

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Influência dos Diferentes Modos de Excitação nos
Modelos de Análise de Configuração *Lazy Wave***

Lucas Xavier Martins
Matheus Cavalcante do Couto

Prof. Orientador: Fernando Ribeiro da Silva
Prof. Coorientador: Paulo Pedro Kenedi

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2018**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Influência dos Diferentes Modos de Excitação nos
Modelos de Análise de Configuração *Lazy Wave***

Lucas Xavier Martins
Matheus Cavalcante do Couto

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação
Superior do CEFET/RJ como parte dos
requisitos para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: Fernando Ribeiro da Silva
Prof. Coorientador: Paulo Pedro Kenedi

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2018**

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

M386 Martins, Lucas Xavier
Influência dos diferentes modos de excitação nos modelos de análise de configuração *Lazy Wave* / Lucas Xavier Martins [e] Matheus Cavalcante do Couto.—2018.
xi, 104f. + apêndices e anexo : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.
Bibliografia : f. 103-104
Orientador : Fernando Ribeiro da Silva
Coorientador : Paulo Pedro Kenedi

1. Engenharia mecânica. 2. Indústria offshore de petróleo. 3. Dutos flexíveis. 4. Petróleo em terras submersas. I. Couto, Matheus Cavalcante do. II. Silva, Fernando Ribeiro da (Orient.). III. Kenedi, Paulo Pedro (Coorient.). IV. Título.

CDD 620.1

Elaborada pela bibliotecária Mariana Oliveira CRB-7/5929

RESUMO

Com o recente aumento da exploração de petróleo na região do pré-sal brasileiro, as necessidades de operação dos dutos de transporte do material extraído do poço até a plataforma vêm se tornando cada vez mais complexas. Visando entender mais as dificuldades encontradas na instalação destes dutos, este projeto apresenta a análise de parâmetros de simulação estática e dinâmica de um modelo numérico de instalação de dutos flexíveis em configuração específica de *Lazy Wave* — uma das mais encontradas em águas ultra profundas — por um PLSV através do *software OrcaFlex*. São estudados os efeitos e aplicabilidade dos parâmetros de diversos modos de excitação no modelo, apresentando diferentes propostas para avaliação de uma instalação de duto flexível conforme os parâmetros de tempo e precisão. O projeto conclui quais modelos de excitações mais simples conseguem alcançar, com razoável precisão e maior agilidade, resultados similares aos modelos de excitações complexos.

Palavras-chave: Pré-sal, Duto Flexível, Onda Regular, Onda Irregular, Domínio do Tempo, Domínio da Frequência, *Offshore*, *Lazy Wave*, Elementos Finitos, *OrcaFlex*.

ABSTRACT

The recent increase of the exploration of petroleum in the Brazilian pre-salt region brought more complex necessities in the operation of flexible pipes, which transport the extracted material from the well to the platform. Looking forward to having a better understanding of the difficulties found in the installation of these pipes, this project presents the analysis of parameters of a static and dynamic simulation of a numerical model of the installation of a flexible pipe in the specific Lazy Wave configuration — one of the most usually found in ultra deep waters — by a PLSV using the software OrcaFlex. The effects and applicability of various parameters from several vibrations models are studied, presenting different proposals for the evaluation of a flexible pipe installation due the required time and precision parameters. The project concludes which simpler excitation models can achieve, with reasonable precision and greater agility, similar results to complex excitation models.

Keywords: Pre-salt, Flexible Pipe, Regular Wave, Irregular Wave, Time Domain, Frequency Domain, Offshore, Flexible Pipe, Lazy Wave, Finite Elements, OrcaFlex.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	Motivação.....	2
1.2	Objetivo.....	2
1.3	Metodologia.....	2
1.4	Revisão Bibliográfica.....	2
1.5	Organização do Trabalho.....	3
2	Dutos Flexíveis e Umbilicais.....	4
2.1	Classificação de Flexíveis.....	5
2.1.1	<i>Risers</i>	5
2.1.2	<i>Flowlines</i>	6
2.1.3	<i>Jumpers</i>	6
2.2	Camadas de um Flexível.....	6
2.2.1	Carcaça.....	6
2.2.2	Camada Polimérica.....	7
2.2.3	Armadura de Pressão.....	7
2.2.4	Camada Anti-Desgaste.....	8
2.2.5	Armadura de Tração.....	8
2.2.6	Isolante Térmico.....	9
2.2.7	Capa Externa.....	9
2.3	Acessórios e Equipamentos.....	9
2.3.1	Conector.....	9
2.3.2	Enrijecedor.....	10
2.3.3	Restritor de Curvatura.....	11
2.3.4	Flutuador.....	12
2.3.5	Módulo de Conexão Vertical.....	12
2.3.6	Árvore de Natal Molhada.....	13
2.4	Configurações de Dutos Flexíveis.....	13
2.4.1	Catenária Livre.....	14
2.4.2	<i>Lazy Wave</i>	14
3	Instalação de Dutos Flexíveis em <i>Lazy Wave</i>	16
3.1	Pipe Laying Support Vessel.....	16
3.2	Conexão Vertical Direta.....	17
3.3	Lançamento.....	17
3.3.1	Instalação de Flutuadores.....	17

3.3.2	Operação com Peso Morto	18
3.4	Pull In	19
4	Modelo Numérico de Instalação em <i>Lazy Wave</i>	20
4.1	Modelo Vibratório	20
4.1.1	Transformada de Fourier	21
4.1.2	Domínio do Tempo	22
4.1.3	Domínio da Frequência	22
4.1.4	Ondas Regulares	23
4.1.5	Modelo Vibratório Não-Harmônico	28
4.2	Método dos Elementos Finitos	31
4.3	<i>OrcaFlex</i>	31
4.3.1	Objeto <i>Environment</i>	32
4.3.2	Objeto <i>Line</i>	32
4.3.3	Objeto <i>Attachment</i>	35
4.3.4	Objeto <i>Vessel</i>	35
4.4	Modelo Estático	36
4.5	Análise de Convergência	37
4.6	Modelo Dinâmico	37
4.6.1	Domínio do Tempo Com Esquema de Integração Explícita	37
4.6.2	Domínio do Tempo Com Esquema de Integração Implícita	39
4.6.3	Domínio da Frequência	39
5	Parâmetros da Análise	41
5.1	Parâmetros do Duto Flexível	41
5.1.1	Instalação de Flutuadores (Etapa 0)	43
5.1.2	Preparação para Instalação de Peso Morto (Etapa 1)	44
5.1.3	Instalação de Peso Morto (Etapa 2)	44
5.1.4	Lançamento com Peso Morto (Etapa 3)	45
5.1.5	Preparação para Desinstalação do Peso Morto (Etapa 4)	46
5.1.6	Desinstalação do Peso Morto (Etapa 5)	47
5.2	Parâmetros Ambientais	48
5.3	Parâmetros de Mar	49
5.3.1	Dimensionamento da Altura de Onda Máxima	50
5.4	Aplicabilidade das Teorias de Onda Regular	52
5.5	Teoria de Onda Irregular	56
6	Modelagem	57
6.1	Análise de Convergência do Modelo Estático	57

6.2	Otimização de Malha.....	63
6.3	Análise Dinâmica com 5ª Expansão de Stokes	69
6.3.1	Parâmetros do Domínio do Tempo Explícito.....	70
6.3.2	Domínio do Tempo Implícito Constante.....	70
6.3.3	Domínio do Tempo Implícito Variável.....	71
6.3.4	Domínio da Frequência.....	71
6.3.5	Armazenamento de Resultados	72
6.3.6	Parâmetros Ambientais	72
6.3.7	Duração da Simulação.....	73
6.3.8	Desempenho dos Modelos	74
6.4	Análise Dinâmica com a Função <i>Stream</i> de 3ª Ordem.....	78
6.4.1	Duração da Simulação.....	79
6.4.2	Desempenho dos Modelos	80
6.5	Análise Dinâmica do PLSV com JONSWAP	82
6.5.1	Análise de Convergência do Número de Componentes	84
6.5.2	Desempenho dos Modelos	87
6.6	Análise Dinâmica do Sistema com Onda Irregular JONSWAP.....	88
6.6.1	Análise de Convergência da Duração da Análise Dinâmica.....	89
6.6.2	Desempenho dos Modelos	91
7	Resultados	96
8	Conclusão.....	101
9	Discussão para Trabalhos Futuros	102
10	Referências Bibliográficas	103
	APÊNDICE I – Determinação Numérica do Intervalo de Altura e Período de Ondas	105
	APÊNDICE II – Determinação dos Parâmetros e Aplicabilidade das Teorias de Ondas Regulares	107
	ANEXO I – Distribuição Individual de Altura de Ondas e Períodos Associados.....	118

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Duto flexível típico. Modificado de (Technip, 2015)	4
Figura 2: Arranjo submarino. Modificado de (Flexi France, 2011)	5
Figura 3: Carcaça. Modificado de (Flexi France, 2006)	7
Figura 4: Camada Polimérica. Modificado de (Flexi France, 2006)	7
Figura 5: Armadura de Pressão. Modificado de (Flexi France, 2006)	8
Figura 6: Armadura de Tração. Modificado de (Flexi France, 2006)	8
Figura 7: Capa externa. Modificado de (Flexi France, 2006)	9
Figura 8: Conector de duto flexível. (Flexi France, 2006)	10
Figura 9: Enrijecedor. (Trelleborg, 2017)	10
Figura 10: Vértebra. (Trelleborg, 2017)	11
Figura 11: Montagem de uma vértebra. (Trelleborg, 2017)	11
Figura 12: Flutuador instalado em um <i>riser</i> . (Balmoral Offshore Engineering, 2018)	12
Figura 13: ANM no setor de montagem de sua fabricação. (Petrobras, 2015)	13
Figura 14: Configurações de dutos flexíveis. (Flexi France, 2011)	14
Figura 15: <i>Riser</i> em <i>Lazy Wave</i> . (Petrobras, 2015)	15
Figura 16: Skandi Recife (DOF Subsea, 2018)	16
Figura 17: Flutuadores realizando empuxo no <i>riser</i> (Trelleborg, 2018)	18
Figura 18: Típico conjunto de peso morto (BELOV, 2018)	18
Figura 19: Excitação determinística e aleatória. (Rao & Griffin, 2011)	20
Figura 20: Decomposição de um sinal através da transformada de Fourier. (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1998)	21
Figura 21: Decomposição de uma onda do oceano. (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1998)	22
Figura 22: Sinal no domínio do tempo e frequência. (Driemeier, 2017)	22
Figura 23: Parâmetros de uma onda senoidal. (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1998)	23
Figura 24: Exemplo de perfil de onda da 5ª expansão de Stokes.	26
Figura 25: Exemplo de perfil de onda da função <i>Stream</i> de 3ª ordem.	27
Figura 26: 5ª expansão de <i>Stokes</i> e a <i>Stream</i> de 3ª ordem.	27
Figura 26: Onda irregular e seu espectro de onda. (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1998)	29

Figura 27: Espectro de Pierson-Moskowitz. (Codecogs, 2014)	30
Figura 28: O espectro de JONSWAP e a influência do fator de aprimoramento de pico. (Det Norske Veritas, 2010)	30
Figura 29: Perfil de onda irregular JONSWAP gerado pelo <i>OrcaFlex</i> .	31
Figura 30: Objeto <i>Line</i> .	32
Figura 31: Modelagem do objeto <i>Line</i> . Adaptado de (Orcina, 2018)	33
Figura 32: Modelagem de um objeto <i>Line</i> . Adaptado de (Orcina, 2018)	34
Figura 33: Seis graus de liberdade de uma embarcação. (Driemeier, 2017)	35
Figura 34: Conexão da extremidade superior do duto no modelo.	42
Figura 35: Conexão da extremidade inferior do modelo.	43
Figura 36: Modelos da instalação de flutuadores (etapa 0).	43
Figura 37: Modelos preparação para instalação de peso morto (etapa 1).	44
Figura 38: Modelos para instalação de peso morto (etapa 2).	45
Figura 39: Modelos para lançamento com peso morto (etapa 3).	46
Figura 40: Modelos para preparação para desinstalação de peso morto (etapa 4).	47
Figura 41: Modelos para desinstalação de peso morto (etapa 5).	47
Figura 42: Distribuição de altura e período de onda da bacia de Campos.	48
Figura 43: Altura Máxima de Onda por Período em Águas Profundas	49
Figura 44: Comprimento de Onda por Período em Águas Profundas	50
Figura 45: Intervalos de validade de diversas teorias de onda regular. (Det Norske Veritas, 2010)	52
Figura 46: Aplicabilidade das teorias da expansão de Stokes ou <i>Stream</i> .	54
Figura 47: Malha uniforme.	57
Figura 48: Análise de convergência estática do raio de curvatura mínimo	58
Figura 48: Análise de convergência estática do raio de curvatura mínimo. (Zona de convergência)	59
Figura 49: Posicionamento de <i>attachments</i> em malhas refinadas e grosseiras.	61
Figura 50: Raio de curvatura mínimo para a etapa de instalação de peso morto do duto de 4 polegadas.	62
Figura 51: Raio de curvatura mínimo para a etapa de instalação de peso morto do duto de 8 polegadas.	63
Figura 52: Resultados raio de curvatura mínimo da análise de otimização de malha	65
Figura 53: Modelo de Malha Uniforme.	68
Figura 54: Modelo de Malha Otimizada.	68

- Figura 55: Perfil de onda de período 6 s da 5ª expansão de Stokes gerado pelo *OrcaFlex*.
73
- Figura 56: Perfil de onda de período 14 s da 5ª expansão de Stokes gerado pelo *OrcaFlex*.
73
- Figura 57: Número de ondas necessários para cada caso ser considerado regime permanente.
74
- Figura 58: Duração média das análises de cada método de solução 77
- Figura 59: Resultados Extremos da Análise Dinâmica com Stokes 5ª. 77
- Figura 60: Perfil de onda de período 6 s da função *Stream* de 3ª ordem gerado pelo *OrcaFlex*.
78
- Figura 61: Perfil de onda de período 14 s da função *Stream* de 3ª ordem gerado pelo *OrcaFlex*.
79
- Figura 62: Número de ondas necessárias para cada caso ser considerado regime permanente.
79
- Figura 63: Duração média das análises de cada método de solução 82
- Figura 64: Resultados Extremos da Análise Dinâmica com Stokes 5ª. 82
- Figura 65: Perfil de onda irregular de período de pico 6s JONSWAP gerado pelo *OrcaFlex*.
84
- Figura 66: Perfil de onda irregular de período de pico 14s JONSWAP gerado pelo *OrcaFlex*.
84
- Figura 67: Distribuição dos resultados de velocidade máxima de cada semente. 86
- Figura 68: Resultados médios da análise de convergência de duração da análise dinâmica.
90
- Figura 69: Resultados extremos da análise de convergência de duração da análise dinâmica.
90
- Figura 70: Resultados Médios da Análise Dinâmica com onda irregular JONSWAP. 93
- Figura 71: Resultados Extremos da Análise Dinâmica com onda irregular JONSWAP. 94
- Figura 72: Ocorrência de resultados extremos para cada momento crítico. 94
- Figura 73: Resultados das teorias de ondas no domínio do tempo implícito com incremento de tempo constante de 0,01 s. 96
- Figura 74: Resultados médios das teorias de onda por fase de instalação para o duto de 4".
97
- Figura 75: Resultados médios das teorias de onda por fase de instalação para o duto de 8".
97

Figura 76: Resultados das teorias de ondas no domínio do tempo implícito com incremento de tempo constante de 0,05 s. 98

Figura 77: Resultados das teorias de ondas no domínio do tempo implícito com incremento de tempo constante de 0,1s. 98

Figura 78: Resultados das teorias de ondas no domínio do tempo implícito com incremento de tempo constante de 1s. 99

Figura 79: Resultados das teorias de ondas no domínio do tempo explícito. 99

Figura 80: Resultados das teorias de ondas no domínio da frequência. 100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados relevantes do duto flexível de 4".	41
Tabela 2: Dados relevantes do duto flexível de 8".	42
Tabela 3: Dados ambientais.	48
Tabela 4: Critérios de tolerância para análise de convergência estática.	60
Tabela 5: Resultados da Análise de Convergência para Sistema de 4 polegadas.	60
Tabela 6: Resultados da Análise de Convergência para Sistema de 8 polegadas.	60
Tabela 7: Casos de segmentação da análise de otimização de malha.	64
Tabela 8: Critérios de raio para refinamento de malha da análise de otimização de malha.	64
Tabela 9: Resultados da categoria 12 na análise de otimização de malha do sistema de 4".	67
Tabela 10: Resultados da categoria 12 na análise de otimização de malha do sistema de 8".	67
Tabela 11: Resultados estáticos dos modelos com malha otimizada.	69
Tabela 12: Resultados da análise da 5ª expansão de Stokes Exp. (4")	75
Tabela 13: Resultados da análise da 5ª expansão de Stokes Exp. (8")	76
Tabela 14: Resultados da análise da 3ª ordem de <i>Stream</i> Exp. (4")	80
Tabela 15: Resultados da análise da 3ª ordem de <i>Stream</i> Exp. (8")	81
Tabela 16: Tolerância da análise de convergência.	85
Tabela 17: Resultados da onda de 320 componentes (referência na análise de convergência).	85
Tabela 18: Resultados de análise de convergência de número de componentes.	86
Tabela 19: Resultados da análise do PLSV com onda irregular JONSWAP	87
Tabela 20: Sementes e momentos críticos	89
Tabela 21: Resultados da análise com onda irregular JONSWAP e Imp. Cte. 0.01 s (4")	91
Tabela 22: Resultados da análise com onda irregular JONSWAP e Imp. Cte. 0.01 s (8")	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ANM – Árvore de Natal Molhada
- BAP – Base Adaptadora de Produção
- Cte - Constante
- CVD – Conexão Vertical Direta
- Din – Dinâmico
- Est - Estático
- Exp – Solução no Domínio do Tempo Explícito
- FPSO – *Floating Production Storage and Offloading*
- Freq – Solução no Domínio da Frequência
- H_s – Altura de onda significativa
- Imp – Solução no Domínio do Tempo Implícito
- MCV – Módulo de Conexão Vertical
- PLSV – *Pipe Laying Support Vessel*
- RAO – *Response Amplitude Operator*
- Var - Variável
- TDP – *Touch Down Point*
- T_p – Período entre Picos
- T_z – Período entre zeros

Capítulo 1

1 Introdução

Ao longo das últimas décadas, ocorreu um aumento exponencial dos esforços de engenharia na área de óleo e gás. Durante muito tempo, a exploração se restringiu a poços terrestres, ou *onshore*, e poços em profundidade no mar de até 400m. Porém, com a descoberta dos poços em águas profundas (de 400m a 1000m) e ultra profundas (maior que 1000m), já não se podia mais depender das tecnologias presentes, necessitando um desenvolvimento que fosse condizente com as dificuldades desses projetos.

Estudos foram cada vez mais sendo realizados e, com isso, as possibilidades, desde a exploração até a utilização do produto final, se tornaram muito maiores. As plataformas fixas começaram a se tornar ineficazes devido a sua inflexibilidade, já que, uma vez instalada, dificilmente ela poderá sair daquela região. O desenvolvimento de plataformas flutuantes permitiu a movimentação e adaptação dessas unidades aos diversos layouts que pudessem ser recriados num campo de exploração, além da sua mais rápida instalação.

A evolução tecnológica também ocorreu com os dutos que conectam os poços às plataformas de exploração, uma vez que, durante muito tempo, foram utilizados apenas dutos rígidos. Atualmente, utilizam-se bastante os dutos flexíveis que, por definição, permitem uma utilização mais maleável do material, podendo ser armazenados em grande quantidade nos navios instaladores para a utilização em diversos projetos em regiões de alta profundidade, sendo capazes de resistir às rigorosidades desses locais.

No Brasil, houve uma grande revolução no setor após a descoberta da Bacia de Campos em 1974, a qual possui diversos poços de água ultra profunda. A partir desta data, a Petrobras focou em desenvolver tecnologias que permitam a exploração desses poços de maneira eficiente, devido às complexidades apresentadas nos projetos. Utilizando as inovações do

mercado, plataformas flutuantes e dutos flexíveis são componentes vitais nos projetos da empresa, sendo responsável por grande parte da economia brasileira

1.1 Motivação

Diversas áreas do conhecimento atuam nos diferentes momentos do processo de exploração do petróleo. Neste trabalho de engenharia mecânica, o foco será no momento de instalação dos dutos que conectam os poços às plataformas.

Para realizar essa instalação utilizando dutos flexíveis, nem sempre a configuração que se apresenta ao longo da lâmina d'água é de um duto livre. Devido ao peso que se acumula ao longo das enormes distâncias no fundo do mar, diferentes configurações são adotadas para aliviar as tensões, uma delas é a *Lazy Wave*. Para avaliar a instalação dessa configuração em um determinado projeto, um estudo realizado com programas de análise dinâmica que utilizam o método de elementos finitos é necessário. No entanto, é preciso bom entendimento dos parâmetros do modelo para garantir a obtenção de resultados confiáveis.

1.2 Objetivo

Este projeto irá analisar as influências que os diferentes modos de excitação provocam no modelo e propor uma otimização dos modelos utilizados no software com base em dados reais da Bacia de Campos. Não cabe a este projeto analisar a metodologia de instalação aplicada, mas apenas o seu modelo numérico.

1.3 Metodologia

A análise do modelo se dará em torno de um caso baseado em um típico sistema de dutos flexíveis da bacia de Campos. O modelo será analisado estaticamente e dinamicamente.

1.4 Revisão Bibliográfica

Para o projeto, alguns trabalhos teóricos, livros e normas foram importantes para a definição do escopo e tomada de decisões ao longo dos estudos. Sendo os principais:

- DNV-RP-205 (Det Norske Veritas, 2010) – A DNV GL é uma fundação autônoma e independente com sede na Noruega que certifica, classifica, oferece serviço de consultoria para serviços de navegação marítima, instalações *offshore* e *onshore* ao redor do mundo. A DNV GL oferece uma série de documentos de Prática

Recomendadas. A modelagem de ondas regulares é abordada na DNV-RP-205, cujo título em tradução livre é Condições Ambientais e Carregamentos Ambientais.

- Manual Online do *OrcaFlex* (Orcina, 2018) - A escocesa *Orcina*, desenvolvedora do *OrcaFlex*, *software* utilizado para as simulações do estudo, disponibiliza gratuitamente seu manual, onde suporta usuários na modelagem, execução e extração de modelos através do *OrcaFlex*. Lá é abordada a teoria que orientou o desenvolvimento da aplicação. Também é explicada o funcionamento dos métodos de solução e cada parâmetro envolvido nas simulações.
- Dados meteoceanográficos da Bacia de Campos (Petrobras, 2015) – O conjunto de dados que indicaram as condições meteoceanográficas para as análises dinâmicas.

1.5 Organização do Trabalho

Ao longo do trabalho, serão apresentados todos os componentes mais importantes da operação avaliada e definição dos conceitos físicos e matemáticos utilizados nos projetos.

Um dimensionamento teórico apoiará a escolha de parâmetros do modelo. O dimensionamento, baseado no material apresentado na revisão bibliográfica, será feito através de uma ferramenta online chamada *Jupyter Notebook*. Este é uma aplicação *web open-source* disponível gratuitamente que permite a criação de documento que integram linguagem de programação, texto narrativo, imagens e equação. A aplicação suporta mais de 40 linguagens de programação, mas apenas uma será usada, *Python*, pois a mesma apresenta um *API (Application Program Interface)* próprio para manusear modelos do *OrcaFlex*. O que permite além de realizar o dimensionamento, também manipular os modelos. As simulações serão executadas no *software* de método de elementos finitos *OrcaFlex* e os resultados serão analisados novamente através do *Jupyter Notebook*, para apoiar a conclusão.

Capítulo 2

2 Dutos Flexíveis e Umbilicais

Os dutos (ou linhas) flexíveis têm sido bastante utilizados na área de engenharia submarina nos últimos anos, especialmente no Brasil em que, devido às desafiadoras condições de exploração, considerou-se que esse duto apresentava a melhor solução. Como ilustrado na Figura 1, as linhas flexíveis são compostas por desde 4 até 19 camadas de material polimérico, compósito e de arames metálicos em arranjo helicoidal, permitindo maior flexibilidade e comportamento dinâmico superior em comparação aos dutos rígidos, podendo formar raios de quase 2 metros. Tal flexibilidade permite que o armazenamento seja feito em bobinas, facilitando a logística e permitindo a acomodação em terrenos irregulares com facilidade.

O duto flexível também pode ser recuperado e reinstalado diversas vezes, sem comprometer a integridade do mesmo.

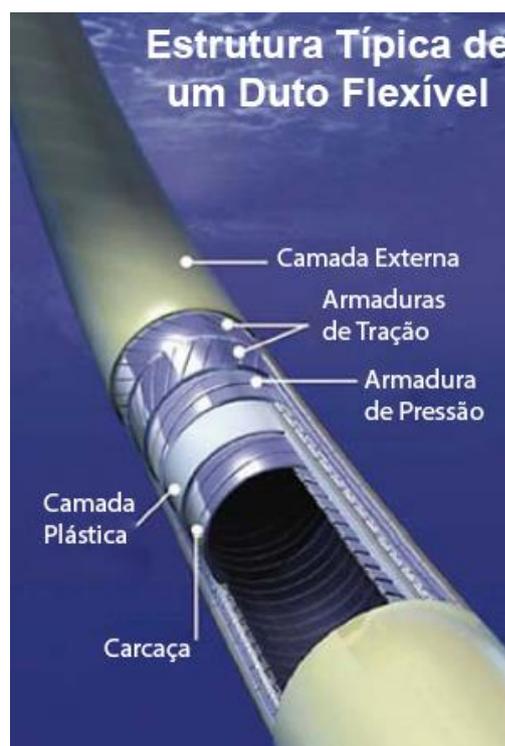


Figura 1: Duto flexível típico. Modificado de (Technip, 2015)

Assim como os dutos flexíveis, os umbilicais são formados por camadas de arame de aço e polímeros capazes de proteger sua estrutura interna de tubos de aço e mangueiras plásticas de alta resistência à pressão, além de cabos elétricos. Este tipo de duto é usado para o controle eletro-hidráulico e injeção de compostos químicos nos poços de exploração.

Ao longo deste capítulo, serão apresentados os diferentes tipos de dutos presentes num arranjo submarino; suas camadas internas; os acessórios e equipamentos que podem estar presentes e as configurações que se encontram ao longo da LDA (lâmina d'água).

2.1 Classificação de Flexíveis

Num arranjo submarino, há três situações em que um duto flexível pode se encontrar, como pode ser observado na Figura 2. Essas situações diferem as linhas de acordo com sua demanda estrutural, portanto precisam ser tratadas de maneiras diferentes. Ou seja, um duto projetado para determinada aplicação não pode ser usado para outra.

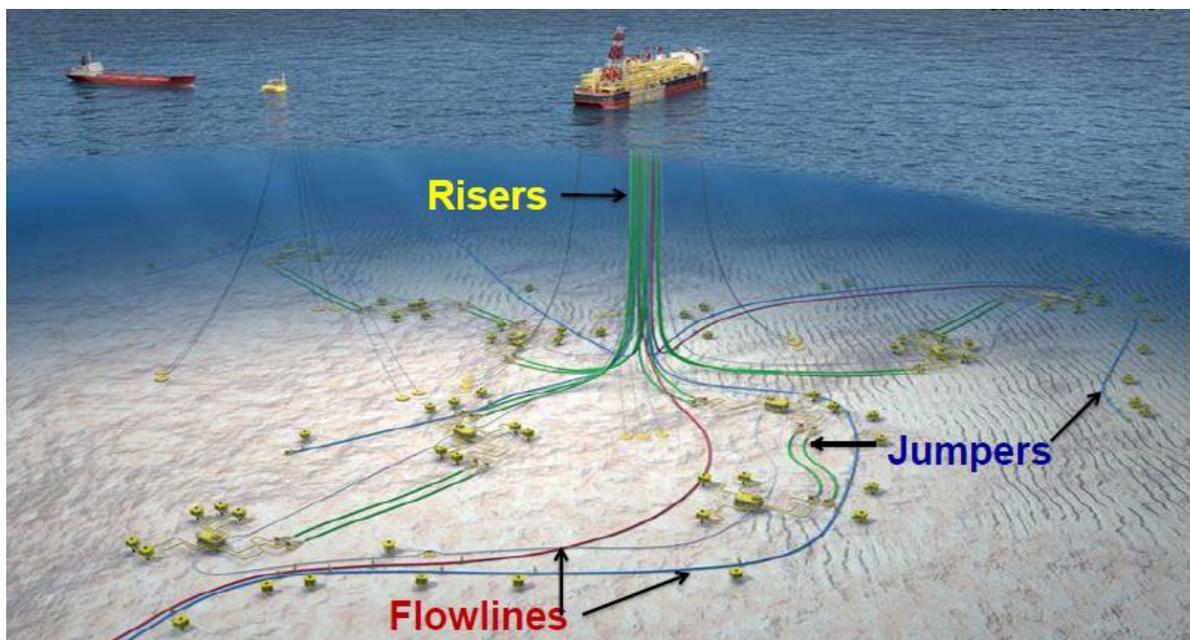


Figura 2: Arranjo submarino. Modificado de (Flexi France, 2011)

2.1.1 Risers

Um *riser* é considerado como toda a região de um flexível desde a sua conexão na plataforma até o toque no solo. Devido ao estado de suspensão em que se encontra, a linha sofre cargas e flexões cíclicas durante operação, portanto deve ter uma estrutura capaz de resistir a esses esforços dinâmicos.

Não só é necessário se preocupar com a carga de operação em si, mas no momento de se lançar a linha também. Há uma série de cargas dinâmicas aplicadas nesta situação, além do movimento do mar que incessantemente está em atividade. Desta forma, é comum que os *risers*

sejam mais pesados por conta da necessidade do reforço estrutural para resistir às condições em que são colocados.

2.1.2 Flowlines

Caracteriza-se uma *flowline* como toda a região de um flexível a partir da conexão ao *riser* que se mantém apoiada no solo. Como a linha está sendo suportada no leito marinho durante a operação, não há cargas dinâmicas significativas ocorrendo, sendo o momento mais crítico o seu lançamento.

Geralmente, as *flowlines* não estão preparadas para atuarem como *riser* num projeto, devendo ser estudado sempre sua utilização em casos de remanejamento.

2.1.3 Jumpers

Jumpers são trechos de *flowlines* que interligam dois equipamentos submarinos. Portanto, são frações do arranjo submarino que não entram em contato direto com a *flowline* ou *riser*.

2.2 Camadas de um Flexível

Cada camada de um flexível exerce uma determinada função. A composição das camadas depende diretamente do tipo do flexível (*riser*, *flowline* ou *jumper*), das condições ambientais e da característica do fluido de trabalho. Um *riser* que operará com água apresentará uma composição diferente de um *riser* que operará com óleo, por exemplo.

2.2.1 Carcaça

Estrutura intertravada para prevenir o tubo de colapsar devido à pressão externa. Quando há presença de carcaça, é dito que a linha tem interior rugoso. Mas nem sempre haverá a carcaça em um flexível, nesse caso ele é dito ter interior liso. A carcaça é composta por fitas de aço em um arranjo helicoidal de pequeno passo. Como essa camada tem contato direto com fluido, deve

apresentar boa resistência a corrosão. A seção transversal da fita formadora dessa camada pode ser vista na Figura 3.



Figura 3: Carcaça. Modificado de (Flexi France, 2006)

2.2.2 Camada Polimérica

Camada extrudada de polímero que garante a vedação interna do tubo, sendo resistente à corrosão para garantir que o fluido não alcançará as camadas subsequentes. Quando o flexível não tem carcaça, a camada polimérica garante o interior liso. O posicionamento da camada é indicado na Figura 4.



