, período e frequência, são obtidos por meio de métodos estatísticos. No entanto, para estruturas com significativa resposta dinâmica, é recomendável o uso de modelos aleatórios, em que o estado de mar é descrito em função do espectro de elevação de onda (CHAKRABARTI, 2005).

Ao longo dos anos, diversas teorias foram formuladas com base nesses modelos. Entre as mais importantes teorias, destacam-se: Teoria Linear de Airy, Teoria Não-Linear de Stokes, Teoria Cnoidal, Teoria de Fluxo de Corrente, entre outras (COSTA, 2008).

Essas teorias são largamente utilizadas em projetos de estruturas *offshore* (CHAKRABARTI, 2005). Como exemplo, pode-se citar alguns softwares como DYNASIM e ORCAFLEX que realizam simulações numéricas de estruturas localizadas em ambientes marinhos. Esses sistemas computacionais utilizam teorias como as de Airy, Stokes e Cnoidal para representar o comportamento de ondas. Nesse trabalho abordam-se a Teoria Linear de Airy e a Teoria Não-Linear de Stokes de 2ª ordem.

2.1.2.1 Teoria Linear de Airy

Segundo Chakrabarti (2005), a Teoria Linear de Airy é a teoria mais utilizada e considerada a mais simples de todas. A superfície da água é regida por um movimento harmônico simples, aplicável em baixas amplitudes quando comparada ao comprimento de onda.

É possível desprezar os efeitos de ordem superior envolvidos no comportamento da onda. Esse procedimento é conhecido como linearização, o qual se baseia na hipótese de que para comprimentos de onda muito longos, a superfície de elevação apresentará pouca variação na direção perpendicular à direção de propagação. Dessa forma, a onda terá um comportamento regular e poderá ser facilmente determinada. Meireles e Carvalho (2017) falam que essa teoria

assume o fluido como homogêneo, incompressível e irrotacional, fazendo assim com que haja um potencial de velocidade nesse fluido.

Além da elevação, para uma profundidade finita é possível determinar algumas propriedades cinemáticas e dinâmicas que caracterizam as ondas. As expressões para os cálculos da elevação de superfície, velocidades e acelerações horizontal e vertical, segundo a DNVGL-RP-C205 (2017), são dadas por:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

$$u(x, z, t) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (2)$$

$$v(x, z, t) = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (3)$$

$$\dot{u}(x, z, t) = \frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\cosh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (4)$$

$$\dot{v}(x, z, t) = -\frac{2\pi^2 H}{T^2} \frac{\sinh[k(z+d)]}{\sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (5)$$

sendo H a altura de onda, k o número de onda, x a coordenada na direção de propagação da onda, t o tempo, ω a frequência de oscilação da onda, z a coordenada vertical e d a lâmina de água.

2.1.2.2 Teoria de Stokes

A teoria de Stokes de 2ª ordem tem como particularidade o fato de considerar um componente adicional à formulação da teoria linear de Airy, sendo assim, as ondas definidas pela teoria de Stokes de 2ª ordem são formadas por dois harmônicos simples. Esses harmônicos possuem frequências de oscilação diferentes e, conseqüentemente, cada um influencia no comportamento da onda de uma forma diferente (CHAKRABARTI, 2005).

As teorias não-lineares conseguem obter uma representação mais próxima das ondas reais, permitindo a análise de ondas mais altas e em profundidades mais rasas (CARNEIRO, 2007).

Assim como na teoria de Airy, pela teoria de Stokes de 2ª ordem pode-se definir o comportamento da onda por meio das propriedades cinemáticas dadas por:

$$\eta_1(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (6)$$

$$\eta_2(x, t) = \frac{\pi H^2 \cosh(kd)}{8 \lambda \sinh^3(kd)} [2 + \cosh(2kd)] \cos [2(kx - \omega t)] \quad (7)$$

$$\eta_{stokes} = \eta_1 + \eta_2 \quad (8)$$

$$u_1 = \frac{\pi H \cosh[k(z+d)]}{T \sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (9)$$

$$u_2 = \frac{3}{4c} \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (10)$$

$$u_{stokes} = u_1 + u_2 \quad (11)$$

$$v_1 = \frac{\pi H \sinh[k(z+d)]}{T \sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (12)$$

$$v_2 = \frac{3}{4c} \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (13)$$

$$v_{stokes} = v_1 + v_2 \quad (14)$$

$$\dot{u}_1 = \frac{2\pi^2 H \cosh[k(z+d)]}{T^2 \sinh(kd)} \sin(kx - \omega t) \quad (15)$$

$$\dot{u}_2 = \frac{3\pi}{2\lambda} \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \frac{\cosh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (16)$$

$$\dot{u}_{stokes} = \dot{u}_1 + \dot{u}_2 \quad (17)$$

$$\dot{v}_1 = -\frac{2\pi^2 H \sinh[k(z+d)]}{T^2 \sinh(kd)} \cos(kx - \omega t) \quad (18)$$

$$\dot{v}_2 = -\frac{3\pi}{2\lambda} \left(\frac{\pi H}{T} \right)^2 \frac{\sinh[2k(z+d)]}{\sinh^4(kd)} \cos 2(kx - \omega t) \quad (19)$$

$$\dot{v}_{stokes} = \dot{v}_1 + \dot{v}_2 \quad (20)$$

sendo η_1 o termo de primeira ordem para a elevação de superfície, η_2 o termo de segunda ordem para a elevação de superfície, η_{stokes} a elevação de superfície para a teoria de Stokes, u_1 o termo de primeira ordem para a velocidade horizontal, u_2 o termo de segunda ordem para a velocidade horizontal, u_{stokes} a velocidade horizontal para a teoria de Stokes, v_1 o termo de primeira ordem para a velocidade vertical, v_2 o termo de segunda ordem para a velocidade vertical, v_{stokes} a velocidade vertical para a teoria de Stokes, \dot{u}_1 o termo de primeira ordem para a aceleração horizontal, \dot{u}_2 o termo de segunda ordem para a aceleração horizontal, \dot{u}_{stokes}

a aceleração horizontal para a teoria de Stokes, \dot{v}_1 o termo de primeira ordem para a aceleração vertical, \dot{v}_2 o termo de segunda ordem para a aceleração vertical, \dot{v}_{stokes} a aceleração vertical para a teoria de Stokes, (DNVGL-RP-C205, 2017).

2.1.3 Ondas Irregulares

Um estado real de mar apresenta características aleatórias de amplitude, frequência e fase, não podendo se definir uma relação matemática sólida para determinar seu comportamento (MARTINS, 2016). Quando se considera o modelo estocástico pode-se representar o estado de mar formado pela superposição de diferentes ondas.

A formação e evolução de um campo de ondas de gravidade ocorrem pela transferência de energia da atmosfera para as camadas superficiais do oceano por meio dos ventos: área de atuação do vento (pista); intensidade e direção do vento que incide sobre a pista; duração que ocorre a transferência.

Quanto maior for a pista, em relação ao vento incidente, mais energia é recebida, assim os seus componentes crescem, alterando a frequência de pico e a velocidade de propagação. Em um caso de um mar irregular composto por um somatório de ondas senoidais, a densidade será dada pela soma de cada parcela de η^2 individual. Essas ondas são caracterizadas por um espectro de onda que descreve a distribuição de energia em relação à sua frequência ou período.

Para caracterização das partículas do fluido (cálculo de parâmetros de velocidade, aceleração e pressão), há a necessidade de um procedimento de discretização do espectro em termos de um somatório de um determinado número de componentes de onda regular.

Existem basicamente dois métodos para definição da discretização do espectro:

- a) Faixas de frequência ($\Delta\omega$) constantes
- b) Áreas constantes – Faixas de frequência são ajustadas de modo que cada componente esteja associado à mesma quantidade de energia.

O ajuste do modelo espectral é feito em termos de parâmetros estatísticos, tais como fatores de forma espectral, altura significativa de onda e período de pico. Na estatística de curto prazo, estes parâmetros são supostos constantes, cada conjunto deles caracterizando um “estado de mar”.

Na formulação desses espectros, um ou mais parâmetros são necessários. São

parâmetros estatísticos representativos do mar demonstrado pelo espectro e determina a energia total desse mar. Cada modelo espectral, para um mesmo conteúdo de energia, distribui de forma diferente a energia pelas faixas de frequência. Assim, a resposta da estrutura será diferente para mesma energia de onda representada por diferentes espectros.

Apresentam-se seis exemplos de espectros: Espectro de Bretschneider; Espectro de Scott; Espectro ISSC; Espectro ITTC; Espectro de Pierson-Moskowitz; e Espectro de JONSWAP (*Joint North Sea Wave Project*). Nesse trabalho serão abordados apenas os espectros de Pierson-Moskowitz e JONSWAP.

2.1.3.1 Espectro de Pierson-Moskowitz

Assume que um vento constante de velocidade $U_{19,6}$ (velocidade do vento a 19.6 m/s) incidiu por um longo tempo em uma grande área, e que as ondas estão em equilíbrio com ele. A formulação da energia do espectro de Pierson-Moskowitz é dada por:

$$S(\omega) = \frac{5}{16} H_s^2 \frac{\omega_p^4}{\omega^5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \quad (21)$$

em que S é o valor da energia (m^2/Hz), H_s é a altura significativa da onda, ω é a frequência angular da onda e ω_p a frequência de pico da onda.

O espectro de Pierson-Moskowitz (espectro de P-M) é descrito em função da frequência de pico (ω_p), que corresponde a frequência na qual a densidade de energia assume valor máximo (de pico) na função espectral. Para o espectro de P-M, a frequência de pico pode ser escrita em função da altura significativa de onda e da gravidade, ou também em função da velocidade média do vento (U_ω) com a gravidade, dada por:

$$\omega_p = 0,161 \frac{g}{H_s} \quad (22)$$

$$\omega_p = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{g}{U_\omega} \quad (23)$$

Os espectros de P-M modificado e de JONSWAP são frequentemente utilizados para representar ondas geradas pelo vento (MARTINS, 2016). O espectro de P-M foi desenvolvido para representar mares completamente desenvolvidos, estado de equilíbrio em que o vento transmitiu toda a energia possível à superfície oceânica. Significa que a taxa de energia que está sendo dissipada pelas ondas é na mesma taxa de energia fornecida pelo vento. O tamanho e as características das ondas não mudam.

2.1.3.2 Espectro de JONSWAP

Similar ao espectro de Pierson-Moskowitz, exceto que as ondas continuam a crescer com a distância ou tempo, e o pico do espectro é mais pronunciado por um fator de intensificação de pico γ . É utilizado em águas costeiras. A energia deste espectro ($S(\omega)$) é dada por

$$S(\omega) = [1 - 0,287 \ln(\gamma)] \frac{5}{16} H_s^2 \frac{\omega_p^4}{\omega^5} \exp \left[-1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \gamma e^{\left[\frac{-(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right]} \quad (24)$$

$$\sigma = \begin{cases} 0,07 & \text{para } \omega \leq \omega_p \\ 0,09 & \text{para } \omega > \omega_p \end{cases} \quad (24.1)$$

em que σ é o fator de forma da onda.

O espectro de JONSWAP estende o conceito de Pierson-Moskowitz para estados de mar em desenvolvimento. O espectro possui 5 parâmetros, mas apenas 2 são geralmente variados, os demais parâmetros são definidos pela localidade. Caso o parâmetro de pico γ não tenha sido informado, pode-se aplicar a seguinte relação:

$$\gamma = 5 \text{ para } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} \leq 3,6 \quad (25.1)$$

$$\gamma = \exp(5,75 - 1,15 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}) \text{ para } \frac{T_p}{\sqrt{H_s}} > 3,6 \quad (25.2)$$

Neste espectro, para se determinar a elevação, a velocidade ou a aceleração de uma onda irregular, admite-se que: a onda irregular será composta por uma série de ondas harmônicas, cada componente será expressa por uma amplitude, frequência angular e ângulo de fase aleatório. Assim, a elevação do mar pode ser expressa por:

$$\eta(t, x) = \sum_{i=1}^{N\omega} A_i \sin(\omega_i t - k_i x + \phi_i) \quad (26)$$

$$A = \sqrt{2S_n \Delta\omega} \quad (27)$$

sendo T_p o período de pico da onda, A é a amplitude da onda irregular e ϕ_i é o ângulo de fase da onda. As velocidades e acelerações horizontais e verticais serão descritas como:

$$u(t) = \sum_{i=1}^{N\omega} A_i \omega_i e^{k_i z} \cos(k_i x - \omega_i t + \phi_i) \quad (28)$$

$$v(t) = \sum_{i=1}^{N\omega} A_i \omega_i e^{k_i z} \sin(k_i x - \omega_i t + \phi_i) \quad (29)$$

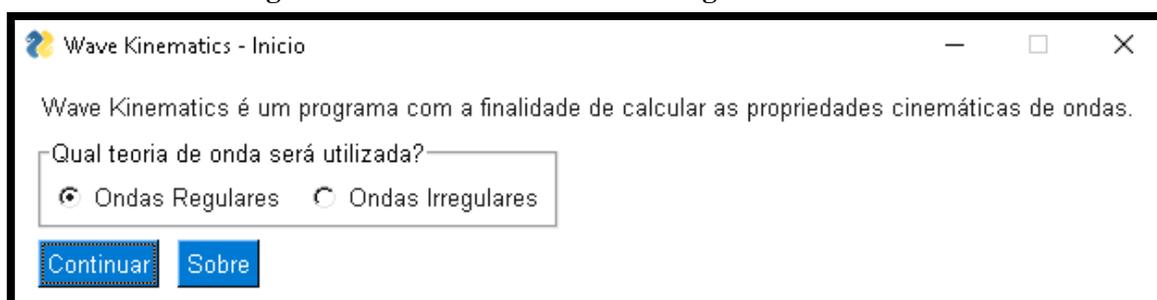
$$\dot{u}(t) = \sum_{i=1}^{N\omega} A_i \omega_i^2 e^{k_i z} \sin(k_i x - \omega_i t + \phi_i) \quad (30)$$

$$\dot{v}(t) = -\sum_{i=1}^{N\omega} A_i \omega_i^2 e^{k_i z} \cos(k_i x - \omega_i t + \phi_i) \quad (31)$$

3 MÉTODOS E MATERIAIS

A interface *Wave Kinematics* foi desenvolvida inicialmente por Ferreira (2018) utilizando a linguagem de programação MATLAB®, com foco em ondas regulares e englobando a teoria linear de Airy. Neste trabalho, ocorre o aperfeiçoamento da interface por meio da linguagem de programação para Python™ associada a biblioteca PySimpleGUI. Também são incluídas a teoria de Stokes de 2ª ordem para ondas regulares e as formulações dos espectros de Pierson-Moskowitz e JONSWAP, para análise de ondas irregulares. Ela está dividida em janelas, como está mostrado na Figura 4, inicialmente, o usuário escolhe que tipo de onda quer trabalhar: ondas regulares ou onda irregulares.

Figura 4 - Janela inicial da interface gráfica Wave Kinematics.



3.1 ONDAS REGULARES

Haverá diferença na próxima janela dependendo do que será escolhido. A Figura 5 mostra a janela que será aberta caso a escolha da janela inicial seja “Ondas Regulares”.

Figura 5 - Wave Kinematics: janela de ondas regulares.

Wave Kinematics - Ondas Regulares

Insira os valores de:

Altura (m)	8
Período (s)	25
Profundidade (m)	1000
Posição (m)	10
Instante (s)	10

Qual teoria de onda será usada?

Airy Stokes

Deseja analisar as propriedades ao longo:

do Tempo da Profundidade

Assinale quais propriedades serão analisadas

Elevação de Superfície

Velocidade Horizontal Velocidade Vertical

Aceleração Horizontal Aceleração Vertical

[Voltar](#) [Processar Dados](#) [Gerar Gráficos](#)

Resultados:

```

Teoria de Onda: Airy
Número de Onda: 0.01
Celeridade: 39.03
Comprimento de onda: 975.66

Variáveis percentuais:
Velocidade Horizontal: 4.33%
Velocidade Vertical: 4.32%
Aceleração Horizontal: 4.33%
Aceleração Vertical: 4.32%

```

Nessa janela, serão inseridos os valores de Altura de onda (H), período da onda (T), profundidade da lâmina d'água (d), posição inicial da onda (x) e o valor do instante de tempo (t) em que a cinemática será avaliada. Além disso, o programa permite escolher entre a Teoria linear de Airy e a Teoria de segunda ordem de Stokes para serem realizados os devidos cálculos. Além de escolher qual teoria de onda a ser usada, pode-se avaliar a cinemática da onda, velocidade e aceleração, de acordo com a profundidade ou ao longo do tempo.

O usuário vai poder navegar por essa interface de maneira simples pelo mouse do computador/notebook ou pelo teclado. O botão “Processar Dados” faz com que os dados inseridos sejam lidos e utilizados nos cálculos e de acordo com os parâmetros selecionados, na caixa de resultados aparecerão os valores da relação percentual, dada pela diferença relativa entre as velocidades da superfície e da metade da profundidade das velocidades e acelerações, para efeito comparativo.

Ao apertar o botão “Gerar Gráficos”, serão expostos gráficos de acordo com a seleção feita pelo usuário. Ao serem selecionadas as velocidades, por exemplo, tem-se a resposta gráfica do comportamento das velocidades com suas respectivas legendas, como se pode ver na Figura 6. E, ao se retirar as escolhas de velocidades e adicionar as escolhas de acelerações e alterando a teoria estudada para a de Stokes ao longo da profundidade, recebe-se uma nova resposta Figura 7.

Figura 6 - Resposta gráfica de Wave Kinematics para ondas regulares com Teoria de Airy, análise das propriedades ao longo do tempo e velocidades horizontal e vertical selecionadas.

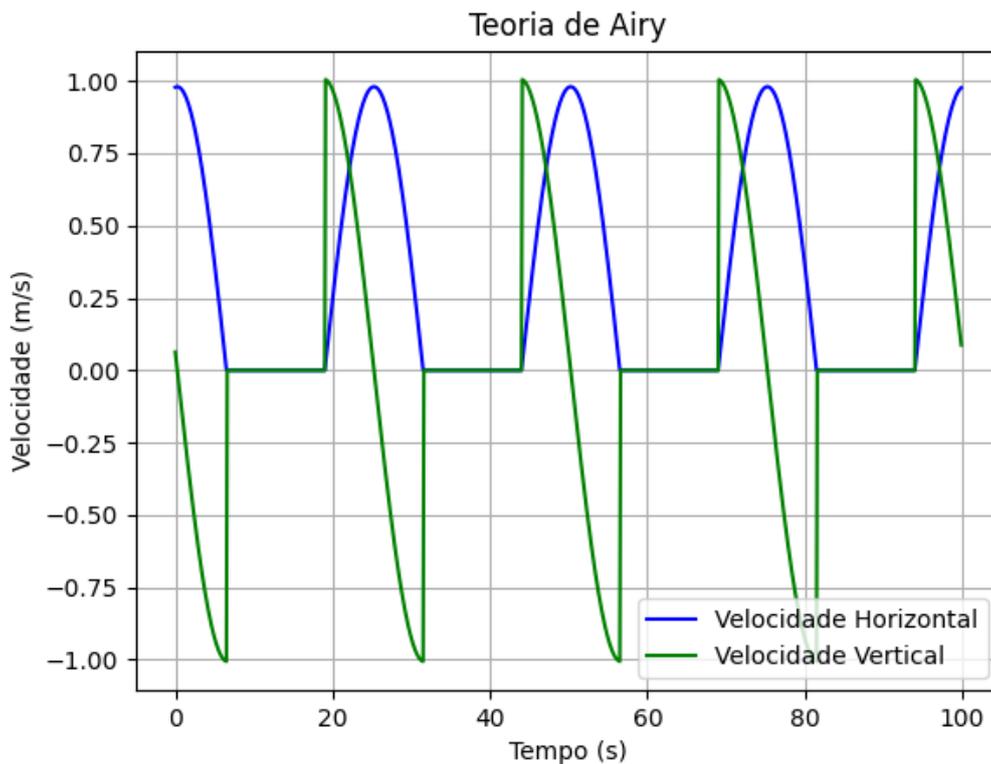
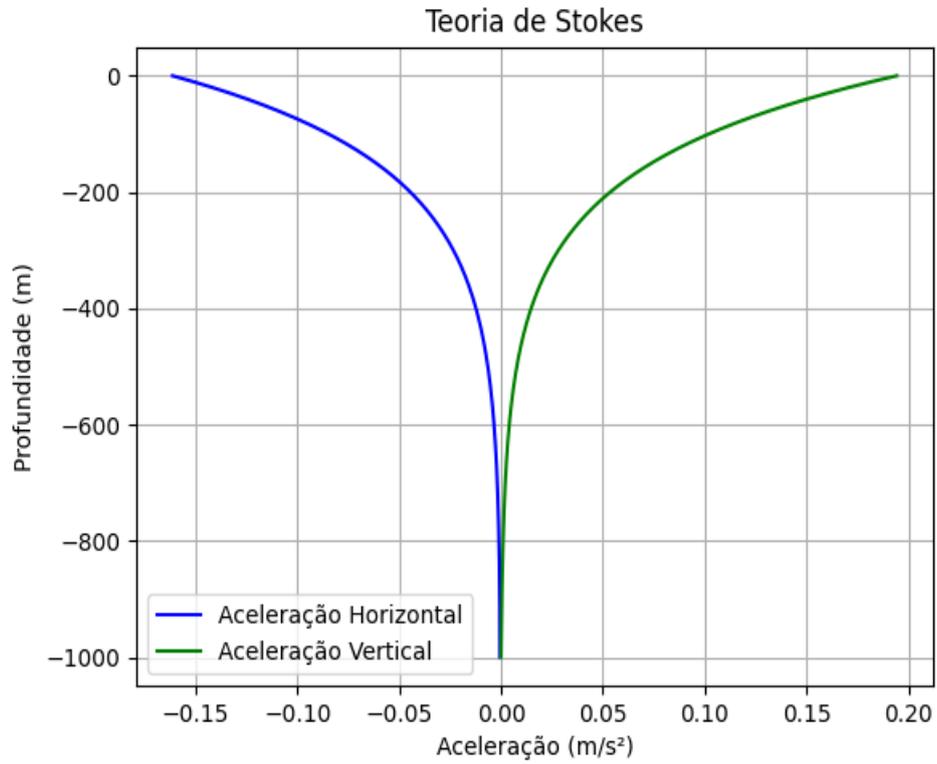


Figura 7 - Resposta gráfica de Wave Kinematics para ondas regulares com Teoria de Stokes, análise das propriedades ao longo da profundidade com acelerações horizontal e vertical selecionadas.



3.2 ONDAS IRREGULARES

A escolha de ondas irregulares da janela inicial apresenta ao usuário uma nova janela, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Wave Kinematics: janela de ondas irregulares.