Figura 4: Camada Polimérica. Modificado de (Flexi France, 2006)

2.2.3 Armadura de Pressão

Estrutura intertravada que suporta pressão interna e externa no tubo. Também é composta por fitas metálicas em arranjo helicoidal de pequeno passo. A seção transversal pode

ter diversos formatos, para garantir o travamento. Dois formatos usados, *Zeta* e *Teta* são apresentados na Figura 5.

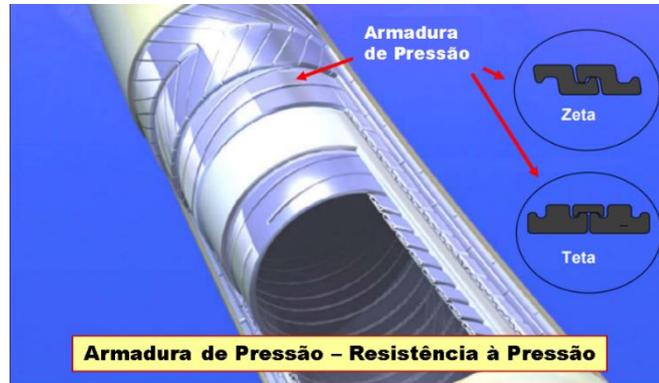


Figura 5: Armadura de Pressão. Modificado de (Flexi France, 2006)

2.2.4 Camada Anti-Desgaste

Assim como diz seu nome, é uma camada posicionada entre as camadas metálicas para reduzir o desgaste. Apenas utilizada nos *Risers*, uma vez que apresenta comportamento dinâmico.

2.2.5 Armadura de Tração

A camada que suporta os esforços trativos, mas também suporta a pressão interna no tubo. É formada por fitas metálicas de seção transversal retangular em um arranjo helicoidal de grande passo. Há duas dessa camada no flexível, cada uma com seu arranjo helicoidal seguindo para uma direção para distribuição equivalente das cargas. A seção transversal das fitas dessa camada é apresentada na Figura 6.



Figura 6: Armadura de Tração. Modificado de (Flexi France, 2006)

2.2.6 Isolante Térmico

Essa camada age como uma barreira térmica entre o fluido no interior do duto e o ambiente externo. É importante em dutos que operarão com hidratos, pois esse caso exige uma temperatura bem mais elevada no interior do flexível em relação ao exterior.

2.2.7 Capa Externa

Protege o tubo do ambiente e confina a armadura de tração. É feita de material polimérico extrudado continuamente sobre duto. O posicionamento da capa externa pode ser visto na Figura 7.



Figura 7: Capa externa. Modificado de (Flexi France, 2006)

2.3 Acessórios e Equipamentos

Os dutos flexíveis e umbilicais possuem uma série de acessórios e equipamentos que atuam na operação de conexão entre plataforma e poço, sendo necessários já na fase de instalação.

Suas aplicações e formas se apresentam conforme as variáveis de projeto, como por exemplo a profundidade; o arranjo submarino; o navio de instalação envolvido e outras. Como há uma quantidade enorme de acessórios e equipamentos, serão detalhados apenas os mais impactantes no estudo das análises realizadas.

2.3.1 Conector

O conector é o elemento que se localiza na extremidade de um tramo, conectando-o a outro tramo ou a um equipamento. Cada camada do flexível é ancorada, individualmente, dentro do conector, sendo esse acessório bastante complexo.

Sua montagem no duto é realizada em terra, devido a necessidade de diversos equipamentos para a operação, portanto o navio de lançamento já recebe os tramos com os conectores, realizando apenas a interligação se necessário.

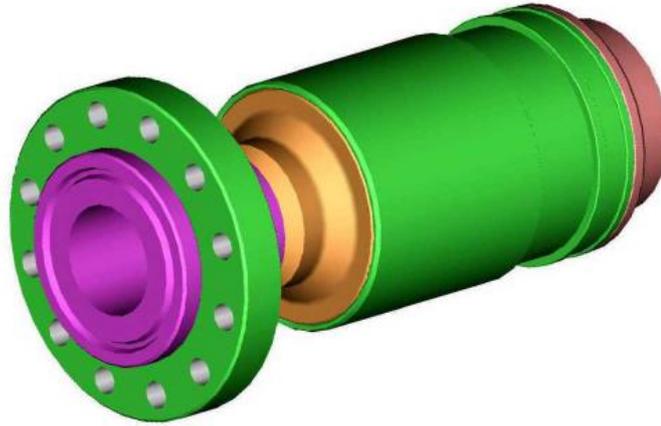


Figura 8: Conector de duto flexível. (Flexi France, 2006)

A Figura 8 mostra um conector de duto flexível. É muito importante que não haja riscos na operação como, por exemplo, não estanqueidade ou concentradores de tensão (devido a impactos no manuseio ou montagem), pois esse é um dos elementos mais sensíveis e importantes de um arranjo submarino.

2.3.2 Enrijecedor

O enrijecedor encontra-se, sempre, localizado após o conector de uma extremidade, limitando a deformação angular do duto flexível à valores previamente determinados devido a sua configuração cônica, permitindo uma transição gradual das tensões.



Figura 9: Enrijecedor. (Trelleborg, 2017)

O enrijeecedor é utilizado apenas na extremidade de topo de um *riser*, ou seja, a extremidade que chega à plataforma. É possível ver na Figura 9 uma modelagem em 3D de um enrijeecedor.

2.3.3 Restritor de Curvatura

O restritor de curvatura, comumente chamado de vértebra, é um acessório localizado na extremidade de um duto, sendo responsável pelo controle do raio da curvatura, limitando-o ao valor estipulado de projeto. A vértebra tem atuação na região do tramo que se conecta no poço, devido à forte influência das ondas durante os últimos momentos da instalação, é necessário controlar o aumento da curvatura nessa região. Na Figura 10 tem-se a renderização de um projeto de uma vértebra.

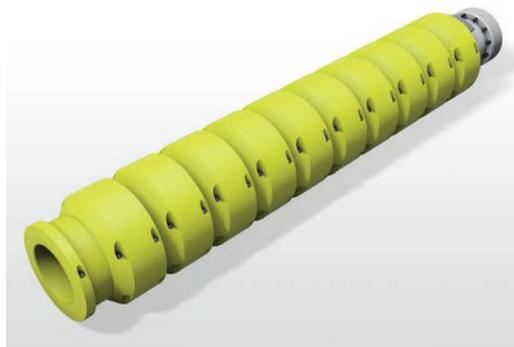


Figura 10: Vértebra. (Trelleborg, 2017)

O restritor de curvatura é feito de diversos elementos bipartidos, chamados de gomos, que se interconectam. A folga entre os gomos permite a movimentação até certo limite, no qual ocorre o contato entre os mesmos, travando o movimento. A montagem de uma vértebra é apresentada na Figura 11.

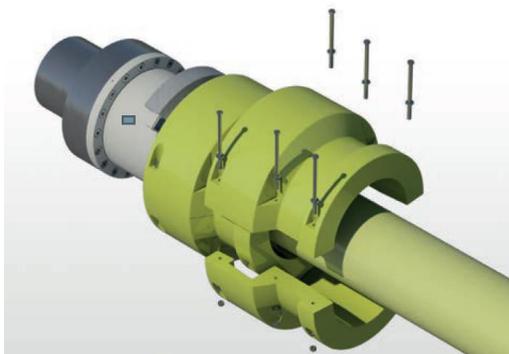


Figura 11: Montagem de uma vértebra. (Trelleborg, 2017)

2.3.4 Flutuador

Flutuadores são os acessórios que realizam empuxo no duto, podendo estar presente pontualmente na linha para auxílio em acoplamento ou assentamento, mas também de forma distribuída ao longo do *riser* (conforme mostrado na Figura 12) para formar determinada configuração da linha. Essas configurações serão tratadas mais à frente.



Figura 12: Flutuador instalado em um *riser*. (Balmoral Offshore Engineering, 2018)

2.3.5 Módulo de Conexão Vertical

O MCV, sigla comumente usada para o módulo de conexão vertical, é o equipamento localizado na extremidade do duto que se conecta ao poço. A vértebra, apresentada anteriormente, protege a região da linha conectada a esse equipamento em que há uma concentração de flexões, já que é necessário verticalizar o equipamento para sua conexão final, sendo essa operação bastante sensível e de alto risco.

Fatores como o ângulo de instalação, distância do leito marinho e profundidade de LDA são alguns dos avaliados para a operação de conexão ao poço, conhecida como CVD (conexão vertical dirta), a qual será mais aprofundada nas próximas seções. Este equipamento tem grandes dimensões, além de diversos cantos vivos e seções frágeis de manuseio pelo ROV, sendo imprescindível seu cuidado ao manuseá-lo durante todo o caminho do navio ao poço.

2.3.6 Árvore de Natal Molhada

A árvore de natal molhada é o equipamento submarino que realiza a extração do óleo ou gás do poço. Neste equipamento, é conectado o MCV (módulo de conexão vertical), realizando a passagem de fluido captado pela ANM (árvore de natal molhada) à linha. Para realizar as operações de conexão da linha flexível ou umbilical, é necessário que a ANM já tenha sido instalada previamente no leito marinho.

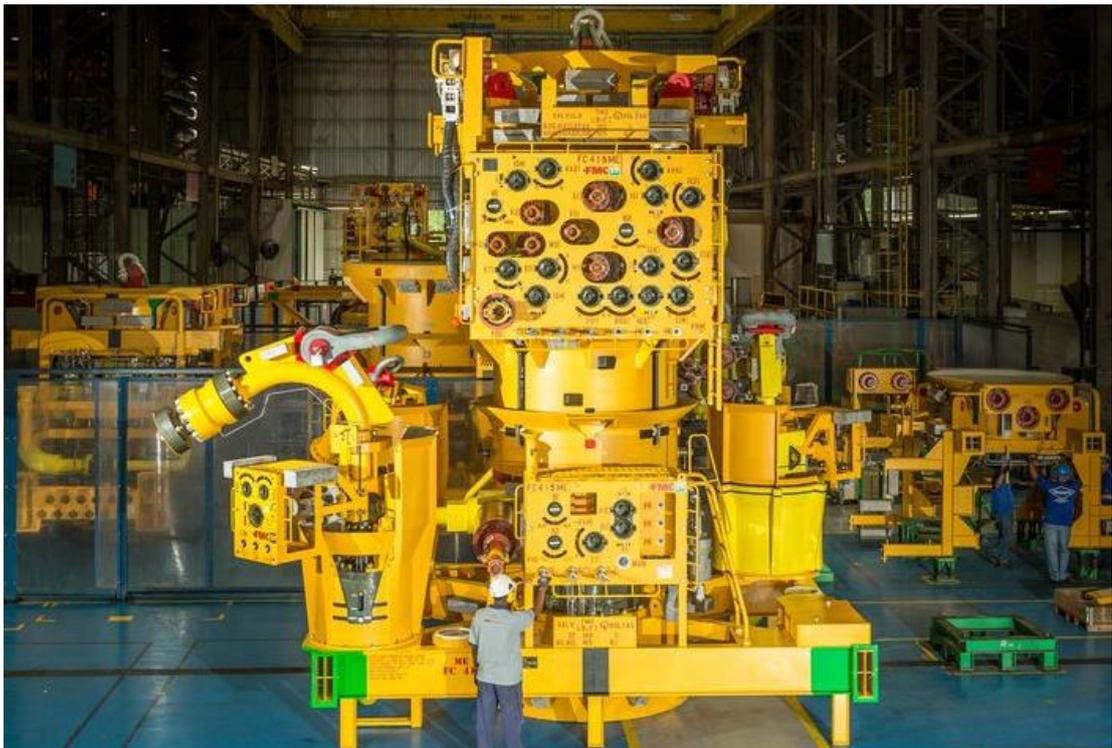


Figura 13: ANM no setor de montagem de sua fabricação. (Petrobras, 2015)

Geralmente, há 3 *HUBs* (região com formato geralmente cônico para encaixe de um equipamento) na ANM, um para conexão do duto flexível de produção, extraindo o óleo ou gás do poço, um para o duto flexível de injeção, inserindo água ou produtos químicos para estimular a produção no poço, e um para o umbilical, controlando os diversos acionamentos eletro hidráulicos necessários. Na Figura 13, é possível observar a ANM em sua fase final de fabricação.

2.4 Configurações de Dutos Flexíveis

Como mencionado na seção de flutuadores, os dutos flexíveis podem operar em diversas configurações de catenária conforme ilustrado na Figura 14. Cada configuração é escolhida de

acordo com a necessidade de projeto, as mais importantes para o estudo apresentado serão detalhadas abaixo.

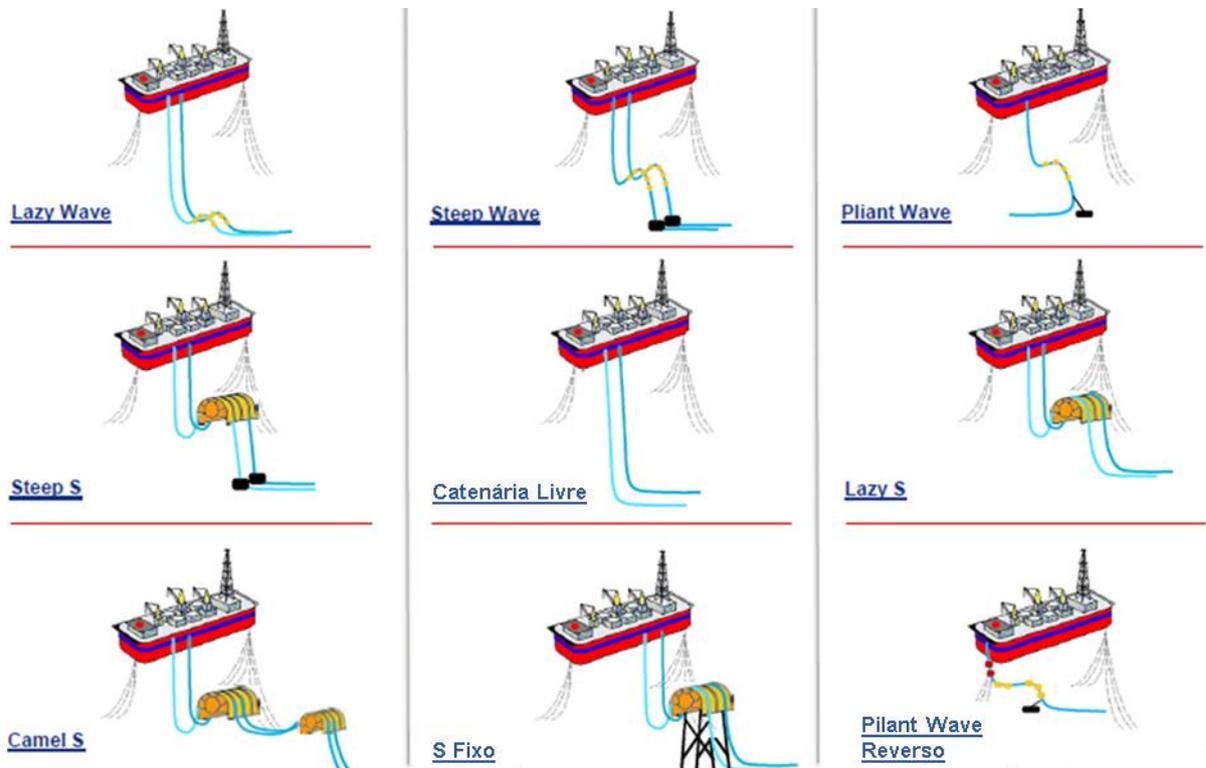


Figura 14: Configurações de dutos flexíveis. (Flexi France, 2011)

2.4.1 Catenária Livre

É a configuração mais simples e barata de ser realizada, o *riser* é suspenso sem nenhum auxílio desde o TDP (*touchdown point*) até a plataforma. Esse tipo de configuração pode se tornar inviável para operação em áreas de grande profundidade e com dutos de elevado diâmetro, pois a plataforma sustenta todo o peso e cargas do *riser*.

Essa configuração também é propensa a problemas com carga no TDP, uma vez que movimentos e cargas no topo são diretamente transmitidas para o fundo. Encontra aplicação em pequenas profundidades e dutos leves.

2.4.2 Lazy Wave

É a alternativa mais frequente na costa brasileira para os casos onde a catenária livre não pode ser adotada. Consiste na instalação de flutuadores no *riser*, como ilustrado na Figura 15, fazendo com que parte da carga seja suportada pelos flutuadores, e não pela plataforma,

aumentando a profundidade de atuação. Os flutuadores também ajudam na desacoplagem do topo em relação ao fundo, diminuindo a transmissão de cargas pelo *riser*.

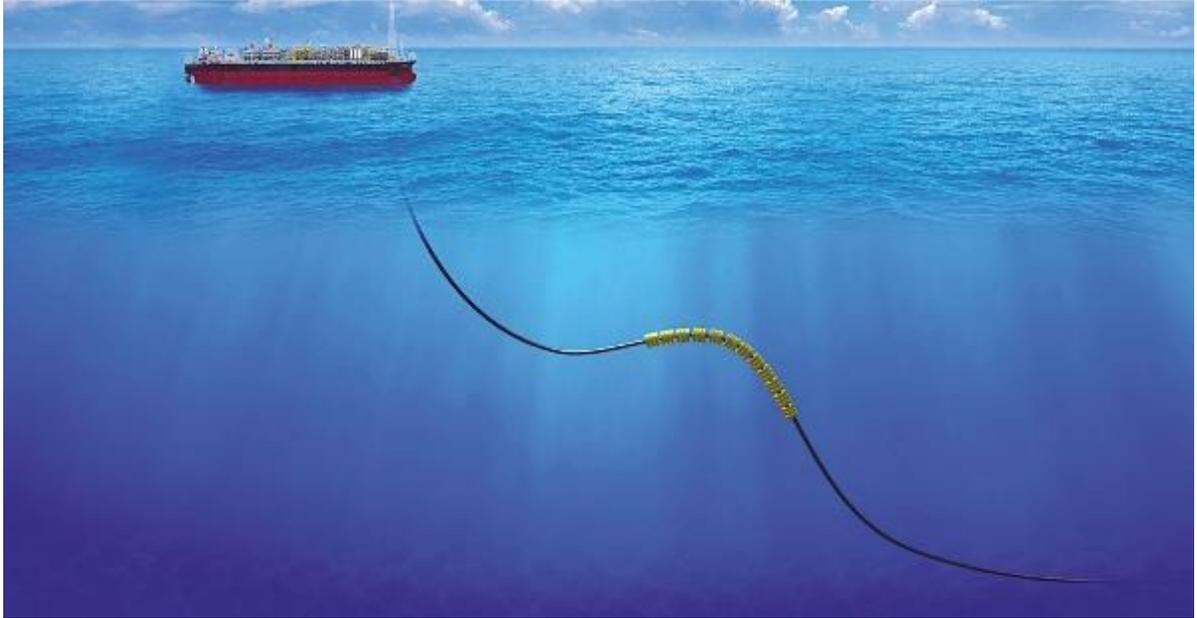


Figura 15: *Riser* em *Lazy Wave*. (Petrobras, 2015)

Capítulo 3

3 Instalação de Dutos Flexíveis em *Lazy Wave*

Para melhor compreensão dos métodos aplicados na análise de instalação, neste capítulo serão explicados os elementos mais importantes da operação de instalação em *Lazy Wave*. Primeiramente, será apresentada a embarcação que opera a mobilização de dutos flexíveis e umbilicais, seguindo para as etapas, apresentadas em ordem de realização, da instalação em configuração de *Lazy Wave*.

3.1 Pipe Laying Support Vessel

O PLSV é, por tradução direta, uma embarcação de lançamento de dutos, sendo característico pela presença da torre de lançamento, equipamento com diversos tensionadores ao longo do seu comprimento e um ou mais guinchos. Os tensionadores são esteiras que apertam os dutos de forma a segurar o mesmo através do atrito, e, conforme a esteira corre, a linha é lançada ou recolhida. Já os guinchos se encontram, geralmente, no topo da torre para realizar o lançamento ou recolhimento do duto.

Este tipo de navio pode conter um sistema de lançamento vertical (conforme foto da Figura 16) ou horizontal. Quando horizontal, o lançamento é realizado pela popa da embarcação, já quando vertical, a linha é lançada através de uma abertura no casco da embarcação chamada de *moonpool*, em que se encontra uma região de operação ao redor chamada mesa de trabalho. Neste projeto o PLSV analisado é de lançamento vertical.



Figura 16: Skandi Recife (DOF Subsea, 2018)

3.2 Conexão Vertical Direta

A primeira etapa da instalação consiste na conexão do MCV ao *HUB da ANM*. O PLSV irá lançar linha com o guincho da torre até a extremidade da mesma se encontrar próxima ao poço. Neste momento, com o auxílio de um ROV, o guindaste do PLSV é conectado ao MCV. Desta forma, a linha assume uma configuração em formato de um J.

É necessário que o MCV se encontre verticalizado em relação ao *HUB* para devida conexão vertical direta (CVD), porém, em determinados casos, apenas lançar ou recolher linha não possibilita a verticalização do MCV, sendo necessário a instalação de flutuadores temporários e pontuais próximos à extremidade que será conectada para finalizar a operação.

Uma vez que o MCV se encontra devidamente posicionado, seu acoplamento é feito através de acionamentos de válvulas da ANM pelo ROV, isso garante que o equipamento esteja devidamente fixado. Caso tenham sido instalados flutuadores temporários próximos à extremidade, no fim da conexão eles já podem ser retirados, permitindo o assentamento do duto no leito marinho para prosseguir com o lançamento do resto de linha.

3.3 Lançamento

Uma vez finalizada a operação de CVD, com parte do duto assentado no leito, o PLSV pode seguir lançando linha e se deslocando em direção à plataforma até chegado o momento em que o comprimento de duto flexível para iniciar a instalação de flutuadores para formação da *Lazy Wave* conforme especificado pelo projeto foi alcançado.

Para essa fase de operação, são destacados dois momentos: o começo da instalação dos flutuadores e a operação com peso morto.

3.3.1 Instalação de Flutuadores

Para inicializar a instalação dos flutuadores, o ângulo de topo (ângulo de saída do duto em relação à vertical) deve ser diminuído para que os operadores do navio possam realizar a operação na mesa de trabalho. Essa atividade ocorre quando já se encontram no convés do navio os flutuadores necessários. Cada flutuador é colocado no duto um por um através de fixação inicial de um *clamp* (acessório metálico no formato de uma braçadeira que irá prender o flutuador na cota determinada do duto), logo após o conjunto bipartido do flutuador é encaixado ao redor do *clamp*, finalizando a sua fixação. Entre a instalação dos flutuadores, o tensionador

da torre vertical do PLSV irá andar com sua esteira para baixo, lançando o duto até que a próxima cota de instalação de flutuador seja atingida na mesa de trabalho

Dependendo das propriedades encontradas nos materiais e no ambiente, pode haver esforços de compressão no duto devido ao empuxo realizado pelos flutuadores (conforme visto na Figura 17) ao longo da LDA, fazendo com que o duto possa flambar, oferecendo diversos riscos de segurança. Desta forma, pode ser necessário a instalação de um conjunto de peso morto (diversas correntes com elevado peso) na linha para manter o esforço trativo no PLSV.

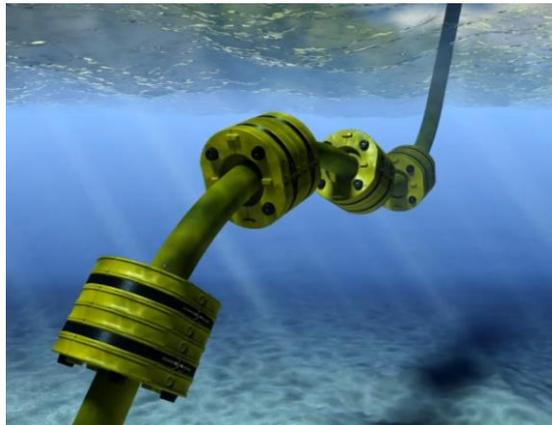


Figura 17: Flutuadores realizando empuxo no *riser* (Trelleborg, 2018)

3.3.2 Operação com Peso Morto

Uma vez instalada a quantidade, especificada por projeto, de flutuadores para que o duto não sofra esforços de compressão, a instalação do peso morto será realizada para balancear as forças verticais. Conforme visto na Figura 18, o peso morto geralmente é um conjunto de amarras metálicas que são entrelaçadas, concentrando o peso dos materiais num ponto mais próximo possível.



Figura 18: Típico conjunto de peso morto (BELOV, 2018)

Uma embarcação de apoio é necessária para essa operação, pois irá atuar em uma região de difícil acesso do PLSV na situação em que se encontra. Portanto, é preciso que o PLSV se desloque na direção oposta à embarcação de apoio, aumentando o ângulo na mesa de trabalho, permitindo que o conjunto de peso morto seja fixado em uma região especificada do duto.

Após concluída a instalação do peso morto, o PLSV retorna o ângulo de topo para o mais próximo possível da vertical para realizar a instalação de flutuadores e seguir com o lançamento. Uma vez realizada a instalação de todos os flutuadores necessários, o PLSV deve abrir o ângulo de topo para a retirada do peso morto pela embarcação de apoio. Após concluído, a linha assumirá uma formação côncava para cima na região dos flutuadores tendo a característica de *Lazy Wave*.

3.4 Pull In

Ao final do lançamento, quando o PLSV estiver próximo à plataforma, inicia-se a transferência da última extremidade do duto. Quando esta extremidade chega à mesa de trabalho, conecta-se o cabo do guincho da torre de lançamento do PLSV na mesma.

Uma troca de cabos é realizada entre o PLSV e plataforma, para chegada de um cabo que irá guiar o caminho da última extremidade do duto até a entrada da região de apoio na plataforma. Este cabo chega até a mesa de trabalho, conectando-se na extremidade do duto junto ao cabo do guincho da torre de lançamento.

Desta maneira, o PLSV lança o cabo do seu guincho enquanto a plataforma recolhe o seu cabo de transferência até o ponto em que o cabo de transferência suporte toda carga e o guincho do PLSV esteja livre para voltar ao navio. Ao final desta operação, a extremidade final do duto se encontra na plataforma, pronto para ser devidamente operada.

Capítulo 4

4 Modelo Numérico de Instalação em *Lazy Wave*

Devido ao elevado grau de complexidade envolvendo a configuração do flexível durante as etapas de instalação e as dinâmicas condições de contornos do ambiente marinho, cálculos analíticos do problema apresentado se tornam extremamente não práticos. Em contrapartida, o método dos elementos finitos ganha destaque para a solução desse tipo de problema. Ao longo deste capítulo, serão apresentados os métodos utilizados para realização da análise através dos cálculos dinâmicos e suas bases teóricas.

4.1 Modelo Vibratório

Qualquer movimento repetido em um dado intervalo de tempo pode ser chamado de uma vibração. Esta pode ser classificada como livre ou forçada e pode aparecer na forma de força ou deslocamento.

A vibração livre acontece quando o sistema recebe uma perturbação inicial e responde livremente à perturbação, não recebendo mais nenhuma excitação externa além da inicial. Já a vibração forçada ocorre quando o sistema recebe excitação externa contínua durante a vibração. Ondas do oceano excitam o PLSV continuamente, portanto, o modelo é caracterizado como de vibração forçada.

A excitação pode ser harmônica, não harmônica e periódica ou irregular. Se o valor ou magnitude da vibração forem conhecidos, a mesma pode ser chamada de determinística, caso contrário, se as características da vibração são imprevisíveis, a mesma pode ser chamada de aleatória. A Figura 19 apresenta os dois modos de excitação:

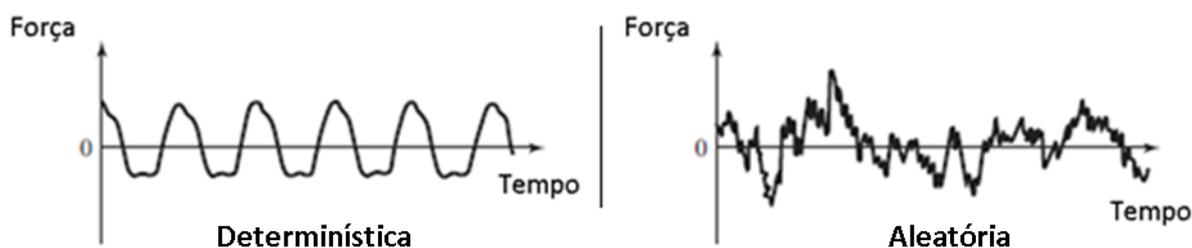


Figura 19: Excitação determinística e aleatória. (Rao & Griffin, 2011)

No modelo estudado, estão presentes uma forma de condição de contorno: As ondas do oceano, que fazem vibrar a embarcação.

As ondas do oceano são resultado de diversas forças atuantes no mesmo. A principal dela é o vento, porém também podem ser causadas por forças resultante do movimento de placas tectônicas, gravidade da terra e de outros corpos celestes como a lua e a força de *Coriolis*, resultado da rotação da terra e tensão superficial da água. Como resultado da diversidade de causas, as ondas se apresentam de forma aleatória na natureza, resultante do somatório de cada uma das causas listadas anteriormente.

4.1.1 Transformada de Fourier

Muitas vezes, uma onda que tem comportamento aparentemente aleatório traz muita dificuldade para se realizar uma análise das informações. Uma alternativa para esse caso é a utilização da transformada de Fourier. Com este método, é possível representar funções complexas em um conjunto de funções mais simples, como senos e cossenos. Essa decomposição é ilustrada na Figura 20.

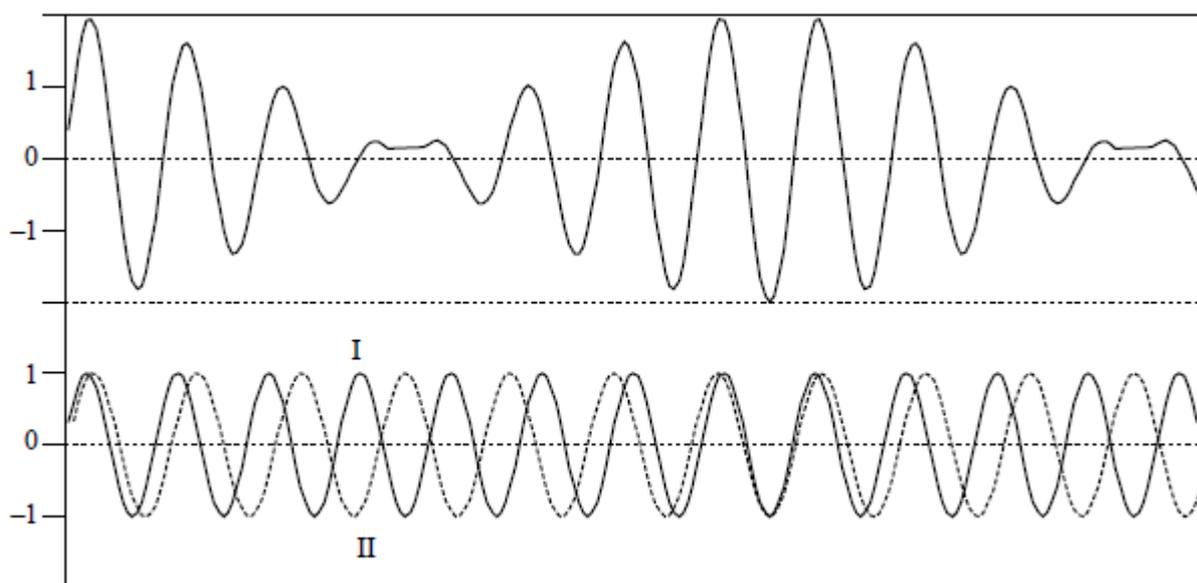


Figura 20: Decomposição de um sinal através da transformada de Fourier. (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1998)

Esta decomposição é interessante, pois permite transformar o complexo sinal da onda do oceano em uma série de ondas mais simples de se modelar. Um exemplo visual se encontra na Figura 21, que apresenta uma representação da decomposição de uma onda em diversas ondas mais simples.

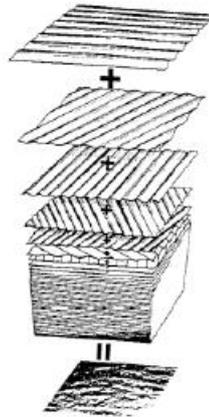


Figura 21: Decomposição de uma onda do oceano. (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1998)

4.1.2 Domínio do Tempo

Como citado anteriormente, a análise no domínio do tempo estuda a resposta do sistema em função do tempo, ou seja, como se o sistema estivesse sendo observado evento após evento. Portanto, esse tipo de visualização apresenta a amplitude de um sinal no tempo.

4.1.3 Domínio da Frequência

A análise no domínio da frequência estuda a resposta do sistema em função da frequência. Esse tipo de análise tem como resultado a amplitude da frequência de cada sinal decomposto do original através da transformada de Fourier. Um exemplo de sinal no domínio no tempo contraposto ao mesmo sinal no domínio da frequência é apresentado na Figura 22.

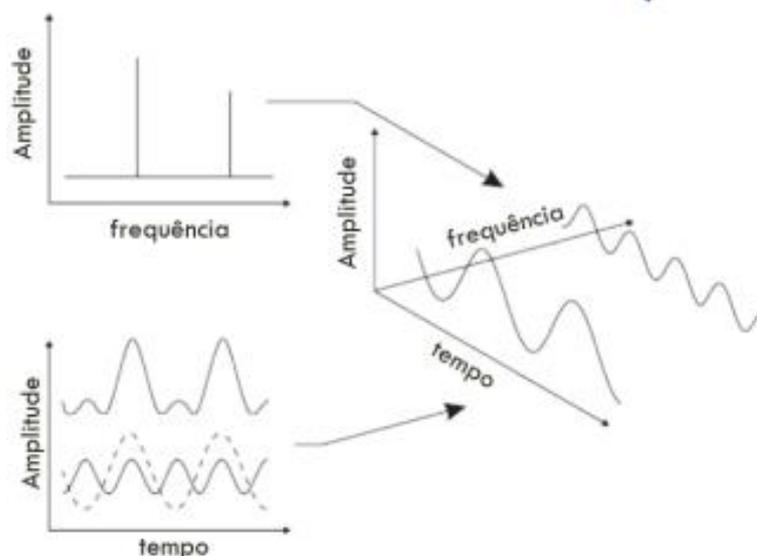


Figura 22: Sinal no domínio do tempo e frequência. (Driemeier, 2017)

4.1.4 Ondas Regulares

Como visto anteriormente, em vista de simplificar o modelo, é possível representar uma onda para uma função mais simples, como a senoide. Para uma onda representada por uma senoide tem-se:

- Comprimento de onda, λ , a distância entre dois picos;
- Período, T , o intervalo de tempo entre dois picos;
- Frequência, f , o número de vezes que um pico ocorre em determinado intervalo de tempo;
- Amplitude, a , o deslocamento máximo em relação ao nível zero;
- Altura, H , a distância vertical máxima entre pico e vale;
- Profundidade, d , a profundidade, da superfície até o leito marinho.

Alguns dos parâmetros listados acima podem ser visualizados numa onda conforme Figura 23: Parâmetros de uma onda senoidal.

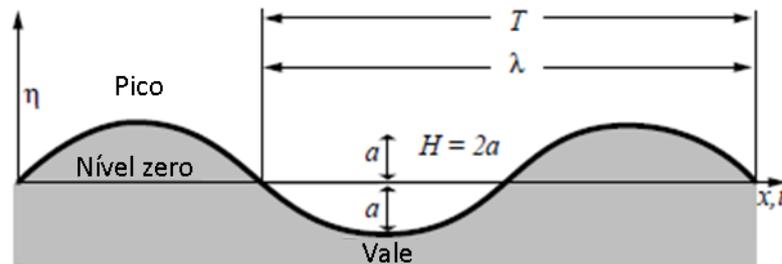


Figura 23: Parâmetros de uma onda senoidal. (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1998)

Desta forma, temos que o comprimento de onda é definido por:

$$\lambda = cT \quad 4.1$$

Onde c é a velocidade da onda. O comprimento de onda também pode ser definido em relação ao período (Det Norske Veritas, 2010). Para águas profundas, é válida a seguinte relação:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad 4.2$$

A função que representa o perfil de uma onda tem o seguinte formato:

$$\eta(x, t) = a \sin(kx - \omega t) \quad 4.3$$

A onda regular é determinística, ou seja, dados os mesmos parâmetros, o perfil da onda será sempre o mesmo.

4.1.4.1 Altura Máxima de Onda

Um dos parâmetros importantes para avaliação de atividades offshore é a altura máxima de onda. Para tal serão utilizadas neste trabalho as informações fornecidas pela DNV GL de práticas recomendadas. A modelagem de ondas regulares é abordada na DNV-RP-C205 (Det Norske Veritas, 2010), cujo título em tradução livre é Condições Ambientais e Carregamentos Ambientais.

A altura máxima de uma onda regular é limitada pela quebra da mesma. Segundo (Det Norske Veritas, 2010) a altura máxima de onda é encontrada pela fórmula abaixo:

$$\frac{H_B}{\lambda} = 0,142 \tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \quad 4.4$$

4.1.4.2 Altura Máxima Em Um Mar Estacionário

Segundo a DNV GL uma prática corriqueira em análises hidrodinâmicas é assumir que estados de mar são estáveis em períodos de até de 20 minutos até 6 horas (Det Norske Veritas, 2010). Este tipo de premissa se chama estado de mar estacionário. O mesmo pode ser definido em três características:

- H_s = Altura significativa de onda. A média de altura do maior terço de ondas durante um período;
- T_p = Período de pico. O inverso da frequência de maior energia no espectro de onda;
- T_z = A média dos intervalos de tempo entre dois momentos sucessivos onde a onda esteve no nível médio.

A DNV GL e a *Orcina* apresentam formas de estimar a altura máxima de onda que aparecerá em um estado de mar estacionário. No manual online do *OrcaFlex*, a seguinte equação estima a máxima altura de onda em um estado de mar estacionário (Orcina, 2018):

$$H_{max} = kH_s \sqrt{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{t}{T_z}\right)} \quad 4.5$$

Onde k é um fator aplicado devido ao fato de, em um intervalo de tempo razoável, os maiores picos e vales geralmente não ocorrem seguidos. A *Orcina* recomenda um fator de 0,9

para operações de duração curta, como a deste projeto, e 1 para operações de longa duração, como um estudo de fadiga por exemplo.

A seguinte equação é oferecida na DNV-RP-C205 (Det Norske Veritas, 2010).

$$H_{max} = \frac{H_s}{2} \sqrt{(1 - \rho) \ln\left(\frac{t}{T_z}\right)} \quad 4.6$$

Onde ρ é o parâmetro que representa os efeitos de largura de banda. Segundo a DNV GL valores típicos variam de -0,6 a -0,75. O mesmo pode ser calculado em função de um fator chamado parâmetro de aprimoramento de pico γ , quando $1 < \gamma < 10$ (Det Norske Veritas, 2010):

$$\rho = -0,00091\gamma^3 + 0,00488\gamma^2 - 0,0525\gamma - 0,605 \quad 4.7$$

Este fator γ é empírico e deve ser calculado para a região analisada.

4.1.4.3 Teorias de Ondas Regulares

Há algumas teorias de ondas regulares usadas para definir as decisões do modelo numérico, para decidir qual teoria seguir, primeiramente devem ser conhecidos os parâmetros adimensionais que auxiliam na decisão da teoria mais adequada. Na prática recomendada da DNV GL são abordados os seguintes parâmetros (Det Norske Veritas, 2010):

Parâmetro de declividade de onda:

$$S = 2\pi \frac{H}{gT^2} = \frac{H}{\lambda} \quad 4.8$$

Parâmetro de águas rasas:

$$\mu = 2\pi \frac{d}{gT^2} = \frac{d}{\lambda} \quad 4.9$$

E o número de *Ursell*, que é calculado com os dois parâmetros anteriores:

$$U_R = \frac{S}{\mu^3} \quad 4.10$$

Tais parâmetros servem de guia para caracterizar ondas e, por consequência, norteiam o processo de modelagem.

Existem diversas teorias de modelagem de ondas regulares, entre elas pode-se citar:

- Linear (Airy);
- Expansão de Stokes;
- Cnoidal;
- Solitária;
- Stream.

Cada teoria será explicada nas próximas seções. No capítulo 5, serão definidos os parâmetros de análise e a decisão de qual onda regular optada será detalhada.

4.1.4.4 Linear

É a teoria de onda mais simples, a onda senoidal. Sua utilização tem como premissa o tamanho de onda ser muito menor que o comprimento e profundidade do oceano. Também é conhecida como *Airy*. A formulação de seu perfil já foi apresentada pela equação 4.3.

4.1.4.5 Expansão de Stokes

A expansão de ondas de Stokes é a uma expansão da superfície de elevação à potência da altura de onda linear. Portanto, uma onda de Stokes de primeira ordem é uma onda linear elevada a primeira potência, ou seja, igual a própria onda linear. Por exemplo, a formulação de uma expansão de segunda ordem é dada por:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(\theta) + \frac{\pi H^2}{8\lambda} \frac{\cosh(kd)}{\sinh^3(kd)} [2 + \cosh 2kd] \cos(2\theta) \quad 4.11$$

Onde:

$$\theta = k(x \cos(\beta) + y \cos(\beta)) - \omega t \quad 4.12$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad 4.13$$

A partir de expansões de segunda ordem, as ondas se tornam assimétricas, com picos mais agudos e vales mais compridos em relação a onda linear (*Airy*). A Figura 24 exhibe como uma onda da 5ª expansão de Stokes se demonstraria fisicamente.



Figura 24: Exemplo de perfil de onda da 5ª expansão de Stokes.

4.1.4.6 Cnoidal

A onda *cnoidal* é uma onda periódica com pico agudo separada por largos vales, onde os picos são pelo menos 73% maiores que o vale (Det Norske Veritas, 2010). A teoria foi

apresentada por Wiegel em 1960, e posteriormente aprofundada por Mallery e Clark em 1972. A mesma encontra sua aplicação para os parâmetros $\mu < 0,125$ e $U_R > 30$.

4.1.4.7 Solitária

Para ondas muito longas, onde o comprimento de uma onda *cnoidal* tende ao infinito, os vales se tornam desprezíveis, resultando em uma onda de um pico solitário. Portanto, a solitária, é um tipo de onda *cnoidal* específico para um U_R muito elevado.

4.1.4.8 Stream

A função *Stream* é um procedimento puramente numérico para aproximar o perfil de uma onda. A solução de uma função *Stream* apresenta a solução geral abaixo (Det Norske Veritas, 2010).

$$\Psi(x, t) = cz + \sum_{n=1}^N X(n) \sinh(nk(z + d) \cos(nkx)) \quad 4.14$$

Onde c é a celeridade da onda e N a ordem. Essa função tem uma extensão de validade maior comparada às teorias apresentadas anteriormente.

A Figura 25 exibe um exemplo de onda de 3ª ordem da função *Stream*,



Figura 25: Exemplo de perfil de onda da função *Stream* de 3ª ordem.

Pode-se notar na Figura 26 como, à olho nu, é imperceptível a diferença física se comparadas as ondas de Stokes e *Stream*. Isso reitera a importância das avaliações de engenharia para esses tipos de atividade, devido à presença de diversos pequenos fatores complexos.

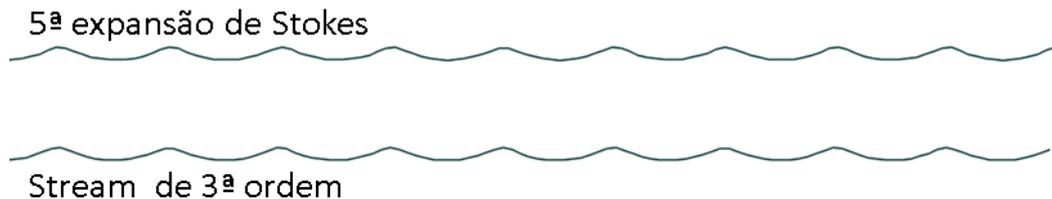


Figura 26: 5ª expansão de *Stokes* e a *Stream* de 3ª ordem.

4.1.5 Modelo Vibratório Não-Harmônico

O modelo vibratório não-harmônico, ou irregular, tenta representar a onda do oceano mais fielmente conforme ocorre na natureza. Para isso, é somado um conjunto de ondas regulares aleatoriamente, e aplicado o caminho reverso ao da Figura 20, compondo uma onda complexa. Por se tratar de uma metodologia probabilística, o processo deve ser repetido diversas vezes para garantir que o modelo foi excitado por diversas ondas complexas distintas. O modelo se torna interessante, pois apresenta uma alternativa à excitação harmônica, a qual não ocorre na natureza, porém o caráter probabilístico do processo faz com que a análise seja mais demorada.

4.1.5.1 Espectro de Onda

Como mostrado anteriormente, uma onda irregular pode ser decomposta na soma de diversas ondas regulares através da transformada de Fourier. Uma forma de visualizar a distribuição de ondas regulares formadoras de uma onda irregular é através do espectro de onda. O mesmo é a distribuição das frequências das ondas decompostas no eixo horizontal, pela densidade de energia das mesmas ondas na vertical. A densidade de energia E , é avaliada pela equação 4.15.

$$E = \frac{\rho g H^2}{8} \quad 4.15$$

Onde ρ é a densidade da água, g é a aceleração da gravidade e H a altura da onda decomposta. Também é comum encontrar espectros onde a variável do eixo vertical é apenas o quadrado da amplitude. Um espectro de onda não deve ser confundido com uma distribuição pois não mostra apenas o número de ocorrência por frequência, mas também leva em consideração a amplitude da mesma. A Figura 27 exemplifica uma onda irregular, o espectro de onda da mesma.

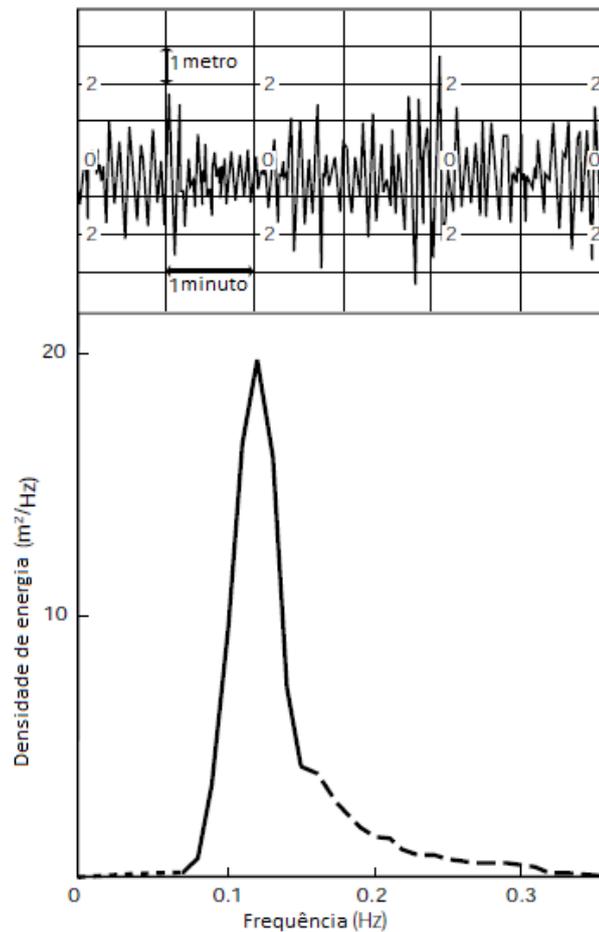


Figura 27: Onda irregular e seu espectro de onda. (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1998)

Em termos de análise de dados, o principal diferencial do espectro de ondas é ajudar a identificar quais frequências são as mais relevantes, em uma onda irregular, o que seria impossível afirmar apenas visualizando um sinal irregular.

4.1.5.2 Espectro de Pierson-Moskowitz

Desenvolvido em 1964, o espectro de Pierson-Moskowitz é um espectro empírico. A partir das premissas de que as ondas oceânicas são formadas principalmente pelos ventos, foi feita a suposição de dado um intervalo de tempo e área suficientemente grandes, sob vento constante, as ondas entrariam em equilíbrio com os ventos. Esse conjunto de premissas é chamado de mar completamente desenvolvido. Pierson e Moskowitz apresentaram espectros em relação ao vento para mares completamente desenvolvidos. Os espectros são empíricos e usaram dados medidos de embarcações britânicas no mar do Norte ao longo de 5 anos. Os espectros são apresentados na Figura 28.

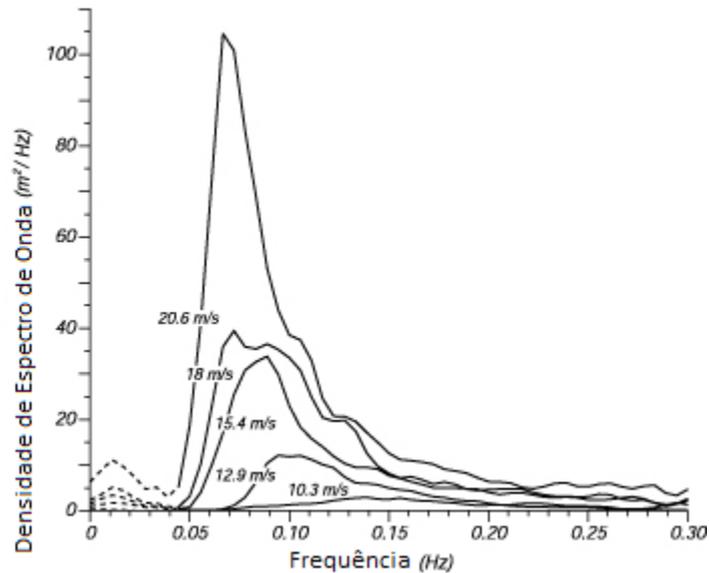


Figura 28: Espectro de Pierson-Moskowitz. (Codecoqs, 2014)

4.1.5.3 JONSWAP

O espectro de JONSWAP surgiu após a análise de dados do *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP) no ano de 1973. Neste projeto, foi observado que o mar nunca fica completamente desenvolvido, como na premissa para o espectro de Pierson-Moskowitz. Foi proposto, então, um fator de aprimoramento de pico γ para adequar o espectro de Pierson-Moskowitz aos dados medidos no JONSWAP. O efeito deste parâmetro é ilustrado na Figura 29. O espectro de JONSWAP é uma modificação empírica do espectro de Pierson-Moskowitz, logo, para um parâmetro de 1, ambos os espectros são iguais.

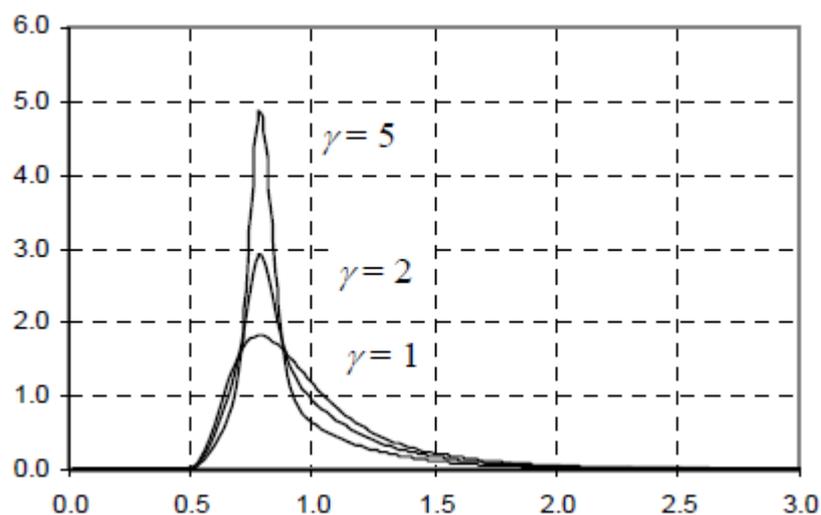


Figura 29: O espectro de JONSWAP e a influência do fator de aprimoramento de pico. (Det Norske Veritas, 2010)

Apesar de ter surgido de uma iniciativa no mar do Norte, parâmetros de aprimoramento de pico podem ser calculados para qualquer região do mundo, empiricamente.



Figura 30: Perfil de onda irregular JONSWAP gerado pelo *OrcaFlex*.

4.2 Método dos Elementos Finitos

O método numérico dos elementos finitos vem sendo amplamente utilizado em análises de estruturas, mecanismos, transferência de calor e escoamento de fluidos. O método combina diversos conceitos matemáticos para produzir sistemas com até 20000 equações lineares ou não-lineares.

Apesar de sua origem não ser bem definida, estima-se que o método exista há pelo menos 150 anos, porém só ganhou notoriedade nos anos 1950 e foi impulsionado pelos investimentos da corrida espacial nos anos 1960 (Seegerlind, 1984). Essa época coincidiu também com o avanço dos computadores, devido ao exorbitante número de operações envolvendo o método, tornou-se cada vez mais habitual o desenvolvimento de aplicações que utilizassem do método. Sua principal vantagem é a fácil aplicação em problemas com formas e condições de contorno complexas, suportando condições de regime permanente e transiente.

Apesar de muito versátil, o método é muito sensível à escolha de parâmetros. Má escolha dos mesmos pode levar desde modelos com erros grotescos, até modelos que duram semanas para concluir sua execução.

4.3 *OrcaFlex*

OrcaFlex é uma aplicação para projetos de engenharia com análise estática e dinâmica de sistemas marinhos através do método de elementos finitos. A aplicação foi desenvolvida pela *Orcina*, uma empresa localizada na Escócia, Reino Unido e a aplicação apresenta versão apenas em inglês. O *OrcaFlex* recebeu sua primeira versão no ano de 1986 e atualmente se encontra na versão 10.2c.

Um modelo no *OrcaFlex* é composto de diversos objetos, sendo apenas um obrigatório, o *Environment*, que representa as condições de contorno ambientais do modelo. Sobre este

modelo, é possível adicionar outros objetos, interligando-os entre si, de forma a montar complexos sistemas.

4.3.1 Objeto *Environment*

O objeto *Environment* define a condição sob a qual todos os outros objetos estarão. Ele é constituído de mar, corrente, ondas, leito marinho e vento. A condição de ondas é disponível apenas para a análise dinâmica, enquanto todas as outras são disponíveis para ambos os tipos de análise.

4.3.2 Objeto *Line*

O objeto *Line* é composto por elementos flexíveis lineares. Normalmente, é usado para modelar cabos, dutos, correntes e outros objetos similares, os quais chamaremos de linha.

O *OrcaFlex* constrói o objeto *Line* por um modelo de massa concentrada. Ou seja, o objeto é modelado como uma série de massas concentradas interligadas por molas sem peso, como se fossem pérolas em um colar. As massas são chamadas de nós e as molas que as interligam são chamadas de segmentos. A linha apresenta seis graus de liberdade para cada nó, sendo três de translação e três de rotação.

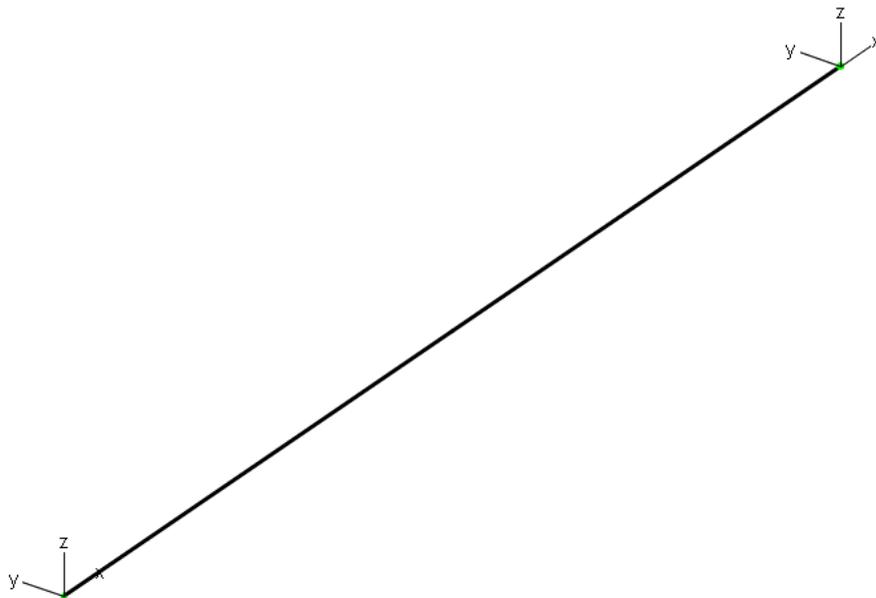


Figura 31: Objeto *Line*.

No objeto *Line*, os segmentos são retilíneos e representam um pedaço da linha, no entanto os segmentos apenas têm propriedades axiais e torcionais, todas as outras propriedades ficam concentradas nos nós. São elas massa, rigidez flexional, diâmetro, diâmetro de contato, fatores de arrasto, atrito e amortecimento. Este objeto armazena como resultado a posição, velocidade, aceleração e tensão de cada nó. Propriedades flexionais como a curvatura são calculados nos pós processamento levando em consideração posição de cada nó. Qualquer outro tipo de resultado derivado dos resultados armazenados pode ser calculado através no armazenamento, no entanto o projeto apenas foca nas tensões e curvaturas do objeto linha. A Figura 32 apresenta a modelagem do objeto *Line*.

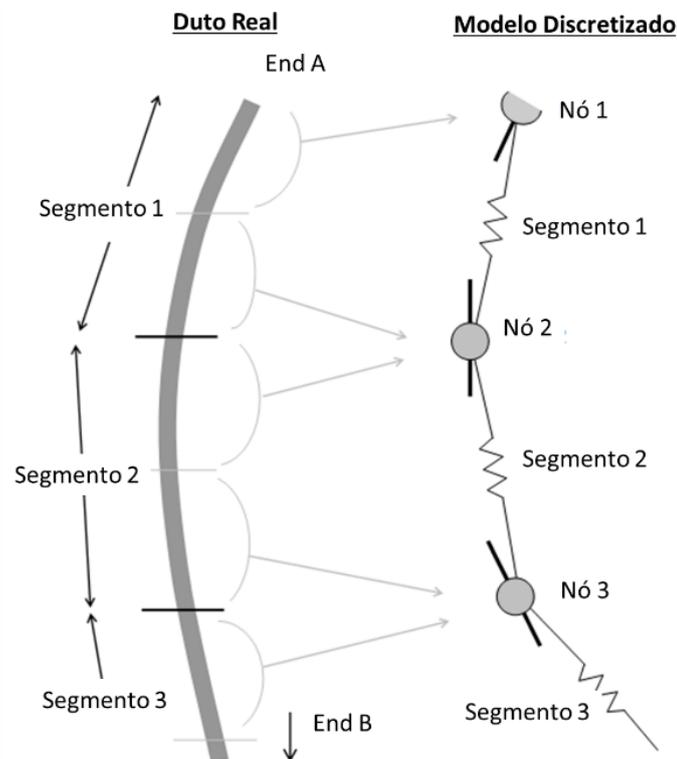


Figura 32: Modelagem do objeto *Line*. Adaptado de (Orcina, 2018)

As propriedades do *Line* são especificadas dividindo o objeto em seções. Para cada seção, é definido um comprimento, as propriedades da mesma e o número de segmentos que aquela seção terá. A Figura 33 mostra um exemplo de uma linha modelada através do objeto *Line* com 3 seções.

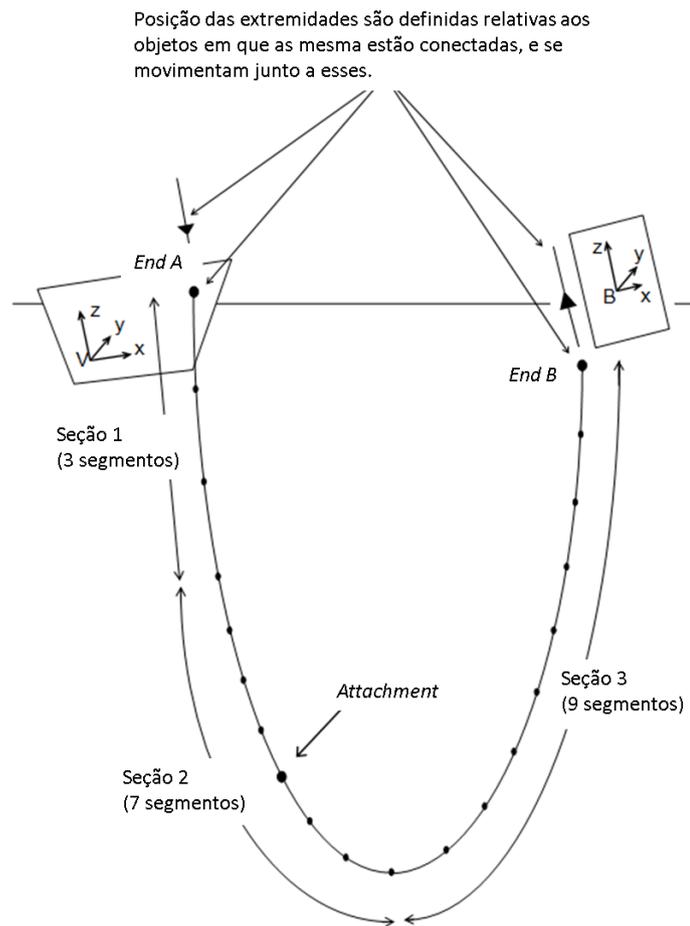


Figura 33: Modelagem de um objeto *Line*. Adaptado de (Orcina, 2018)

O *OrcaFlex* oferece ao usuário a possibilidade de reduzir os graus de liberdade de cada nó, de forma a simplificar a modelagem.

O objeto *Line Type* é um conjunto de propriedades. Para modelar um duto flexível são necessárias diversas seções com propriedades diferentes, uma vez que as propriedades de *Riser* não são as mesmas de um *Flowline*. Todos os nós e segmentos de uma seção sob um determinado *Line Type* recebem as propriedades do mesmo. Dentre essas propriedades estão:

- Propriedades geométricas (diâmetro, massa, centro de gravidade);
- Limites (tensão máxima admissível, raio mínimo de curvatura);
- Propriedades estruturais (rigidez flexional, axial e torcional);
- Coeficientes de arrasto, inércia e atrito.

As duas extremidades de uma linha são chamadas de *End A* e *End B*, podendo estar fixas, livres, ancoradas ou conectadas a outro objeto. Quando livre, a extremidade irá se posicionar e buscar sua posição de equilíbrio. Quando fixa o objeto *Line* permanece nas coordenadas específicas. Já quando conectado a outro objeto, o *Line* segue o posicionamento e do objeto especificado. Uma conexão fixa, tem apenas seus movimentos de translação

restringidos, mesmo fixa a extremidade é livre para rotacionar, ou seja, tem os movimentos de uma rótula. Já a condição ancorada tem as mesmas especificações da fixa, sendo a única diferença que a fixa é cotada em relação ao eixo global ou a um objeto, e a ancorada tem suas cotas em relação ao eixo do leito marinho.