Wave Kinematics - Ondas Irregulares

Insira os valores de:

Altura (m)	8
Período (s)	25
Profundidade (m)	1000
Qtd. de ondas	100
Pos. horizontal (m)	10
Pos. vertical (m)	0

Qual espectro de onda será utilizado?

Pierson-Moskowitz Jonswap

Assinale quais propriedades serão analisadas

<input checked="" type="checkbox"/> Espectro de Energia	<input checked="" type="checkbox"/> Elevacao de Superficie
<input checked="" type="checkbox"/> Velocidade Horizontal	<input checked="" type="checkbox"/> Velocidade Vertical
<input checked="" type="checkbox"/> Aceleração Horizontal	<input checked="" type="checkbox"/> Aceleração Vertical

Voltar **Processar Dados** **Gerar Gráficos**

Resultados:

Características espectrais:
 Espectro: Pierson-Moskowitz
 Momento de ordem 0: 4.0000000000000001
 Momento de ordem 2: 0.5006908485044466
 Momento de ordem 4: 3.14436834535965
 Período médio de cruzamento zero: 17.75926702464153
 Desvio padrão: 2.0
 Espectro de banda larga

Nessa janela são inseridos os valores de Altura significativa da onda (H_s), período de pico da onda (T_p), profundidade da lâmina d'água (d), quantidade de ondas a serem somadas (esse valor implica no tempo de processamento do programa, o valor mais recomendado é o de 200 ondas por proporcionar uma boa discretização do espectro a ser selecionado), posição horizontal da onda (x) e a posição vertical da onda (z).

Além disso, o programa dá a opção, quando se trata do espectro de ondas irregulares, de se escolher entre o espectro de Pierson-Moskowitz e o espectro de JONSWAP para realização dos cálculos. As respostas gráficas que podem ser obtidas são: espectro de energia,

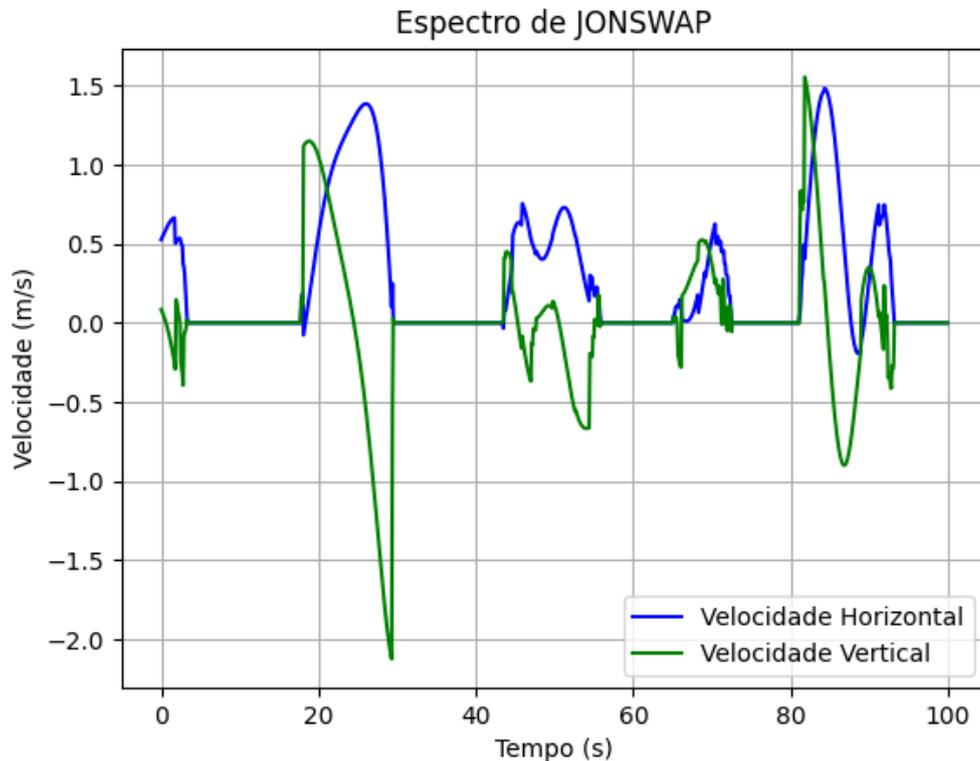
elevação de superfície, velocidade horizontal e velocidade vertical, aceleração horizontal e aceleração vertical.

Após a inserção dos dados é necessário clicar no botão “Processar Dados” para fazer com que os dados inseridos sejam lidos e utilizados nos cálculos e de acordo com os parâmetros selecionados. Após, serão expostos gráficos de acordo com a seleção feita na interface. A escolha por um espectro de energia, produz a sua resposta gráfica, sendo que as propriedades de mesma grandeza (como velocidade horizontal e vertical serão plotadas na mesma janela), por exemplo, como é mostrado na Figura 9. E, como elevação de superfície, velocidade ou aceleração e mudando o tipo do espectro também, recebe-se uma nova resposta (Figura 10).

Figura 9 - Resposta gráfica para espectro de energia de Pierson-Moskowitz com 100 ondas selecionadas.



Figura 10 - Resposta gráfica para velocidades horizontal e vertical para o espectro de JONSWAP.



No Capítulo 4 estarão expostas as respostas gráficas para a verificação do programa por meio de um comparativo com o programa DOOLINES, que é um framework desenvolvido com a linguagem de programação C++ que utiliza o paradigma da programação orientada a objetos (POO). Composto por diversas classes, as classes Model e a Intalg são as que mais se destacam. Elas são responsáveis pela concepção do modelo e pelos algoritmos de integração temporal, respectivamente (BEZERRA NETO et al., 2010). No capítulo 4 também é apresentado um estudo de caso relativo à uma plataforma em operação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 VERIFICAÇÃO DA INTERFACE

Para a verificação do desempenho da ferramenta desenvolvida, são feitas comparações com o programa DOOLINES para um estudo de caso.

O caso estudado avalia o comportamento do mar sobre a plataforma P-61 em operação. Para isto, utiliza-se dados de altura significativa e período de acordo com a (Figura 11), observando os intervalos de maior ocorrência de intervalos nos pares H_s e T_p e gerando números aleatórios nos pares de maior ocorrência.

Figura 11 - Ocorrências de H_s e T_p na Bacia de Campos.

Tp → Hs ↓	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	Total	%	Mean Tp	
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20				
0,0	0,5	34	185	40	8	10	10	35	72	88	88	130	75	73	11	13	7	5	884	6,32	10,76
0,5	1,0	160	1358	775	265	245	128	139	272	298	224	148	64	55	11	1	0	1	4144	29,64	7,30
1,0	1,5	3	458	998	724	558	491	291	259	267	152	61	26	14	1	1	1	0	4306	10,80	7,61
1,5	2,0	0	13	307	563	413	374	268	191	196	118	80	11	5	3	1	0	0	2543	18,19	8,46
2,0	2,5	0	0	25	150	250	178	138	131	156	111	60	9	7	1	0	0	0	1217	8,70	9,46
2,5	3,0	0	0	1	15	74	70	69	68	87	52	39	13	8	4	0	0	0	500	3,58	10,41
3,0	3,5	0	0	0	3	14	29	22	22	42	35	16	2	5	2	0	0	0	192	1,37	10,94
3,5	4,0	0	0	0	0	1	2	14	23	20	15	19	3	3	2	1	0	0	103	0,74	11,83
4,0	4,5	0	0	0	0	0	1	7	9	7	12	10	10	3	0	0	0	0	59	0,42	12,36
4,5	5,0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	2	6	3	2	0	0	0	0	18	0,13	13,08
5,0	5,5	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	3	1	4	0	0	0	0	12	0,09	13,63
5,5	6,0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,01	11,30
6,0	6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0,01	13,30
6,5	7,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0,01	13,70
Total		197	2014	2146	1726	1565	1281	984	1051	1164	810	574	217	179	35	17	8	6	3981		
%		1,41	14,41	15,31	12,31	11,11	8,11	7,04	7,51	3,34	5,71	1,11	1,51	1,21	0,21	0,11	0,01	0,01	00,00		
Mean Hs		0,67	0,83	1,14	1,44	1,56	1,62	1,64	1,52	1,54	1,51	1,44	1,17	1,01	1,14	0,51	0,31	0,22			

Fonte: DENO OCEÂNICA (2020)

Realizam-se os cálculos para ondas regulares e ondas irregulares utilizando os mesmos parâmetros de $H = 1,08$ m, $T = 5,95$ s e $d = 1189$ m. Avaliando de acordo com o erro médio quadrático (MSE) e a raiz do erro médio quadráticos (RMSE) para avaliar a acurácia dos resultados. Adotou-se um intervalo de tempo padrão em ambos os programas de 100 segundos com incremento de 0,1 segundos.

Inicialmente, faz-se a comparação relacionado a ondas regulares para as duas teorias empregadas na interface ao longo do tempo. Com isso, geram-se gráficos com um intervalo de tempo de 15 segundos para facilitar a visualização (Figura 12, Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16) para efeito comparativo, além disso, cria-se uma tabela (Tabela 1) para apontar o MSE e RMSE. Inicialmente, apresentam-se as respostas para a teoria linear de Airy.

Figura 12 - Comparativo DOOLINES *versus* Wave Kinematics para Elevação de Superfície na teoria linear de Airy.

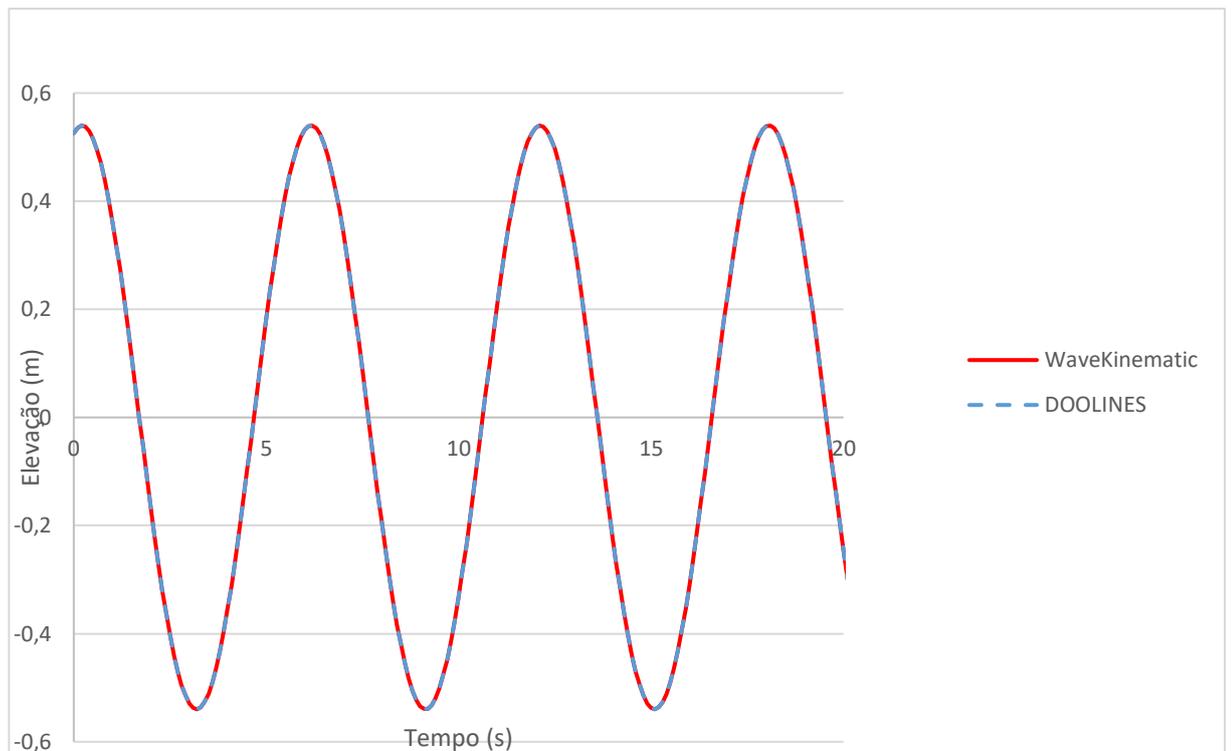


Figura 13 - Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Velocidade Horizontal na teoria linear de Airy.

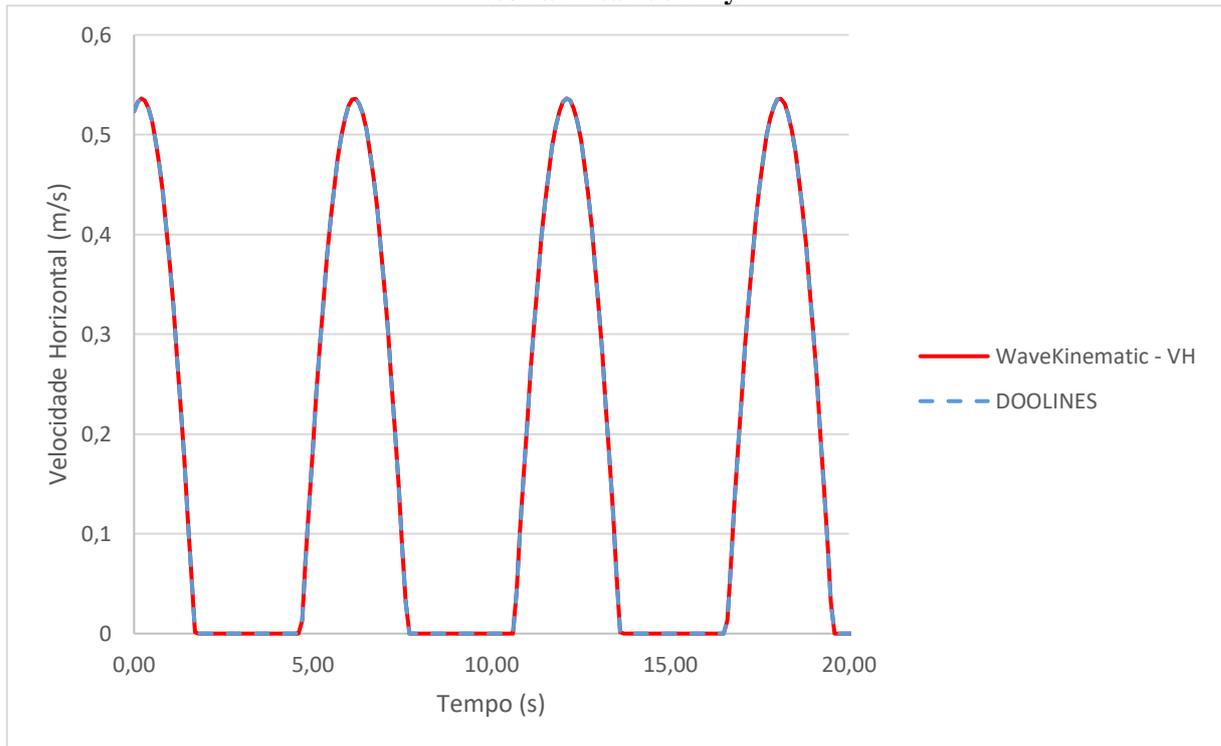


Figura 14 - Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Velocidade Vertical na teoria linear de Airy.

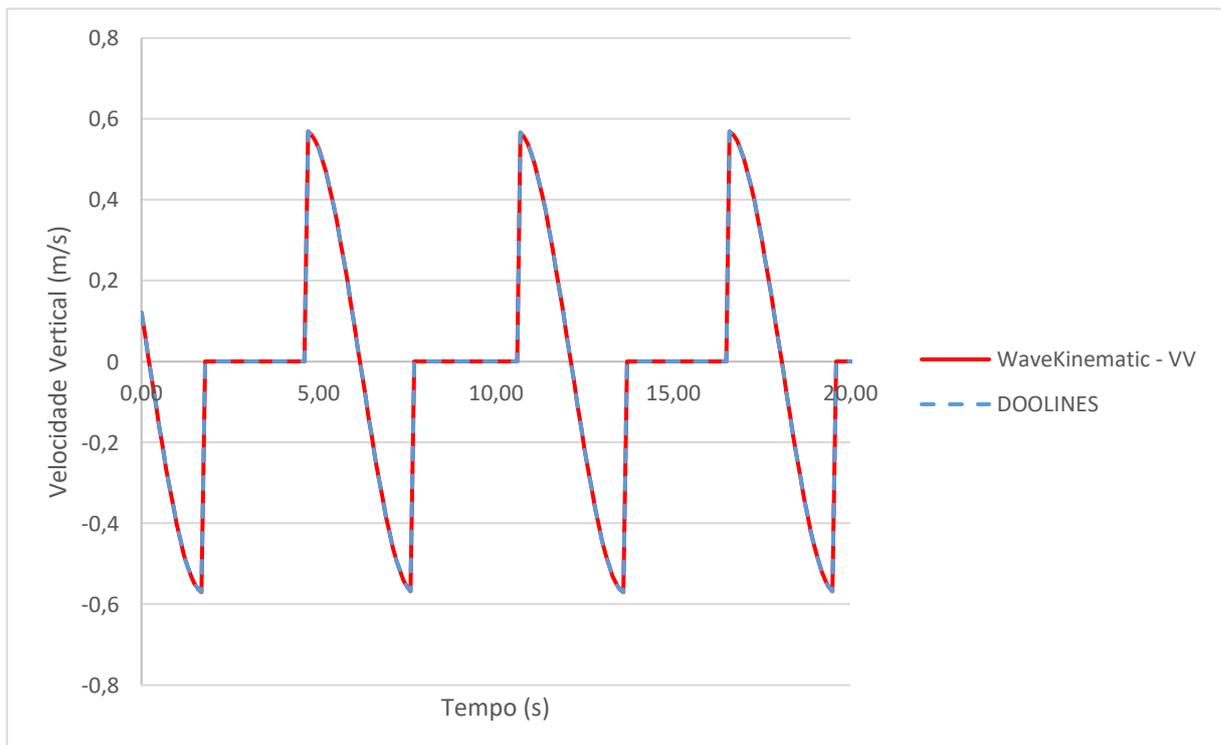


Figura 15 - Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Aceleração Horizontal na teoria linear de Airy.

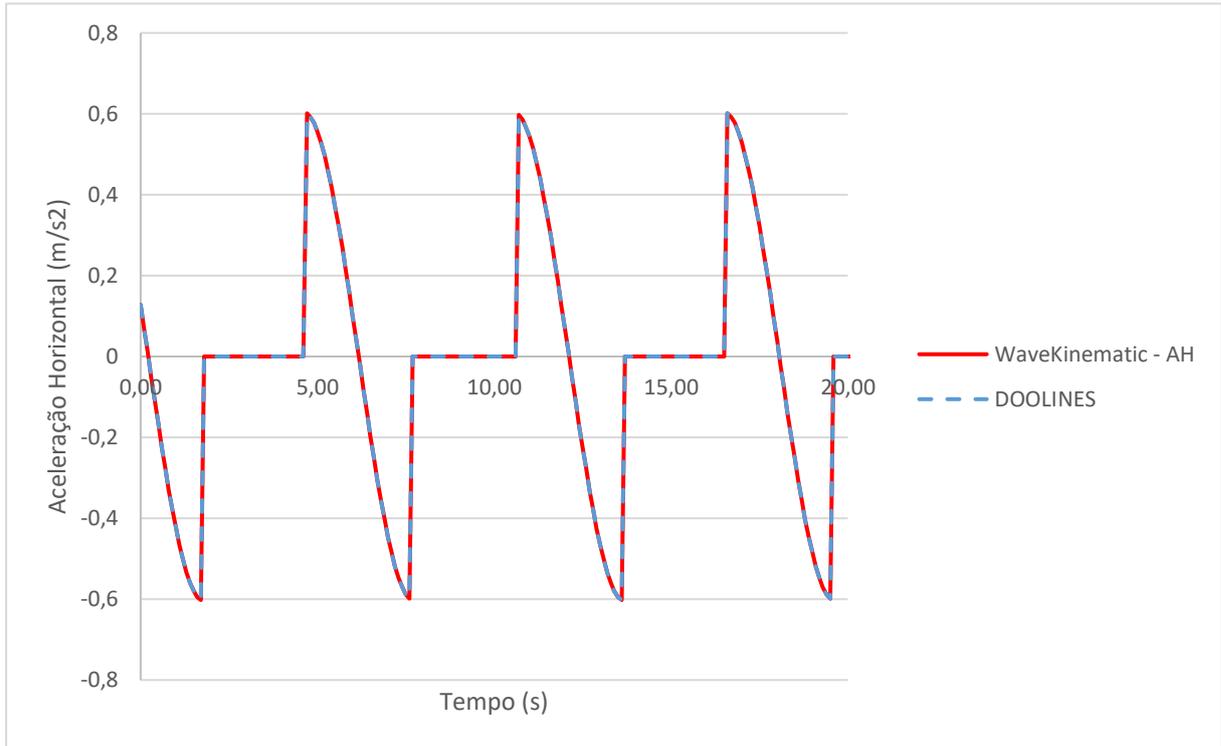


Figura 16 - Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Aceleração Vertical na teoria linear de Airy.

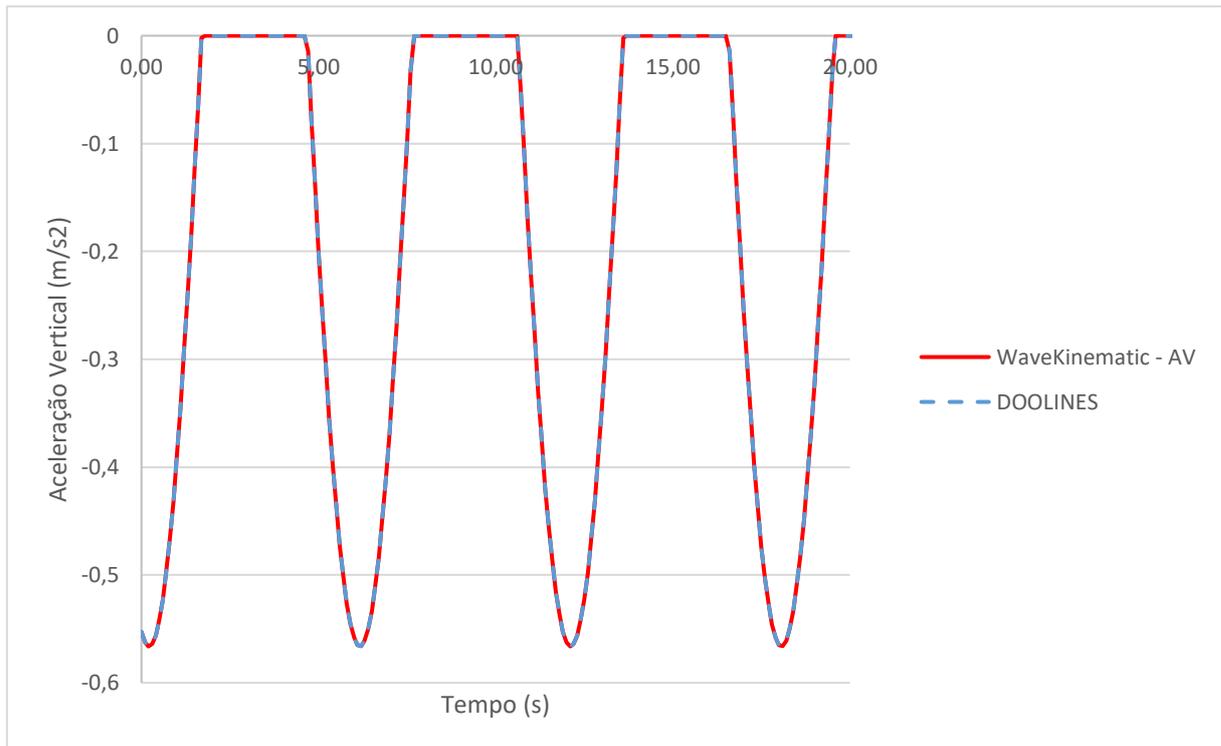


Tabela 1 - Erros DOOLINES versus Wave Kinematics para a teoria de Airy.

Airy					
	Elevação	Vel. Horizontal	Vel. Vertical	Ac. Horizontal	Ac. Vertical
MSE	8,779E-10	4,65256E-10	4,75809E-10	5,28478E-10	5,18409E-10
RMSE	2,962E-05	2,15698E-05	2,1813E-05	2,29886E-05	2,27686E-05

O MSE e RMSE têm como objetivo mostrar a distância média entre as amostras, os valores obtidos estão na casa de 5 casas decimais. Sendo assim, pode-se afirmar que os resultados da interface são satisfatórios de acordo com o programa DOOLINES para a teoria de Airy.

Prosseguindo com a análise, faz-se o mesmo procedimento para a teoria de Stokes e gráficos (Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 20 e Figura 21) também são gerados e uma tabela (Tabela 2) de erros é criada.

Figura 17 - Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Elevação de superfície na teoria linear de Stokes.

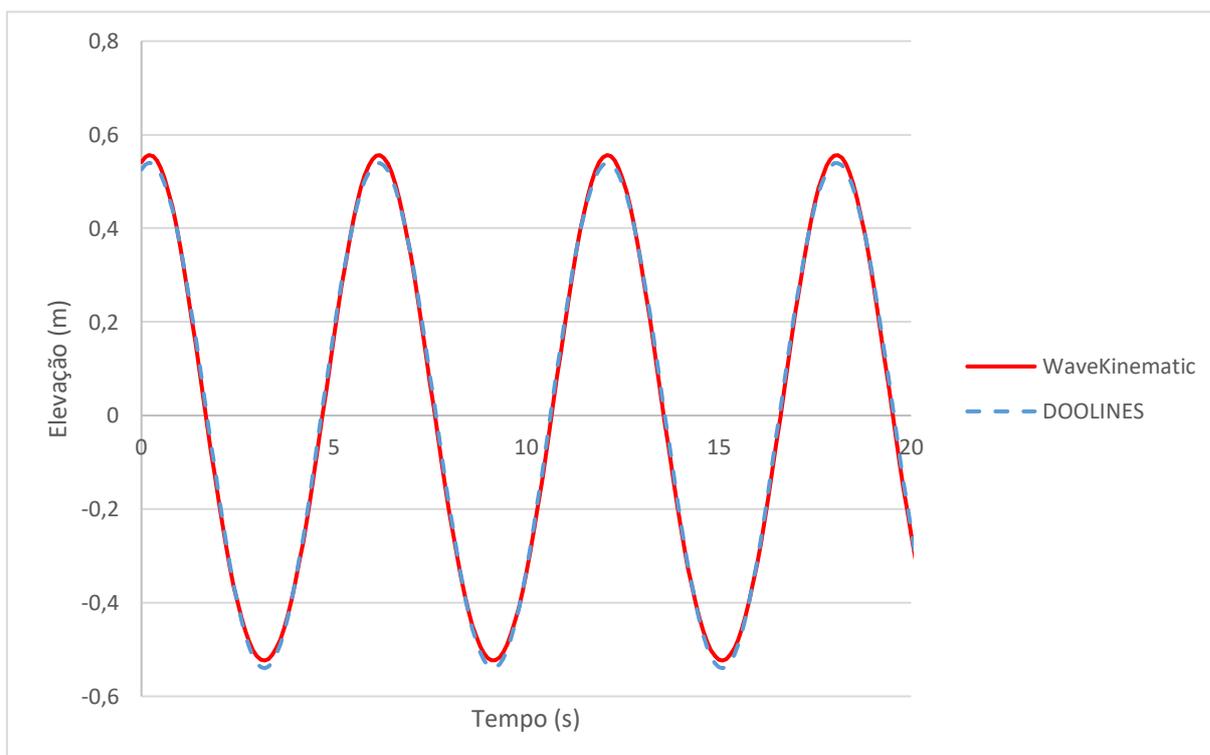


Figura 18 - Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Velocidade Horizontal na teoria linear de Stokes.

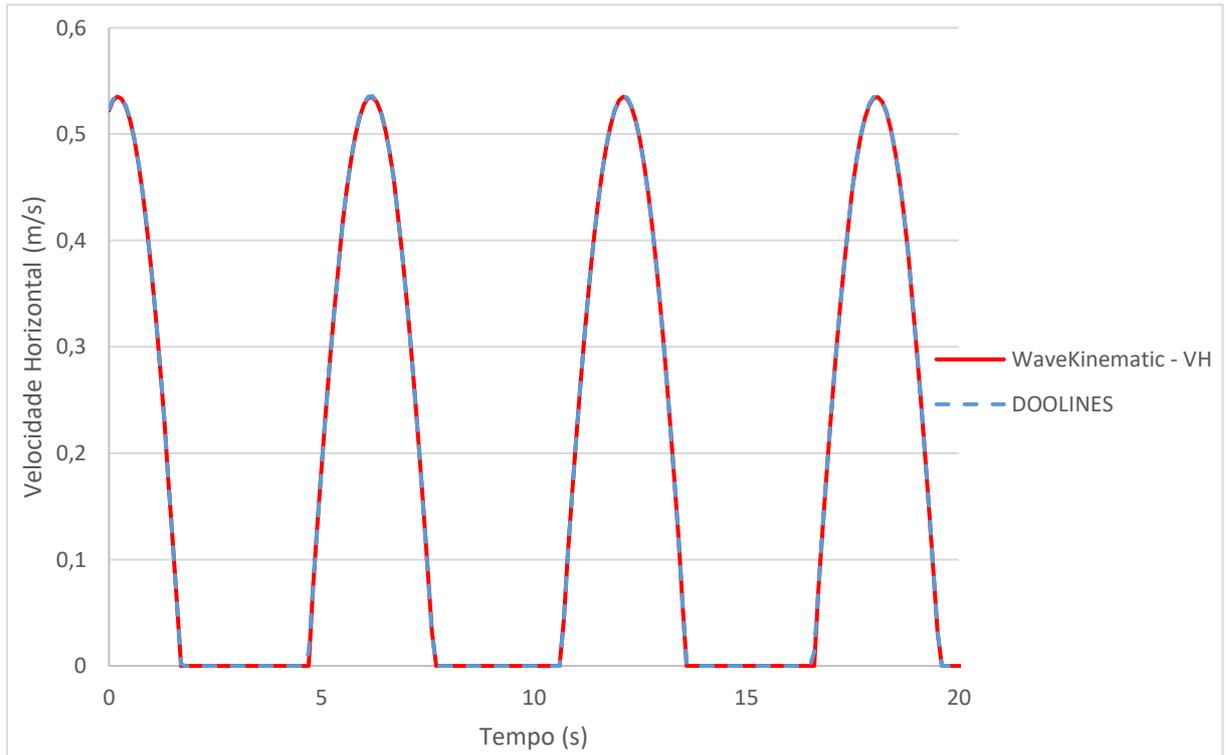


Figura 19 - Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Velocidade Vertical na teoria linear de Stokes.

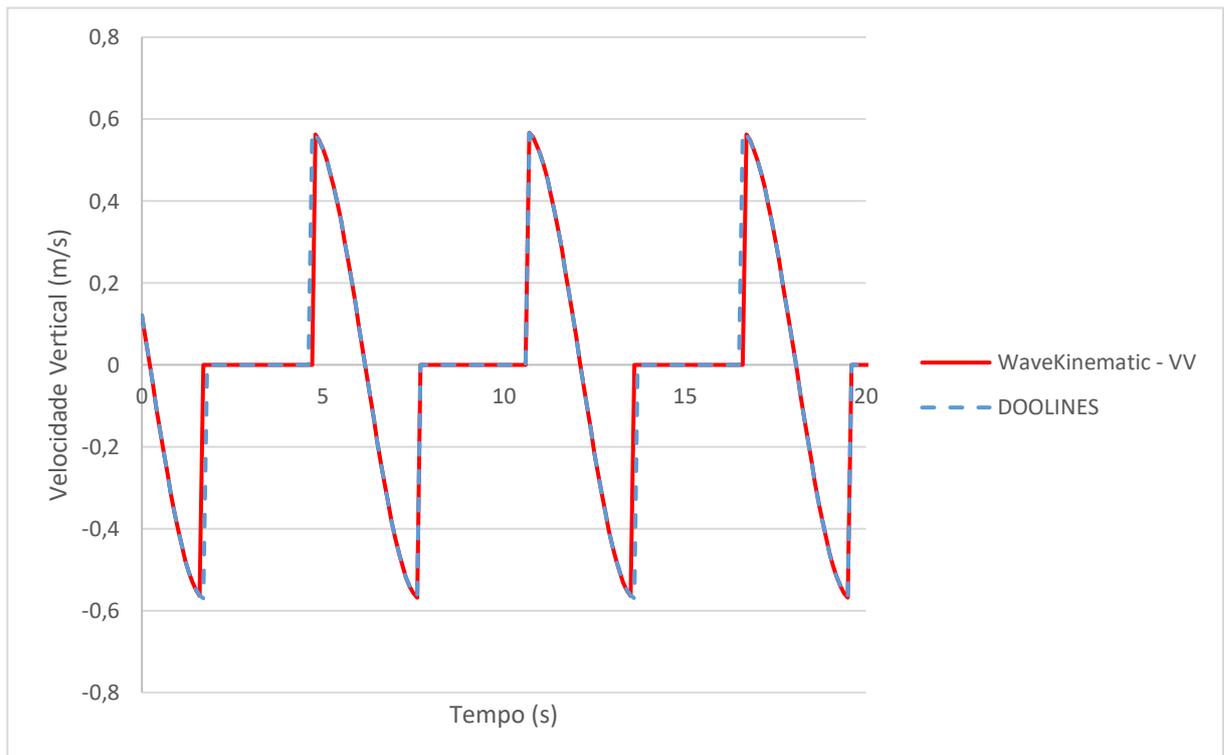


Figura 20 - Comparativo DOOLINES *versus* Wave Kinematics para Aceleração Horizontal na teoria linear de Stokes.

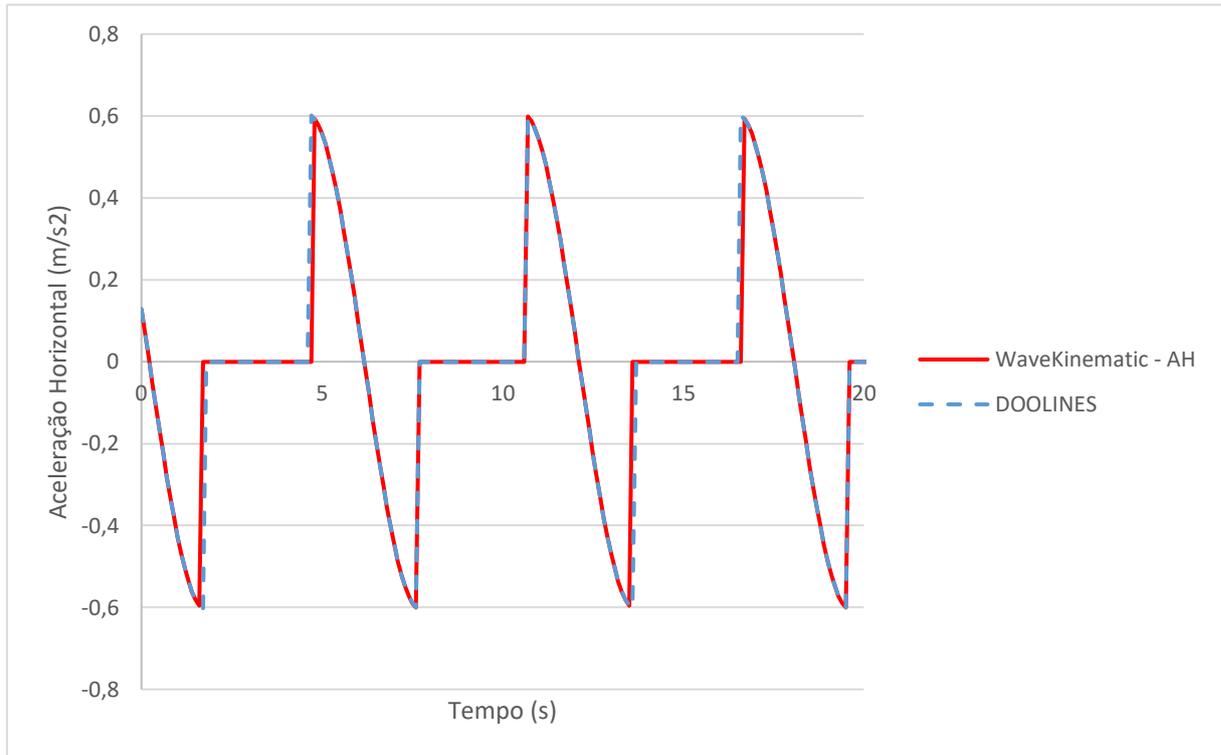


Figura 21 - Comparativo DOOLINES *versus* Wave Kinematics para Aceleração Vertical na teoria linear de Stokes.

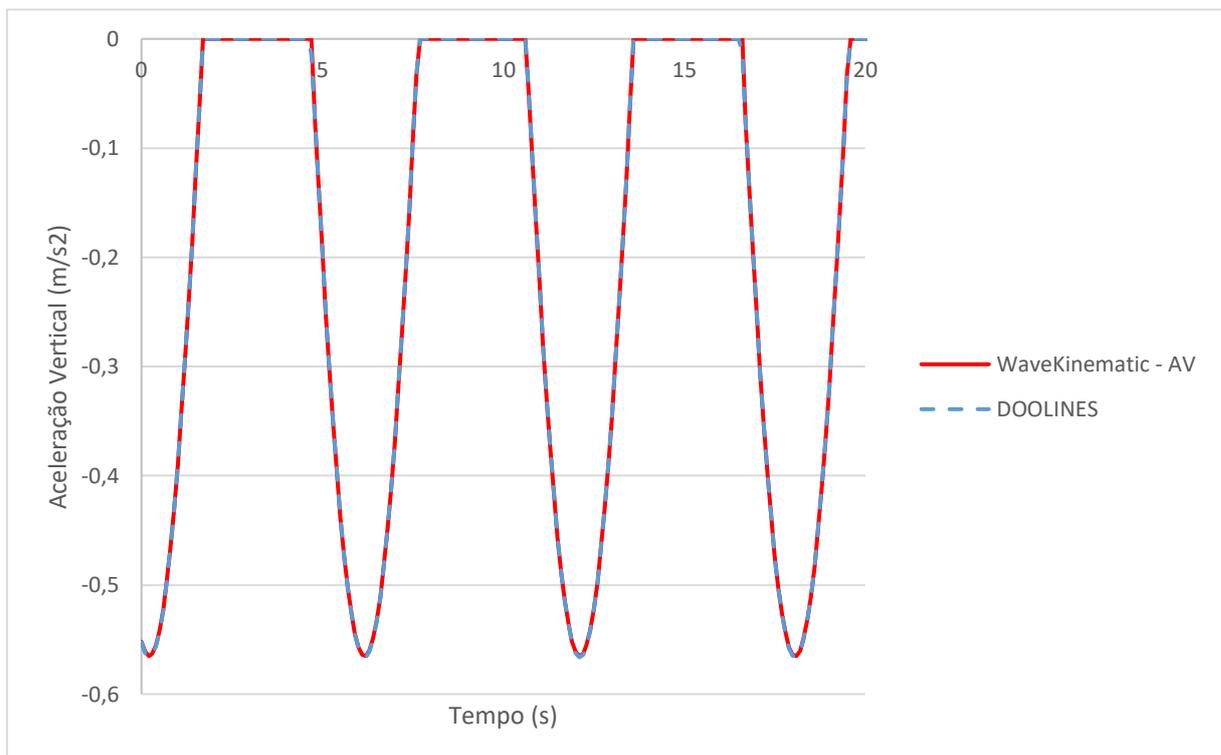


Tabela 2 - Erro DOOLINES versus Wave Kinematics para a teoria de Stokes.

Stokes					
	Elevação	Vel. Horizontal	Vel. Vertical	Ac. Horizontal	Ac. Vertical
MSE	1,37738E-04	1,74704E-06	5,84212E-03	6,51474E-03	1,94E-06
RMSE	1,17362E-02	1,32176E-03	7,64338E-02	8,07139E-02	1,39E-03

Visto os valores de MSE e RMSE apresentados na Tabela 2 pode-se chegar a mesma análise feita para o caso da teoria linear de Airy, o RMSE está próximo de zero, que seria o valor ideal, então conclui-se que para a teoria de Stokes a interface tem resultados satisfatórios.

Prosseguindo a análise, fez-se o mesmo comparativo entre os dois programas para ondas irregulares, utilizando $H_s = 1,08$ m, $T_p = 5,95$ s e $d = 1189$ m, para o espectro de Pierson-Moskowitz e JONSWAP. Inicialmente, foi estudado o caso para o espectro de Pierson-Moskowitz com todos os dados iniciais e gerados, como comprimento de onda e ângulo de fase, que possuem caráter aleatório, na interface e utilizados no DOOLINES. Com isso, apresenta-se abaixo (Figura 22, Figura 23, Figura 24, Figura 25 e Figura 26) os gráficos relacionados à diferença das duas ferramentas, logo após, o MSE e RMSE (Tabela 3) para o caso.

Figura 22 - Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Elevação de Superfície para espectro de Pierson-Moskowitz.

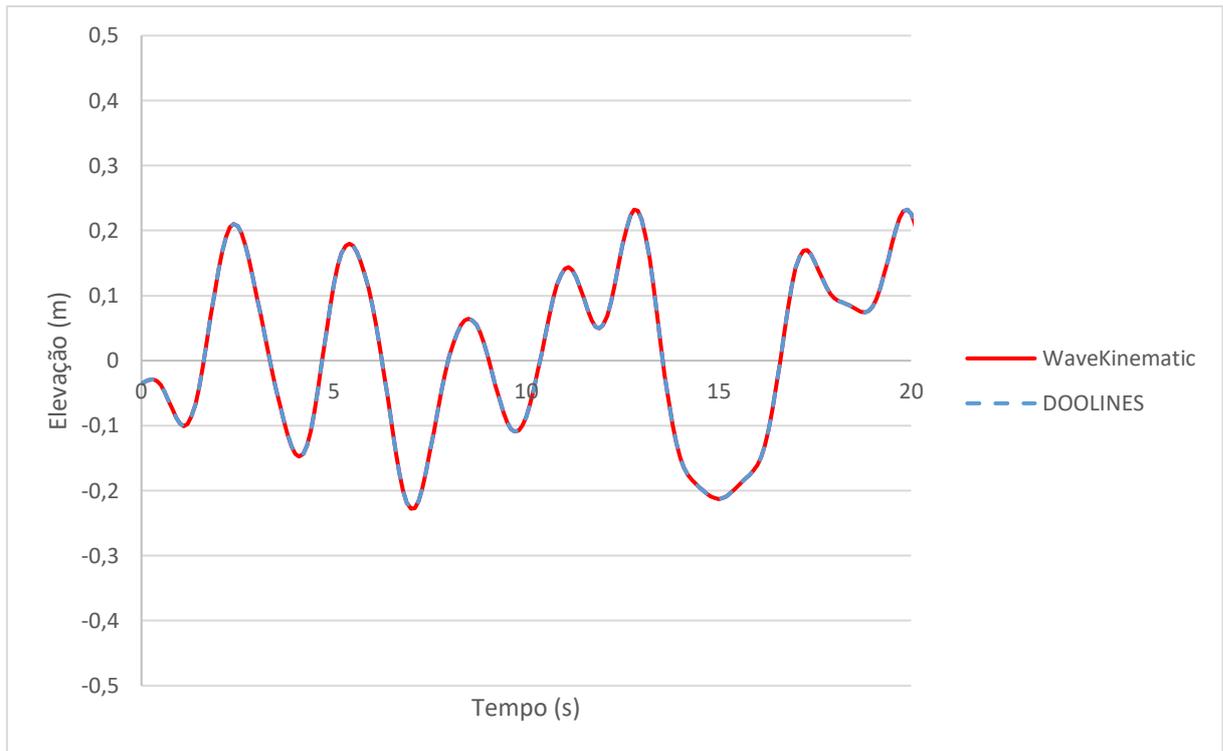


Figura 23 - Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Velocidade Horizontal para espectro de Pierson-Moskowitz.