4.3.3 Objeto *Attachment*

O objeto *Attachment* pode ser definido como um item conectado a um nó de um objeto *Line*. É normalmente utilizado para modelar pesos, correntes ou flutuadores instalados em dutos. Cada *Attachment* é definido pela sua posição no *Line* e pelo *Attachment Type*. Assim como *Line Type* define as propriedades de um *Line*, o *Attachment Type* define as propriedades de um *Attachment*. O posicionamento ideal de um *Attachment* é definido inicialmente pelo usuário, porém dependendo da quantidade de segmentações do modelo, seu posicionamento será sempre no nó mais próximo ao definido pela posição inicial. O *OrcaFlex* não oferece a possibilidade de distribuir as propriedades do *Attachment* entre os nós mais próximos de sua cota teórica, conforme método de interpolação aplicado em outros *softwares* de elementos finitos, portanto as propriedades de um nó estarão sempre localizadas em um único nó.

4.3.4 Objeto *Vessel*

Vessel é o objeto projetado para modelar principalmente embarcações e plataformas grandes o suficiente para a difração da onda ser significativa. A Figura 34 demonstra os 3 graus de liberdade de rotação e os 3 graus de liberdade de translação existentes num navio. Para analisar as implicações de um sistema de 6 graus de liberdade, é utilizado como base o operador de amplitude de resposta (RAO).

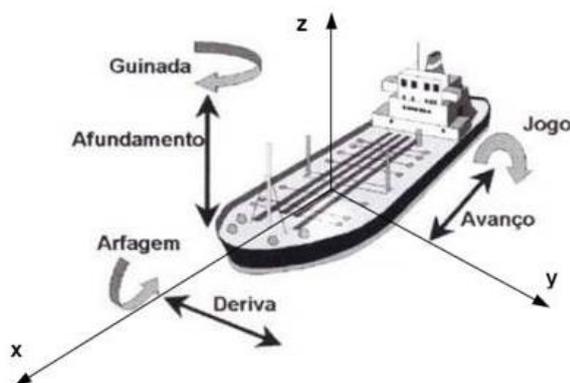


Figura 34: Seis graus de liberdade de uma embarcação. (Driemeier, 2017)

O RAO é um conjunto de dados que define o movimento do *Vessel* para determinada excitação. Ele pode ser obtido através de um programa computacional de difração, depois inserido em um *Vessel Type*. Assim como o objeto *Line Type* define as propriedades do *Line*, o *Vessel Type* define as propriedades de um *Vessel*. Existem duas categorias de RAO: por deslocamento e por carregamento de ondas. O primeiro define o movimento para grau de liberdade para uma dada combinação de período e amplitude de onda, já o segundo define a força no *Vessel* para uma dada combinação de período e amplitude de onda.

4.4 Modelo Estático

A análise estática no *OrcaFlex* tem dois objetivos: o primeiro é determinar a posição de equilíbrio do sistema, e o segundo é servir como condição inicial para a análise dinâmica. O modelo estático desse projeto será representado por:

- O objeto *Environment*, que está sempre presente e recebe as condições de contorno ambientais (profundidade e densidade do fluido);
- Um objeto *Vessel* para representar o PLSV, que receberá o nome “PLSV”;
- Um objeto *Vessel Type*, para representar as propriedades do PLSV;
- Um objeto *Line* para representar o duto flexível, que receberá o nome “Linha”;
- Outro objeto *Line Type*, para representar as propriedades de cada conector do duto flexível;
- Diversos objetos *Attachment*, para representar os flutuadores, com sua quantidade variando de acordo com o momento da instalação;
- Um objeto *Attachment Type*, para representar as propriedades do flutuador;
- Um objeto *Attachment*, para representar o peso morto, com sua presença variando de acordo com o momento da instalação;
- Um objeto *Attachment Type*, para representar as propriedades do peso morto.

Todos esses objetos interligados entre si, compõem o sistema marinho desse projeto. Baseado nos momentos da instalação comentados anteriormente, foram elaborados 6 modelos, representando 6 etapas da instalação. Estas etapas serão analisadas independentemente. Não será analisado o lançamento de linha ou movimento da embarcação no modelo entre tais etapas, mas cada uma delas, como se fossem retratos de um instante.

Enrijecedores não serão representados no modelo, uma vez que são extremamente leves se comparados ao demais. A influência dos mesmos no sistema real não é rejeitada, mas sua ausência no modelo numérico se dá com o único objetivo de simplificar a modelagem.

O modelo também despreza a torção. Como todas as análises serão feitas em regime permanente e todos os objetos estão em um mesmo plano normal ao leito marinho, os efeitos de torção se tornam desprezíveis.

4.5 Análise de Convergência

Em uma modelagem numérica, devido à grande sensibilidade do método aos parâmetros de modelagem, não é possível ter certeza se os resultados são confiáveis até uma análise de sensibilidade. Essa análise de sensibilidade visa garantir que o modelo está sendo executado dentro de um intervalo de parâmetros suficientemente discriminado de forma a atender algum critério de tolerância. Ou seja, só é possível garantir que os parâmetros corretos estão sendo usados, depois de variados os mesmos, e seus resultados contrastados, na chamada análise de convergência. A análise de convergência também pode indicar se o modelo está sendo excessivamente discriminado.

4.6 Modelo Dinâmico

O modelo dinâmico é construído a partir do modelo estático, apenas com modificação no objeto *Environment*, o qual recebe uma nova condição de contorno, as ondas. A análise pode ser feita com os seguintes métodos de solução:

- Domínio do tempo com esquema de integração explícito;
- Domínio do tempo com esquema de integração implícito;
- Domínio da frequência.

No modelo dinâmico, não serão considerados efeitos de correnteza, vento ou maré, embora todos esses fenômenos sejam impactantes na instalação, os parâmetros de ondas já representam, por si só, um grande leque de possibilidades. O limite de recursos, computacionais e de tempo, obriga a priorização de algumas escolhas. Nesse caso, entende-se que ondas representam a excitação que mais impacta na operação, portanto os parâmetros da onda devem receber mais atenção. Pode-se dizer então que o modelo é de excitação de base, pois apenas o PLSV é excitado, e esse por consequência movimentará a linha.

4.6.1 Domínio do Tempo Com Esquema de Integração Explícita

Apesar de chamar de explícito, o *OrcaFlex* utiliza um esquema de integração semi implícito de *Euler* com formulação concentrada e incremento de tempo constante. O método é chamado de semi implícito pois os valores ao final do incremento são estimados através de

cálculos feitos no início do incremento. O software calcula para cada nó e objeto do sistema a equação do movimento de *Newton* ilustrada na 4.16:

$$M(p)a = F(p, v, t) - C(p, v) - K(p) \quad 4.16$$

Onde:

M – Massa;

F – Força;

C – Amortecimento;

K – Rigidez;

p – Posição;

v – Velocidade;

a – Aceleração.

A aceleração é calculada antes começo de cada incremento de tempo, e a velocidade é obtida através da integração da aceleração, através do método semi implícito de Euler. Então para um instante t e um incremento de tempo dt a velocidade ao final do incremento é obtida por:

$$v_{t+dt} = v_t + dt(a_t) \quad 4.17$$

E a posição ao final do incremento:

$$p_{t+dt} = p_t + dt(v_t) \quad 4.18$$

Para manter a estabilidade do sistema, é necessário que o intervalo de tempo seja pequeno o suficiente para não trazer mudanças bruscas no sistema. Por essa razão valores razoáveis de incremento de tempo para este método de solução representam pequenas frações do período do menor modo de vibração do sistema.

Na busca de melhorar o desempenho desse método, o *OrcaFlex* utiliza um segundo e maior incremento de tempo, utilizado para cálculos que costumam variar menos em relação ao tempo. Ou seja, são usados dois incrementos distintos paralelamente, dependendo da natureza do parâmetro calculado. Exemplo de parâmetros que varia relativamente menos em relação ao tempo e, portanto, recebem o incremento de tempo maior são as forças hidrodinâmicas.

Como esse método se desestabiliza quando usado com um incremento de tempo grande o suficiente para trazer resultados imprecisos. É seguro dizer que sempre que uma simulação com esquema de integração explícito for estável, o resultado é confiável. Esse método é o recomendado a ser utilizado como referência em análises de sensibilidade devido a sua estabilidade na precisão de resultados. Por outro lado, como este método utiliza incremento de tempo muito pequeno, este método de solução costuma ser demorado.

4.6.2 Domínio do Tempo Com Esquema de Integração Implícita

Para a integração implícita no domínio do tempo, o *OrcaFlex* utiliza o esquema de integração de α -generalizado com formulação concentrada para solução. Assim como no caso explícito a equação do movimento de *Newton*, exemplificada na equação 4.16 é avaliada para todos os nós e objetos antes do incremento de tempo.

A diferença para o método anterior é que agora é calculada a equação do movimento do sistema ao final do incremento de tempo. Como p , v , e a são desconhecidos ao final do incremento, é feita uma solução iterativa. Por ser iterativa, cada incremento de tempo consome mais tempo para solução que o método explícito. Por outro lado, é possível utilizar incrementos de tempo muito superiores em relação ao método explícito e ainda obter análise estável, o que faz com que esse método se torne muito mais ágil, mesmo que iterativo.

O fato desse método ser estável para grandes incrementos de tempo implica em benefícios e malefícios.

- O ponto positivo é que é possível encurtar drasticamente os tempos de simulação usando incrementos largos.
- O ponto negativo se dá, pois, a simulação será estável até para modelos de grandes incrementos e pouca precisão, portanto o usuário terá dificuldade em avaliar a precisão do modelo sob uma primeira vista. Esse método de solução deve sempre passar por uma análise de sensibilidade para poder confiar em seus resultados.

Além do modelo de incremento de tempo constante *OrcaFlex* oferece também um método onde o incremento de tempo é variável. Caso o modelo se torne instável e o número de iterações para obter um resultado se eleve demais, o modelo automaticamente reduz o tamanho do incremento para evitar que a simulação fique estagnada e aborte. O contrário também é feito quando o número de iterações é baixo.

Apesar de trazer versatilidade ao modelo, a variação do incremento de tempo tende a trazer resultados espúrios à simulação.

4.6.3 Domínio da Frequência

Para a análise no domínio da frequência, é analisada a resposta do sistema para frequências de interesse em torno do resultado estático do mesmo. Como o resultado desse método não varia ao longo do tempo, o mesmo só é aplicável para soluções de problemas em regime permanente. O método de solução utilizado pelo *OrcaFlex* não compreende não-

linearidades, portanto as mesmas não podem ser inseridas no modelo. Logo, a única teoria de onda regular aceita por este método é a linear (*Airy*). A principal vantagem é a falta de necessidade de solução sequencial de incrementos de tempo, o que acaba por tornar o método extremamente veloz.

Capítulo 5

5 Parâmetros da Análise

Para esse estudo, diversos parâmetros precisaram ser estabelecidos para obtenção dos resultados. Esses dados são essenciais para obtenção dos resultados finais, portanto antes de avaliar a conclusão da análise, é importante compreender o sistema em que ela foi trabalhada.

5.1 Parâmetros do Duto Flexível

Para este projeto, serão utilizados os casos de instalação com duto flexível de 4 e 8 polegadas de diâmetro nominal. Foram considerados sistemas de 4 tramos, com 65 flutuadores na linha de 4" e 170 flutuadores na linha de 8".

No sistema de 4", cada flutuador tem 2 toneladas-força de empuxo e o peso morto pesa 40 toneladas-força na água. No de 8" cada flutuador tem empuxo de 4 toneladas-força e o peso morto pesa 80 toneladas-força na água.

A seguir, serão exibidas na Tabela 1 e Tabela 2 as informações relevantes para ambos os tipos de dutos, sendo considerados conectores de 1320 mm de comprimento e 400 kg nos tramos da Dados relevantes do duto flexível de 4". e 2000 mm e 1500 kg para os tramos da Dados relevantes do duto flexível de 8". A rigidez flexional representa a resistência a flexão do duto, enquanto a axial a resistência a tração. Não serão considerados efeitos de torção no estudo, portanto a rigidez à torção não precisa ser informada. As características do sistema foram propostas pelos autores de forma a representar dois sistemas extremos.

Tabela 1: Dados relevantes do duto flexível de 4".

Sistema de Diâmetro Nominal 4"					
Tramo	Rigidez Flexional [kN/m ²]	Rigidez Axial [MN]	Peso Cheio na Água [kg/m]	Raio de Curvatura Mínimo para Instalação [m]	Comprimento [m]
<i>Riser</i> de Topo	15	1000	78	2,1	400
<i>Riser</i> intermediário	10	500	40	1,95	1640
<i>Riser</i> de Fundo	5	250	45	1,8	1060
<i>Flowline</i>	5	250	32	1,65	1670

Tabela 2: Dados relevantes do duto flexível de 8".
Sistema de Diâmetro Nominal 8"

Tramo	Rigidez Flexional [kN/m ²]	Rigidez Axial [MN]	Peso Cheio na Água [kg/m]	Raio de Curvatura Mínimo para Instalação [m]	Comprimento [m]
<i>Riser de Topo</i>	265	2500	220	3.75	450
<i>Riser intermediário</i>	250	1300	170	3.6	1400
<i>Riser de Fundo</i>	250	850	170	3.3	1220
<i>Flowline</i>	200	850	160	3.15	950

Os modelos têm suas extremidades superiores fixas no PLSV, conforme ilustrado na Figura 35.

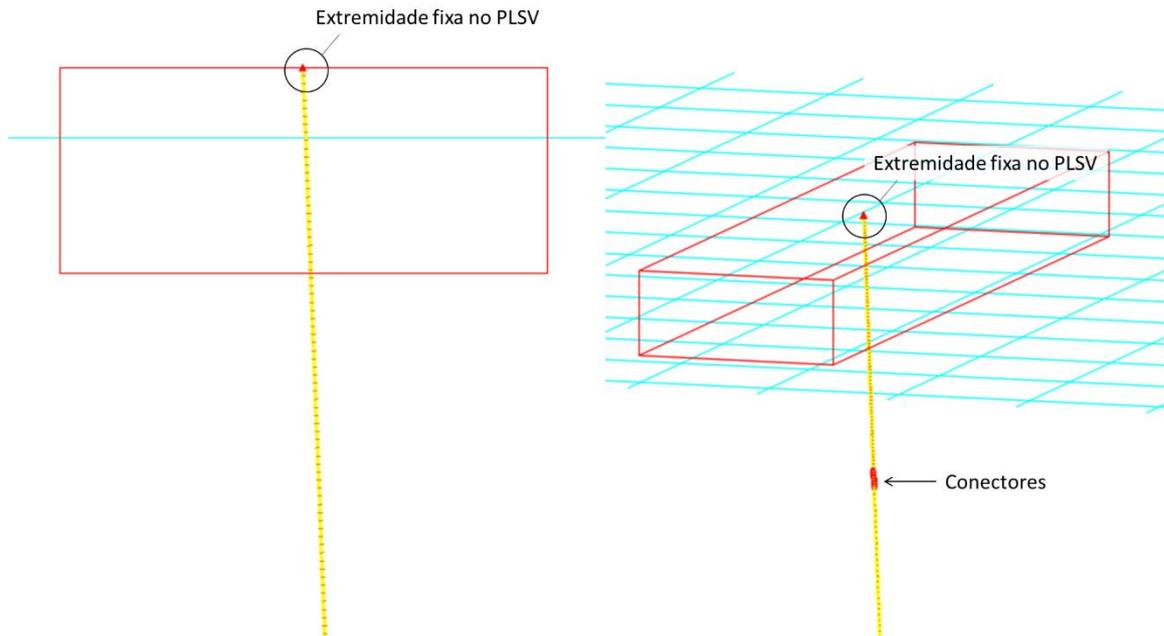


Figura 35: Conexão da extremidade superior do duto no modelo.

A Figura 36 exibe duas vistas diferentes da situação onde a extremidade inferior do modelo se encontra ancorada no leito.

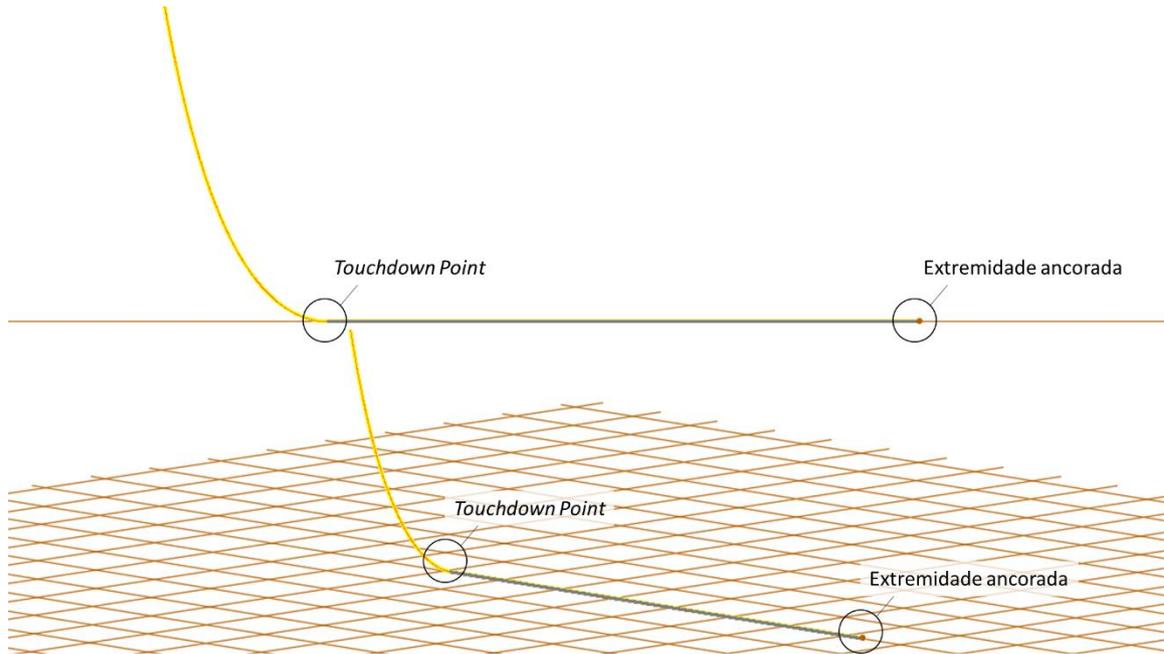


Figura 36: Conexão da extremidade inferior do modelo.

5.1.1 Instalação de Flutuadores (Etapa 0)

Nesta etapa, há presença de poucos flutuadores ainda próximos ao PLSV. A linha deve ficar próxima à vertical para a instalação de flutuadores. Por causa do empuxo dos flutuadores, a tensão máxima não ocorre na conexão do PLSV, mas logo abaixo dos flutuadores. Como na maioria dos modelos, a tensão mínima e o raio de curvatura ocorrem no TDP.

Da Figura 37 até a Figura 42, serão exibidos os modelos de ambos os dutos, sendo o modelo de 4" à esquerda e o de 8" à direita. A linha está na cor amarela, enquanto os flutuadores são a marcação rosa na linha de 4" e azul na linha de 8". Neste passo há 10 flutuadores no sistema de 4" e apenas um no sistema de 8"

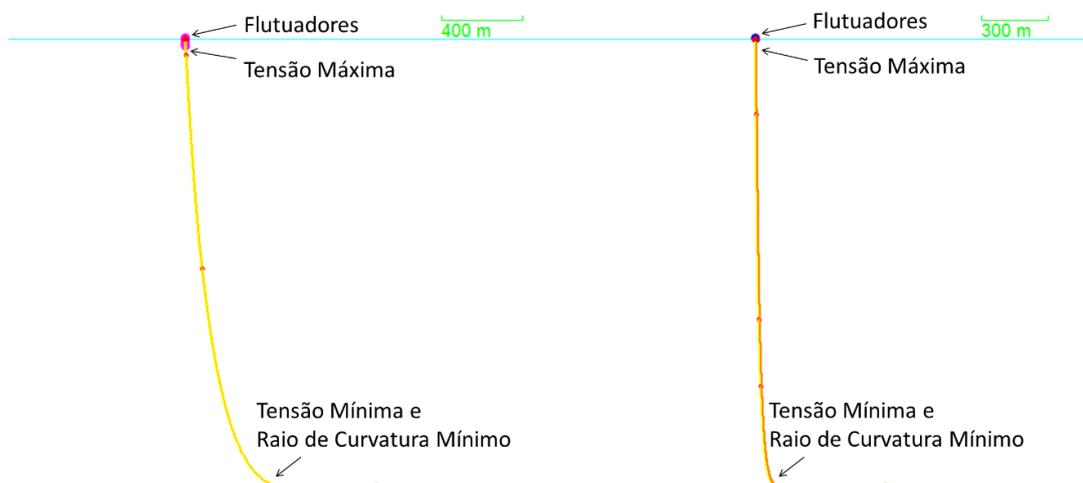


Figura 37: Modelos da instalação de flutuadores (etapa 0).

5.1.2 Preparação para Instalação de Peso Morto (Etapa 1)

Nesta etapa, tem-se 20 flutuadores já instalados no sistema de 4" e 94 no sistema de 8", sendo este o momento ideal para colocação do peso morto para evitar maiores esforços de compressão no duto. A inclinação de topo da linha é alta, para garantir que o PLSV não esteja na projeção vertical da cota onde será instalada o peso morto, e assim possibilitar o acesso pela embarcação de apoio para instalar o peso.

Devido ao trecho de linha acima dos flutuadores, a tensão máxima ocorre não mais abaixo dos mesmos, mas na conexão com o PLSV. A tensão mínima e raio de curvatura continuam no mesmo ponto, exceto para o sistema de 4". Neste há uma conexão de tramos próxima à região do TDP. A inclinação da conexão e a transição brusca de rigidez e peso da seção do conector para o da seção da linha criam esforços fletores que levam com que o menor raio de curvatura do sistema ocorra ali. Esse fenômeno não ocorre no sistema de 8" pois a conexão se encontra em uma região menos inclinada e os esforços na interface entre conexão-linha são majoritariamente axiais.

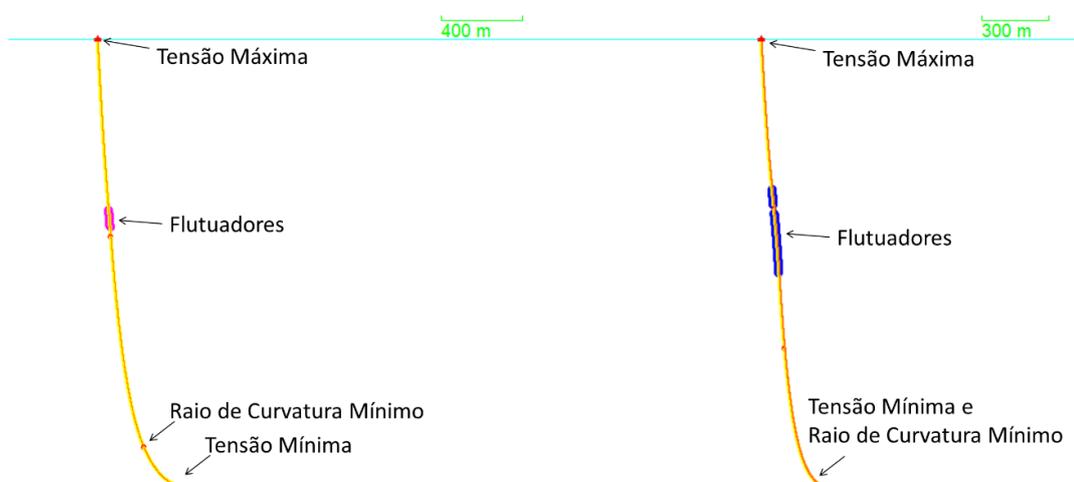


Figura 38: Modelos preparação para instalação de peso morto (etapa 1).

5.1.3 Instalação de Peso Morto (Etapa 2)

Estes modelos representam os momentos logo após a instalação do peso morto pelo barco de apoio, a inclinação no topo ainda é alta, mas agora o peso morto já está presente. Esse modelo tem o mesmo comprimento de linha lançada e quantidade de flutuador que o anterior. Na Figura 39, o peso morto é representado na cor vermelha no duto de 4" e azul claro no de 8". Ambos ficam próximos à conexão entre tramos logo abaixo da região de flutuadores.

Os pontos de tensão máxima e mínima continuam o mesmo, mas para ambos os sistemas o raio de curvatura mínima passou a ocorrer próximo a região do peso morto. Isso acontece porque o peso morto representa uma massa concentrada com força resultante no eixo vertical. Como a linha encontra-se inclinada em relação ao eixo vertical, essa força resultando gera esforços fletores na seção de linha mais próxima, curvando-a.

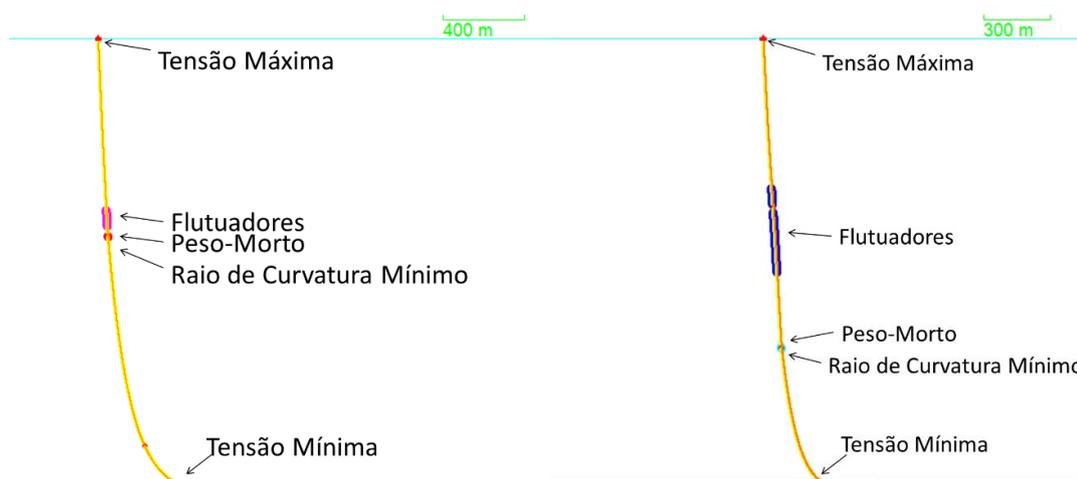


Figura 39: Modelos para instalação de peso morto (etapa 2).

5.1.4 Lançamento com Peso Morto (Etapa 3)

Os próximos modelos representam o lançamento de linha com a presença do peso morto. O PLSV recolhe linha até chegar a parte onde havia interrompido a instalação de flutuadores para continuar instalando mais. O modelo apresenta a situação onde o último flutuador acabou de ser instalado. Portanto, no sistema de 4" há 66 flutuadores instalados, já no sistema de 8" há 171 flutuadores.

Por estar mais próxima do eixo vertical, a força resultante do peso morto parte dos esforços fletores gerados pelo peso morto na etapa anterior, sendo estes agora esforços axiais. Por causa disso, o raio de curvatura mínimo do sistema deixa de ser nesta região e volta a se localizar no TDP. A tensão máxima também volta a se localizar logo após a região de flutuadores.

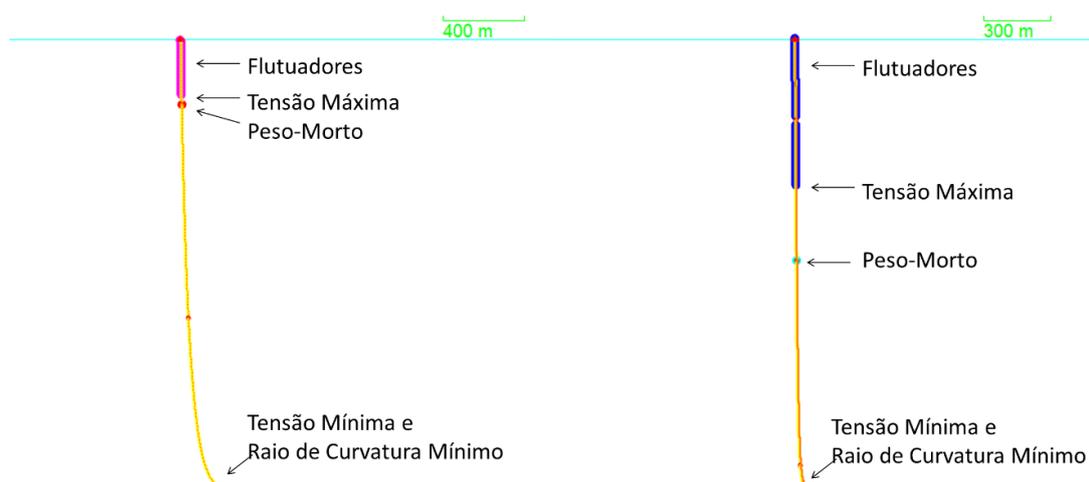


Figura 40: Modelos para lançamento com peso morto (etapa 3).

5.1.5 Preparação para Desinstalação do Peso Morto (Etapa 4)

Nesta etapa, todos os flutuadores já estão presentes e é necessário garantir que a inclinação da linha seja mais acentuada para permitir o acesso do barco de apoio, da mesma forma que na etapa 2.

Pela mesma razão da descrita na etapa 3, a inclinação da linha faz com que o raio de curvatura mínimo volte a aparecer na região de peso morto. A tensão máxima aparece em locais distintos entre os modelos. No de 4" há um grande trecho de duto acima da região dos flutuadores, que estão em menor quantidade em relação ao modelo de 8", ou seja, além do empuxo total ser relativamente baixo, há uma grande quantidade de duto flexível para ser suportado pelo PLSV, obtendo a tensão máxima no topo. Já para o sistema de 8", tem-se a situação oposta, pois tem-se uma maior quantidade de flutuadores abaixo de um menor trecho de duto. Desta forma, os flutuadores suportam a maior parte do peso do sistema, fazendo com que a tensão máxima ocorra abaixo dos mesmos.

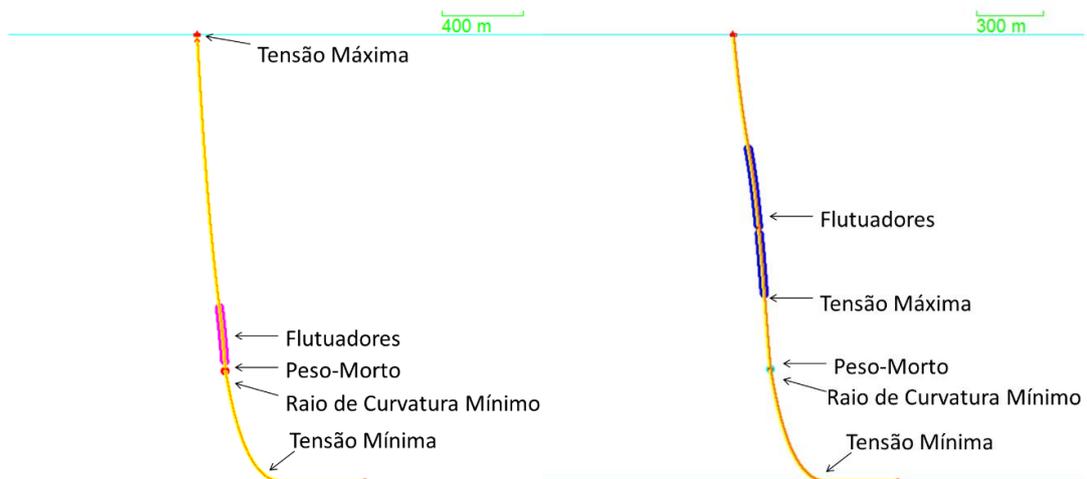


Figura 41: Modelos para preparação para desinstalação de peso morto (etapa 4).