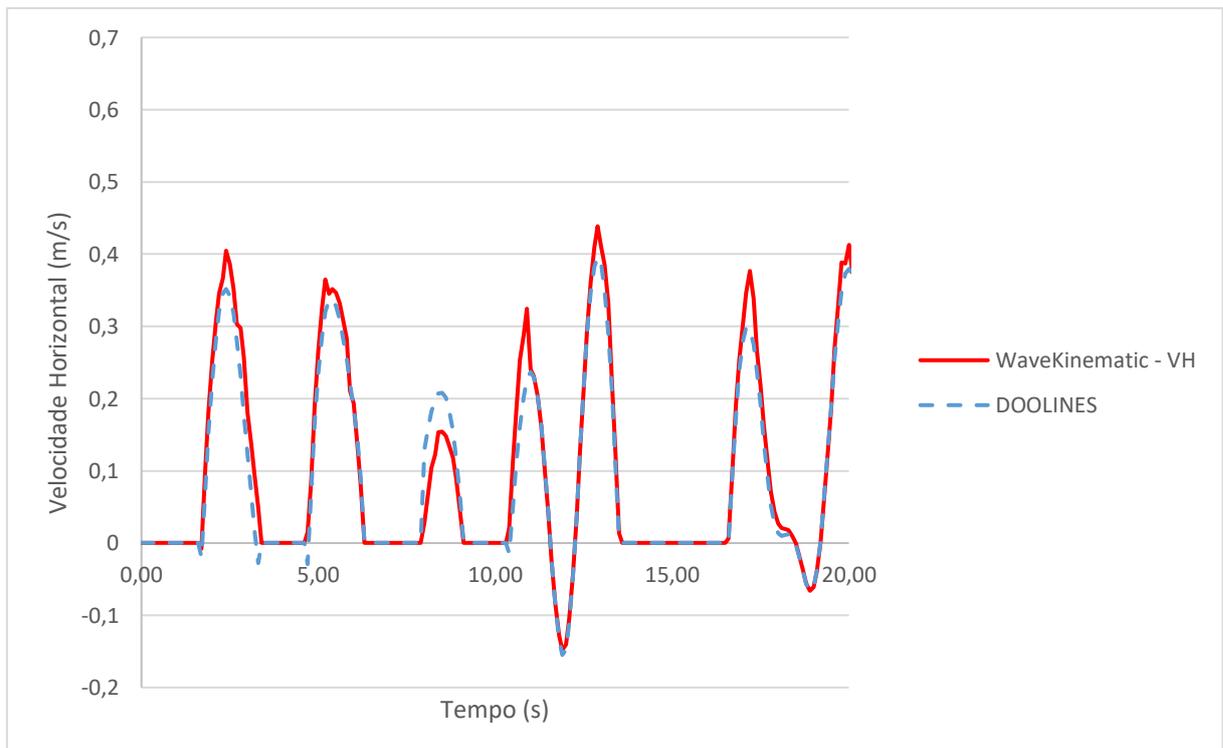


Figura 24 - Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Velocidade Vertical para espectro de Pierson-Moskowitz.

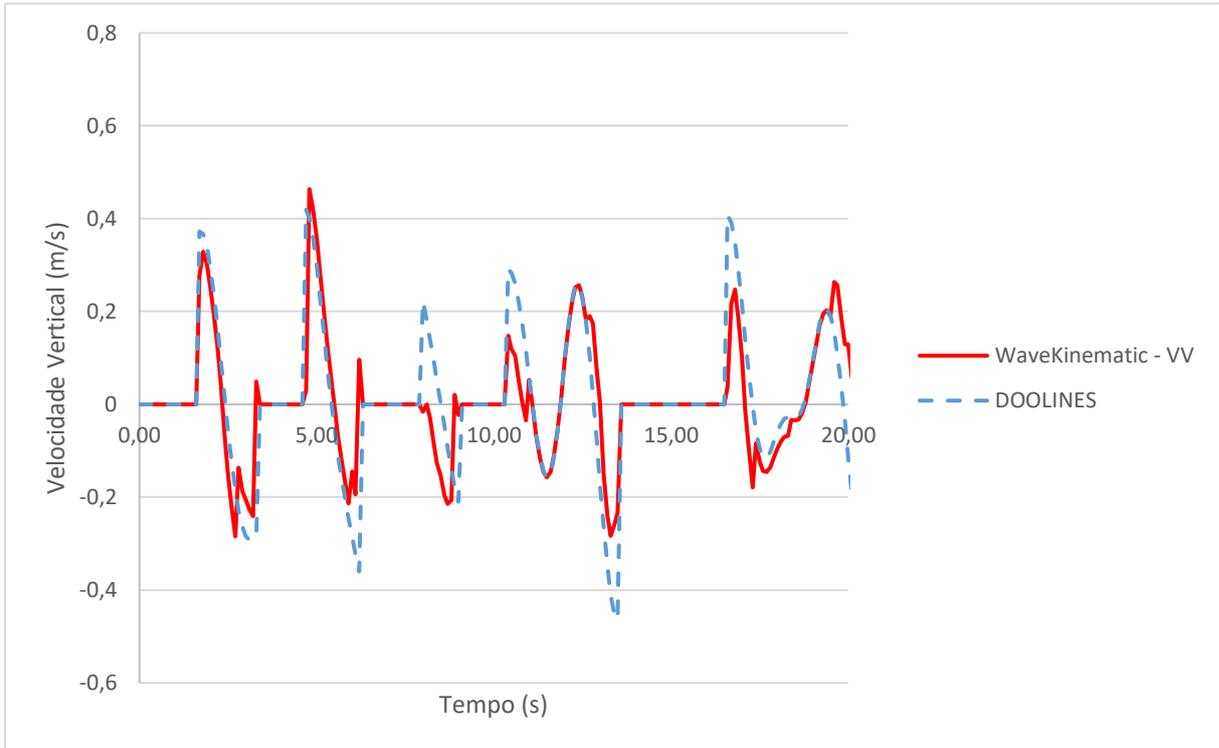


Figura 25 - Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Aceleração Horizontal para espectro de Pierson-Moskowitz.

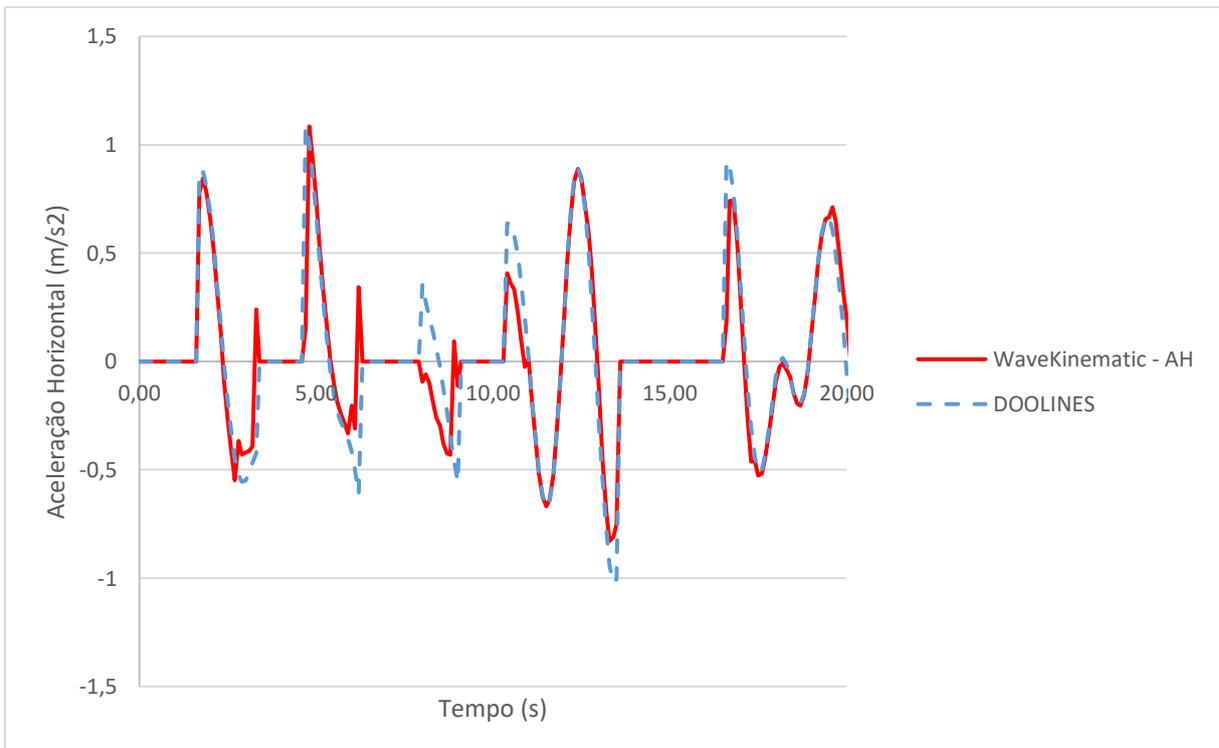


Figura 26 - Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Aceleração Vertical para espectro de Pierson-Moskowitz.

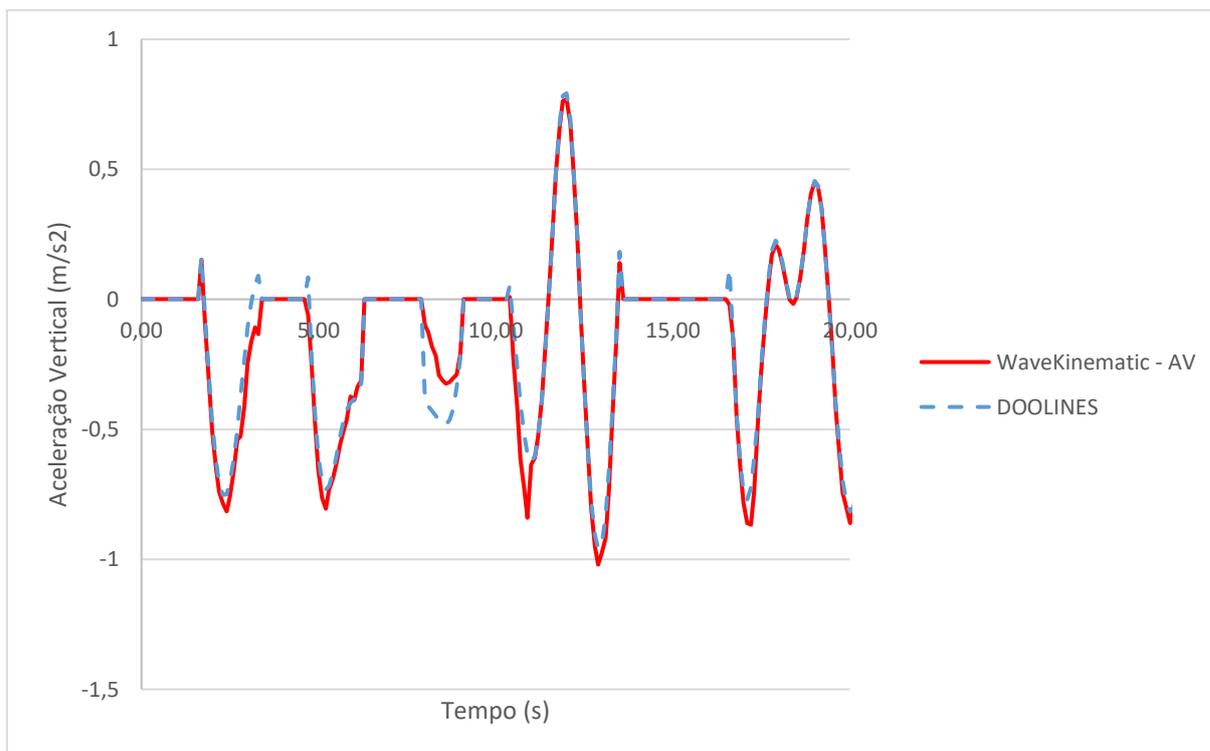


Tabela 3 - Erro DOOLINES versus Wave Kinematics para o espectro de Pierson-Moskowitz.

Pierson-Moskowitz					
	Elevação	Vel. Horizontal	Vel. Vertical	Ac. Horizontal	Ac. Vertical
MSE	1,2033E-09	7,1239E-04	9,9305E-03	2,2155E-02	5,4750E-03
RMSE	3,4689E-05	2,6691E-02	9,9652E-02	1,4885E-01	7,3993E-02

Ao se analisar os valores de MSE e RMSE, pode-se notar, apesar do gráfico aparecerem pontos discrepantes, que os erros continuam próximos a nulidade, fazendo com que o programa não tenha discrepância considerável. Assim é possível confirmar que a interface para o espectro de Pierson-Moskowitz tem utilização satisfatória.

Prosseguindo com a análise, a mesma metodologia foi feita para as propriedades cinemáticas levando em consideração o espectro de JONSWAP. Mantendo todos os dados inseridos e gerados na interface para o programa DOOLINES, gerando assim gráficos (Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30 e Figura 31), e montou-se uma tabela (Tabela 4) com MSE e RMSE para cada propriedade.

Figura 27 – Comparativo DOOLINES *versus* Wave Kinematics para Elevação de Superfície para espectro de JONSWAP.

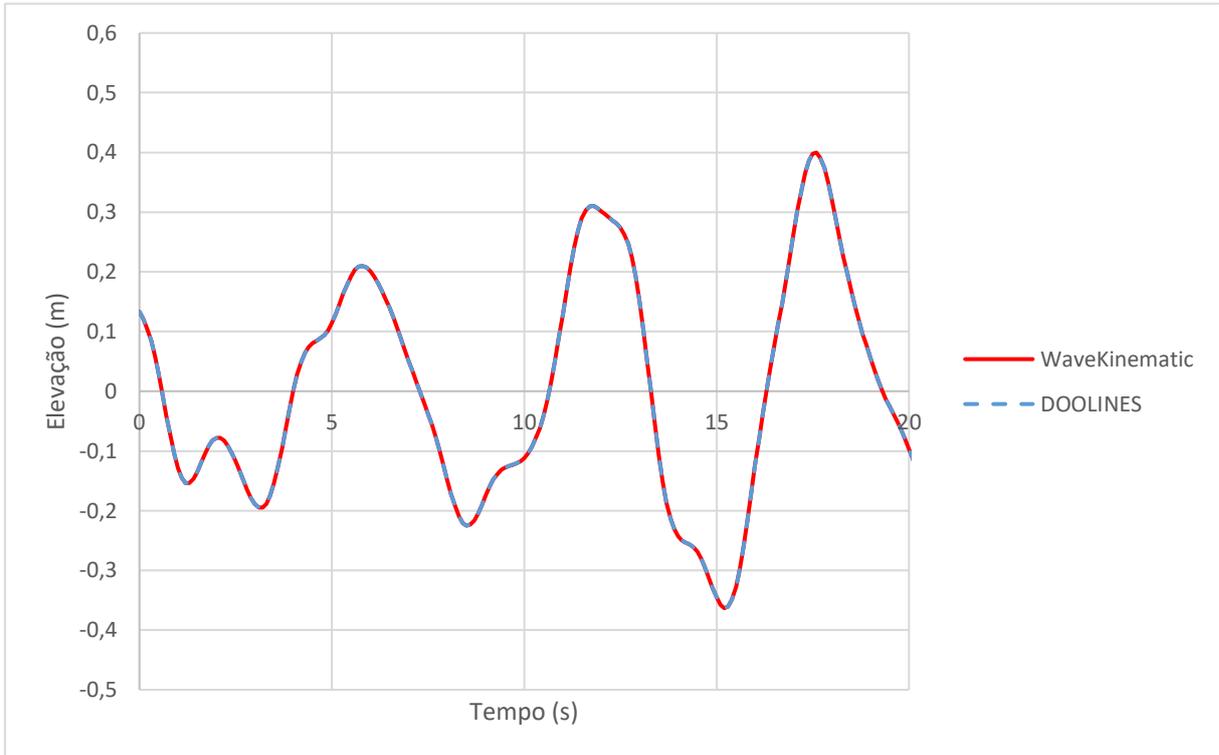


Figura 28 – Comparativo DOOLINES *versus* Wave Kinematics para Velocidade Horizontal para espectro de JONSWAP.

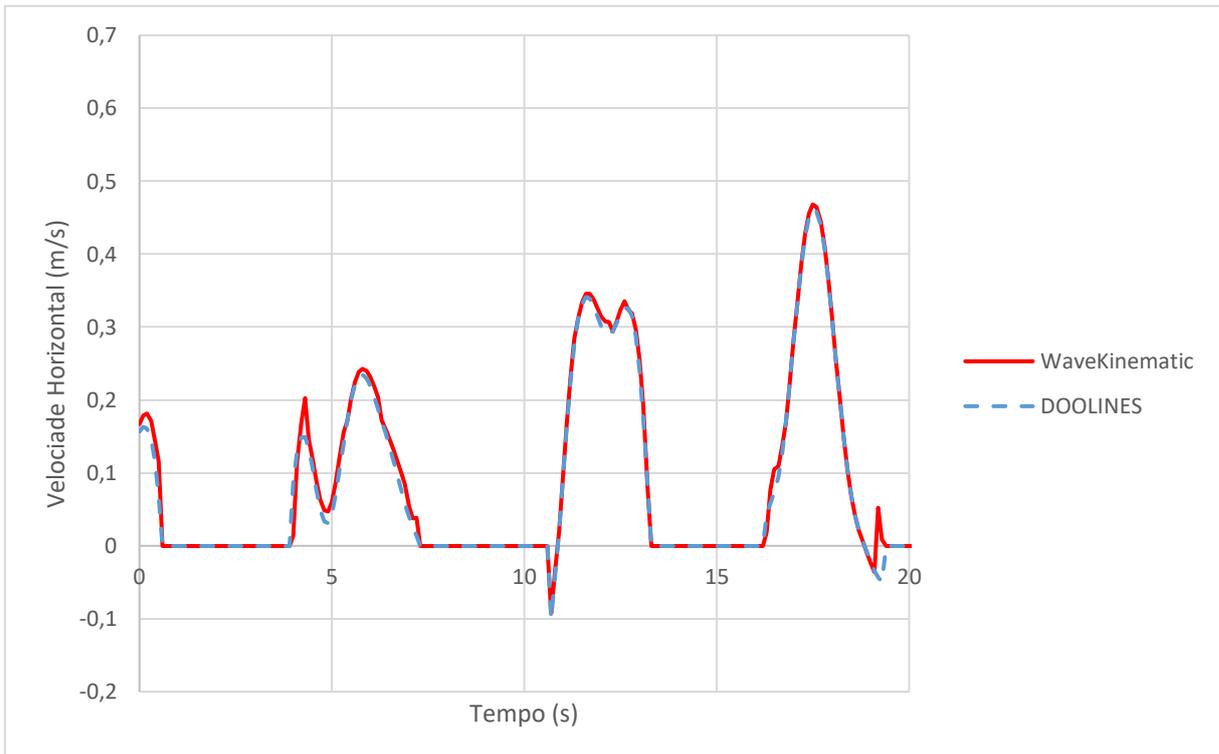


Figura 29 – Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Velocidade Vertical para espectro de JONSWAP.

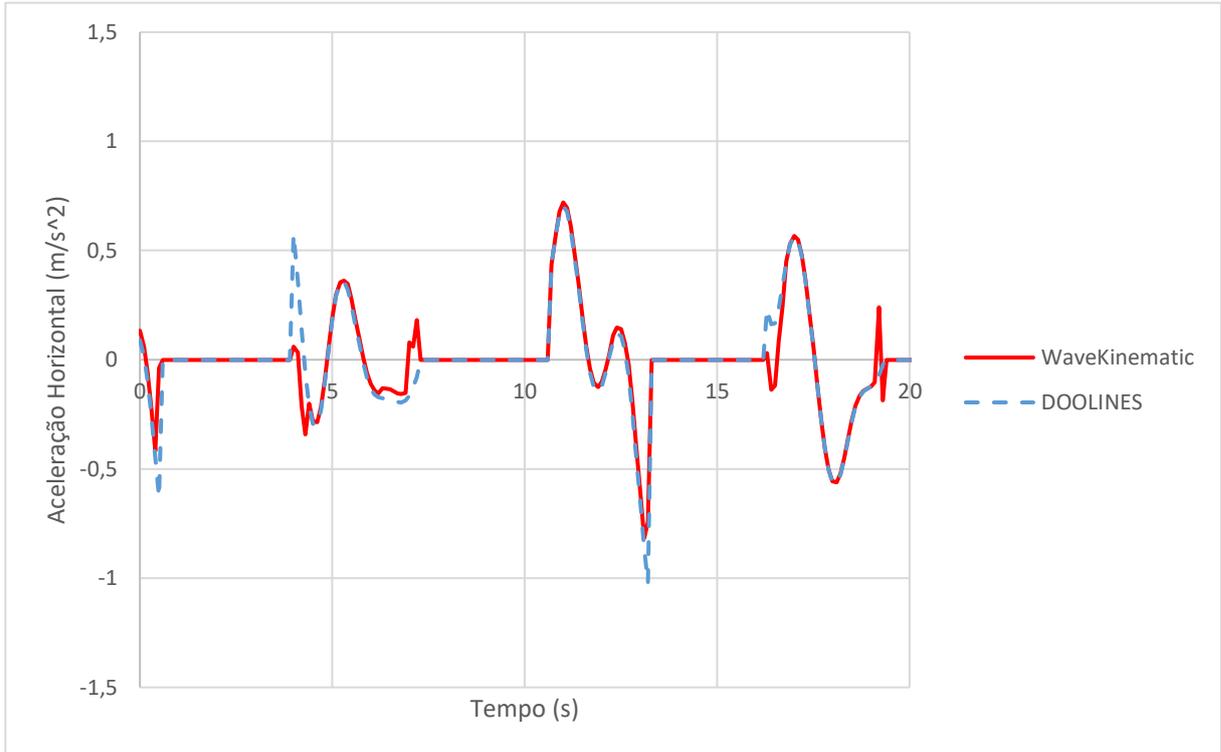


Figura 30 – Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Aceleração Horizontal para espectro de JONSWAP.

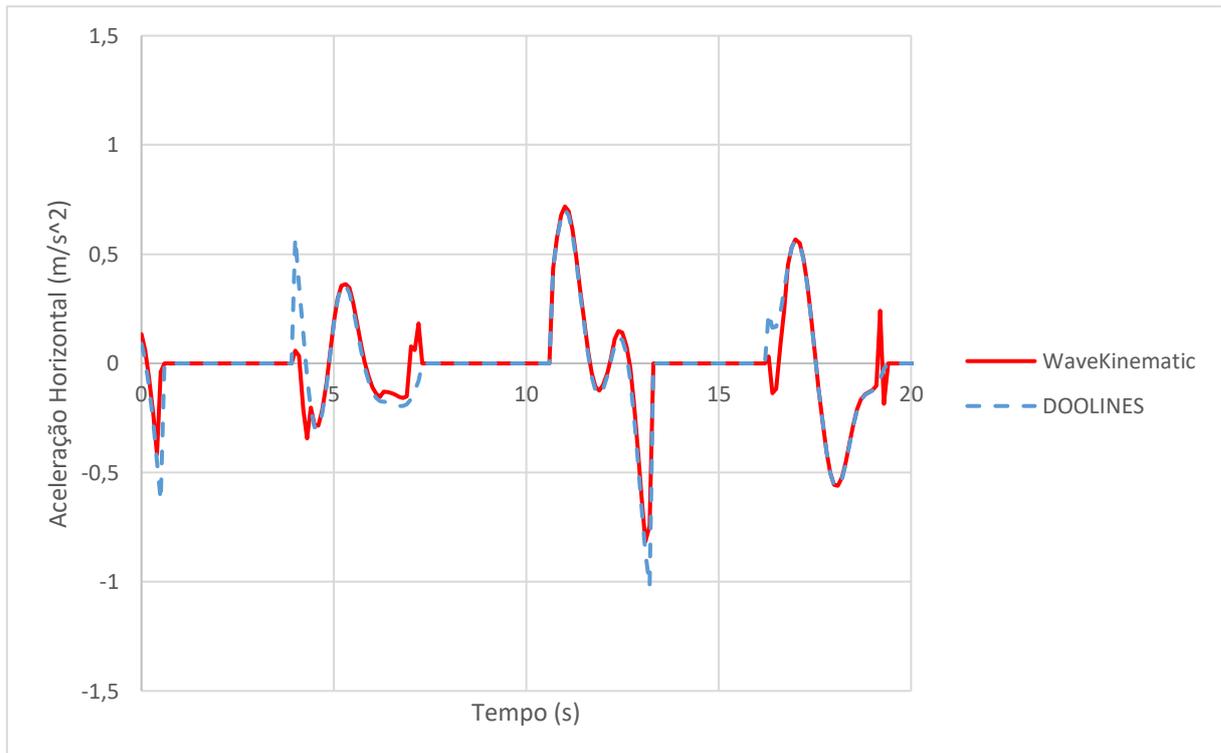


Figura 31 – Comparativo DOOLINES versus Wave Kinematics para Aceleração Vertical para espectro de JONSWAP.

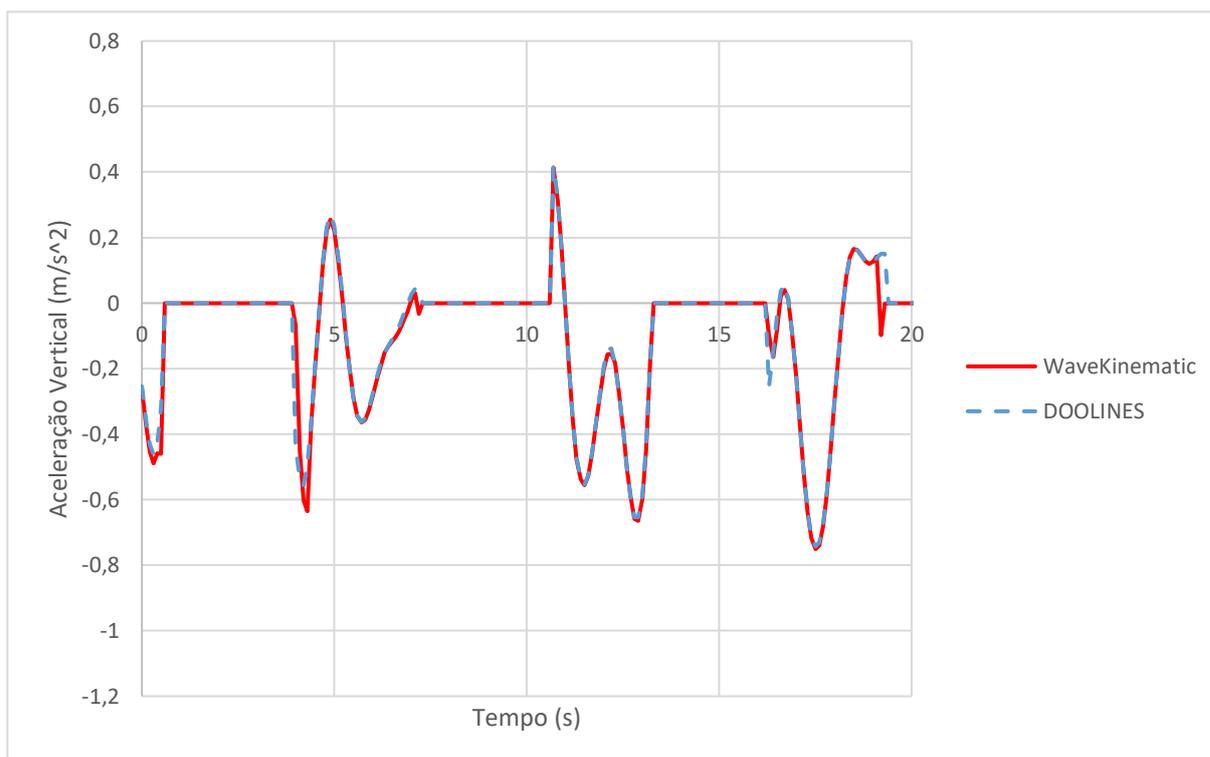


Tabela 4 – Erro DOOLINES versus Wave Kinematics para o espectro de JONSWAP.

JONSWAP					
	Elevação	Vel. Horizontal	Vel. Vertical	Ac. Horizontal	Ac. Vertical
MSE	9,5754E-10	5,1498E-04	7,4388E-03	1,1785E-02	3,1515E-03
RMSE	3,0944E-05	2,2693E-02	8,6248E-02	1,0856E-01	5,6138E-02

Diante do que foi exposto acima, os valores de MSE e RMSE, segue-se com a mesma análise dos casos anteriores, fazendo com que a interface para o espectro de JONSWAP tenha resultados satisfatórios de acordo com o programa DOOLINES.

Sendo assim, tanto para ondas regulares quanto para ondas irregulares, a ferramenta Wave Kinematics se mostrou com resultados satisfatórios diante da literatura e do framework DOOLINES.

4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA FERRAMENTA

Além da necessidade de validação do programa, foi feita uma análise de sensibilidade das propriedades aplicadas no programa, para a Teoria de Airy. Para o caso das ondas regulares variou-se a altura da onda para 1 metro a menos e 1 metro a mais ($H = 0,08$ m e $H = 2,08$ m), também foi variado o período para 1 segundo a mais e 1 segundo a menos ($T = 4,95$ s e $T = 6,95$ s) e, por fim, a profundidade foi variada em 100 metros ($d = 1089$ m e $d = 1289$ m). Com isso foram montados gráficos (Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35 e Figura 36) para cada propriedade analisada na ferramenta e uma tabela (Tabela 5) de comparação das características da onda.

Figura 32- Teste de sensibilidade para elevação de onda.

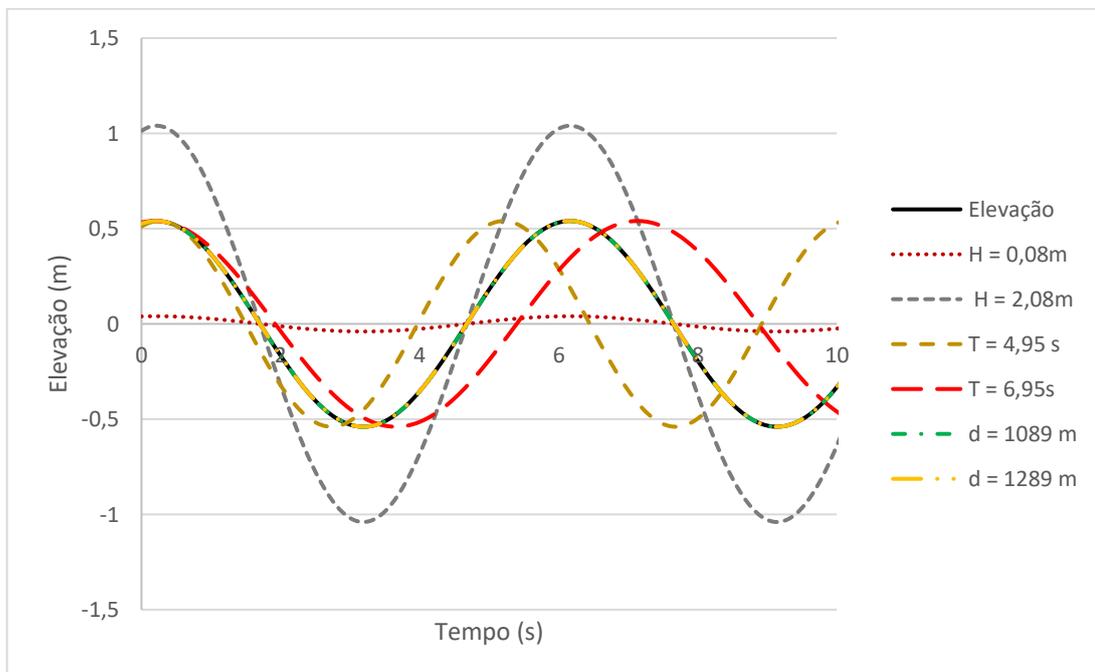


Figura 33 - Teste de sensibilidade para Velocidade Horizontal.

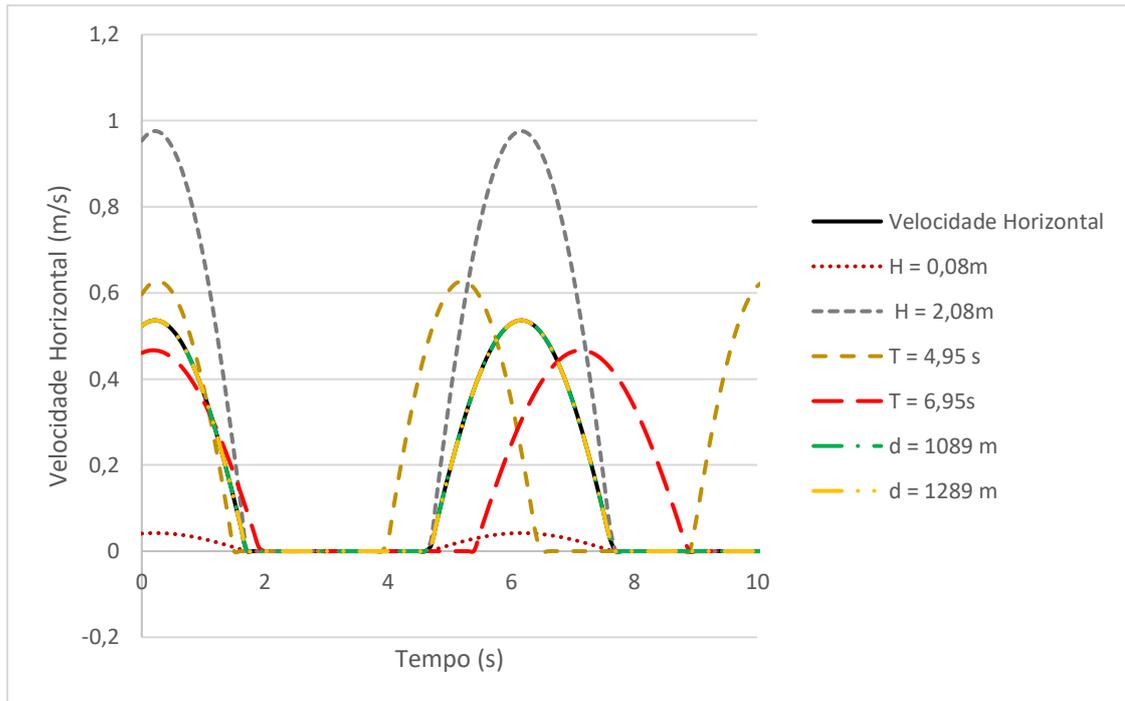


Figura 34 - Teste de sensibilidade para Velocidade Vertical.

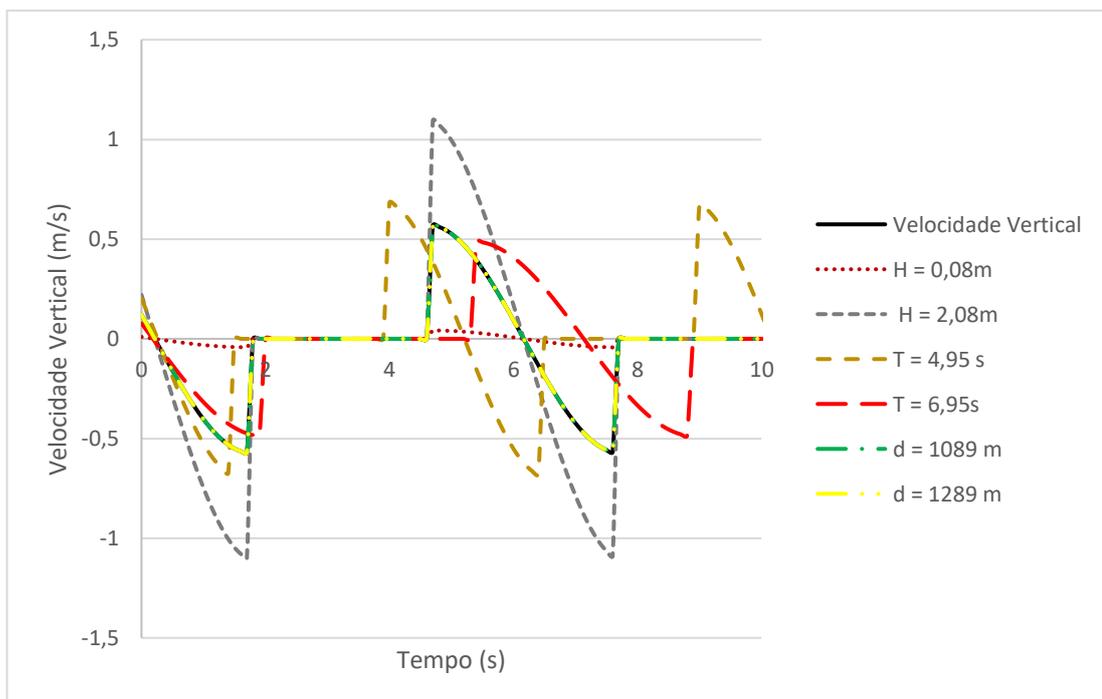


Figura 35 - Teste de sensibilidade para Aceleração Horizontal.

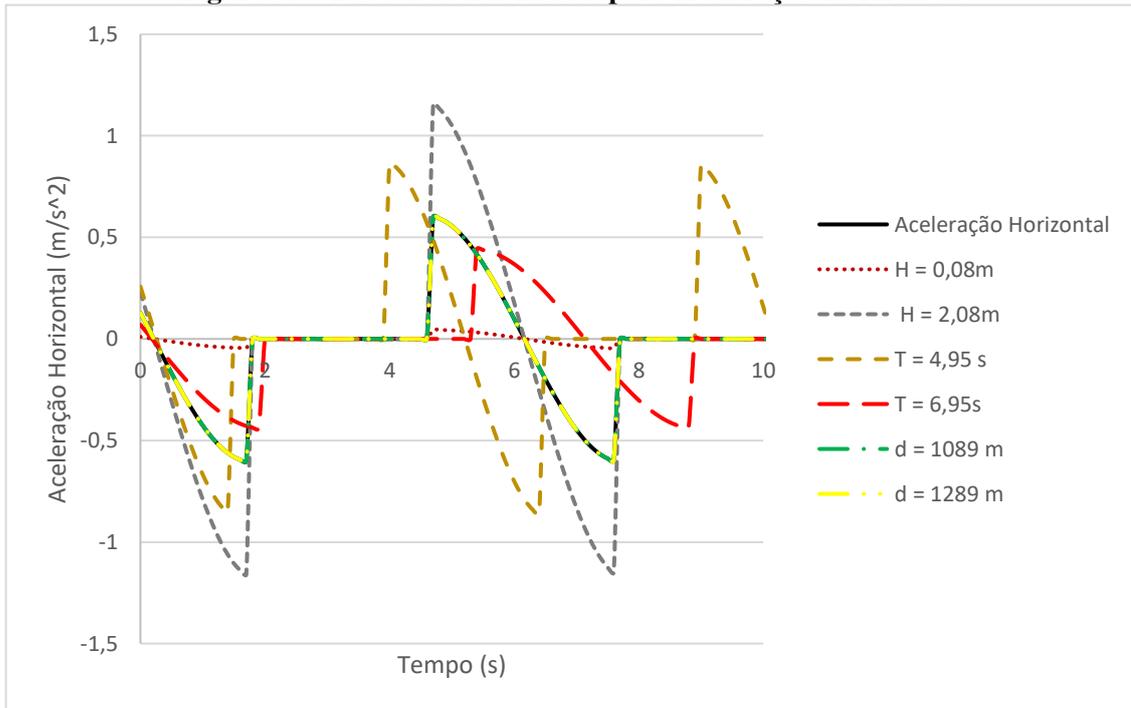


Figura 36 - Teste de sensibilidade para Aceleração Vertical.

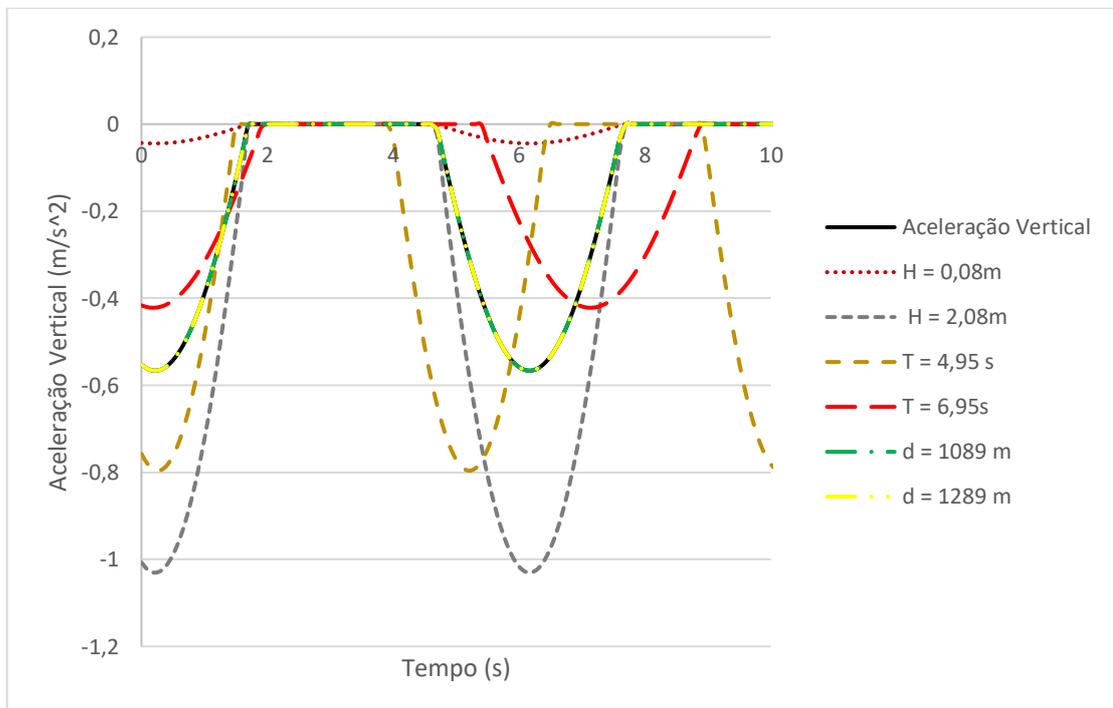


Tabela 5 - Características das ondas no teste de sensibilidade.

	PADRÃO	H = 0,08 m	H = 2,08 m	T = 4,95 s	T = 6,95 s	d = 1089 m	d = 1289 m
Número de Onda	0,11	0,11	0,11	0,16	0,08	0,11	0,11
Celeridade	9,29	9,29	9,29	7,73	10,85	9,29	9,29
Comprimento de onda	55,27	55,27	55,27	38,26	75,42	55,27	55,27

Diante do exposto, pode-se notar que graficamente a principal característica que influencia nos resultados é a altura de onda, pois ela influencia diretamente no formato da onda em análise. Já o período, graficamente representa apenas uma mudança do gráfico no eixo do tempo, porém as características da onda como número de onda, celeridade e comprimento de onda são extremamente influenciados pela alteração. Já de acordo com a profundidade não há nenhuma alteração nem graficamente ou nas características invariáveis das ondas.

4.3 ANÁLISE DA FERRAMENTA

Foi realizado uma análise na plataforma P-55 (Figura 37) com dados de mar presentes na bacia de Campos. Esses dados foram adquiridos no site da Petrobras (PETROBRAS, 2021), que mostra a localização e profundidade das plataformas no ambiente *offshore*, junto com dados de altura significativa e período retirados de um estudo de Farias (2017). Nesse trabalho estão sendo considerados os valores H_s e T_p para as condições de ondas regulares e ondas irregulares,

sendo para ondas regulares a altura da onda igual à altura significativa e o período igual ao período de pico.

Figura 37 - Plataforma P-55.



Fonte: BRASIL ENGENHARIA (2020).

A P-55 é a maior plataforma do tipo semissubmersível no Brasil. Entrou em produção no final de 2013, no Campo de Roncador (Bacia de Campos), ancorada a uma profundidade de cerca de 1.800 metros. Tem capacidade diária para processar 180 mil barris de petróleo e comprimir 4 milhões de m³ de gás natural (PETROBRAS, 2020).

Conforme a Figura 11, os valores utilizados para esse cenário são de $H_s = 7,8$ m, $T_p = 15,6$ s e $d = 1800$ m, adaptando H_s para H e T_p para T em ondas regulares.

4.3.1 Ondas Regulares

Primeiramente, são analisados resultados para a Teoria Linear de Airy e, logo após, observam-se os resultados para a Teoria de segunda ordem de Stokes. Como mostra a Figura

38, preenche-se o programa com os valores pré-estabelecidos e selecionam-se os gráficos que serão plotados, sendo as escolhas plotadas numa mesma janela ao se clicar em Processar Dados.

Figura 38 - Dados iniciais na Wave Kinematics-Ondas Regulares.

The screenshot shows a window titled "Wave Kinematics - Ondas Regulares". Inside, there is a section labeled "Insira os valores de:" followed by five input fields with their respective values:

Parâmetro	Valor
Altura (m)	7.8
Período (s)	15.6
Profundidade (m)	1800
Posição (m)	10
Instante (s)	10

Após processar os dados, recebe-se na caixa de texto, como mostra a Figura 39, os valores de número de onda, velocidade de fase, comprimento de onda e percentuais relativos de cada propriedade cinemática a fim de observar a relação entre a superfície e à profundidade correspondente à metade do comprimento de onda. É possível observar que essa razão para as velocidades e acelerações apresentaram um percentual de 4,32% em todos os casos, estando assim abaixo dos 5% conforme DEAM e DALRYMPLE (1991) propuseram que a uma profundidade correspondente à metade do comprimento de onda, o movimento orbital das partículas é menor ou igual a apenas 5% comparado à superfície, fazendo com que as propriedades cinemáticas se tornem irrelevantes em profundidades superiores a estas.

Figura 39 - Wave Kinematics – Resposta das características da onda e a relação percentual entre superfície e metade do comprimento de onda.

The screenshot shows a text box titled "Resultados:" containing the following information:

```

Característica da onda:
Número de Onda: 0.02
Celeridade: 24.36
Comprimento de onda: 379.96

Variáveis percentuais:
Velocidade Horizontal: 4.32%
Velocidade Vertical: 4.32%
Aceleração Horizontal: 4.32%
Aceleração Vertical: 4.32%
  
```

Nas figuras (Figura 40, Figura 41 e Figura 42) são representados o comportamento da elevação de superfície, velocidades e acelerações ao longo do tempo, respectivamente.

Realizam-se os cálculos com 100 s de simulação. A Tabela 6 apresenta os valores máximos e mínimos de todas as propriedades para efeito comparativo.