5.1.6 Desinstalação do Peso Morto (Etapa 5)

No último passo, logo após a desinstalação do peso morto, ocorre uma grande força resultante vertical para cima. A inclinação da linha faz com que os esforços sejam fletores, curvando a mesma, fazendo com que o raio de curvatura mínimo ocorra logo acima da região de flutuadores, e marcando o começo da formação da característica corcova que marca os sistemas *Lazy Wave*. As tensões máximas e mínimas continuam ocorrendo nos mesmos locais da etapa anterior.



Figura 42: Modelos para desinstalação de peso morto (etapa 5).

5.2 Parâmetros Ambientais

Os parâmetros indicados na Tabela 3 serão tratados nas análises dinâmicas.

Tabela 3: Dados ambientais.

Densidade da Água [ton/m ³]	Profundidade (Caso 4'') [m]	Profundidade (Caso 8'') [m]
1,025	2220	2010

Para as análises dinâmicas, foram considerados os registros da Bacia de Campos, para facilitar a visualização dos dados, tem-se na Figura 43 a distribuição de ondas por altura e período. Tons mais escuros no gráfico representam maior números de ocorrências.

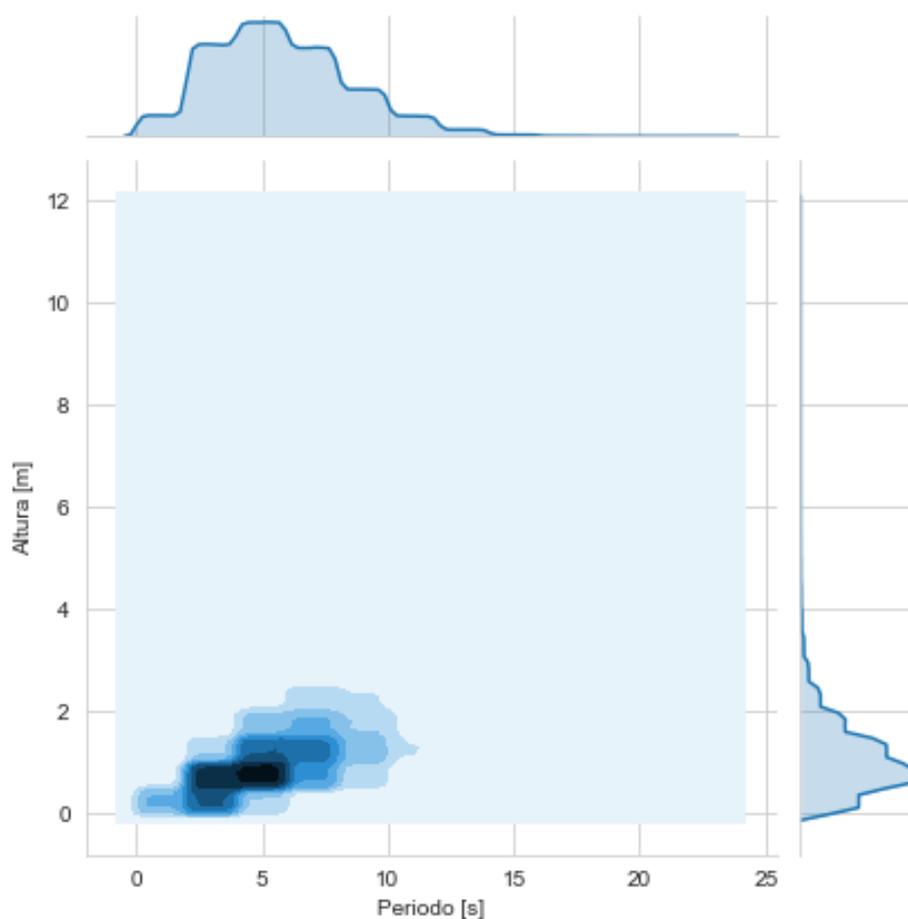


Figura 43: Distribuição de altura e período de onda da bacia de Campos.

Diferente da condição de operação do duto na plataforma, as instalações são realizadas em intervalos de tempos curtos, logo as análises da mesma não precisam considerar ondas extremas. Caso encontre condições extremas, a operação pode ser interrompida e retomada

quando as mesmas forem favoráveis. Um intervalo de confiança de 99,5% sobre a distribuição de ondas garantirá que estes casos que não farão parte das operações não sejam cobertos desnecessariamente nas simulações.

Determinando numericamente, e trabalhando com um intervalo de confiança para realização das análises em que a altura máxima de onda será 4m e o período máximo será 14s, temos englobados 99,5% dos casos possíveis, diminuindo a quantidade de tempo utilizado para o processamento dos cálculos.

5.3 Parâmetros de Mar

A Figura 44 apresenta a altura de onda máxima possível antes da mesma quebrar para os períodos dentro do intervalo de confiança escolhido, pela hipótese de águas profundas. É notável que as duas profundidades analisadas nesse estudo são próximas demais para implicar em qualquer diferença na profundidade máxima. Ao ponto de, no gráfico, os dados de ambas profundidades se sobreporem.

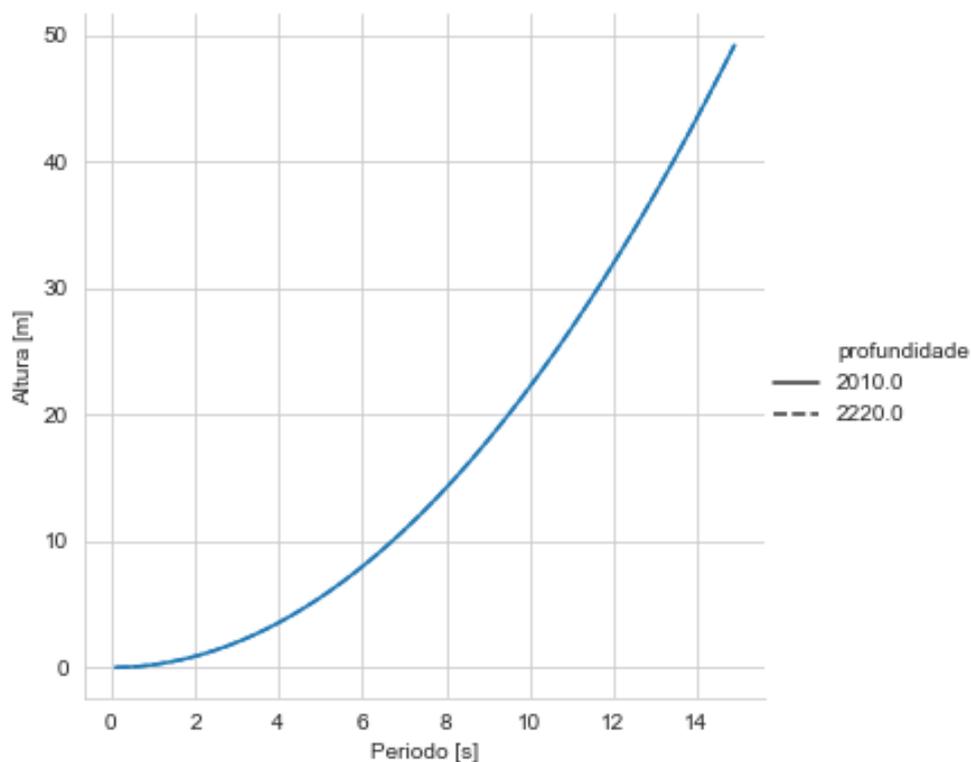


Figura 44: Altura Máxima de Onda por Período em Águas Profundas

A Figura 45 apresenta o comprimento de onda para cada período sob a hipótese de água profunda.

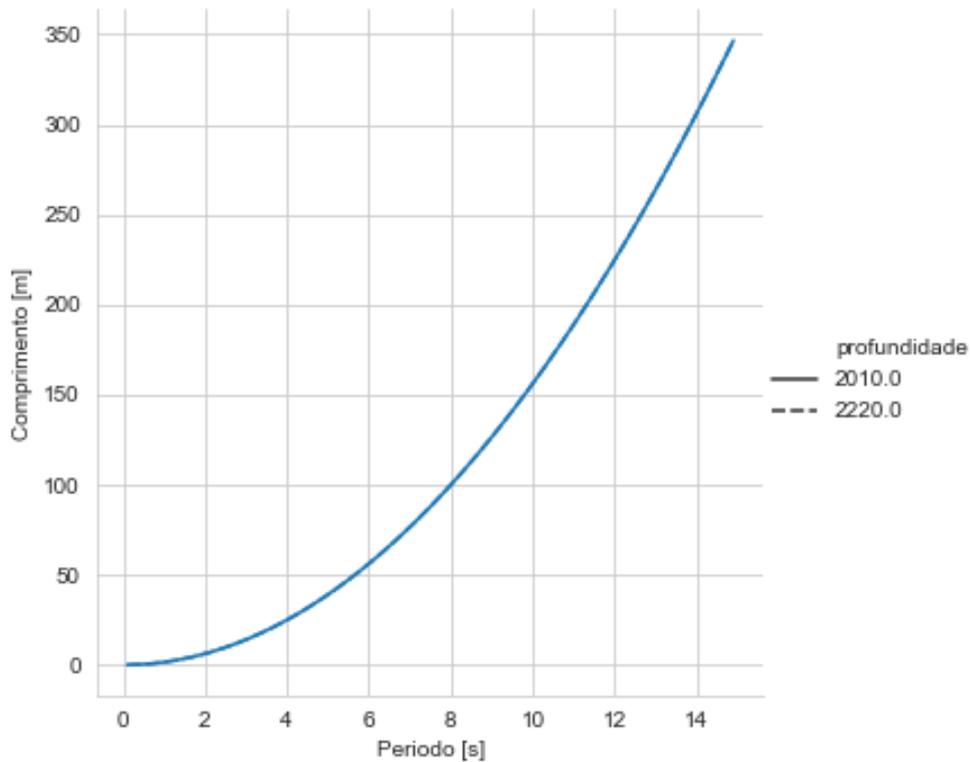


Figura 45: Comprimento de Onda por Período em Águas Profundas

O intervalo de períodos avaliado será desde 6 s até 14 s, pois todos são capazes de gerar ondas possíveis para a altura significativa de 4 s. Para períodos menores tais ondas se tornam impossíveis.

5.3.1 Dimensionamento da Altura de Onda Máxima.

A premissa de duração utilizado para o dimensionamento da maior onda será de estabilidade por 3 horas, pois é o meio da faixa apresentada pela DNV GL em sua prática recomendada. (Det Norske Veritas, 2010).

Primeiramente é necessário estimar T_z . A relação entre o mesmo e T_p é dependente das condições meteoceanográficas e devem ser avaliadas para cada caso. No caso deste estudo, bacia de Campo (Petrobras, 2005), essa relação é:

$$T_z = T_p \sqrt{\frac{5 + \gamma}{10,89 + \gamma}} \quad 5.1$$

Onde γ é o parâmetro de aprimoramento de pico, é fornecido pelo Metocean da Bacia de Campos para períodos em segundos (Petrobras, 2005):

$$\gamma = 6,4T_p^{-0,491} \quad 5.2$$

Para a variação de período do estudo γ varia de:

$$\gamma = 6,4(6)^{-0,491} \cong 1,752$$

Até

$$\gamma = 6,4(14)^{-0,491} \cong 2,655$$

Consequentemente, T_z varia de :

$$T_z = (6 \text{ s}) \sqrt{\frac{5 + (1,752)}{10,89 + (1,752)}} \cong 4,385 \text{ s}$$

Até:

$$T_z = (14 \text{ s}) \sqrt{\frac{5 + (2,655)}{10,89 + (2,655)}} \cong 10,525 \text{ s}$$

Pela equação 4.5, a altura de onda máxima em um mar estacionário por 3 horas seria de:

$$H_{max} = (0,9)(4 \text{ m}) \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{10800 \text{ s}}{10,525 \text{ s}} \right)} \cong 6,70 \text{ m}$$

Até

$$H_{max} = (0,9)(4 \text{ m}) \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{10800 \text{ s}}{4,385 \text{ s}} \right)} \cong 7,11 \text{ m}$$

Outra abordagem para a altura de onda máxima é a equação 4.6. Porém antes de ser avaliado, é necessário calcular o parâmetro de largura de banda ρ pela equação 4.7. Esta equação só é válida para $1 < \gamma < 10$. O parâmetro de aprimoramento de pico, já foi calculado e se encontra dentro deste intervalo para todos os casos.

Logo, ρ irá variar de:

$$\rho = -0,00091(1,752)^3 + 0,00488(1,752)^2 - 0,0525(1,752) - 0,605 \cong -0,683$$

$$\rho = -0,00091(2,655)^3 + 0,00488(2,655)^2 - 0,0525(2,655) - 0,605 \cong -0,714$$

Desta forma, é possível estimar agora a altura máxima no período pela 4.6 que varia de:

$$H_{max} = \frac{4 \text{ m}}{2} \sqrt{(1 + 0,683) \ln \left(\frac{10800 \text{ s}}{10,525 \text{ s}} \right)} \cong 6,83 \text{ m}$$

Até:

$$H_{max} = \frac{4 \text{ m}}{2} \sqrt{(1 + 0,714) \ln \left(\frac{10800 \text{ s}}{4,385 \text{ s}} \right)} \cong 7,32 \text{ m}$$

De forma a simplificar os parâmetros de análise dinâmica, e pela proximidade dos valores será utilizado apenas uma equação de altura máxima nas simulações. A altura escolhida

é a apresentada pela DNV GL na equação 4.6, pois esse caso resultou nas maiores alturas. A razão H_{max}/H_s para esse caso varia aproximadamente de 1,71 até 1,83.

5.4 Aplicabilidade das Teorias de Onda Regular

Na DNV-RP-C205 (Det Norske Veritas, 2010) é apresentada a Figura 46 para guiar a seleção da teoria de onda mais aplicável.

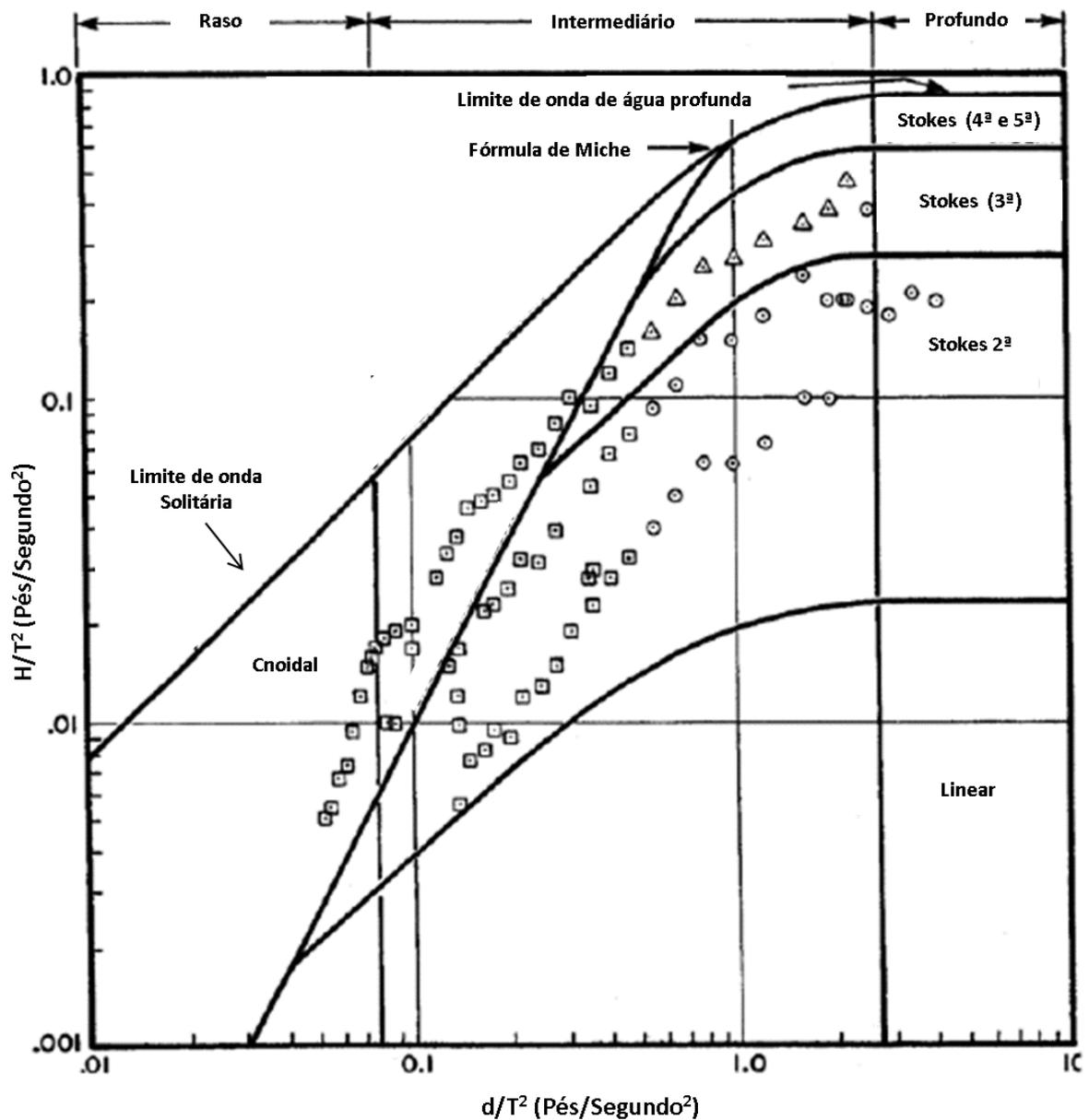


Figura 46: Intervalos de validade de diversas teorias de onda regular. (Det Norske Veritas, 2010)

Será utilizado um intervalo de altura máxima em mar estacionário desde a menor das alturas máximas calculadas, até a maior delas. Fazendo isso garante-se que está cobrindo maior intervalo de casos possíveis. O intervalo de períodos será de 6 s até 14 s o valor do eixo horizontal desse gráfico será de:

$$\frac{d}{T^2} = \frac{(2010 \text{ m})(3,28 \text{ pés/m})}{(14 \text{ s})^2} \cong 33,6 \text{ pés/s}^2 \quad 5.3$$

Até:

$$\frac{d}{T^2} = \frac{(2220 \text{ m})(3,28 \text{ pés/m})}{(6 \text{ s})^2} \cong 202,3 \text{ pés/s}^2 \quad 5.4$$

Que extrapola a figura, já para o eixo vertical será de:

$$\frac{H}{T^2} = \frac{(6,70 \text{ m})(3,28 \text{ pés/m})}{(14 \text{ s})^2} \cong 0,1 \text{ pés/s}^2 \quad 5.5$$

Até:

$$\frac{H}{T^2} = \frac{(7,32 \text{ m})(3,28 \text{ pés/m})}{(6 \text{ s})^2} \cong 0,7 \text{ pés/s}^2 \quad 5.6$$

O alto valor encontrado para o eixo horizontal reforça as condições extremas encontradas na costa brasileira. Considerando o comportamento das curvas do gráfico como assíntotas, é possível afirmar que a modelagem mais adequada é a expansão de Stokes.

O mesmo conjunto de práticas recomendadas também apresenta a Figura 47 para auxiliar na seleção de teoria, porém dessa vez levando em consideração a função *Stream* e suas ordens.

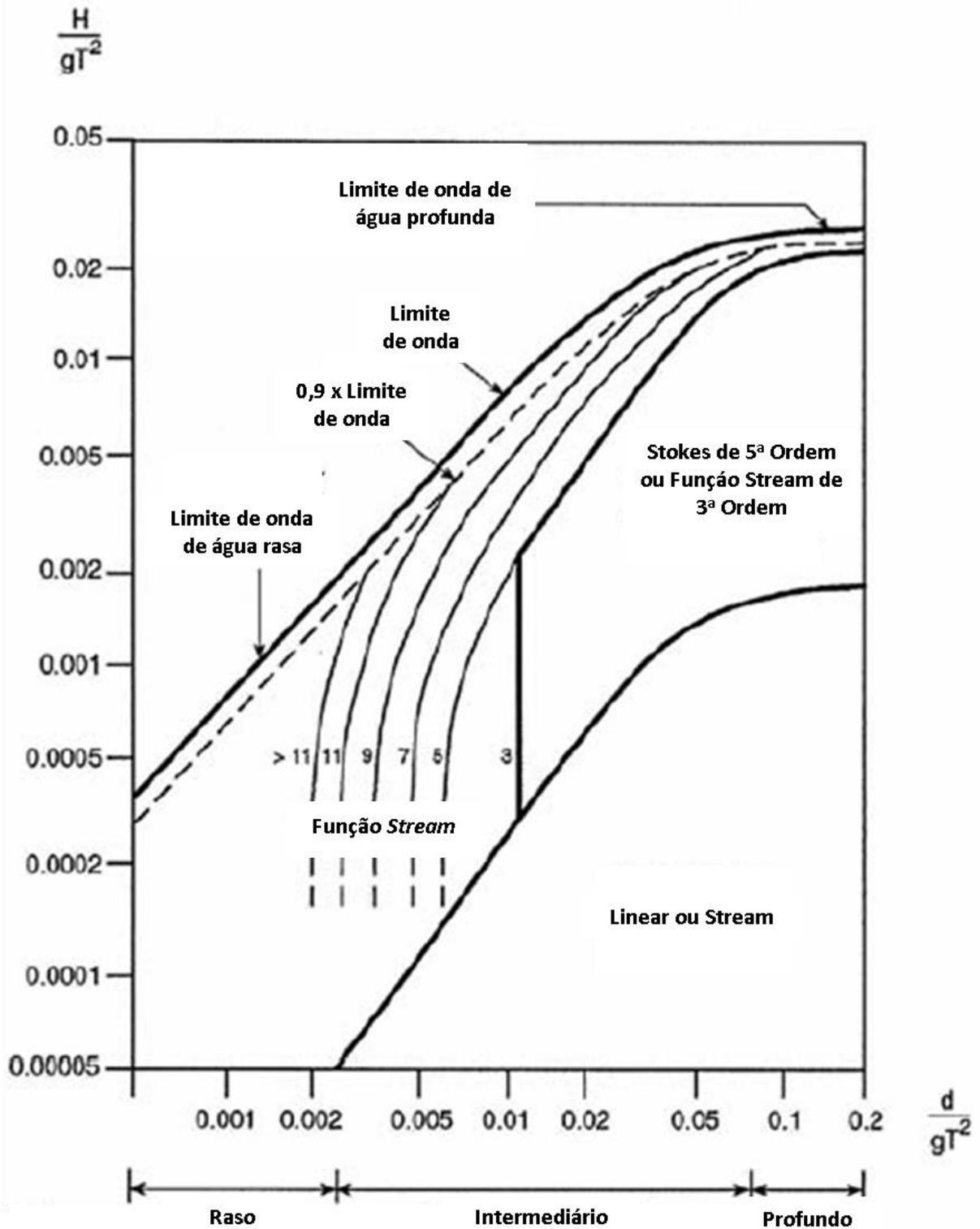


Figura 47: Aplicabilidade das teorias da expansão de Stokes ou *Stream*.

Novamente, com as condições médias da bacia, o valor do eixo horizontal desse gráfico será de:

$$\frac{d}{T^2} = \frac{(2010 \text{ m})}{(9.80665 \text{ m/s}^2)(14 \text{ s})^2} \cong 1,0$$

5.7

Até

$$\frac{d}{T^2} = \frac{(2220 \text{ m})}{(9.80665 \text{ m/s}^2)(6 \text{ s})^2} \cong 6,3 \quad 5.8$$

Que extrapola a figura, já para o eixo vertical será de:

$$\frac{H}{T^2} = \frac{(6,70 \text{ m})}{(9.80665 \text{ m/s}^2)(14 \text{ s})^2} \cong 0,003 \quad 5.9$$

Até:

$$\frac{H}{T^2} = \frac{(7,32 \text{ m})}{(9.80665 \text{ m/s}^2)(6 \text{ s})^2} \cong 0,02 \quad 5.10$$

Novamente, a condição ultra profunda brasileira extrapola o gráfico. Supondo que as linhas que delimitam as teorias são assíntotas, é possível afirmar que a modelagem mais adequada é a expansão de Stokes de quinta ordem ou *Stream* de terceira ordem.

Já a *Orcina*, desenvolvidora da aplicação que será utilizada para as simulações, faz outra recomendação para determinação da teoria de onda aplicável. Segundo a *Orcina*, para número de *Ursell* muito menores que 40, conhecidas como ondas curtas as teorias *Stream* ou Stokes de quinta ordem seriam adequadas. Para número de *Ursell* próximo a 40, deve-se usar a teoria *Stream*. Já para número de *Ursell* muito maior que 40, conhecidas como ondas longas as teorias *Stream* ou *Cnoidal* deveriam ser aplicadas.

A DNV GL também apresenta uma quarta recomendação de grande semelhança à fornecida pela *Orcina* em suas práticas recomendadas, onde para número de *Ursell* inferiores a 30 seria recomendada a teoria de expansão de Stokes ou *Stream*. Valores próximos a 30 apenas a teoria de *Stream* seria adequada e quando maior que 30, a teoria *Cnoidal* ou *Stream* deveria ser aplicada.

$$U_R = \frac{S}{\mu^3} = \frac{\left(\frac{2\pi gH}{T^2}\right)}{\left(\frac{2\pi gd}{T^2}\right)} \quad 5.11$$

Para as condições apresentadas no presente estudo, é calculado o número de *Ursell*, que varia de:

$$U_R = \frac{S}{\mu^3} = \frac{\left(\frac{2\pi gH}{T^2}\right)}{\left(\frac{2\pi gd}{T^2}\right)} = \frac{\left(\frac{2\pi(9.80655 \text{ m/s}^2)(6,70 \text{ m})}{6^2}\right)}{\left(\frac{2\pi(9.80655 \text{ m/s}^2)(2010 \text{ m})}{6^2}\right)} \cong 4,0 * 10^{-7}$$

Até:

$$U_R = \frac{S}{\mu^3} = \frac{\left(\frac{2\pi gH}{T^2}\right)}{\left(\frac{2\pi g d}{T^2}\right)} = \frac{\left(\frac{2\pi(9.80655 \text{ m/s}^2)(7,32 \text{ m})}{6^2}\right)}{\left(\frac{2\pi(9.80655 \text{ m/s}^2)(2010 \text{ m})}{6^2}\right)} \cong 4,7 * 10^{-4} \quad 5.12$$

O resultado de um valor muito próximo a zero, confirma novamente que a teoria da expansão de Stokes de quinta ordem e *Stream* se mostraram adequadas.

Todas as recomendações convergem para a teoria da expansão de Stokes ou função *Stream*. Apenas na Figura 46 a recomendação foi de uma expansão de Stokes de segunda ordem. Enquanto em todas as outras a expansão de quinta ordem é apresentada como mais adequada. No entanto o *OrcaFlex* oferece a expansão de Stokes apenas na quinta ordem. Das três recomendações que apontaram a teoria de *Stream*, apenas uma especificou a ordem, no caso, a terceira ordem.

Serão, portanto, analisadas as teorias de quinta ordem de Stokes e a função de terceira ordem de *Stream* para ondas regulares.

5.5 Teoria de Onda Irregular

As análises de onda irregular serão feitas utilizando a teoria de JONSWAP. Essa é a única cujo os parâmetros são fornecidos pelo conjunto de dados da Bacia de Campos, logo, a única possível.

O parâmetro de aprimoramento de pico utilizado será o apresentado na equação 5.2. E a relação T_z/T_p já foi mostrada na equação 5.1.

Capítulo 6

6 Modelagem

6.1 Análise de Convergência do Modelo Estático

Em busca do melhor balanço entre desempenho e resultado elaborou-se uma análise de convergência do modelo estático. Foram gerados casos com diferentes segmentações uniformes foi utilizada para cada uma das etapas da instalação identificada, e ambos os sistemas avaliados. A Figura 48 exemplifica como ocorre a segmentação na análise de convergência estática. Cada traço vermelho indica a localização de um nó no modelo.

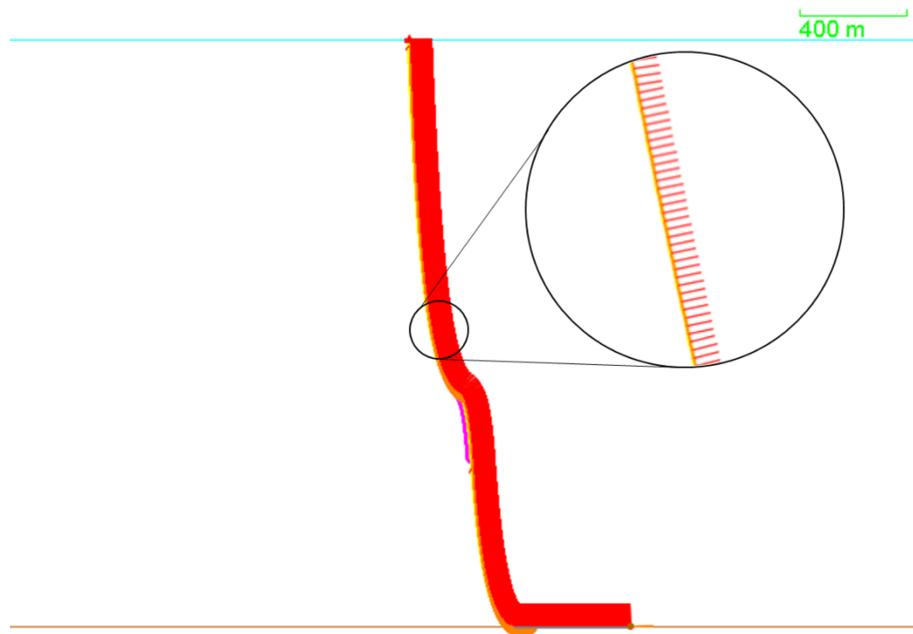


Figura 48: Malha uniforme.

Esses casos foram simulados e os resultados de tensão máxima, tensão mínima e raio de curvatura mínimo ao longo de toda linha foi extraído.

A premissa adotada é que o modelo com menor tamanho de segmento apresenta o resultado mais preciso, e todas as outras foram comparadas a essa. Foi escolhido um intervalo

começando em 0,1m até 10m, variando em 0,1m entre casos, totalizando 100 simulações, por etapa de instalação.