Figura 40 - Elevação de superfície para $d=1800$ m, $H=7,8$ m e $T=15,6$ s, para a teoria de Airy ao longo do tempo.

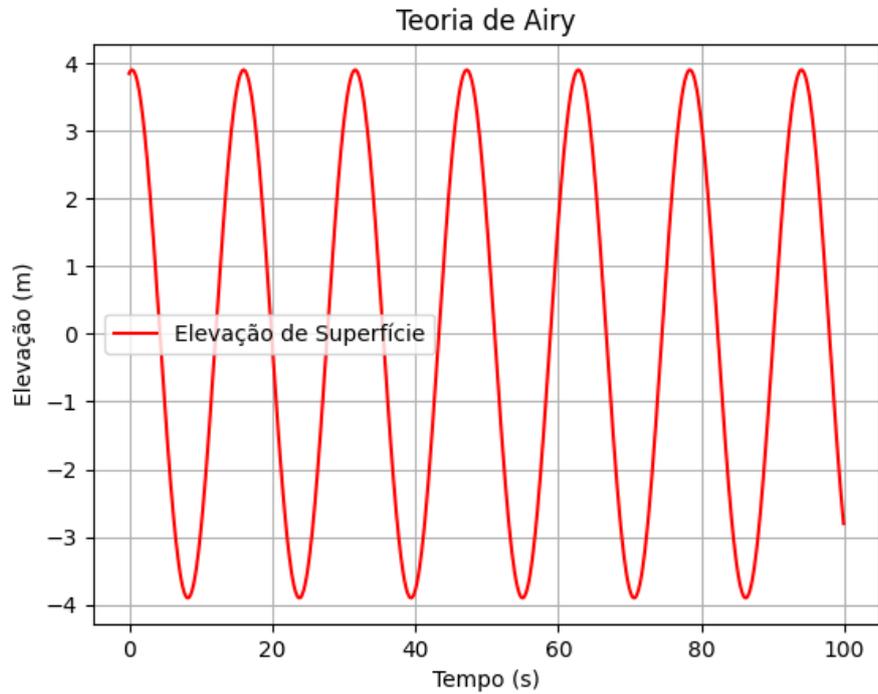


Figura 41 - Velocidades horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Airy, ao longo do tempo.

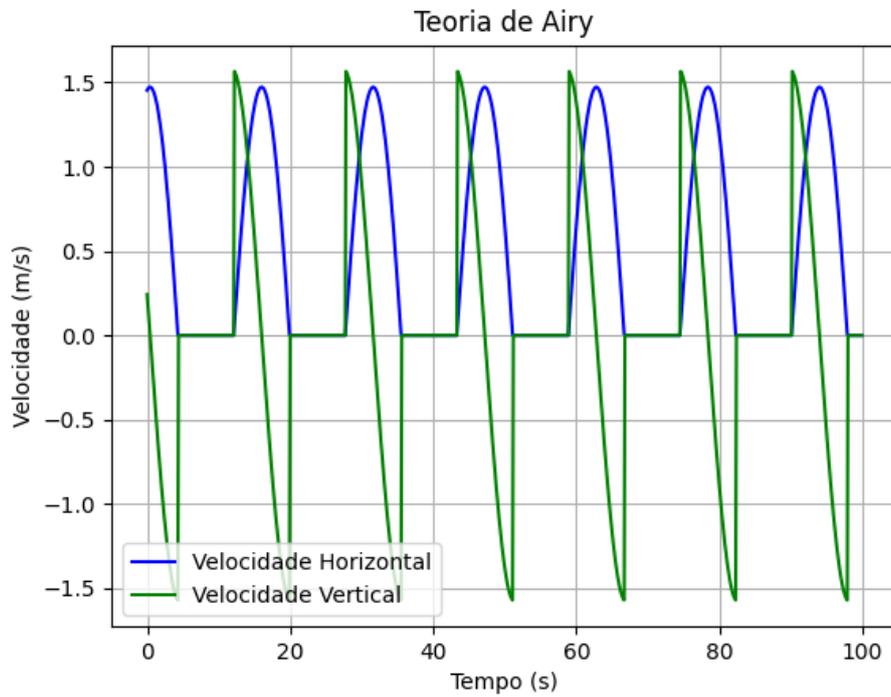


Figura 42 - Acelerações horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Airy, ao longo do tempo.

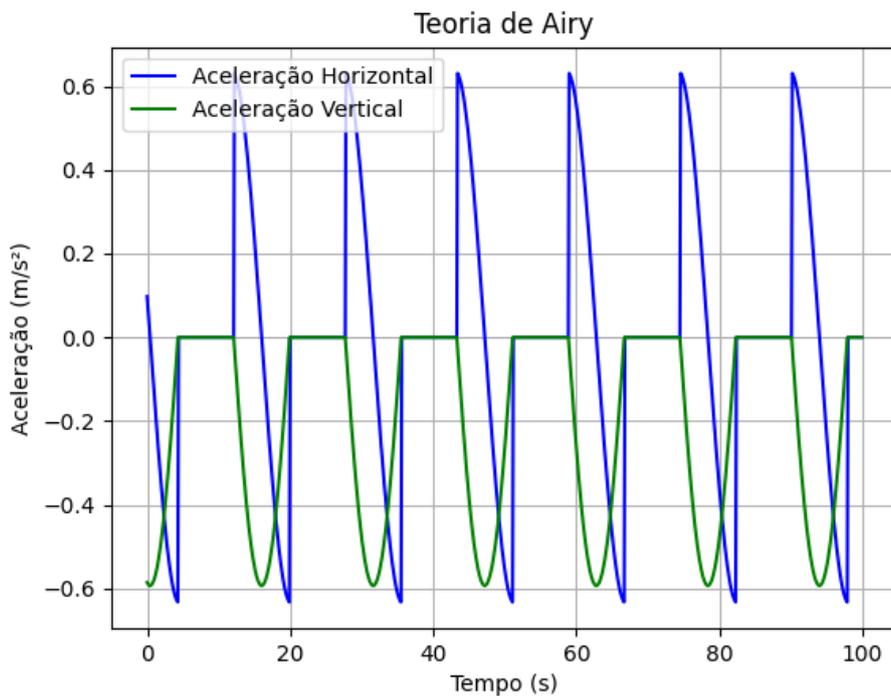


Tabela 6 - Valores máximos e mínimos das propriedades cinemáticas ao longo do tempo para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Airy.

	Elevação	Vel.	Vel.	Ac.	Ac.
		Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
Máximo	3,9000	1,5708	1,5708	0,6327	0,6327
Mínimo	-3,9000	-1,5708	-1,5708	-0,6327	-0,6327

Como se pode notar, os resultados se mantiveram satisfatórios de acordo com a teoria linear de Airy, descrevendo um movimento harmônico simples, mantendo picos e cavados iguais, em módulo, como era esperado.

Permanecendo na teoria linear de Airy, selecionou-se os resultados relacionados à profundidade. Neste caso não há como analisar a elevação da superfície, observam-se, então, apenas os gráficos de velocidades e acelerações, Figura 43 e Figura 44. A Tabela 7 apresenta os valores calculados das propriedades a cada 200 metros.

Figura 43 - Velocidades horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, no instante $t = 1$ s, para a teoria de Airy ao longo da profundidade.

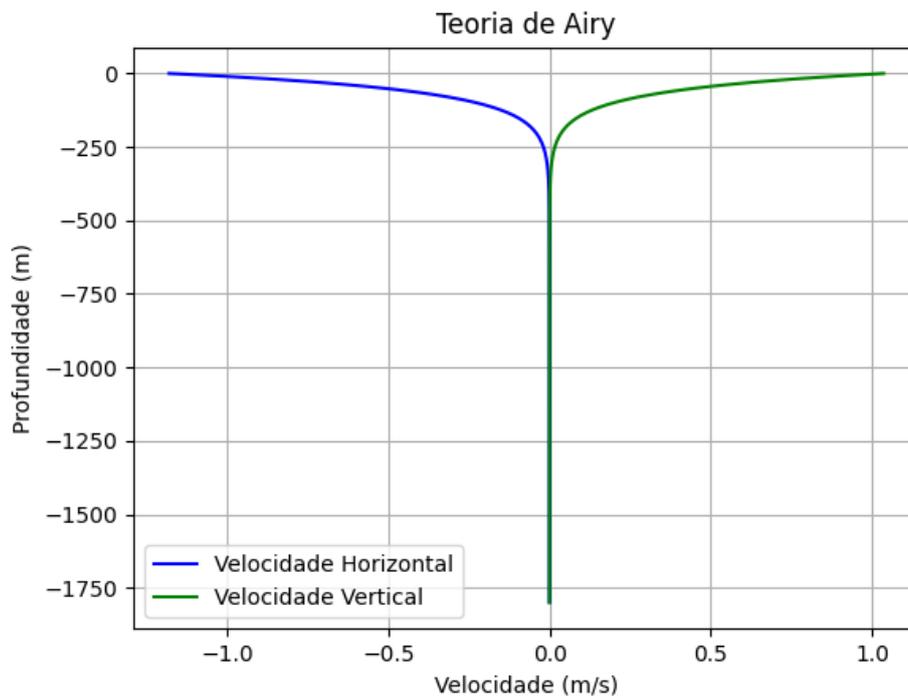


Figura 44 - Acelerações horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Airy ao longo da profundidade.

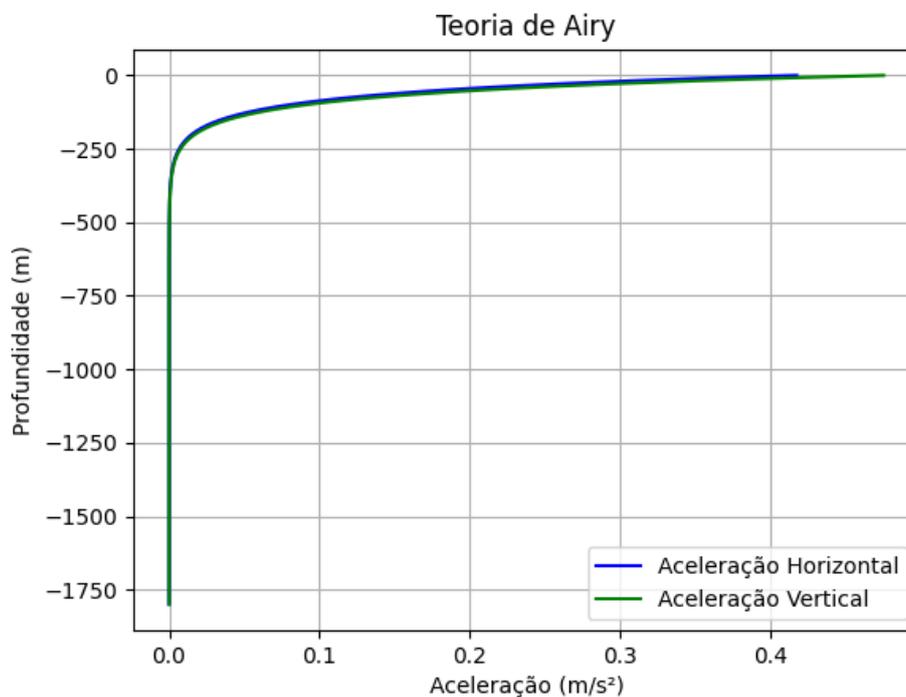


Tabela 7 - Valores máximos e mínimos das propriedades cinemáticas ao longo da profundidade para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Airy.

Profundidade	Vel. Horizontal	Vel. Vertical	Ac. Horizontal	Ac. Vertical
0	-1,1802E+00	1,0366E+00	4,1752E-01	4,7534E-01
200	-2,2583E-01	1,9836E-01	7,9892E-02	9,0957E-02
400	-1,5823E-03	1,3898E-03	5,5976E-04	6,3728E-04
600	-5,7935E-05	5,0888E-05	2,0496E-05	2,3334E-05
800	-2,1213E-06	1,8633E-06	7,5047E-07	8,5440E-07
1000	-7,7673E-08	6,8225E-08	2,7479E-08	3,1284E-08
1200	-2,8440E-09	2,4981E-09	1,0061E-09	1,1455E-09
1400	-1,0414E-10	9,1468E-11	3,6841E-11	4,1943E-11
1600	-3,8181E-12	3,3447E-12	1,3507E-12	1,5337E-12
1800	-2,7927E-13	4,0559E-15	9,8797E-14	1,8598E-15

Pode-se notar que as propriedades cinemáticas vão diminuindo de maneira considerável ao longo da profundidade chegando a ser valores que podem ser desprezados quando se calcula

abaixo de 200 metros de profundidade. Isso ocorre devido ao movimento orbital das partículas estar dentro do limite de 5% visto na Figura 39, devido ao comprimento de onda ser de aproximadamente 379 metros, por volta de 190 metros de profundidade a influência das propriedades cinemáticas começam a ser desprezíveis.

Faz-se uma análise semelhante para o mesmo estudo de caso utilizando a teoria de Stokes de segunda ordem, apresentando-se a elevação da superfície (Figura 45), velocidades (Figura 46) e acelerações (Figura 47) para os valores de $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s e também monta-se uma tabela (Tabela 8) com os valores máximos e mínimos de cada propriedade analisada.

Figura 45 - Elevação de superfície para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Stokes ao longo do tempo.

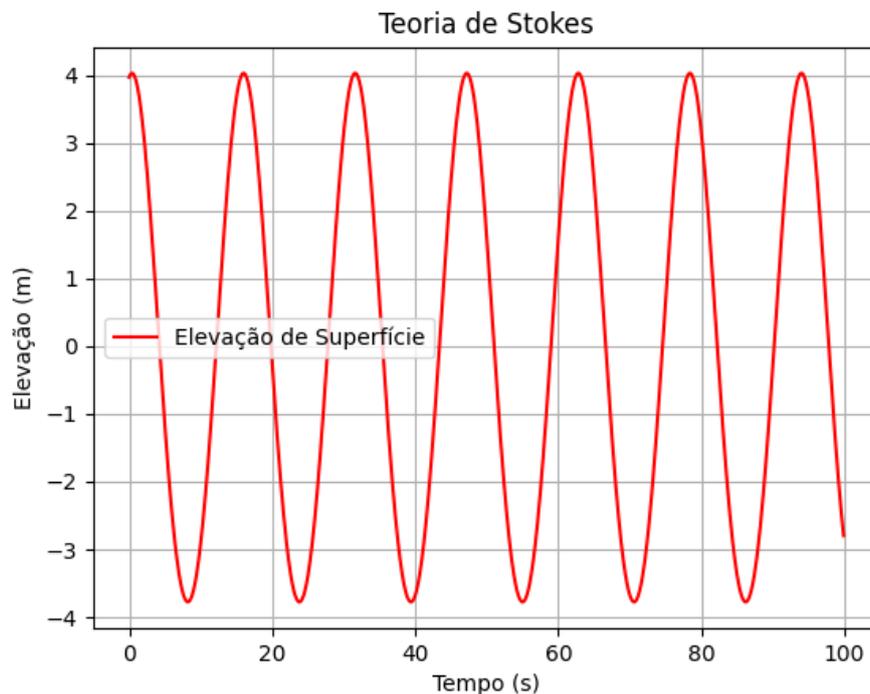


Figura 46 - Velocidades horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Stokes ao longo do tempo.

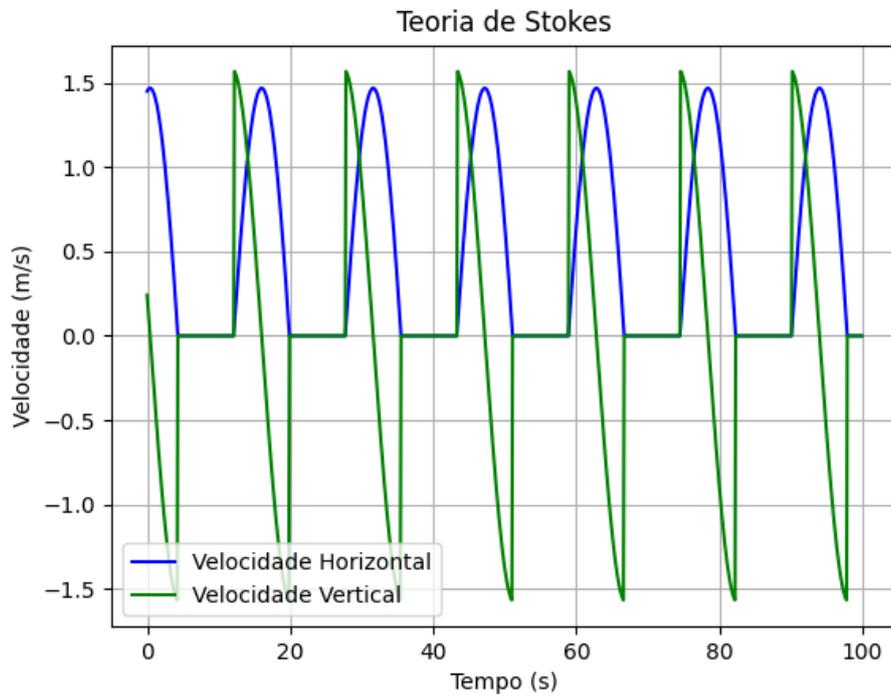


Figura 47 - Acelerações horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Stokes ao longo do tempo.

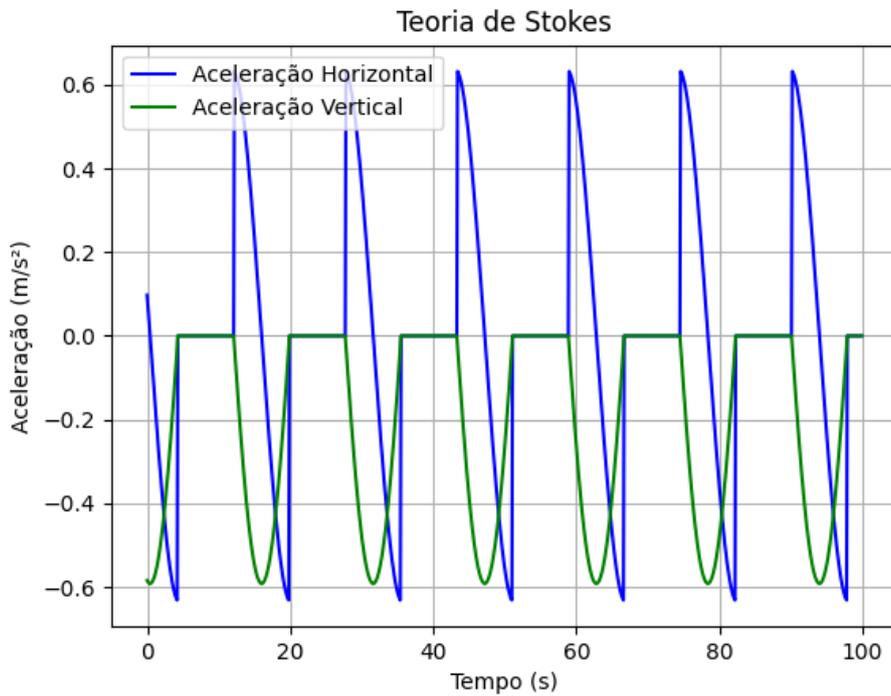


Tabela 8 - Valores máximos e mínimos das propriedades cinemáticas ao longo do tempo para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s para a Teoria de Stokes.

	Elevação	Vel. Horizontal	Vel. Vertical	Ac. Horizontal	Ac. Vertical
Máximo	4,0257	1,5708	1,5708	0,6327	0,6326
Mínimo	-3,7742	-1,5708	-1,5708	-0,6327	-0,6326

Nota-se que ocorre uma certa diferença na elevação de superfície máxima e mínima, diferentemente do que se obtém na utilização da teoria de Airy, isso se dá devido ao acréscimo da segunda parcela de Stokes que em certos casos pode gerar um caráter destrutivo e não construtivo no somatório das ondas.

Continuando, migram-se para os resultados relacionados à profundidade, nesse caso não há como analisar a elevação da superfície, parte-se apenas para a observação dos gráficos de velocidades e acelerações; Figura 48 e Figura 49, respectivamente; e detalha-se o comportamento das propriedades a cada 200 metros para o instante $t = 1$ s na Tabela 9.

Figura 48 - Velocidades horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Stokes ao longo da profundidade.

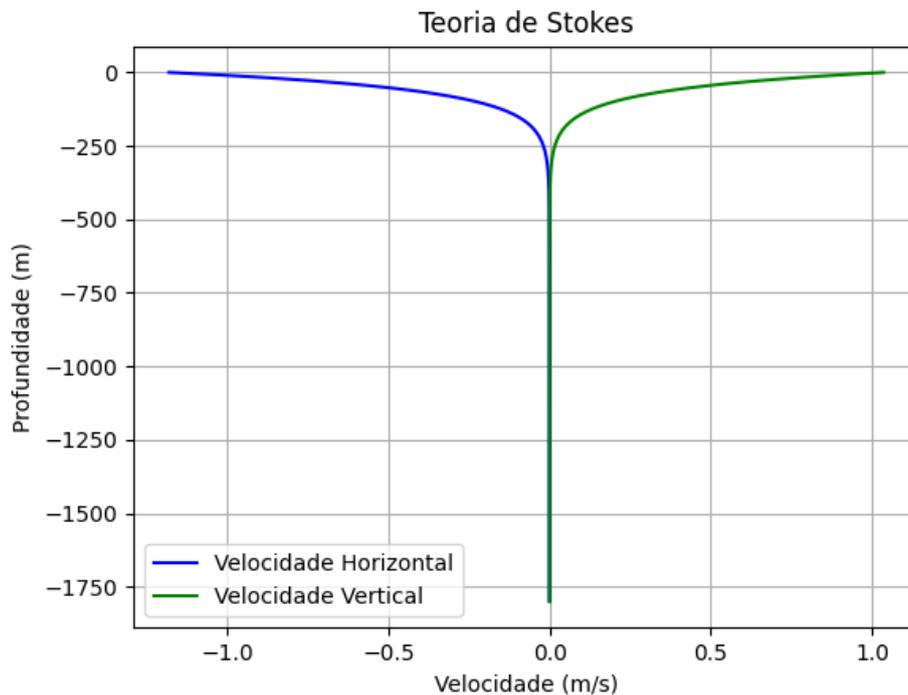


Figura 49 - Acelerações horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Stokes ao longo da profundidade.

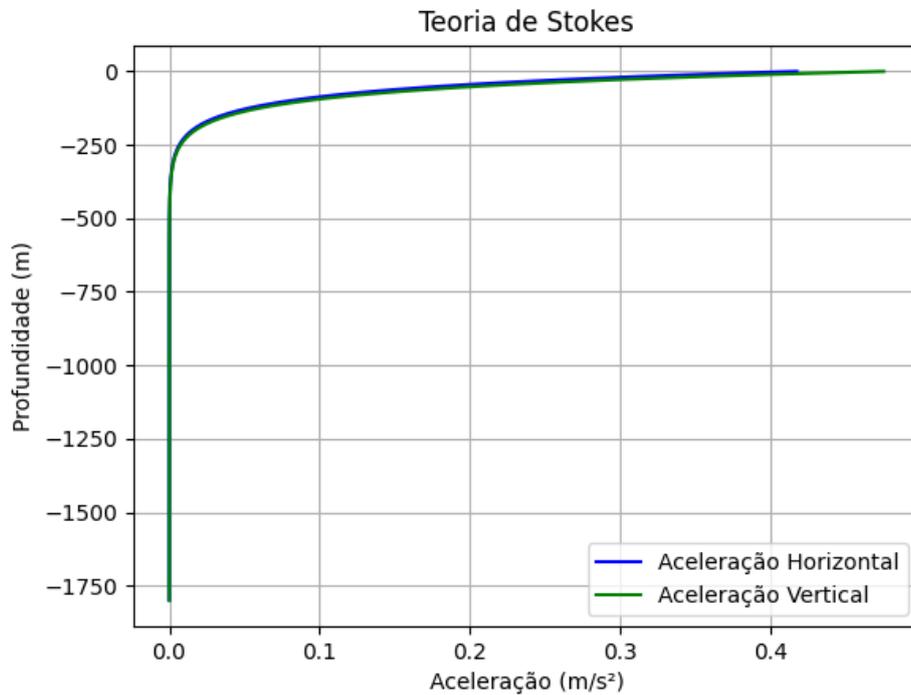


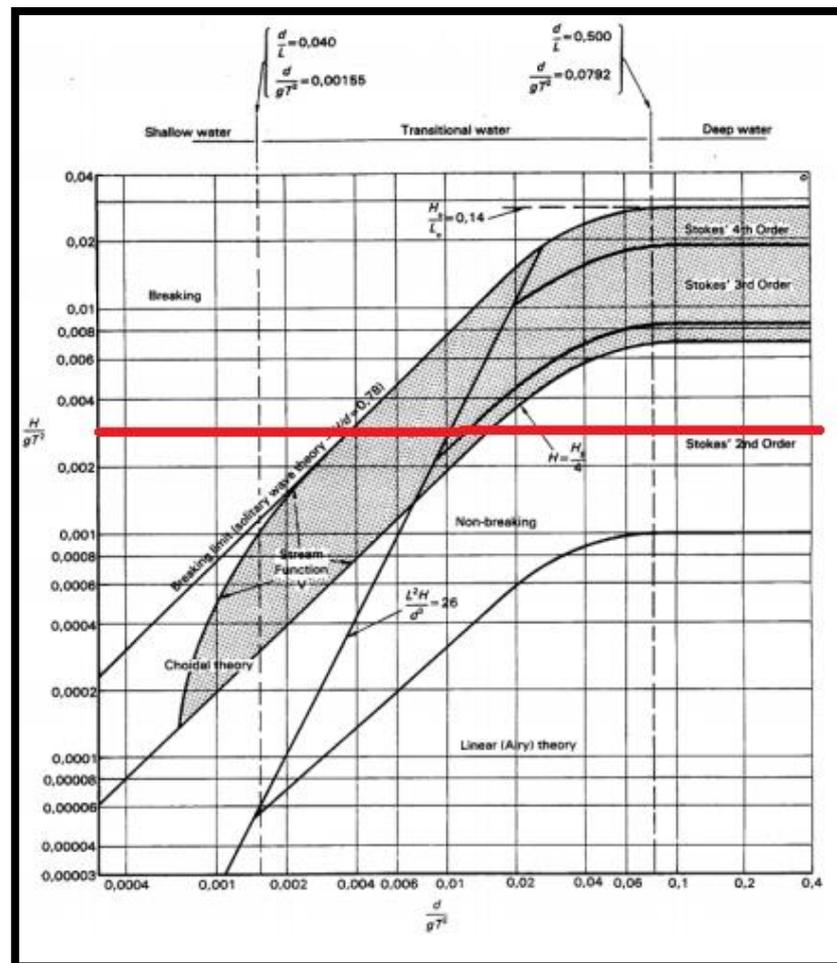
Tabela 9 - Valores máximos e mínimos das propriedades cinemáticas ao longo da profundidade para $d = 1800$ m, $H = 7,8$ m e $T = 15,6$ s, para a teoria de Stokes.

Profundidade	Vel.	Vel.	Ac.	Ac.
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical
0	-1,1802E+00	1,0366E+00	4,7534E-01	4,1752E-01
200	-2,2583E-01	1,9836E-01	9,0957E-02	7,9892E-02
400	-1,5823E-03	1,3898E-03	6,3728E-04	5,5976E-04
600	-5,7935E-05	5,0888E-05	2,3334E-05	2,0496E-05
800	-2,1213E-06	1,8633E-06	8,5440E-07	7,5047E-07
1000	-7,7673E-08	6,8225E-08	3,1284E-08	2,7479E-08
1200	-2,8440E-09	2,4981E-09	1,1455E-09	1,0061E-09
1400	-1,0414E-10	9,1468E-11	4,1943E-11	3,6841E-11
1600	-3,8181E-12	3,3447E-12	1,5337E-12	1,3507E-12
1800	-2,7927E-13	4,0559E-15	1,8598E-15	9,8797E-14

Observa-se que a partir de 200 metros, os valores das propriedades cinemáticas começam a ser praticamente desprezíveis devido ao movimento orbital das partículas corresponder a aproximadamente 5% do valor da superfície, já comentados anteriormente.

Após todos os cálculos realizados, verificou-se qual teoria de onda seria a mais adequada para o estudo de caso referente, por meio da validação de teoria de onda (Figura 50) onde foram calculadas as razões $S = \frac{H}{gT^2}$ e $\mu = \frac{d}{gT^2}$ para a verificação abaixo, de modo que $S = 0,003$ e $\mu = 0,754$, em que S é a esbeltez e μ é a profundidade relativa. É possível verificar na Figura 50 a intercepção dos valores graficamente.

Figura 50 - Aplicabilidade da teoria de ondas para o estudo de caso.



Pode-se observar que a razão μ não se encontra no gráfico pois o valor está acima dos valores empregados no mesmo, porém nota-se uma tendência de estabilidade das faixas de valores em águas profundas, tornando-se possível dizer que, para o caso estudado, a teoria de Stokes de 2ª ordem é a mais adequada. Com isso, resolveu-se comparar ambos os resultados presentes nas figuras abaixo (Figura 51, Figura 52, Figura 53, Figura 54 e Figura 55).

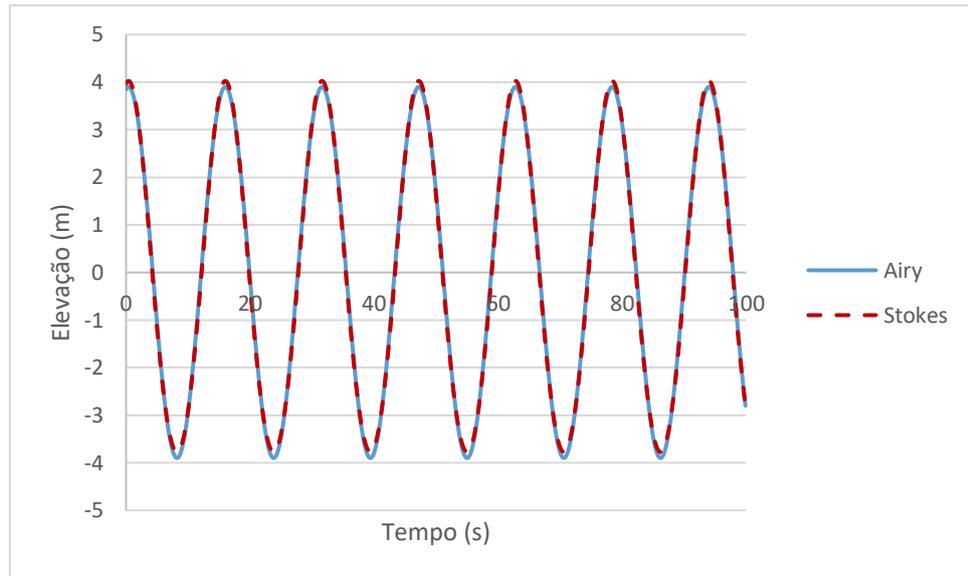
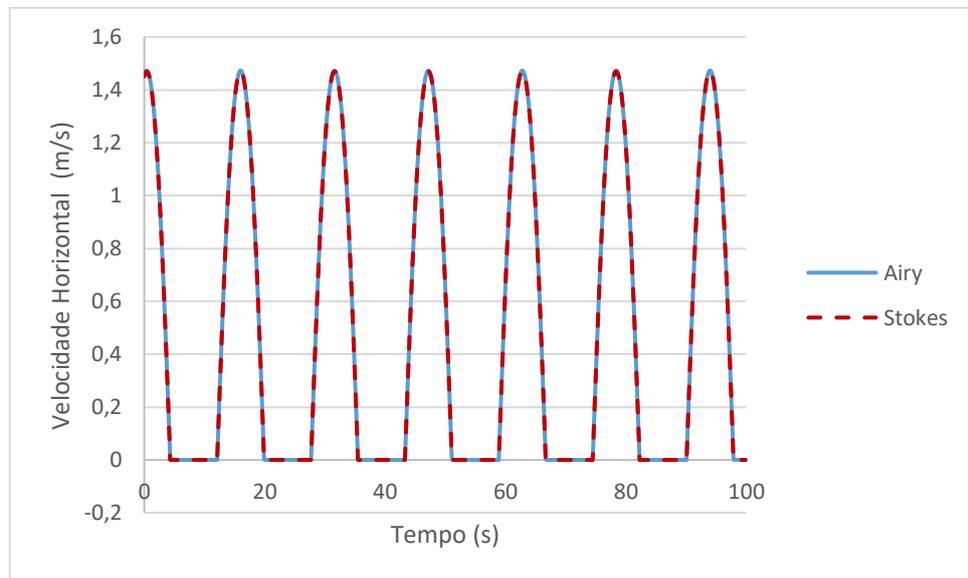
Figura 51 - Comparativo da elevação de superfície teoria de Airy e Stokes.**Figura 52 - Comparativo da velocidade horizontal teoria de Airy e Stokes.**

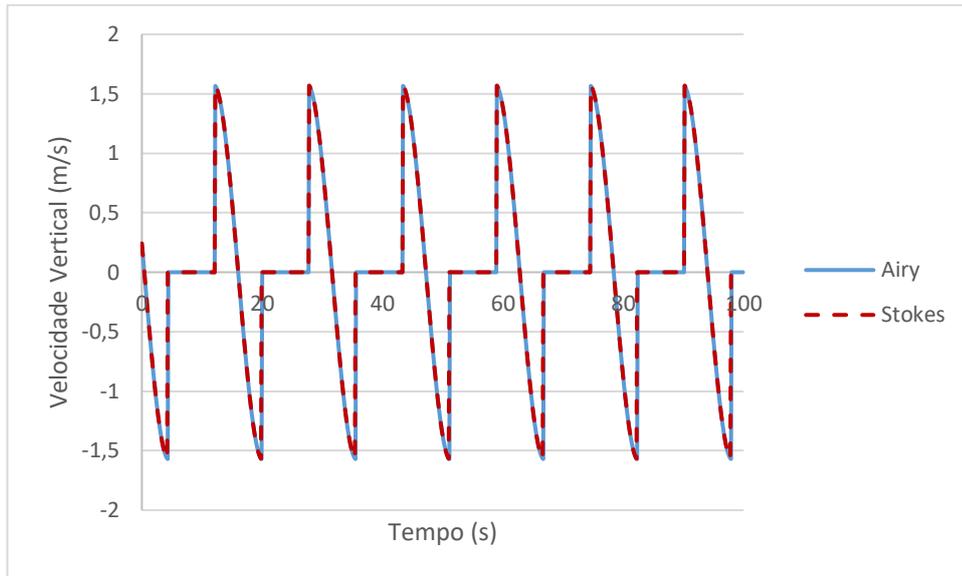
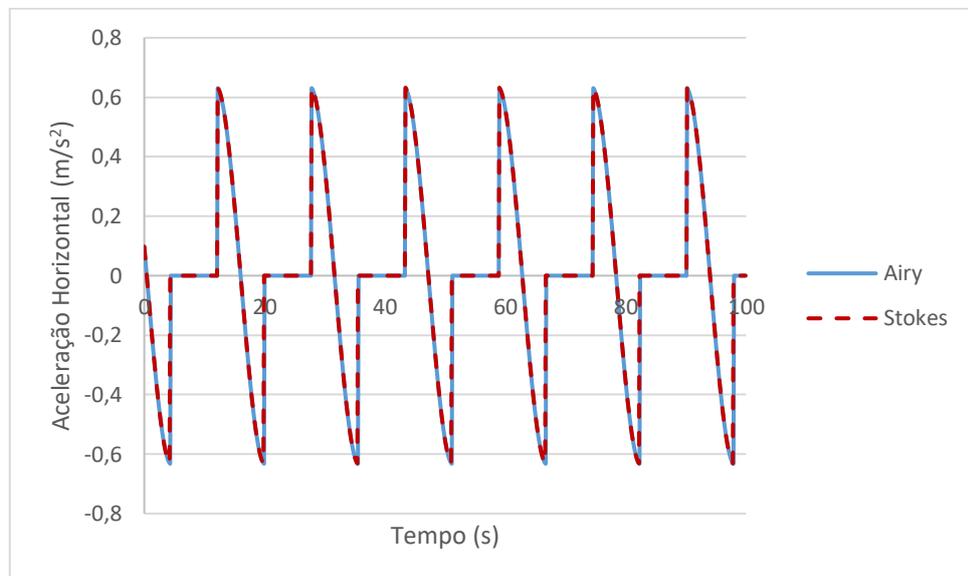
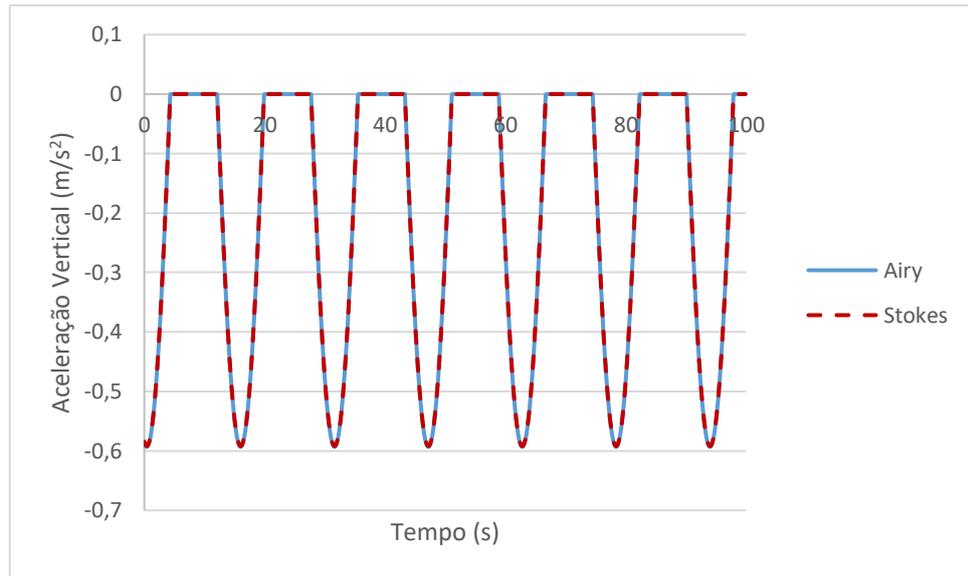
Figura 53 - Comparativo da velocidade vertical teoria de Airy e Stokes.**Figura 54 - Comparativo da aceleração horizontal teoria de Airy e Stokes.**

Figura 55 - Comparativo da aceleração vertical teoria de Airy e Stokes.

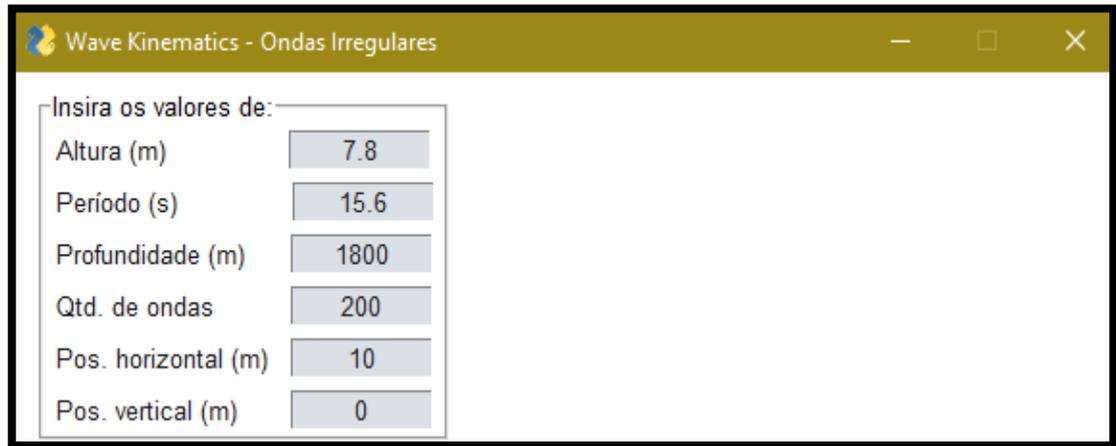


Notou-se que não há uma discrepância entre os valores apresentados, apenas na elevação de superfície nas cristas e cavados. Esta diferença também está presente na Tabela 8 onde o valor mínimo da elevação de superfície tem valor menor que o valor máximo e, como comentado anteriormente, o fato dá pelo fator de segunda ordem de Stokes ter caráter destrutivo. Porém, visto todos os resultados, pode-se afirmar que as duas teorias têm aplicabilidade neste caso.

4.3.2 Ondas Irregulares

Para ondas irregulares mantêm-se os valores para altura, período e profundidade, como mostra a Figura 56, com a adição da quantidade de ondas que utilizada para discretizar o espectro que representa a onda irregular.

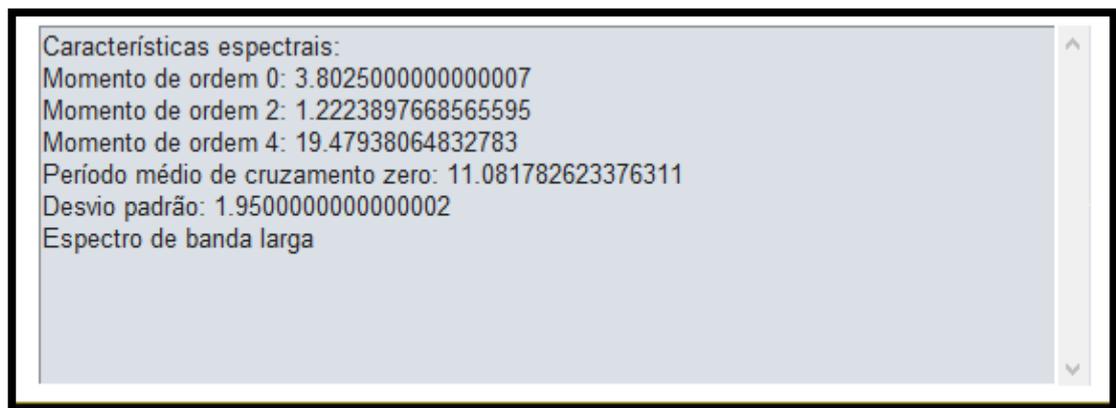
Figura 56 - Wave Kinematics – Ondas irregulares para o caso P-55 $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s.



Insira os valores de:	
Altura (m)	7.8
Período (s)	15.6
Profundidade (m)	1800
Qtd. de ondas	200
Pos. horizontal (m)	10
Pos. vertical (m)	0

Com isso obtêm-se respostas na Figura 57 a respeito dos momentos espectrais, período de cruzamento de zeros, desvio padrão e o tipo de banda do espectro, caso ele seja de banda larga a teoria de ondas irregulares é aplicável.

Figura 57 - Características espectrais para o caso $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s.



```

Características espectrais:
Momento de ordem 0: 3.8025000000000007
Momento de ordem 2: 1.2223897668565595
Momento de ordem 4: 19.47938064832783
Período médio de cruzamento zero: 11.081782623376311
Desvio padrão: 1.9500000000000002
Espectro de banda larga
  
```

Inicialmente, estuda-se o espectro de Pierson-Moskowitz. Plotou-se o espectro de energia, Figura 58. Em seguida, gerou-se os gráficos de elevação de superfície, velocidades e acelerações ao longo de um tempo de 100 segundos (Figura 59, Figura 60 e Figura 61). Seguindo o mesmo procedimento do estudo de ondas regulares, montam-se as tabelas (Tabela 10 e Tabela 11) mostrando os valores máximos e mínimos das propriedades.

Figura 58 - Espectro de energia para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s com 200 ondas, com o Espectro de Pierson-Moskowitz.

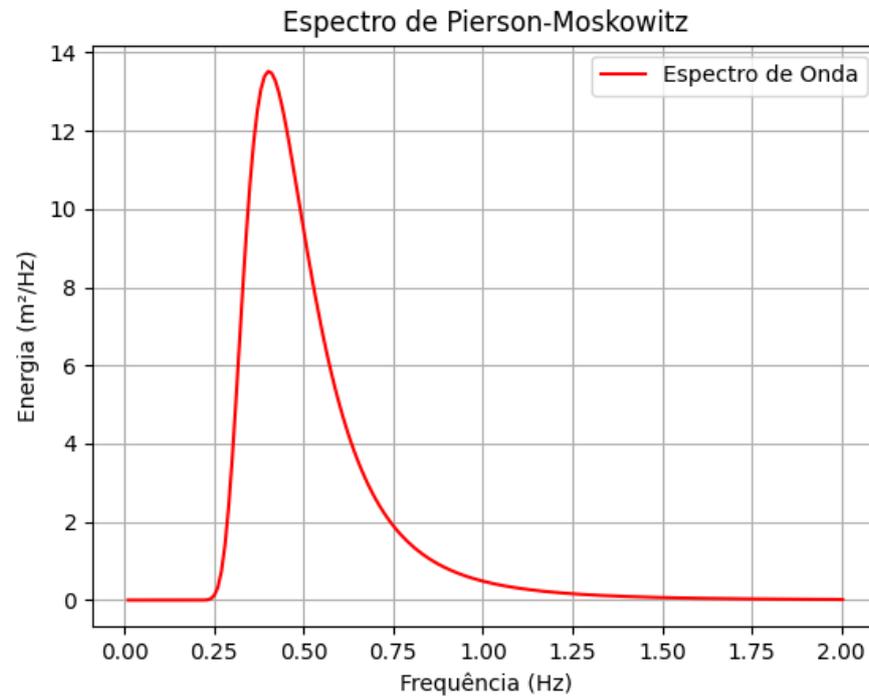


Figura 59 - Elevação de Superfície para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para a Espectro de Pierson-Moskowitz ao longo do tempo.