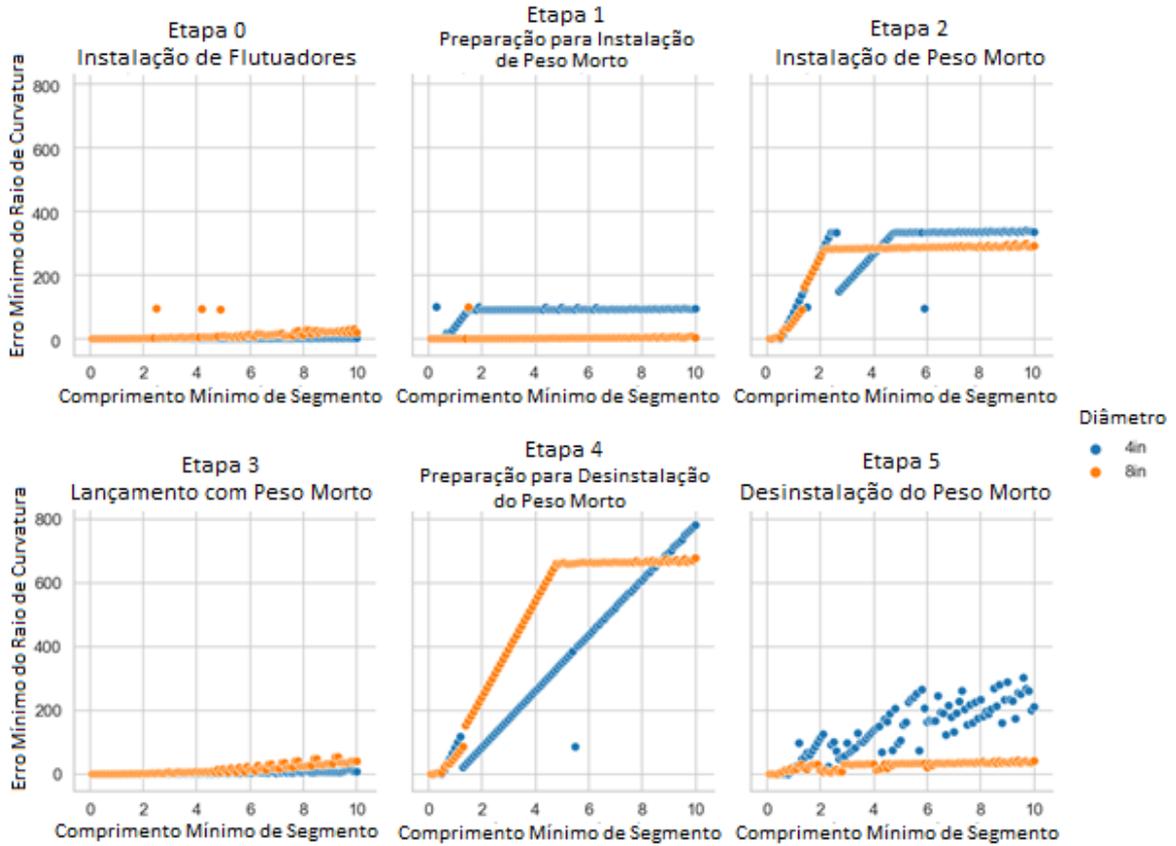


Figura 49: Análise de convergência estática do raio de curvatura mínimo

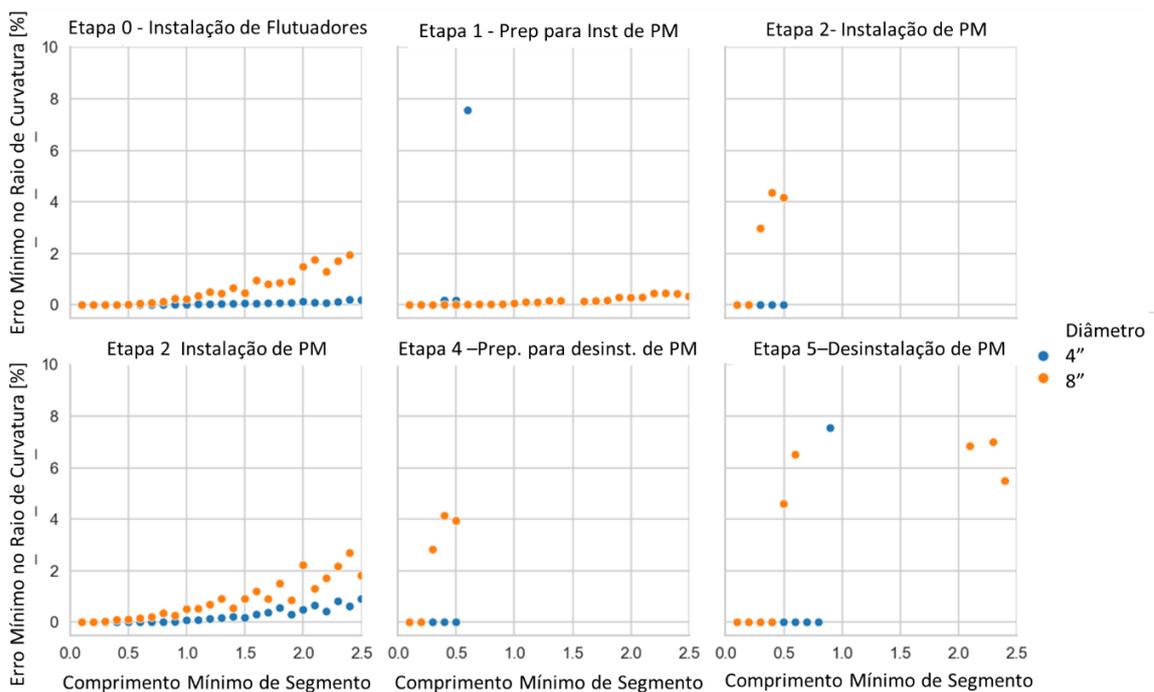


Figura 50: Análise de convergência estática do raio de curvatura mínimo. (Zona de convergência)

O próximo passo é determinar a tolerância para o modelo. Para isso é preciso avaliar o impacto na atividade.

Para uma tensão máxima, onde os valores são de grande magnitude, pequenas variações percentuais representam grandes variações absolutas que acarretam em grande impacto na instalação. Uma tensão máxima mal avaliada representa riscos aos trabalhadores do PLSV, risco a embarcação e seus equipamentos e por fim risco ao duto e seus acessórios. Portanto, a mesma receberá a menor tolerância dentre todos os resultados.

Erros na tensão mínima e no raio de curvatura mínimo também implicam em enormes impactos nas operações, podendo trazer péssimas consequências, porém não podem ser comparados aos impactos de erros na tensão máxima. Portanto, deve-se adotar diferentes tolerâncias de erro entre situações.

O raio de curvatura mínimo pode ser avaliado a parte, pois deve ser levado em consideração o limite do mesmo, que é bem definido. Uma vez que os resultados se encontram em no mínimo quase 4 vezes o limite, há um certo conforto em admitir uma maior tolerância, pois mesmo assim não estarão sendo assumidos grandes riscos a operação. A Tabela 4 apresenta os critérios desejados para a análise de convergência. Esses valores não devem ser seguidos como regra, mas apenas servir de guia de ordem de grandeza. O resultado deve ser sempre

considerado dentro do contexto da análise e as tolerâncias podem ser abrandadas em casos particulares.

Tabela 4: Critérios de tolerância para análise de convergência estática.

Tensão Máxima [%]	Tensão Mínima [%]	Raio de Curvatura Mínima [%]
1%	2,5%	5%

As Tabela 5 e Tabela 6 apresentam os tamanhos de segmentos que atenderam as tolerâncias, e os erros em relação ao modelo de menor número de segmentos.

Tabela 5: Resultados da Análise de Convergência para Sistema de 4 polegadas.

Etapa	Tamanho de Segmento [m]	Erro na Tensão Máxima [%]	Erro na Tensão Mínima [%]	Erro no Raio de Curvatura Mínimo [%]
0	10,0	0,20	0,0013	1,9
1	0,5	$5,5 \times 10^{-5}$	$1,6 \times 10^{-4}$	0,17
2	0,5	$3,2 \times 10^{-5}$	$6,3 \times 10^{-5}$	$5,7 \times 10^{-5}$
3	6,1	0,13	0,031	3,3
4	0,5	$1,2 \times 10^{-4}$	$6,5 \times 10^{-8}$	0,0017
5	0,8	$1,3 \times 10^{-5}$	$4,5 \times 10^{-4}$	0,0012

Tabela 6: Resultados da Análise de Convergência para Sistema de 8 polegadas.

Etapa	Tamanho de Segmento [m]	Erro na Tensão Máxima [%]	Erro na Tensão Mínima [%]	Erro no Raio de Curvatura Mínimo [%]
0	2,4	0,075	0,052	1,9
1	1,4	$3,8 \times 10^{-4}$	$6,1 \times 10^{-4}$	0,16
2	0,5	$1,8 \times 10^{-4}$	$4,0 \times 10^{-4}$	4,2
3	2,8	0,14	0,33	2,2
4	0,5	0,014	$9,2 \times 10^{-5}$	3,9
5	0,5	0,019	0,0035	4,6

Os dados apresentados acima levam a conclusão de que nos passos onde a inclinação de topo é alta (etapas 1, 2, 4 e 5), há maior influência do tamanho do segmento no resultado de

curvatura se comparado aos casos onde a linha apresenta ângulo pequeno em relação ao eixo vertical (etapas 0 e 3).

A principal razão para tal fenômeno é o posicionamento dos *attachments*. Eles recebem uma cota teórica onde serão fixos aos nós do objeto *line*, no entanto os mesmos só podem ficar nos nós da linha. O *OrcaFlex* então os posiciona no nó mais próximo da cota especificada. Conforme aumenta o tamanho dos segmentos, aumenta a distância entre nós e conseqüentemente a distância do posicionamento real do *attachment* em relação de sua cota teórica. Por exemplo, se há 10 *attachments* distribuídos uniformemente ao longo de um segmento de 10 metros, 5 ficarão posicionados no nó anterior, e 5 no nó posterior. A Figura 51 exemplifica como é feito o posicionamento de *attachents* no modelo.

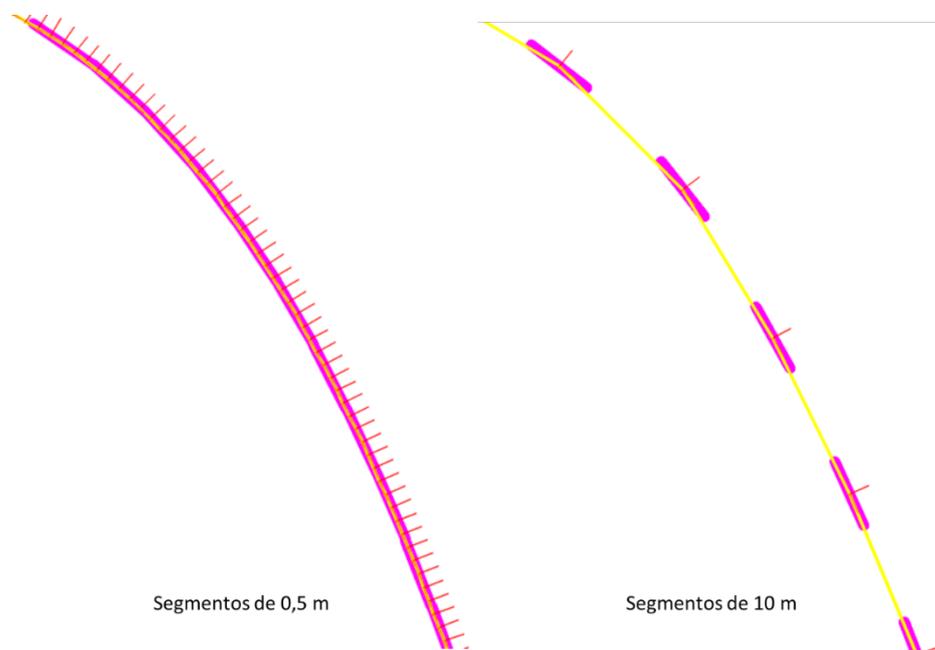


Figura 51: Posicionamento de *attachments* em malhas refinadas e grosseiras.

Quando o duto se encontra praticamente alinhado com eixo vertical, os mesmos resultam em esforços axiais no mesmo, e a cota do *attachment* influencia muito menos no resultado.

Já quando o duto se encontra inclinado, os esforços deixam de ser axiais e passam a resultar em um momento no duto. Para estes casos a variação no posicionamento do *attachment* terá grande impacto no resultado de curvatura da linha.

Na Figura 52 observa-se uma assíntota no resultado de modelos de menor tamanho de segmento. Conforme o tamanho aumenta, a diferença no raio começa a aumentar de forma

linear até estabilizar, quando há uma grande queda para depois o valor do raio voltar a subir de forma linear.

Analisando cuidadosamente percebeu-se que essa descontinuidade ocorre devido ao posicionamento do peso morto no modelo. Conforme discutido anteriormente, o peso morto é modelado como um objeto *attachment*. Este caso evidenciou a sensibilidade do modelo quanto o posicionamento do peso morto. Um deslocamento de 2 a 4 metros implicou em uma diferença de aproximadamente 60 metros no raio mínimo.

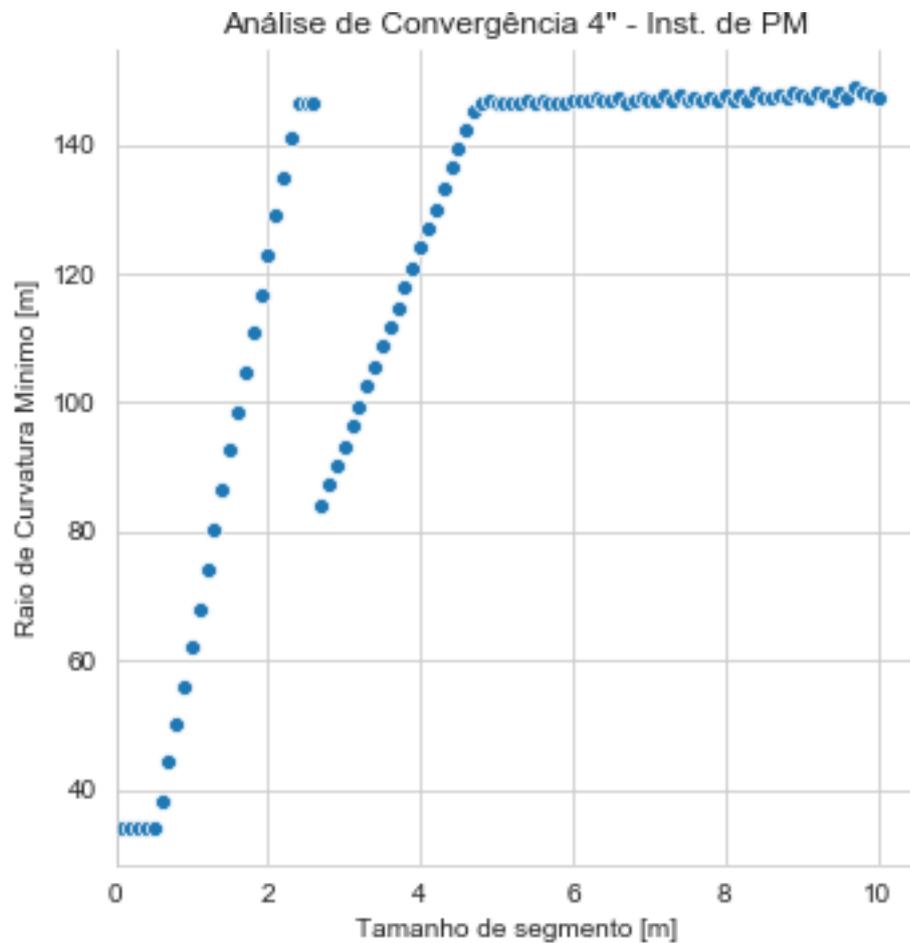


Figura 52: Raio de curvatura mínimo para a etapa de instalação de peso morto do duto de 4 polegadas.

A Figura 53 mostra que o mesmo fenômeno da descontinuidade no resultado devido ao deslocamento da cota do peso morto ocorreu para o duto de 8" com a presença de peso morto.

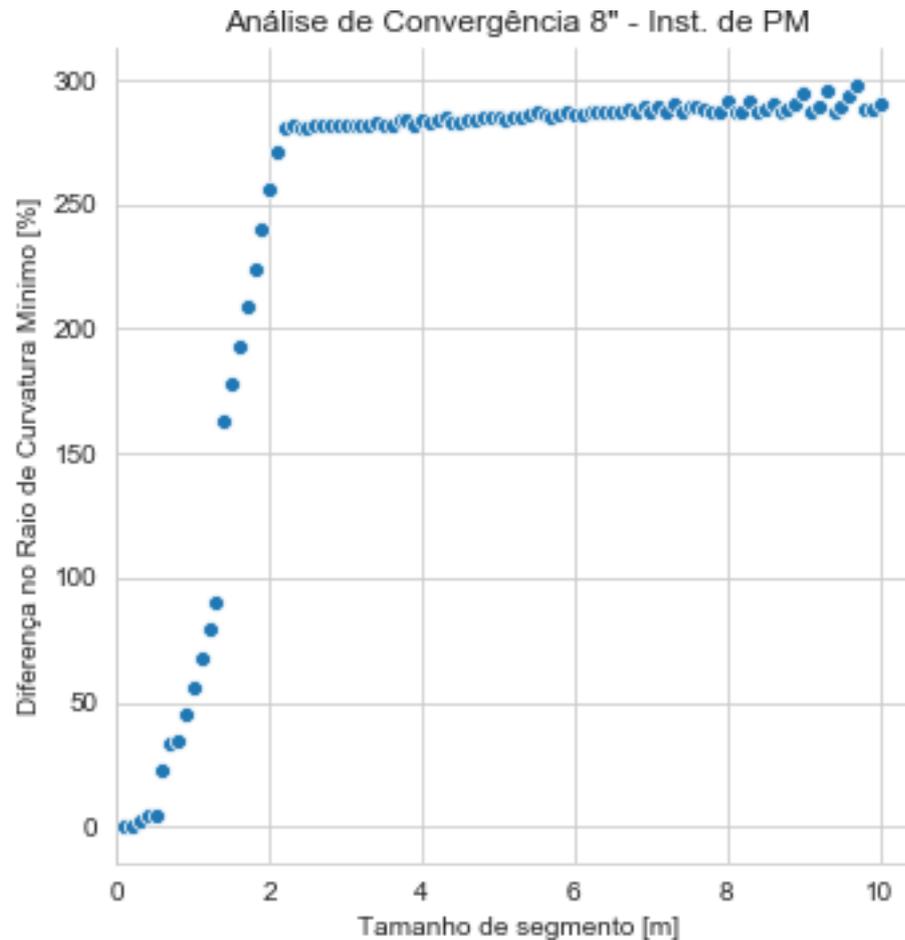


Figura 53: Raio de curvatura mínimo para a etapa de instalação de peso morto do duto de 8 polegadas.

Esse fenômeno não influenciou os resultados de tensão na linha, que se mantiveram consistente independentemente do tamanho de segmento. De forma conservadora, será adotado a segmentação de 0,5 m tamanho de segmento aprovado para os modelos de todas as etapas de instalação nas próximas etapas da análise.

6.2 Otimização de Malha

Mesmo após encontrar o maior tamanho de segmento que atenda os critérios de tolerância, o modelo de malha uniforme ainda contém um número muito elevado de segmentos. Os modelos com 0,5 m de tamanho de segmento, apresentam em média aproximadamente 4800 segmentos cada. Este grande número pode trazer dois problemas:

- Lentidão no carregamento do modelo;
- Lentidão nas análises dinâmicas posteriores.

Portanto, propõe-se um refinamento de malha condicional, aumentando o tamanho do segmento nas regiões de baixo interesse, e diminuindo o tamanho do segmento nas regiões de grande interesse ou não-linearidade. Adotou-se as seguintes premissas para identificar os trechos onde deveria haver um maior refinamento de malha:

- Maiores curvaturas no modelo de malha uniforme;
- Presença de *attachment* (peso morto ou boia);
- Interface de seções com rigidezes diferentes.

Também se buscou maior refinamento nas regiões das condições de contorno:

- Extremidade fixa no PLSV;
- Região do TDP.

Todas as regiões que não se encaixavam nessas descrições foram categorizadas como de não-interesse e receberam segmentos maiores.

Uma boa prática de qualquer software de elementos finitos, a transição suave entre tamanho de segmentos também foi aplicada, para evitar a presença de sinais espúrios na interface de grandes e pequenos segmentos.

Por fim como última medida de diminuição de número de segmentos, o trecho estático do duto, que repousa no solo foi quase inteiramente removido do modelo, restando apenas 100 metros próximos ao TDP.

Os casos e critérios apresentados na Tabela 7 foram avaliados em todas as fases de instalação para ambos os sistemas, de forma a avaliar, quais seriam capazes de reduzir o número de elementos sem perda de qualidade nos resultados.

Tabela 7: Casos de segmentação da análise de otimização de malha.

Caso	Menor Segmento [m]	Segmento Intermediário [m]	Segmento Intermediário [m]	Maior Segmento [m]
1	0,5	1,0	2,0	4,0
2	0,5	1,5	4,5	13,5
3	0,5	2,0	8,0	32,0
4	0,5	2,5	12,5	62,5

Tabela 8: Critérios de raio para refinamento de malha da análise de otimização de malha.

Caso	Primeiro faixa de raio de curvatura mínimo [m]	Segunda faixa de raio de curvatura mínimo [m]	Terceira faixa de raio de curvatura mínimo [m]
1	$MBR < 100$	$100 < MBR < 200$	$300 < MBR$
2	$MBR < 50$	$50 < MBR < 100$	$150 < MBR$
3	$MBR < 25$	$25 < MBR < 50$	$50 < MBR < 75$

Os casos avaliados foram o produto dos casos da Tabela 7 e da Tabela 8, gerando um total de 12 categorias de malha por modelo base. Todos as 144 simulações foram executadas e os resultados serão avaliados com as mesmas premissas da Tabela 4, levando em consideração a criticidade de cada resultado.

A Figura 54 mostra os resultados da análise de otimização de malha para raio de curvatura mínimo. Houve uma grande consistência entre todas as categorias, especialmente para as tensões máximas e mínimas. Comprovando que as premissas adotadas de engrossamento de malha nos trechos de baixo interesse são efetivas.

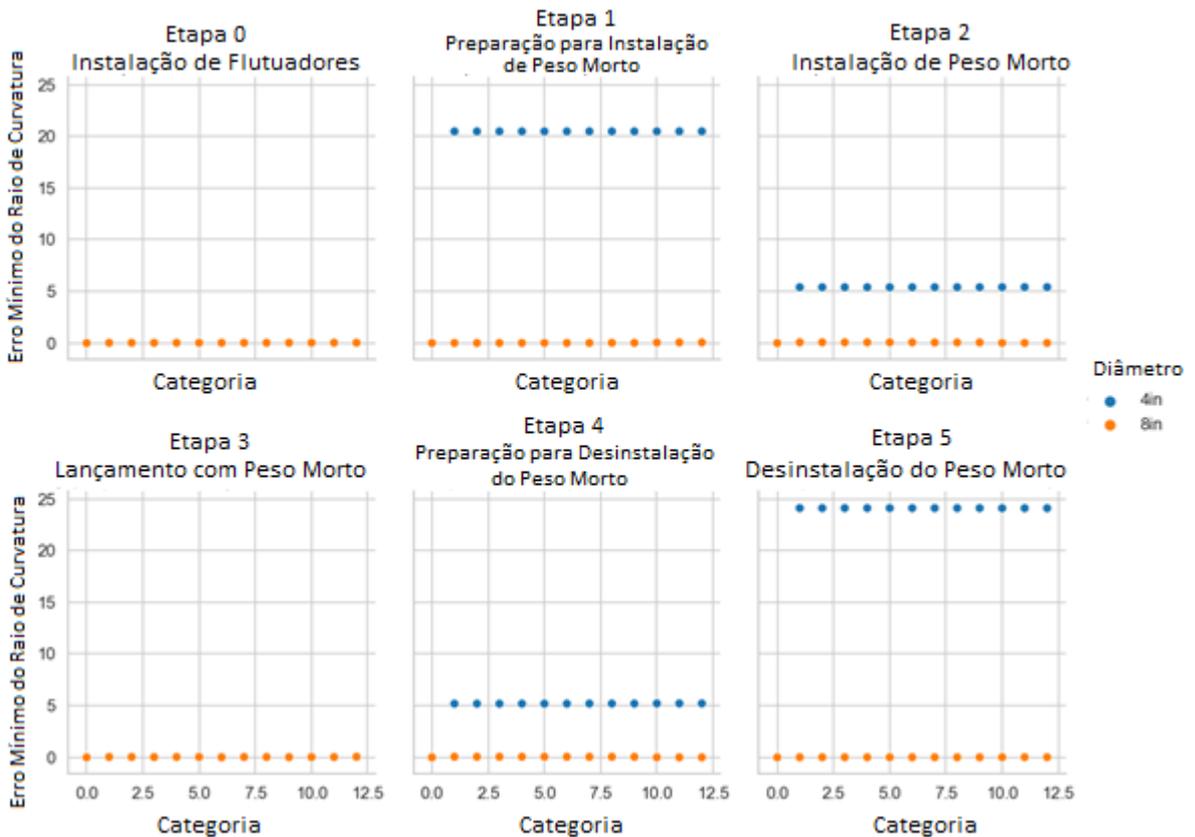


Figura 54: Resultados raio de curvatura mínimo da análise de otimização de malha

No entanto para as fases 2, 4 e 5 do duto de 4 polegadas, apesar dos resultados para todas as categorias de malha otimizada se apresentarem semelhantes, os mesmos excederam, apenas para o raio de curvatura mínimo a tolerância adotada anteriormente.

Analisando detalhadamente o modelo, observou-se novamente que o erro nos resultados veio do deslocamento dos nós, que por consequência deslocaram os *attachments* de sua posição original em no máximo o tamanho do menor segmento. Como já comentado na análise de convergência, pequenos deslocamentos nos *attachments* podem implicar em variações significativas de curvatura, mas pouca para nenhuma influência nos resultados de tensões mínimas e máximas.

Se faz necessário nesse momento novamente fazer uma escolha entre o desempenho do modelo e a confiabilidade dos resultados.

Por um lado, o seguinte ponto sugeriria o mantimento do modelo de malha uniforme:

- Erros de até 25% no raio de curvatura.

Por outro lado, podem ser feitas as próximas ponderações:

- O erro ocorreu na menor parte dos modelos;
- A tolerância pré-definida só é excedida nos resultados de curvatura, que foi identificado como menos críticos dos três resultados avaliados;
- Apesar de erros de 25% parecerem expressivos à primeira vista, o raio de curvatura mínimo encontrado continua muitas vezes à cima do limite;
- A causa do erro, o deslocamento das cotas dos *attachments*, nunca será maior que o tamanho do menor segmento, e, portanto, não será encontrado erros maiores ao já obtidos;
- O erro sempre ocorre em direção ao limite, diminuindo o raio de curvatura mínimo, tornando a análise mais conservadora.

Avaliando todos os argumentos, é razoável aceitar continuar com o modelo de malha não-uniforme, mesmo quando o mesmo excede a tolerância pré-definida, pois entende-se que os benefícios associados se sobrepõem a perda de precisão do resultado para determinados casos.

O próximo passo é definir dentre os modelos de malha otimizada, qual representa o melhor balanço entre número de segmentos por qualidade do resultado.

Essa análise pode ser feita com facilidade, uma vez que, todos os resultados entre os modelos não-uniforme tiveram resultados aproximadamente constantes entre si. Desta forma o modelo com menor número de segmentos entre todos é a mais eficiente. A categoria 12 que

representa a combinação do caso 4 da Tabela 7 com o caso 3 da Tabela 8 é a categoria que forma menos segmentos.

Tabela 9: Resultados da categoria 12 na análise de otimização de malha do sistema de 4”.

Fase da Instalação	Quantidade de Segmentos do Modelo Uniforme	Quantidade de Segmentos do Modelo Otimizado	Erro na Tensão Máxima [%]	Erro na Tensão Mínima [%]	Erro no Raio de Curvatura Mínimo [%]
0	4184	1404	0,0012	0,066	0,055
1	5984	1913	0,0064	0,14	20,5
2	5984	1923	0,0056	0,16	5,4
3	4663	1969	$5,4 \times 10^{-4}$	0,049	0,050
4	4088	1702	0,0011	0,050	5,2
5	4088	1736	0,0042	0,043	24,1

Tabela 10: Resultados da categoria 12 na análise de otimização de malha do sistema de 8”.

Fase da Instalação	Quantidade de Segmentos do Modelo Uniforme	Quantidade de Segmentos do Modelo Otimizado	Erro na Tensão Máxima [%]	Erro na Tensão Mínima [%]	Erro no Raio de Curvatura Mínimo [%]
0	5026	1284	0,0014	0,049	0,029
1	4634	1828	$7,8 \times 10^{-4}$	0,063	0,059
2	4634	1835	$7,9 \times 10^{-4}$	0,064	0,013
3	4432	2169	$3,2 \times 10^{-4}$	0,20	0,054
4	4874	2439	0,0052	0,063	0,0046
5	4874	2433	0,0015	0,075	0,018

As Figura 55 e Figura 56 exemplificam o processo de otimização de malha, onde cada traço vermelho próximo à linha representa a posição de um nó. É possível facilmente visualizar a segmentação de cada modelo.

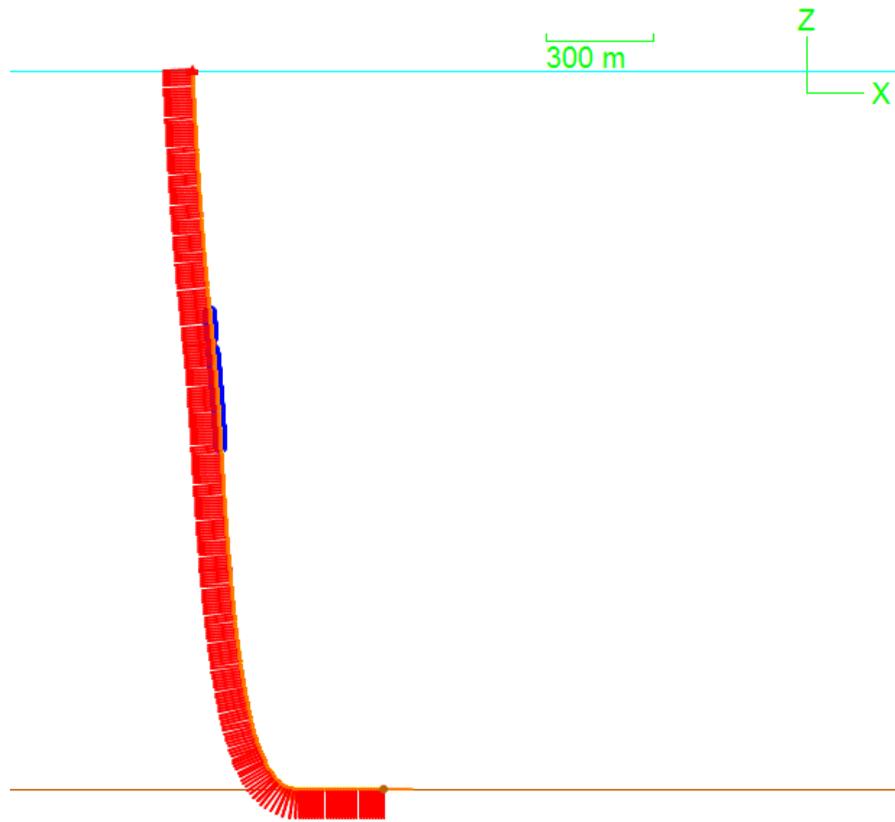


Figura 55: Modelo de Malha Uniforme.