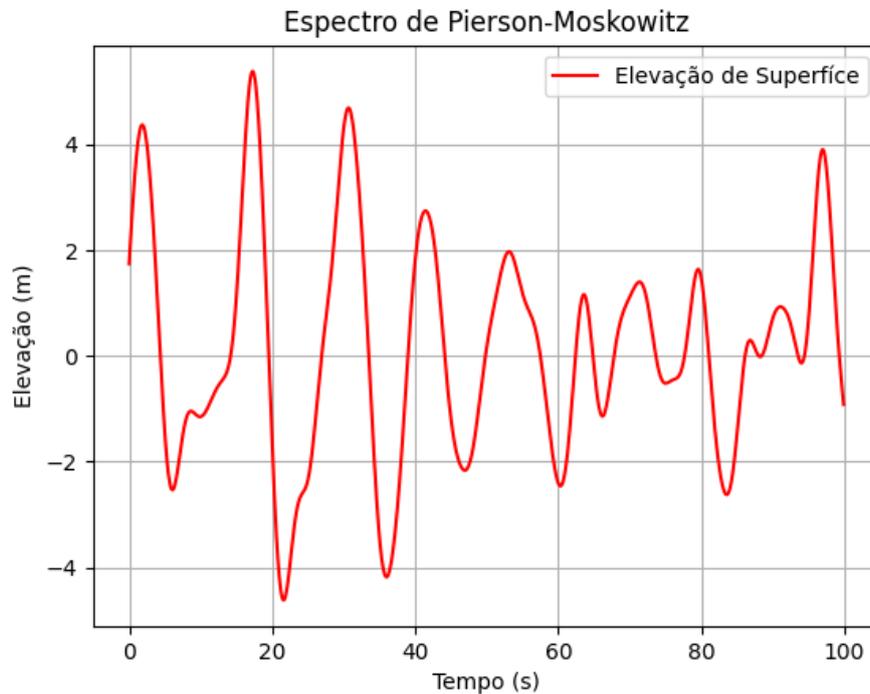


Tabela 10 - Valores máximos e mínimos da elevação de superfície ao longo do tempo para $d=1800$ m, $H_s=7,8$ m e $T_p=15,6$ s, para o espectro de Pierson-Moskowitz.

	Máximo	Mínimo
Elevação de Superfície	5,3866	-4,6198

Com isso pode-se notar que o tipo de espectro de energia apresentado é o de banda larga, como já era esperado, ou seja, gráficos de ondas irregulares completamente aleatórios e aceitáveis de acordo com a teoria, isso já foi confirmado na elevação de superfície onde não há indícios de periodicidade ao longo do tempo.

Figura 60 - Velocidades horizontal e vertical $d=1800$ m, $H_s=7,8$ m e $T_p=15,6$ s, para a Espectro de Pierson-Moskowitz ao longo do tempo.

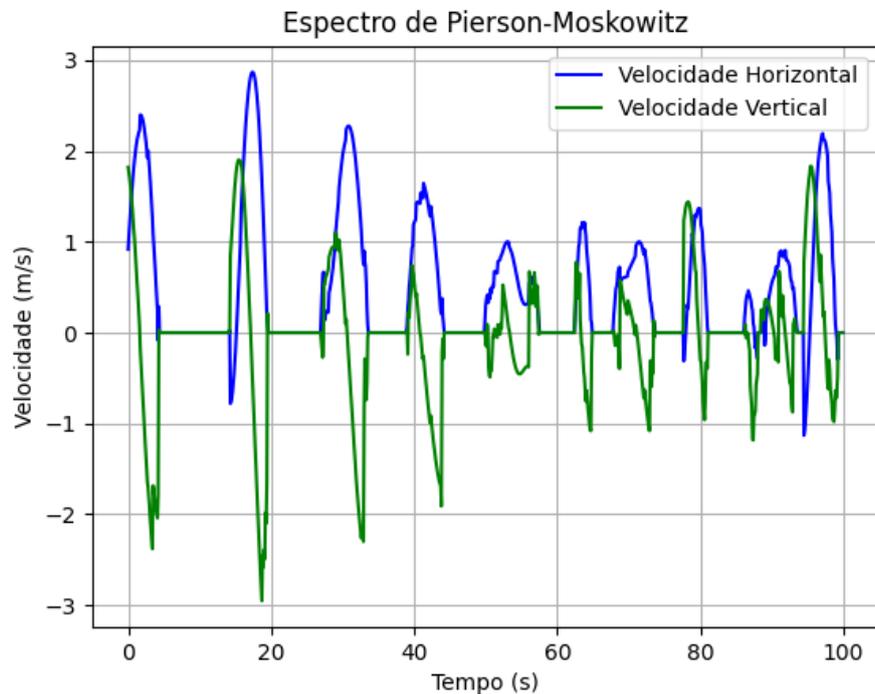


Figura 61 - Acelerações horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para a Espectro de Pierson-Moskowitz ao longo do tempo.

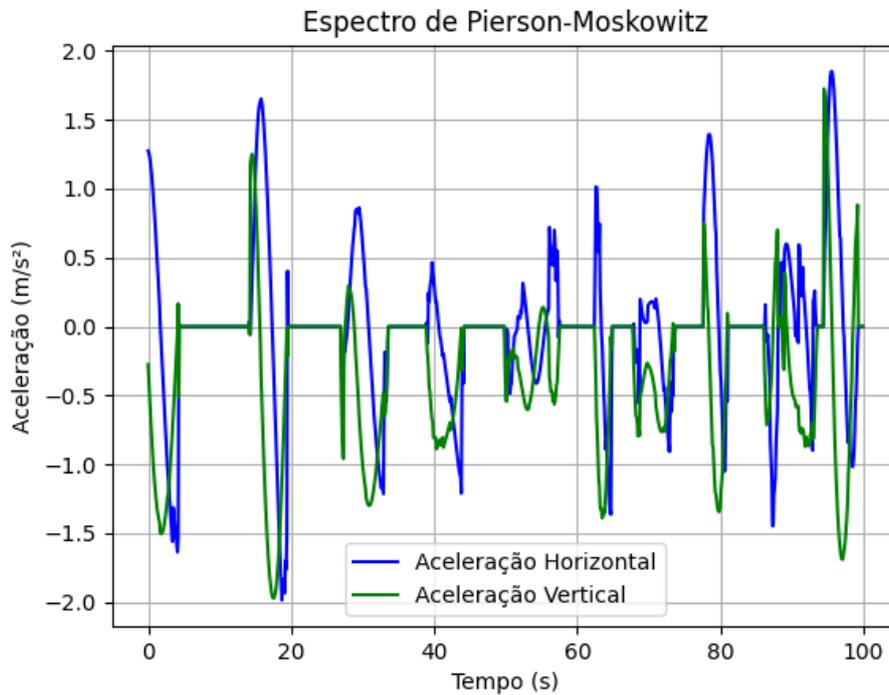


Tabela 11 - Valores máximos e mínimos das propriedades cinemáticas ao longo do tempo para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para o espectro de Pierson-Moskowitz.

	Vel. Horizontal	Vel. Vertical	Ac. Horizontal	Ac. Vertical
Máximo	2,8686	1,9037	1,8504	1,7245
Mínimo	-1,1306	-2,9515	-1,9841	-1,9714

Mais uma vez, como já citado acima, os resultados de velocidades e de acelerações atenderam às expectativas de acordo com a literatura, apresentando comportamento aleatório e sem periodicidade.

Continuando o estudo do comportamento da onda irregular, utiliza-se o espectro de JONSWAP e repete-se o procedimento feito para o espectro de Pierson-Moskowitz, plotando os gráficos de energia (Figura 62) e as demais propriedades cinemáticas elevação de superfície, velocidades e acelerações ao longo de um tempo de 100 segundos (Figura 63, Figura 64 e Figura 65) e montam-se as tabelas (Tabela 12 e Tabela 13) expondo os valores máximos e mínimos de cada propriedade.

Figura 62 - Espectro de Energia para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s com 200 ondas para o espectro de JONSWAP.

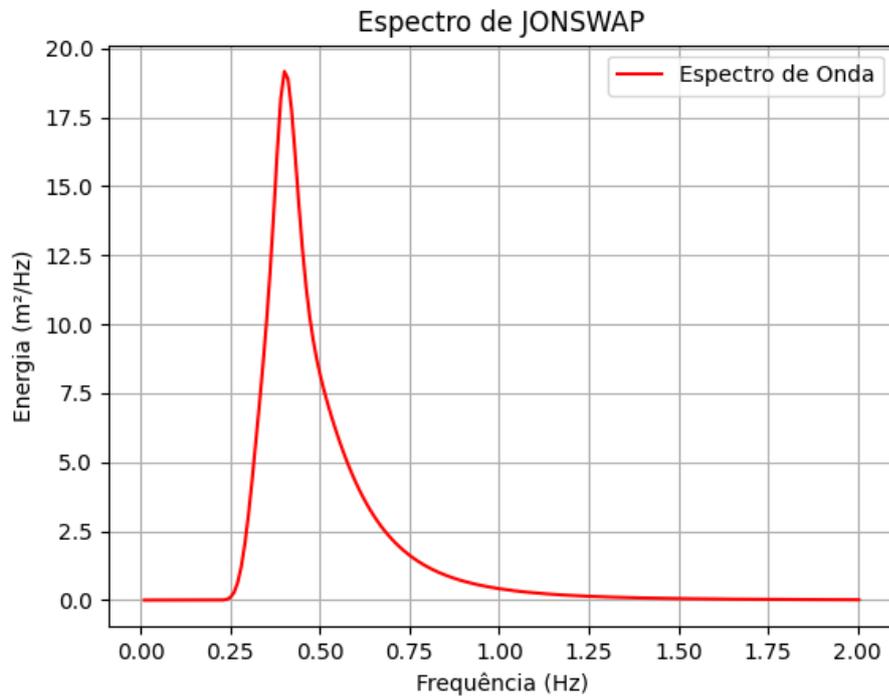


Figura 63 – Elevação de superfície para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s com 200 ondas para o espectro de JONSWAP.

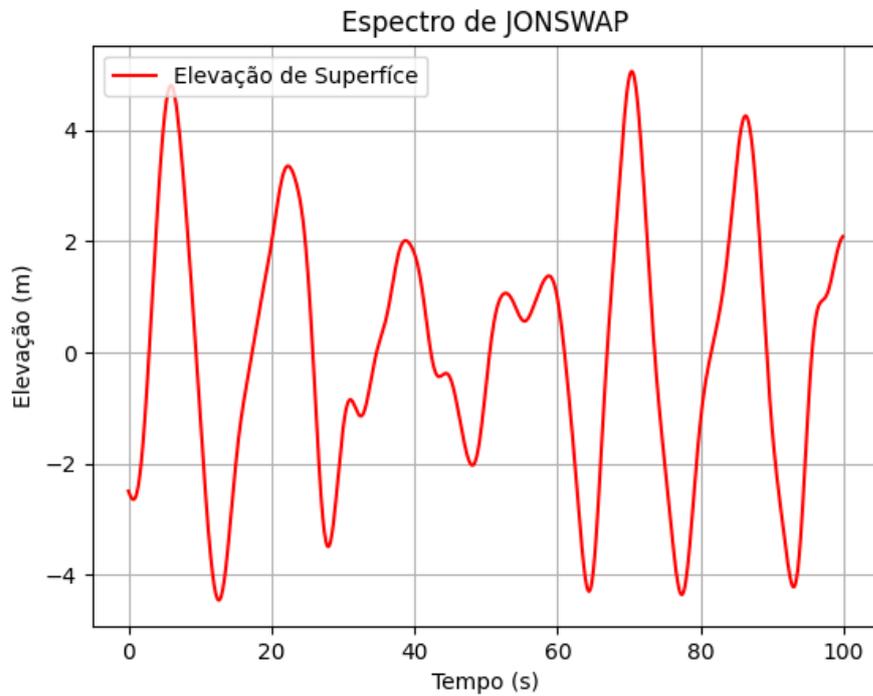


Tabela 12 - Valores máximos e mínimos da elevação de superfície ao longo do tempo para $d=1800$ m, $H_s=7,8$ m e $T_p=15,6$ s, para o espectro de JONSWAP.

	Máximo	Mínimo
Elevação de Superfície	5,0555	-4,4553

Para esse caso mesmo sendo mais estreito que o espectro de Pierson-Moskowitz o resultado continua sendo um espectro de banda larga, como se pode observar na Figura 63, de elevação de superfície, e também nas figuras (Figura 64 e Figura 65) de velocidades e acelerações.

Figura 64 - Velocidades horizontal e vertical para $d=1800$ m, $H_s=7,8$ m e $T_p=15,6$ s, para a Espectro de JONSWAP ao longo do tempo.

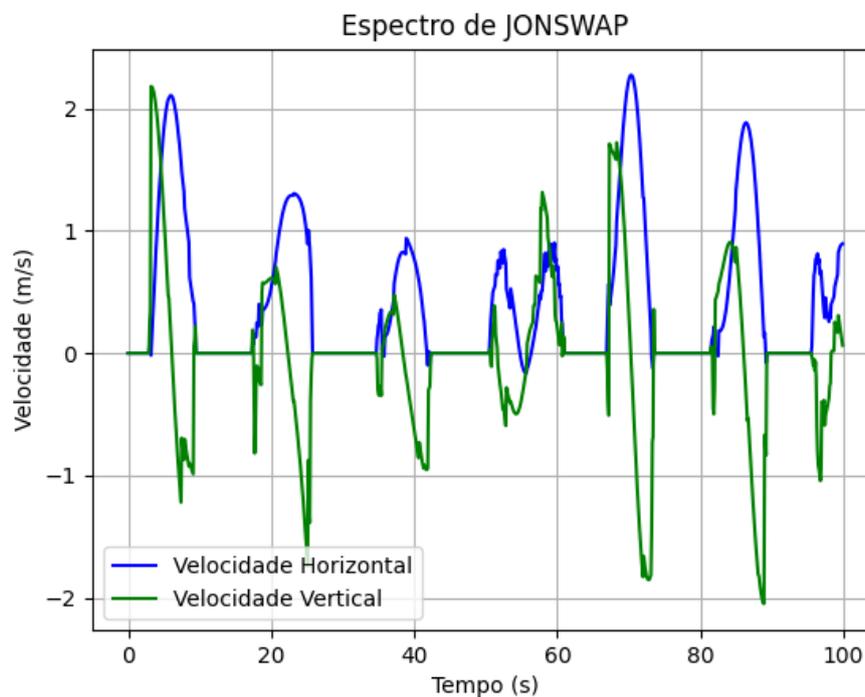


Figura 65 - Acelerações horizontal e vertical para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para a Espectro de JONSWAP ao longo do tempo.

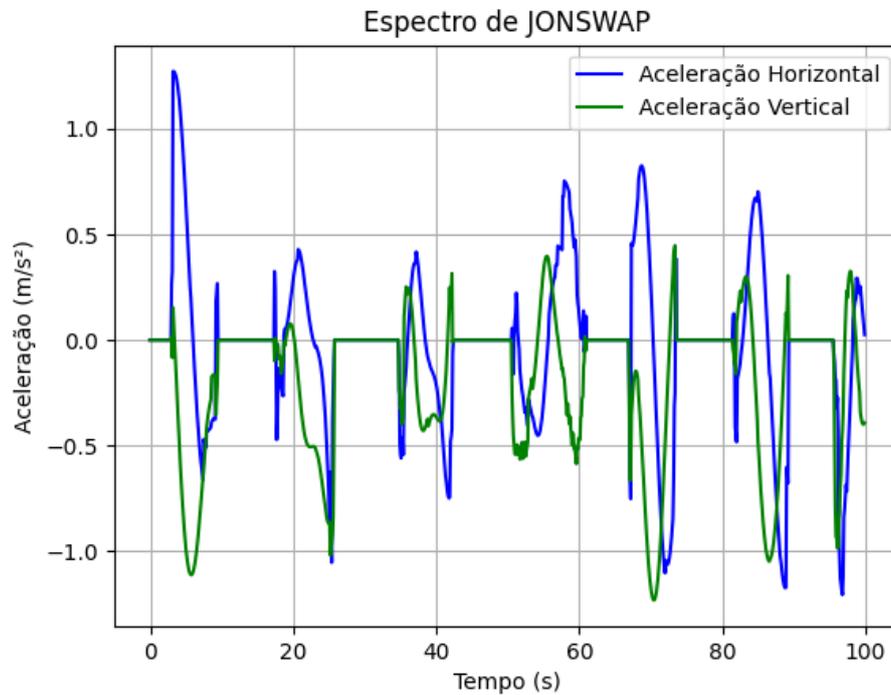


Tabela 13 - Valores máximos e mínimos da elevação de superfície ao longo do tempo para $d = 1800$ m, $H_s = 7,8$ m e $T_p = 15,6$ s, para o espectro de JONSWAP.

	Vel. Horizontal	Vel. Vertical	Ac. Horizontal	Ac. Vertical
Máximo	2,2730	2,1803	1,2721	0,4476
Mínimo	-0,1617	-2,0484	-1,2053	-1,2304

Pode-se notar que ambas as teorias puderam ser aplicadas de maneira satisfatória e os resultados são diferentes pois as ondas geradas não foram as mesmas no estudo.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve o seu objetivo alcançado, a disponibilização de uma interface que facilita o estudo do comportamento dos estados de mar em cenários de ondas regulares e irregulares. A interface Wave Kinematics se mostrou eficiente para a sua proposta que é a facilitação dos cálculos e plotagem gráfica das propriedades cinemáticas para o âmbito *offshore*.

Para a teoria voltada aos estudos de ondas regulares, Teoria linear de Airy e Teoria de Stokes de segunda ordem, os resultados do comparativo com o software DOOLINES se mostraram satisfatórios como os resultados do estudo de caso apresentado no trabalho, tanto na análise ao longo do tempo quanto ao longo da profundidade, atendendo às expressões da norma DNVGL-RP-C205.

As teorias voltadas para ondas irregulares, Espectros de Pierson-Moskowitz e JONSWAP, apresentaram resultados bastante satisfatórios para o comparativo com o software DOOLINES, assim como para o estudo de caso proposto no trabalho, sempre resultando ondas de caráter aleatório como busca o estudo de ondas irregulares.

A interface apresentou, portanto, resultados satisfatórios de acordo com a teoria que engloba, tornando-se, assim, uma ferramenta que pode ser utilizada para estudos cinemáticos tanto no meio acadêmico quanto o de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento).

O trabalho deixa em aberto propostas de continuação em diversos cenários possíveis:

- Incorporação de mais teorias de ondas regulares e irregulares;
- Ampliação para cálculo das propriedades dinâmicas de ondas;
- Implantação do código da interface no SAEP;
- Desenvolvimento de um aplicativo mobile a partir do Wave Kinematics.

REFERÊNCIAS

- AIRY, G. B. **Tides and waves**. Encyclopaedia Metropolitana, 1845.
- BEZERRA NETO, H. P.; COSTA, J. A. C.; FERREIRA, F. M. G.; SILVEIRA, E. S. S. Processamento Paralelo com OPENMP em um Simulador Dinâmico de Linhas de Ancoragem e Risers, Parte II. **Mecânica Computacional**, v. XXIX, p. 19, 2010.
- BHATTACHARYYA, R. **Dynamics of marine vehicles**. John Wiley and Sons. New York, 1978.
- BRASIL ENGENHARIA. Disponível em: <<http://brasilengenharia.com/portal/noticias/destaque/7287-plataforma-p-55-entra-em-operacao-no-campo-de-roncador>> Acesso em: 23 de dezembro de 2020
- CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of Offshore Engineering**. Vol. 1. Illinois, EUA. 2005.
- COSTA, J. A. C. **Estudo e Implementação Computacional de Diferentes Teorias de Ondas Oceânicas**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2008
- COSTA, J. C. H. **Sistema de Aplicações de Engenharia de Petróleo (SAEP): Módulo Poço**. Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2016.
- DENO OCEÂNICA. Estado de mar da bacia de campos. <[www.deno.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2003-2006/Alex+Lorena/relat2/Comportamento no Mar.htm](http://www.deno.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2003-2006/Alex+Lorena/relat2/Comportamento%20no%20Mar.htm)> Disponível em: 22 de novembro de 2018
- DET NORSKE VERITAS. **Recommended Practice DNVGL-RP-C205: Environmental conditions and environmental loads**. Agosto, 2017.
- FARIAS, N. S. **Influência da Discretização De Espectros de Onda na Resposta de Movimento de Plataformas Flutuantes Offshore**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE-RJ, 2017
- FERREIRA, A. S. **Desenvolvimento da Interface Gráfica Wave Kinematics para Análise Cinemática de Ondas Oceânicas ao Longo da Profundidade**. Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo), Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2018

GOUVEIA, R. TODA MATÉRIA. Disponível em: <www.todamateria.com.br/ondas/> Acesso em 21 de outubro de 2020

MARTINS, M. A. L. **Hidrodinâmica - Aula 13 – Ações Ambientais – Ondas Irregulares**. Notas de aula. CTEC/UFAL. 2016.

PARANHOS SOBRINHO, E. S. **Desenvolvimento de Aplicações de Sistemas Oceânicos para Descrever o Comportamento de Ondas Marinhas Baseado em Interface Web**. Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo). Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2016

PARANHOS SOBRINHO, E. S., BEZERRA NETO, H. P., MARTINS, M. A. L. SAEP offshore: Aplicativos web para análise de ondas oceânicas. **Revista de Ensino de Engenharia**, v. 38, n. 3, p. 72-84, 2019 – DOI: 10.37702/REE2236-0158.v38n3p72-84.2019

PETROBRAS. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/bacia-de-campos.htm>> Acesso em: 2 de dezembro de 2020

PIERSON, W. J.; MOSKOWITZ, L. A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S. Kitaigorodskii. **Journal of Geophysical Research**. December, 1964, 69 (2), 5181-5203

RIVAS, M. E. C. **Análise de resposta de estruturas offshore submetidas à ação do mar**. Tese (Mestrado em Ciências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1981.

SILVA, T. V. **Desenvolvimento de sistema para análise de casos de carregamento em colunas de perfuração baseado em interface web**. Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo). Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2017.

STOKES, G. G. On the theory of oscillatory waves. **Trans. Cambridge Phil. Soc.**, Vol. 8, 1847.

VITORINO, A. F. R. A. **Desenvolvimento de um software com interface web para análise de coluna de produção para poços de petróleo e gás natural**. Monografia (Graduação em Engenharia de Petróleo). Universidade Federal de Alagoas, Maceió. 2018.