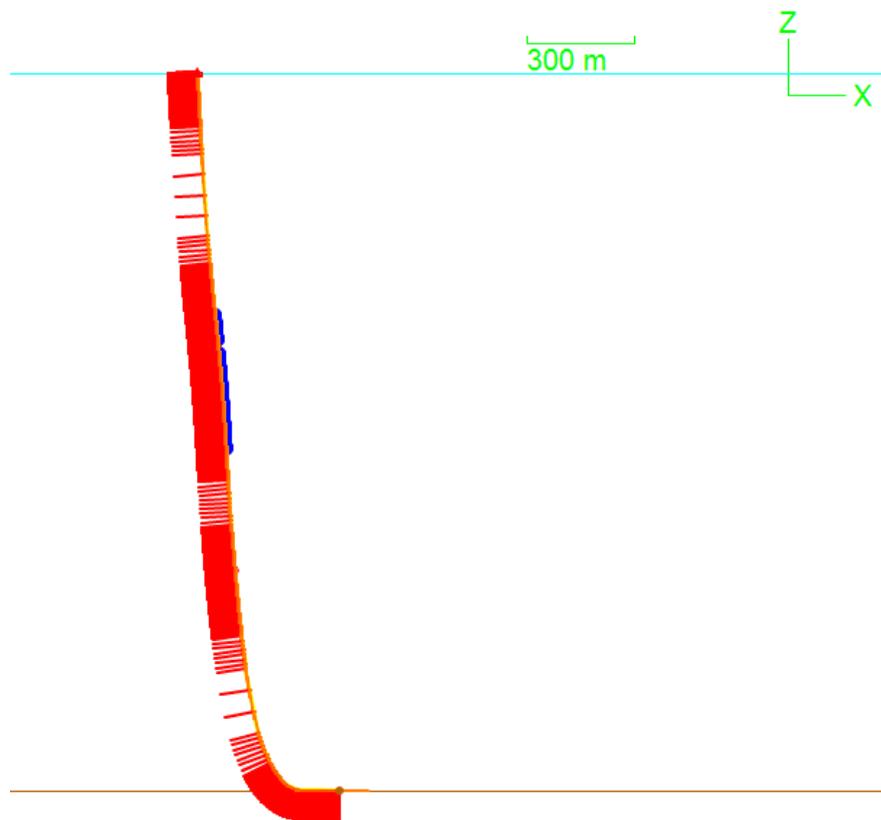


Figura 56: Modelo de Malha Otimizada.

Os resultados dos modelos estáticos de malha otimizada estão na Tabela 11:

Tabela 11: Resultados estáticos dos modelos com malha otimizada.

Etapa	Diâmetro Nominal [“]	Tensão máxima [kN]	Tensão mínima [kN]	Raio de curvatura mínimo [m]
0	4	1071,20	54,63	136,78
	8	3371,39	27,69	21,16
1	4	1007,92	51,09	53,23
	8	1995,62	98,98	61,33
2	4	1425,44	58,51	32,06
	8	2801,25	126,45	21,27
3	4	1352,93	18,36	46,28
	8	3054,16	13,42	13,49
4	4	1103,30	57,90	11,37
	8	2333,68	162,18	13,67
5	4	680,21	25,41	10,25
	8	1525,23	79,31	40,19

6.3 Análise Dinâmica com 5ª Expansão de Stokes

Para as análises dinâmicas com a teoria da 5ª expansão de Stokes foram analisados os seguintes métodos de solução:

- Domínio do tempo explícito;
- Domínio do tempo implícito com incremento de tempo constante de 0,05 s;
- Domínio do tempo implícito com incremento de tempo constante de 0,01 s;
- Domínio do tempo implícito com incremento de tempo variável começando em 1 s;
- Domínio do tempo implícito com incremento de tempo variável começando em 0,1 s;
- Domínio da frequência.

6.3.1 Parâmetros do Domínio do Tempo Explícito

A análise dinâmica no domínio do tempo explícito requer os seguintes parâmetros:

- Incremento de tempo interior – A análise dinâmica no domínio do tempo explícito no *OrcaFlex* usa dois incrementos de tempo em busca de maior desempenho. Um chamado de incremento de tempo interior, e outro maior chamado de incremento de tempo exterior. O interior é utilizado para calcular valores que mudam com maior frequência no modelo, enquanto o exterior para calcular os valores mais estáveis. A *Orcina* recomenda que o incremento de tempo interior represente 1/10 do período do menor modo de vibração do sistema, para garantir que a simulação seja estável.
- Incremento de tempo exterior – O desenvolvedor recomenda 10 vezes o incremento de tempo interior. Eles também frisam que o incremento de tempo exterior não deve ser maior que 1/40 do período de onda (Orcina, 2018).

Convenientemente, é oferecida uma opção calculada automaticamente, evitando que o usuário tenha que fazer todos esses cálculos para cada simulação executada. Essa opção será utilizada para as análises dinâmicas no domínio do tempo explícito.

6.3.2 Domínio do Tempo Implícito Constante

Três parâmetros do domínio do tempo implícito constante foram estudados:

- Incremento de Tempo – Utilizados dois incrementos de tempos distintos, 0,05 s e 0,01 s. Outro parâmetro que deve ser considerado são número máximo de iterações antes de abordar e tolerância.
- Número máximo de iterações – Para o número máximo de iterações será utilizado o valor máximo, 1000, uma vez que desejamos obter os resultados de todos os modelos, mesmo que estejam com dificuldades de convergência.
- Tolerância – A tolerância é um número adimensional que controla a precisão do modelo. Valores maiores resultam em modelos mais ágeis, porém com menos precisão. Para esse parâmetro foi desejado a menor tolerância possível e para isso foi feita uma análise prévia, onde executou-se os incrementos de tempos estudados com a tolerância padrão do *OrcaFlex*, 25×10^{-6} . Percebeu-se que muitos casos de incremento de tempo 0,05 s não conseguiram finalizar com esta tolerância. Para esse incremento foi avaliado a menor tolerância em que todos os modelos conseguiram finalizar a simulação, o resultado foi que a tolerância de 0,001 deveria

ser a usada. Já para o incremento de 0,01 s foi possível usar a tolerância padrão de 25×10^{-6} .

6.3.3 Domínio do Tempo Implícito Variável

Foram avaliados para o domínio do tempo implícito variável três parâmetros:

- Incremento de tempo – Serão avaliados dois incrementos de tempos distintos para o domínio do tempo implícito variável: 1 s e 0,1 s.
- Número máximo de iterações – O número máximo de iterações utilizado será o mesmo do anterior, com a diferença que ao invés de abortar, o modelo irá reduzir o incremento de tempo.
- Tolerância – A tolerância utilizada será a mesma do modelo de 0,01 s, a padrão do OrcaFlex, uma vez que na variável não há risco de a simulação abortar.

6.3.4 Domínio da Frequência

Para o domínio da frequência foram avaliados três parâmetros. O número máximo de iterações, a tolerância e o amortecimento.

- Número máximo de iterações – O número máximo de iterações utilizado foi o mesmo dos casos anteriores, o máximo, que é 1000.
- Tolerância – Para a tolerância foi feito uma análise prévia onde notou-se que diversos casos não convergiam com os parâmetros padrão do OrcaFlex, após uma avaliação, chegou-se à conclusão que a menor tolerância que completaria todas as simulações seria 0,2.
- Amortecimento – O parâmetro de amortecimento é um adimensional que varia de 0 a 0,5. Foi feita uma análise prévia, e percebeu-se que quanto maior este parâmetro, menor poderia ser a tolerância utilizada para convergir o modelo, portanto escolheu-se o valor máximo de 0,5.

A análise no domínio da frequência através do *OrcaFlex*, não compreende não linearidades, portanto não suporta a teoria de onda da quinta expansão Stokes. Esta análise será feita, então, com a teoria de onda linear (*Airy*). Apesar desta escolha implicar em uma menor precisão nos resultados, entende-se que é importante avaliar se os mesmos ainda seriam aceitáveis.

6.3.5 Armazenamento de Resultados

O *OrcaFlex* permite que o usuário controle alguns parâmetros do armazenamento dos resultados das simulações, são eles:

- Precisão – Controla se os resultados são armazenados em 4 ou 8 bytes. A princípio 4 bytes podem parecer suficientes, no entanto sabendo que *OrcaFlex* não armazena resultados de curvatura, mas sim recalcula toda vez que é requisitado pelo usuário através do posicionamento dos nós, não é possível garantir a uma primeira vista que 4 bytes bastam para entregar um resultado de curvatura preciso.
- Intervalo de amostras – É possível pedir para que o software busque resultados em um intervalo de amostras superior ao incremento de tempo, para reduzir o tamanho dos arquivos. De forma conservadora, será utilizado um intervalo correspondente ao menor incremento de tempo definido de 0,01 s. Assim não será perdida nenhuma informação.
- Começo da amostragem – Para reduzir o tamanho do arquivo, também é possível determinar quando começará a ser feita a amostragem de resultados. Como será avaliado o comportamento do modelo ao longo de toda simulação, aqui é escolhido que a amostragem comece junto a simulação.

6.3.6 Parâmetros Ambientais

As análises serão feitas com a embarcação recebendo as ondas de proa, geralmente essa direção é a mais estável de uma embarcação.

Quanto aos parâmetros de onda, nas análises serão utilizados os parâmetros ambientais indicados anteriormente neste documento. Ou seja, serão avaliados os dois extremos do intervalo de períodos, 6 s e 14 s. A altura de onda utilizada é a calculada pela equação 4.6.

A Figura 57 e Figura 58 apresentam perfis de onda gerado pelo *OrcaFlex*, é possível notar que assim como comentado durante a apresentação desta teoria de onda, a mesma tem picos mais agudos e vales mais compridos em relação a uma senoide. Para a onda de período de 14 s é difícil observar essa característica no perfil devido ao grande comprimento de onda.

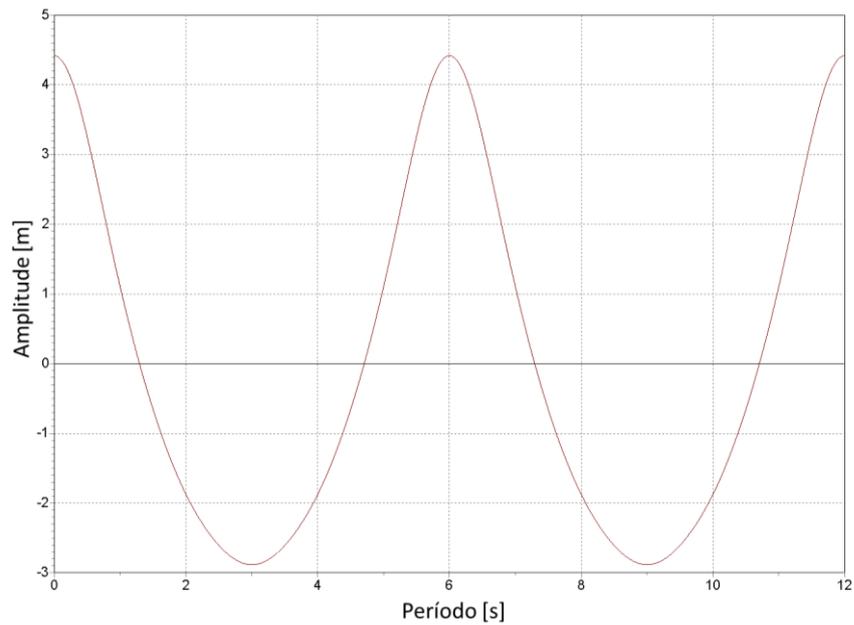


Figura 57: Perfil de onda de período 6 s da 5ª expansão de Stokes gerado pelo *OrcaFlex*.

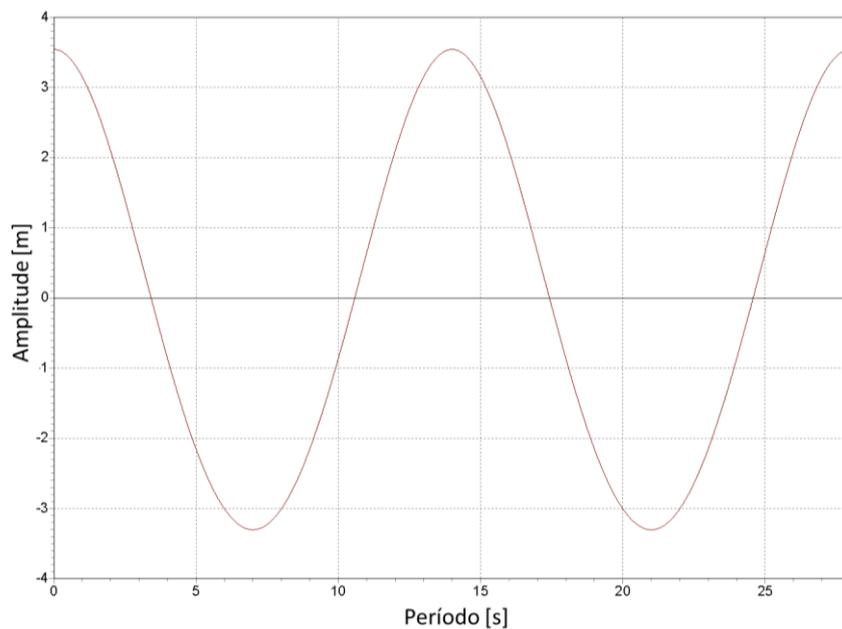


Figura 58: Perfil de onda de período 14 s da 5ª expansão de Stokes gerado pelo *OrcaFlex*.

6.3.7 Duração da Simulação

No modelo dinâmico no domínio do tempo, é necessário certo tempo para que o modelo se estabilize e entre em regime estacionário. Enquanto tiver em regime transiente, o mesmo pode apresentar resultados não reais, e os mesmos devem ser ignorados.

Portanto é necessário avaliar para os casos estudados, uma duração mínima para que possa ser considerado que o modelo está em regime permanente. Essa duração será medida em períodos de ondas, ou simplesmente quantas ondas recebeu o modelo. O mesmo critério

adotado nas análises de sensibilidade estática, apresentado na Tabela 4, será adotado para esta análise de sensibilidade dinâmica.

A Figura 59 apresenta para cada caso quantas ondas foram necessárias para poder considerar o modelo em regime permanente. O critério para tal é que a tensão máxima, tensão mínima, e raio de curvatura mínimo ao longo do período de uma onda apresentassem erro máximo de 5% em relação aos mesmos resultados da onda anterior.

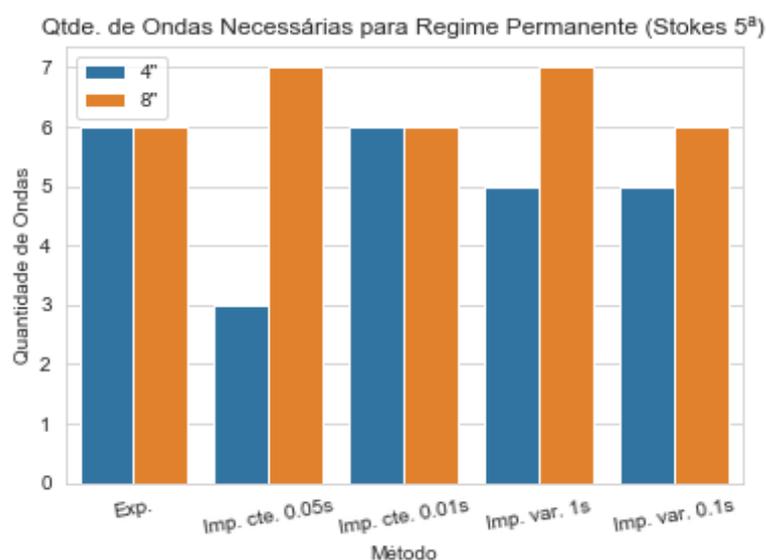


Figura 59: Número de ondas necessários para cada caso ser considerado regime permanente.

6.3.8 Desempenho dos Modelos

Uma vez definido os parâmetros e executadas as simulações é possível avaliar os resultados das simulações dinâmicas. Os próximos valores de tempo apresentados serão todos em razão dos números de núcleos do processador. Ou seja, o tempo de análise é multiplicado pelo número de núcleos usados na mesma. Apesar de apresentar o tempo real de duração passe um sentimento mais real da duração da simulação, é ruim para fins comparativos, pois seria necessário que todas as análises rodassem sob as mesmas condições. As simulações podem ser executadas dedicadamente, em ou em paralelo com outras simulações e tarefas, desta forma, apenas o tempo por núcleo é capaz de representar uma variável confiável para comparação.

Para todas as análises dinâmicas o erro será calculado de maneira diferente das análises estáticas. Será considerado que o resultado pode ser representado por uma parcela dinâmica e outra estática. A parcela estática o valor de um resultado sem a excitação de ondas, ou seja, os valores apresentados nos resultados anteriores. A parcela dinâmica representa o quanto a

parcela estática foi amplificada pela excitação. Em outras palavras, a parcela dinâmica e o resultado extremo, subtraído do resultado estático.

Essa metodologia é aplicada para evitar que o valor absoluto do resultado influencie o erro. Por exemplo, quando a tensão mínima tender a zero, se o erro fosse calculado pela razão apenas, pequenas diferenças resultariam em erros tendendo ao infinito. Já para tensões máximas muito grandes, até erros absolutos enormes, pareceriam pequenos em uma razão simples.

A fórmula usada para calcular o erro foi a seguinte:

$$\text{Erro} = \frac{\text{Resultado Din. Avaliado} - \text{Resultado Din. de Referência}}{\text{Resultado Din. de Referência} - \text{Resultado Est. de Referência}} \quad 6.1$$

Para a sensibilidade de resultados, a prática recomendada pelo fabricante é que a análise de sensibilidade seja realizada em relação ao modelo com domínio do tempo explícito, uma vez que esse é o mais estável (Orcina, 2018). Portanto este método será utilizado como referência para cálculo do erro.

Apesar de estar incluída nesta seção, o domínio da frequência utilizará a excitação de uma onda linear, pois é a única suportada pelo *software* para tal método de solução. Mesmo não sendo a mesma teoria de onda, ela será analisada juntamente a expansão de Stokes pois é desejado saber os erros assumidos ao utilizar um modelo de excitação não recomendado.

Tabela 12: Resultados da análise da 5ª expansão de Stokes Exp. (4'')

Etapa	Período [s]	Duração por Núcleo [s]	Tensão máxima [kN]	Tensão mínima [kN]	Raio de curvatura mínimo [m]
0	6	64926,11	1191,56	37,55	37,92
	14	110242,68	1180,60	21,60	45,82
1	6	67884,03	1139,91	37,36	49,89
	14	187826,91	1164,89	21,94	44,64
2	6	67356,34	1592,72	39,72	30,79
	14	161299,22	1626,45	26,67	29,69
3	6	75758,19	1463,62	12,15	27,64
	14	171185,60	1473,10	4,55	11,75
4	6	76520,21	1489,33	35,07	10,77
	14	176753,47	1444,14	25,76	10,11
5	6	94293,89	722,90	22,95	8,58
	14	188315,64	740,33	11,38	5,28

Tabela 13: Resultados da análise da 5ª expansão de Stokes Exp. (8'')

Etapa	Período [s]	Duração por Núcleo [s]	Tensão máxima [kN]	Tensão mínima [kN]	Raio de curvatura mínimo [m]
0	6	34898,53	3769,36	10,85	14,60
	14	79672,05	3695,22	-14,07	7,36
1	6	59619,20	2792,13	39,97	30,39
	14	146734,10	2784,42	-5,11	14,51
2	6	66797,85	3862,89	19,47	19,93
	14	155302,93	3658,36	-17,41	13,51
3	6	36527,90	3418,89	-0,24	9,78
	14	12830,88	3478,74	-11,76	6,69
4	6	98039,16	2915,01	-244,37	6,23
	14	224466,81	2908,20	-107,38	12,04
5	6	89226,57	1542,79	69,95	32,32
	14	210686,34	1566,46	14,32	14,35

A Figura 60 indica a duração média de cada método de solução. Nela as barras representam os erros em função da análise no domínio do tempo explícito, Tabela 12 e Tabela 13 a linha cinza representa a duração da simulação.

É notável a duração excessivamente longa da análise no domínio do tempo explícito comparado a todos os outros métodos. Também se observa que o erro apareceu distribuído uniformemente entre os resultados. Destaque para o método de solução no domínio do tempo implícito com incremento de tempo de 0,01s, que apresenta resultados muito similares aos do domínio do tempo explícito, em uma duração bem inferior. Os métodos com incremento de tempo 0,05 e 0,1 também apresentaram pequenos erros, por volta de 5% da parcela dinâmica, porém em muito pouco tempo de simulação. Já o domínio da frequência, apesar de extremamente rápido, apresentou erros igualmente grosseiros.

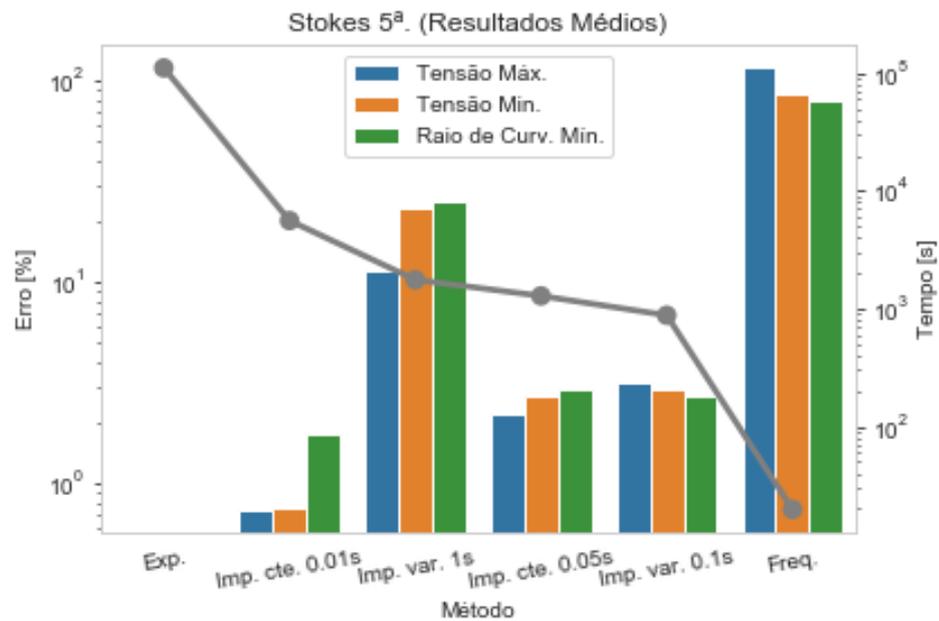


Figura 60: Duração média das análises de cada método de solução

A Figura 61 representa os resultados extremos em todos os casos. Nenhum caso comparado ao explícito foi capaz de manter seus erros inferiores a 10% para todos os casos, sendo o mais próximo de alcançar tal fato, o método com incremento de tempo de 0,01s.

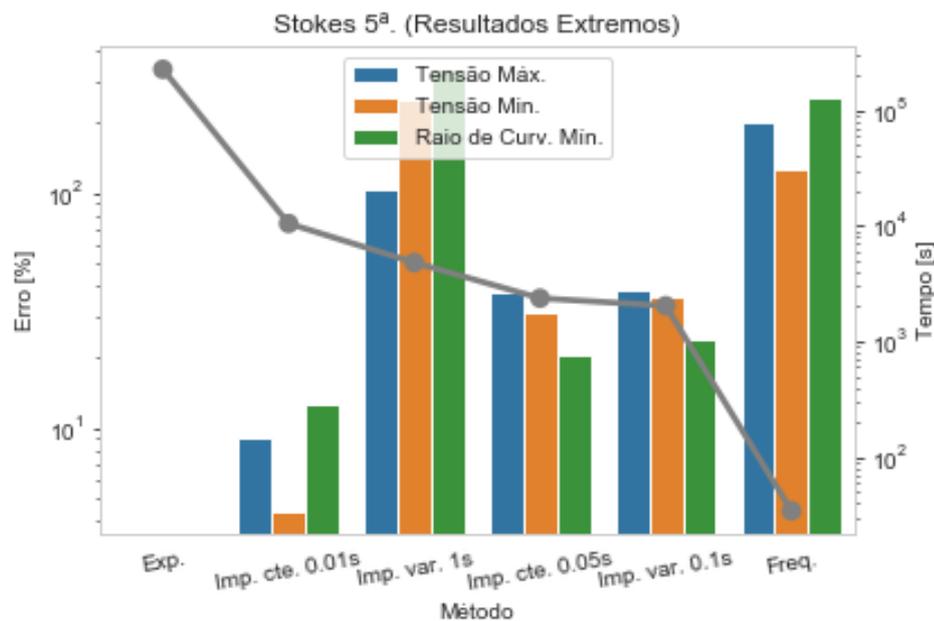


Figura 61: Resultados Extremos da Análise Dinâmica com Stokes 5ª.

As mesmas tolerâncias da Tabela 4, não podem ser aplicadas para os casos dinâmicos. Primeiramente por se tratarem de erros diferentes. Enquanto a Tabela 4 trata de valores

absolutos, os resultados apresentados nessa seção se apresentam sobre a parcela dinâmica apenas. Pode-se dizer então que os erros encontrados pelos métodos de incrementos 0,01 segundos, 0,05 segundos e 0,1 segundos parecem razoáveis quando considerado a economia de tempo que trazem.

6.4 Análise Dinâmica com a Função *Stream* de 3ª Ordem

Para esse caso, foram utilizadas as mesma metodologias, premissas e critérios da análise dinâmica com a quinta expansão de Stokes. Porém desta vez usando a função *Stream* de 3ª ordem. As Figura 62 e Figura 63 mostram o perfil de onda gerado pelo *OrcaFlex* para este caso. Note que é a semelhança com o perfil da onda da quinta expansão de Stokes, Figura 57 e Figura 58, é tanta, que não é possível distinguir ambas a olho nu.

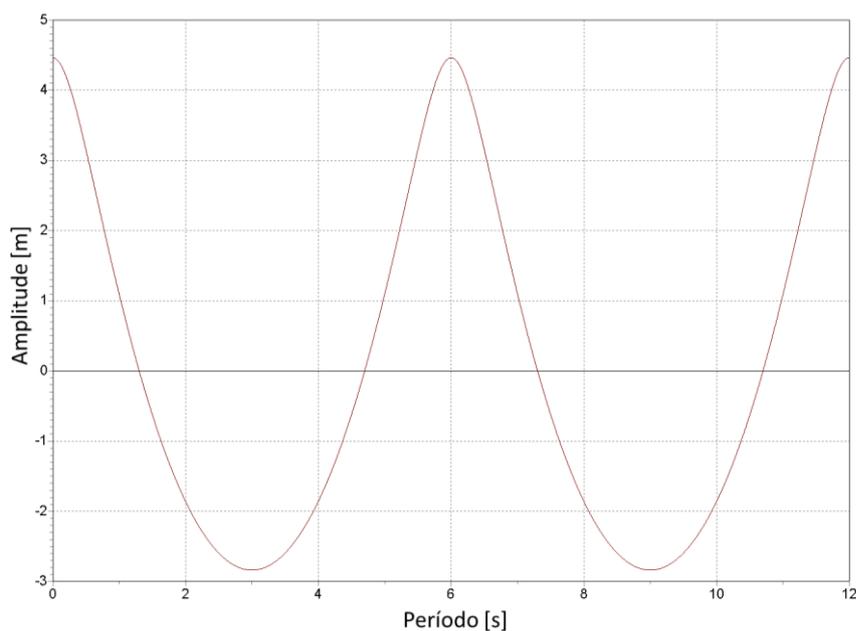


Figura 62: Perfil de onda de período 6 s da função *Stream* de 3ª ordem gerado pelo *OrcaFlex*.

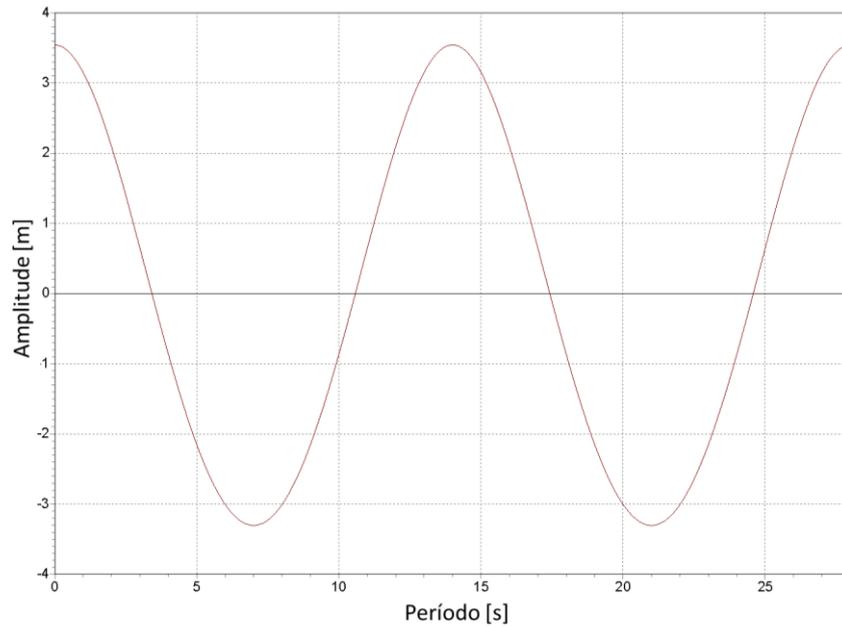


Figura 63: Perfil de onda de período 14 s da função *Stream* de 3ª ordem gerado pelo *OrcaFlex*.

6.4.1 Duração da Simulação

A Figura 64 apresenta para cada caso quantas ondas foram necessárias para poder considerar o modelo regime permanente.

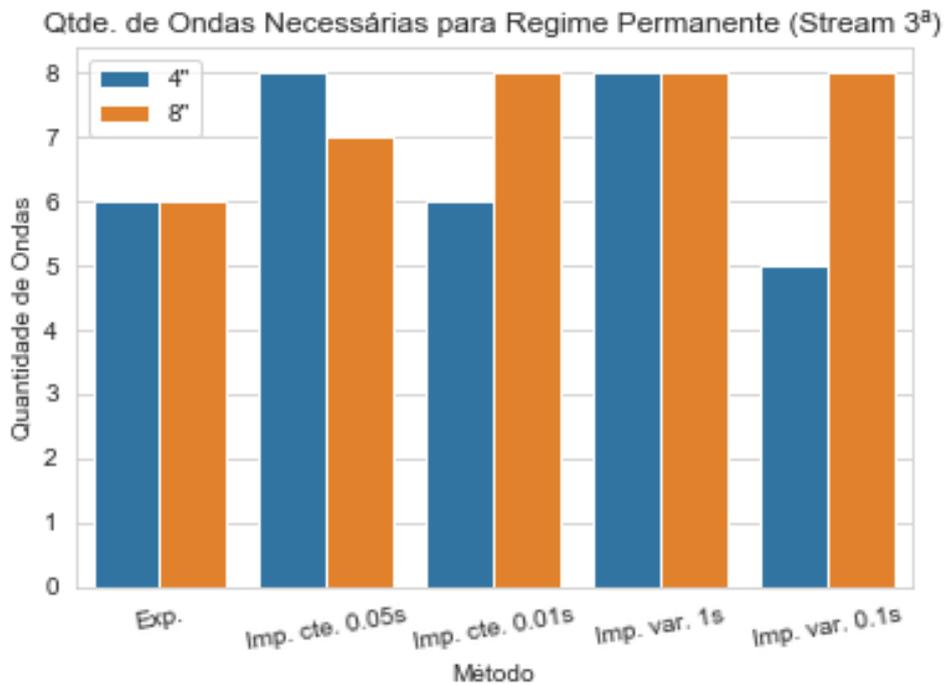


Figura 64: Número de ondas necessárias para cada caso ser considerado regime permanente.

A quantidade de ondas necessárias foi bastante similar à encontrada anteriormente para a quinta expansão de Stokes. A única diferença sendo a teoria de onda e a ausência do método de solução no domínio da frequência. Esse método foi retirado das simulações pois como não compreende a função *Stream* por sua não linearidade, teria que ser usado ondas lineares, resultando em resultados exatamente iguais aos da seção anterior.

6.4.2 Desempenho dos Modelos

Uma vez definidos os parâmetros e executadas as simulações é possível avaliar os resultados das simulações dinâmicas em relação aos valores da Tabela 14 e Tabela 15. Os valores de tempo apresentados serão todos em razão dos números de núcleos do processador.

Tabela 14: Resultados da análise da 3ª ordem de *Stream Exp.* (4^o)

Etapa	Período [s]	Duração por Núcleo [s]	Tensão máxima [kN]	Tensão mínima [kN]	Raio de curvatura mínimo [m]
0	6	49131.55	1180.51	37.69	51.40
	14	117153.37	1180.60	21.61	45.83
1	6	68737.13	1139.92	37.36	49.89
	14	165329.47	1164.89	21.94	44.65
2	6	72316.87	1592.67	39.72	30.79
	14	165610.96	1626.44	26.67	29.69
3	6	77569.58	1464.04	12.20	27.76
	14	175307.15	1473.10	4.56	11.76
4	6	84052.43	1489.79	35.08	10.78
	14	190322.70	1444.14	25.77	10.12
5	6	79706.90	722.99	22.92	8.58
	14	188490.36	740.33	11.38	5.28

Tabela 15: Resultados da análise da 3ª ordem de *Stream Exp.* (8'')

Etapa	Período [s]	Duração por Núcleo [s]	Tensão máxima [kN]	Tensão mínima [kN]	Raio de curvatura mínimo [m]
0	6	36629.3156	3762.31	10.85	14.58
	14	81650.8766	3695.22	-14.07	7.36
1	6	61776.162	2793.30	40.16	30.46
	14	146347.8141	2784.42	-5.11	14.51
2	6	68844.36451	3863.71	19.53	19.93
	14	146319.6871	3658.36	-17.41	13.51
3	6	35383.21081	3416.89	-0.67	9.74
	14	12692.42856	3478.74	-11.76	6.69
4	6	85239.508	2917.92	-244.76	6.25
	14	107440.5563	2908.20	-107.38	12.04
5	6	56155.94517	1539.20	71.45	32.73
	14	70043.24779	1566.46	14.32	14.35

A Figura 60, novamente exalta a duração excessivamente longa da análise no domínio do tempo explícito. Notou-se uma grande semelhança nos resultados entre esta teoria de onda, e a da quinta expansão de Stokes. Com exceção do resultado de raio de curvatura mínimo para o modelo com incremento de tempo com 1s, que apresentou um maior erro, todos os outros modelos tiveram resultados muito semelhantes.

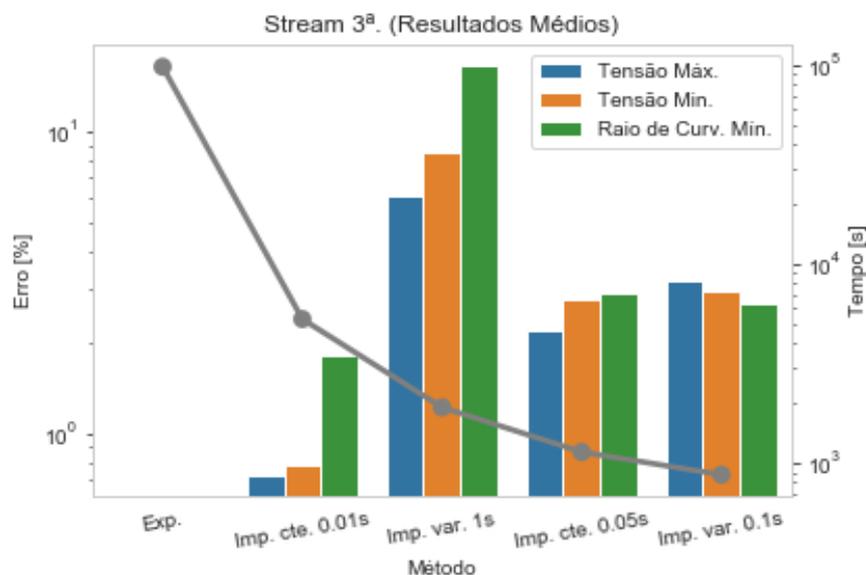


Figura 65: Duração média das análises de cada método de solução

Tal semelhança entre ambos comprova a esperada intercambialidade entre ambas.

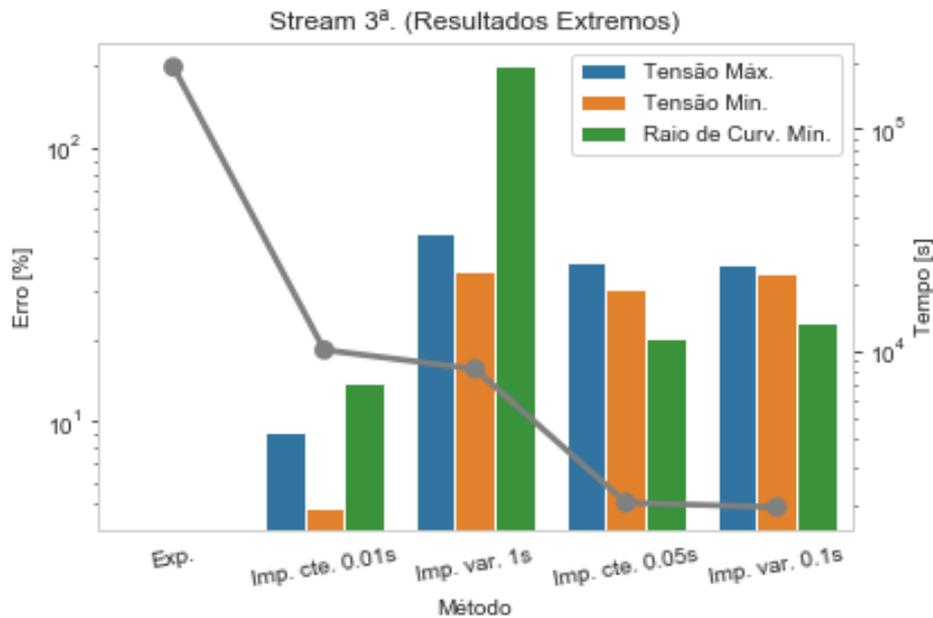


Figura 66: Resultados Extremos da Análise Dinâmica com Stokes 5^a.

Analisando friamente o resultado as durações dos modelos com a onda de *Stream* de terceira ordem foram ligeiramente melhores. No entanto a diferença não foi grande o suficiente para afirmar que o desempenho sempre será melhor. Deve ser considerado que o desempenho não é unicamente dependente da complexidade do modelo, mas também do estado do computador durante a simulação. Normalmente um sistema operacional está rodando diversos processos simultâneos. Estes podem influenciar ligeiramente na duração das simulações. Nos casos avaliados, a proximidade na duração média de ambos os casos não garante que a mesma não seja consequência de condições externas ao modelo.

Considerando isto, não é possível afirmar que a onda de *Stream* apresenta desempenho superior à de Stokes.

6.5 Análise Dinâmica do PLSV com JONSWAP

A análise de dinâmica de onda irregular com a teoria de onda de JONSWAP compreende os seguintes parâmetros:

- Número de componentes – Se a transformada de Fourier decompõe uma onda irregular em uma soma de diversas ondas regulares, para formar a onda irregular é

necessário fazer o caminho reverso e somar diversas ondas regulares. Número de componentes é quantidade de ondas regulares a serem somadas para formar a onda irregular. Quanto maior este número, mais real é a representação, e mais longa a duração da simulação. Para determinação do número de componentes será feita uma análise de convergência;

- Sementes – Semente é a forma de chamar um número usado para inicializar um algoritmo pseudoaleatório. A formação de uma onda irregular, também conhecida como aleatória, na verdade não pode ser dita realmente aleatório. Isso acontece porque algoritmos computacionais são determinísticos e, portanto, é impossível que sejam verdadeiramente probabilísticos. Para contornar isso, quando deseja-se replicar fenômenos naturais, sempre probabilísticos, é feito um algoritmo quase caótico, onde o valor de saída aparenta ter nenhuma relação com o valor e entrada. Esses valores de entradas são as sementes, que geram as ondas irregulares e pseudoaleatórios. Porém o algoritmo não chega a ser realmente caótico, pois dado sempre a mesma semente, obterá sempre a mesma onda. Deve ser usado um grande número de sementes para garantir que um bom intervalo de confiança;
- Duração – A duração da análise. Para essa análise a premissa será a mesma da aplicada no cálculo de altura de onda máxima para mar estacionário, 3 horas, para fins comparativos.

Os métodos de solução para a análise serão os mesmos das seções anteriores com exceção do domínio do tempo explícito. Este não será analisado, pois foi observado nas análises com onda regular que o mesmo exigia muito mais recursos comparados aos outros, enquanto outros métodos conseguiam chegar próximos de sua precisão. Portanto, com o objetivo de economizar recursos (tempo e espaço de armazenamento), o mesmo não foi utilizado nas análises com onda irregular. Apenas os seguintes foram.

- Domínio do tempo implícito com incremento de tempo constante de 0,05 s;
- Domínio do tempo implícito com incremento de tempo constante de 0,01 s;
- Domínio do tempo implícito com incremento de tempo variável de 1 s;
- Domínio do tempo implícito com incremento de tempo variável de 0,1 s;
- Domínio da frequência.

Os mesmos parâmetros de solução e de armazenamento serão usados para fins comparativos. A Figura 67 apresenta o perfil de onda irregular com 80 componentes.

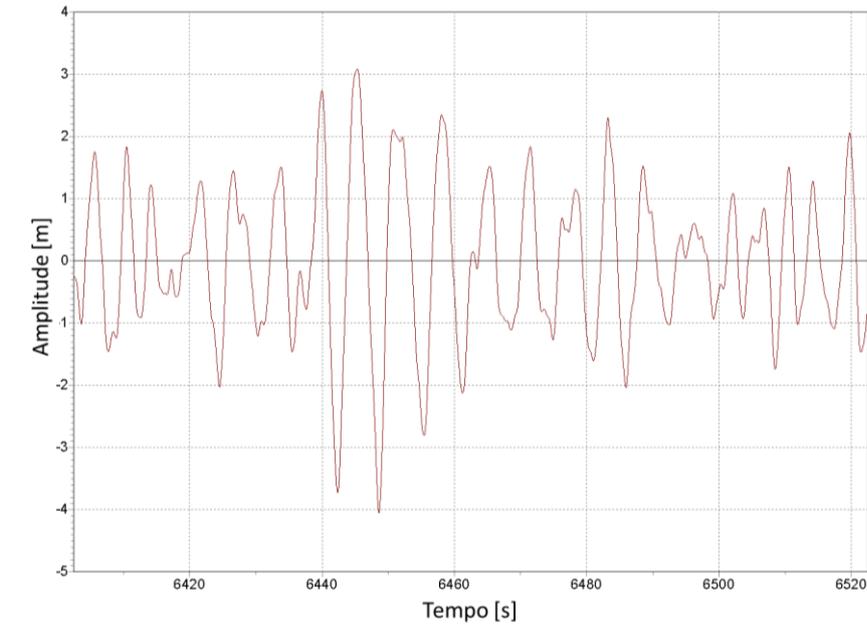


Figura 67: Perfil de onda irregular de período de pico 6s JONSWAP gerado pelo *OrcaFlex*.

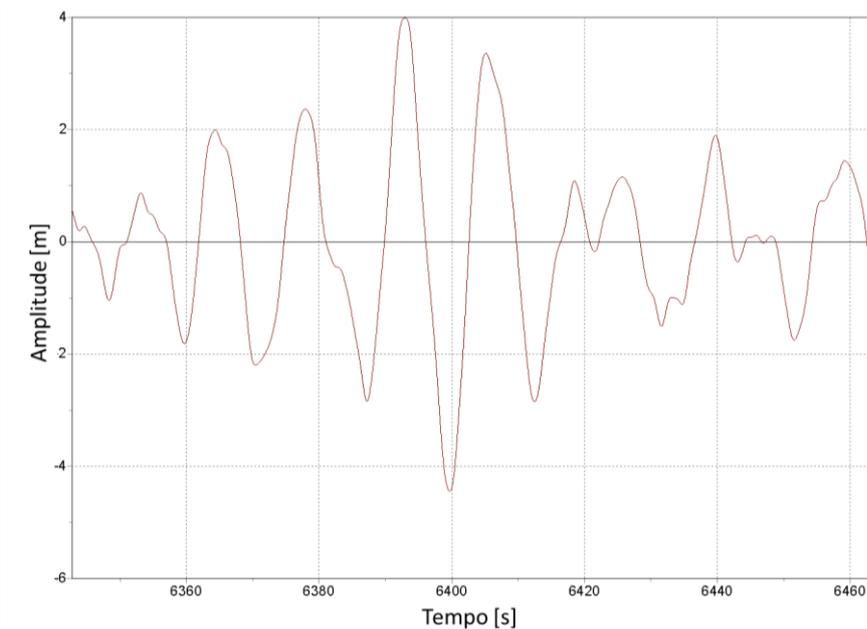


Figura 68: Perfil de onda irregular de período de pico 14s JONSWAP gerado pelo *OrcaFlex*.

6.5.1 Análise de Convergência do Número de Componentes

O princípio é o mesmo das análises de convergência feitas anteriormente nesse estudo, com a única diferença que além de variar o número de componentes, também é necessário variar a semente por se tratar de uma onda irregular.

O intervalo de variação do número de componentes foram 10, 20, 40, 80, 160, 320. As sementes variaram de 0 a 49.

É importante notar que, nessa etapa, serão simulados 3000 arquivos. Por essa razão, nessa etapa apenas o PLSV é mantido no modelo. O objetivo é ter o menor número de objetos possíveis para agilizar a simulação.

Por método de solução, são gerados 600 arquivos. Uma estimativa dos recursos necessários para incluir as simulações no domínio do tempo explícito foi realizada. Para isso, foram executadas algumas poucas análises com este método em um mar irregular de 3 horas, com apenas o PLSV no modelo. Concluiu-se que a simulação levaria em média 450 segundos por núcleo de processador e cada simulação ocuparia 1 *gigabyte* de armazenamento, portanto para incluir o método seriam necessários 75 horas por núcleo de processador e 600 *gigabytes* de espaço livre de armazenamento. O excesso de recursos exigidos levou a inviabilidade deste método de solução para esta etapa de análises.

Prosseguindo com as análises, para avaliar os resultados é tirada a média entre todas as sementes de um caso de número de componentes e os valores encontrados serão comparados aos de maior número de componentes.

Para este caso não é possível utilizar a metodologia de erro sobre a parcela dinâmica. O PLSV encontra-se parada no modelo estático, portanto sua primeira e segunda derivada são nulas, logo o erro será calculado pela razão entre a diferença, sobre o valor original. Os valores de tolerância da Tabela 16 serão utilizados para avaliar o resultado da análise de convergência do número de componentes da onda irregular, e a Tabela 17 as referências usadas para calcular o erro.

Tabela 16: Tolerância da análise de convergência.

Diferença máxima na Aceleração do PLSV [%]	Diferença máxima na Velocidade do PLSV [%]	Diferença máxima na suspensão máxima do PLSV [%]
5	5	5

Tabela 17: Resultados da onda de 320 componentes (referência na análise de convergência).

Método de Solução	T_p [s]	Aceleração máxima [m/s ²]	Velocidade máxima [m/s]	Erro na suspensão máxima [%]
Imp. Cte. 0,01 s	6	0,74	0,72	0,74
	14	1,41	2,65	4,55

A Tabela 18 mostra o menor número de componentes que atenderam as tolerâncias para cada método de solução.

Tabela 18: Resultados de análise de convergência de número de componentes.

Método de Solução	T_p [s]	Quantidade de Componentes	Erro na aceleração máxima [%]	Erro na velocidade máxima [%]	Erro na suspensão máxima [%]
Imp. Cte. 0,05 s	6	80	1,83	1,66	3,53
	14	40	3,55	3,41	3,53
Imp. Cte. 0,01 s	6	80	1,84	1,66	3,52
	14	40	3,55	3,41	3,55
Imp. Var. 1s	6	80	2,86	1,91	3,65
	14	40	3,49	3,54	3,51
Imp. Var. 0,1s	6	80	1,81	1,67	3,52
	14	40	3,55	3,41	3,55
Freq.	6	80	1,70	2,32	3,52
	14	40	3,94	2,35	3,53

A Figura 69 exemplifica, através de um gráfico tipo caixa, como ocorre a variação de resultados pelo número de componentes. Nela observa-se a distribuição de resultados para velocidade máxima para cada semente e número de componentes no caso de análise do domínio do tempo implícito com incremento de tempo de 1s. Um comportamento similar foi observado para todos os outros casos.

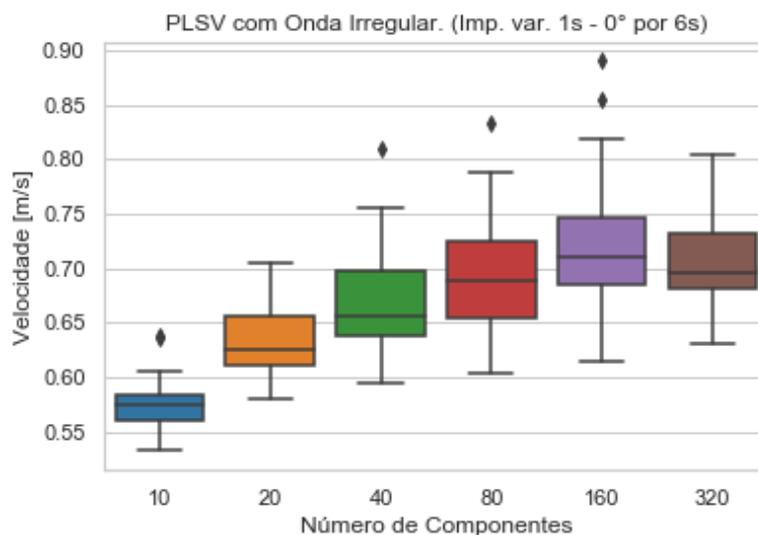


Figura 69: Distribuição dos resultados de velocidade máxima de cada semente.

Pode se concluir que para a onda de período de pico 6 s são necessários apenas 80 componentes para ter comportamento similar a uma onda com 320 componentes. Já para onda de período de pico de 14 s apenas 40 componentes já são suficientes para representar uma onda complexa.

6.5.2 Desempenho dos Modelos

Concluído a análise de convergência do número de componentes, pode-se avaliar quais métodos são adequados para a análise dinâmica com onda irregular JONSWAP. Para isso, os resultados médios de todas as sementes de todos os métodos serão comparados aos resultados médios de todas as sementes do método menor incremento de tempo analisado, o domínio do tempo implícito com incremento de tempo 0,01 s.

Tabela 19: Resultados da análise do PLSV com onda irregular JONSWAP

Método de solução	T_p [s]	Duração por número de Núcleos [s]	Erro na aceleração máxima [%]	Erro na velocidade máxima [%]	Erro na suspensão máxima [%]
Imp. Cte. 0,05 s	6	72.13	0.02	0.01	0.009
	14	62.52	0.004	0.003	0.003
Imp. Cte. 0,01 s	6	296,96	0,00	0,00	0,00
	14	296,27	0,00	0,00	0,00
Imp. Var. 1 s	6	3,05	5,44	2,56	2,66
	14	1,28	1,28	0,91	1,08
Imp. Var. 0,1 s	6	38.76	0.11	0.06	0.04
	14	32.63	0.02	0.01	0.01
Freq.	6	0,02	5,61	5,28	0,12
	14	0,01	13,14	13,24	0,356

Pelos resultados da Tabela 19, observa-se que as simulações com ondas de menor período de pico sofrem maiores problemas conforme aumentado o incremento de tempo. Isso ocorre porque os períodos de seus componentes são mais curtos e, portanto, a onda varia mais em relação ao tempo. Para analisar propriamente são necessários incrementos de tempo menores que os das ondas de alto período de pico.

Para ondas de T_p de 6 segundos, métodos de incremento de tempo maiores apresentaram erros superiores aos desejados, e, portanto, o método de menor incremento ainda deve ser usado se desejado precisão nos resultados.

Já para ondas de T_p de 14 segundos até mesmo métodos de grandes incrementos obtiveram resultados precisos, e, portanto, nesse caso pode ser usado com segurança incrementos de até 1 s.

O método de solução no domínio da frequência, apesar de apresentar os maiores erros, se destacou pela agilidade. Suas simulações são executadas quase que instantaneamente e, portanto, seu uso não pode ser descartado para casos onde é necessário avaliar muitos arquivos em pouco tempo, mas ao fazer isso, estão sendo assumidos erros de grandeza de até aproximadamente 15%. Uma outra limitação do método é que, como o mesmo não é dependente do tempo, não é possível saber quais os instantes críticos da onda. Se for desejável saber isso, mantendo a agilidade das simulações, deve ser usado o método de solução no domínio do tempo com incremento de tempo de 1 s. Comparado ao domínio da frequência, esse caso é muito mais demorado, mas ainda é o mais ágil do domínio do tempo. Ao utilizar ele estará sendo esperado erros na ordem de até aproximadamente 5%.

6.6 Análise Dinâmica do Sistema com Onda Irregular JONSWAP

Caso a análise dinâmica do sistema completo fosse avaliada para todo o período de 3 horas as simulações seriam demasiadamente longas e pesadas. Desta forma é proposta a seguinte abordagem:

- São selecionados da análise do PLSV com onda irregular os momentos mais críticos. Estes são os de maior deslocamento, maior velocidade e maior aceleração do PLSV, em seu centro de gravidade;
- É avaliado um intervalo ao redor de cada momento avaliado.
- Através do princípio de repetibilidade da onda irregular dado a mesma semente, é possível reproduzir fielmente o intervalo crítico evidenciado na análise anterior.

Essa abordagem se baseia na premissa de que a maior parte da análise de 3 h é não-crítica e desinteressante. Ela também se baseia que as tensões máximas, mínimas, e raio de curvatura mínima aparecerão nos intervalos ao redor desses momentos críticos.

6.6.1 Análise de Convergência da Duração da Análise Dinâmica

Para prosseguir com a análise, é primeiro necessário avaliar o mínimo intervalo necessário ao redor de cada momento crítico. Para isso, foi elaborada mais uma análise de convergência. Desta vez, o parâmetro a ser variado será a duração de cada simulação de momento crítico. Os intervalos avaliados serão de 15, 30, 60 e 120 segundos. Os demais parâmetros não variantes foram:

- Método de solução: os mesmos avaliados na análise de onda irregular com apenas o PLSV. O método de solução no domínio do tempo explícito não será analisado pela mesma razão apresentado na análise de onda irregular apenas com o PLSV.
- Número de componentes – 80 componentes, valor oriundo da análise de convergência de número de componentes.

Os demais parâmetros são os mesmos utilizados em todas as análises dinâmicas anteriores. Na Tabela 20 estão todos os momentos críticos e cada semente associada que serão analisadas. A coluna semente apenas identifica em qual semente de onda o momento crítico aconteceu.

Tabela 20: Sementes e momentos críticos

Momento	Período [s]	Semente	Instante [s]	Valor
Aceleração máxima	6	8	6462,44	0,85 m/s ²
	14	0	6402,74	1,64 m/s ²
Velocidade máxima	6	5	4106,31	0,88 m/s
	14	0	6399,88	3,00 m/s
Suspensão máxima	6	5	4107,94	0,84 m
	14	21	2305,70	5,37 m

Para o caso de T_p de 6 segundos, a velocidade e suspensão máxima ocorrem na mesma onda em instantes bem próximos. Para o caso de T_p de 14 segundos a aceleração e velocidade máxima ocorrem ambas na onda de semente 0 com intervalo de aproximadamente 3 segundos entre si.

Na Figura 70, estão os resultados da análise de convergência. Através dela é possível concluir que a simulação de 60 segundos apresenta erros na parcela dinâmica inferiores a 10%. Para casos onde deseja-se agilidade nas simulações, a duração de 60 segundos pode ser utilizada. A diferença no tempo computacional de ambas torna a simulação de 60 segundos bastante atrativa, mas se é desejado bastante precisão na análise, não se deve abrir mão de uma simulação com pelo menos 120 segundos.

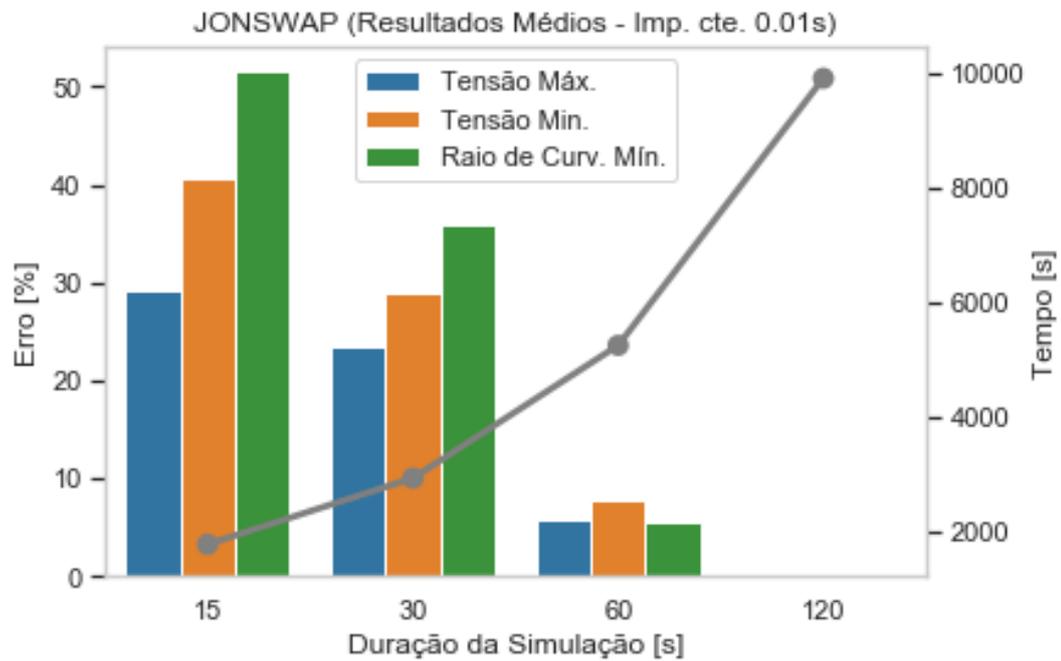


Figura 70: Resultados médios da análise de convergência de duração da análise dinâmica.

Observe que nas simulações com 30 s e 60 s houveram casos com grandes erros no raio de curvatura mínimo. A simulação de 60 já foi suficiente para evitar esta ocorrência.

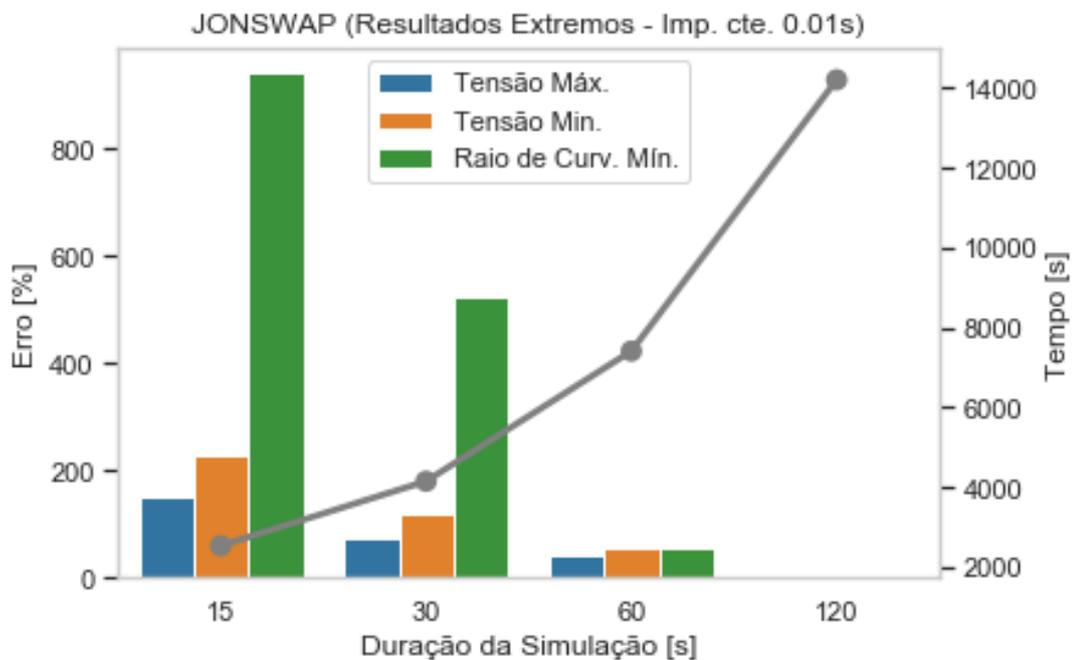


Figura 71: Resultados extremos da análise de convergência de duração da análise dinâmica.

6.6.2 Desempenho dos Modelos

Concluído a análise de convergência da duração da análise dinâmica, pode-se extrair os resultados de todos os momentos da duração de 120 segundos e avaliar quais os resultados extremos da análise dinâmica com onda irregular JONSWAP.

Tabela 21: Resultados da análise com onda irregular JONSWAP e Imp. Cte. 0.01 s (4'')

Etapa	Período [s]	Duração por Núcleo [s]	Tensão máxima [kN]	Tensão mínima [kN]	Raio de curvatura mínimo [m]
0	6	21922,49	1178,82	39,62	39,53
	14	21801,46	1189,46	15,48	29,34
1	6	24752,62	1122,63	39,46	49,79
	14	24184,15	1185,53	17,71	38,91
2	6	24740,06	1584,99	41,26	30,53
	14	24147,69	1646,58	19,98	29,27
3	6	25410,38	1448,95	12,58	29,62
	14	24994,20	1491,85	2,94	8,76
4	6	24166,26	1498,79	33,22	10,64
	14	23519,72	1483,74	21,27	10,13
5	6	24357,33	718,31	22,77	8,60
	14	23653,72	750,30	9,94	4,91

Tabela 22: Resultados da análise com onda irregular JONSWAP e Imp. Cte. 0.01 s (8'')

Etapa	Período [s]	Duração por Núcleo [s]	Tensão máxima [kN]	Tensão mínima [kN]	Raio de curvatura mínimo [m]
0	6	21363,66	3684,35	14,65	15,80
	14	21020,28	3745,15	-19,38	6,38
1	6	24932,85	2688,64	50,67	34,42
	14	24334,64	2856,09	-24,61	10,05
2	6	24987,19	3659,42	45,52	20,12
	14	24382,83	3730,73	-40,56	9,11
3	6	26344,68	3395,62	-0,05	9,91
	14	25825,10	3509,52	-14,18	6,30
4	6	28644,91	2983,72	-236,66	7,89
	14	27971,17	3114,81	-146,33	10,30
5	6	28680,32	1537,19	69,65	32,03
	14	27481,05	1572,943031	7,22	12,75

Os resultados da Tabela 21 e Tabela 22 são da análise mais complexa deste estudo, que mais se assemelha com a realidade. Estes podem ser tomados como referência na comparação com outros casos.

A Figura 72 indica o erro e a duração média de cada método de solução para onda irregular JONSWAP. Logo nota-se que a duração do domínio do tempo implícito de 0,01 segundos incrementos foi muito superior ao com 0,05 segundos de incremento. E é surpreendente a alta precisão do método com incremento de tempo 0,05 segundo em relação ao

de 0,01 segundo. Todos modelos de incremento de até 0,1 segundos mostraram grande coerência em seus resultados. Outra descoberta positiva é o domínio da frequência, que para onda regular havia se mostrado extremamente grosseiro. Agora este apresenta erros relativamente bem menores para a análise com onda irregular. Porém não se deve ter muito otimismo com essa redução, o mesmo ainda apresenta erros de pelo menos 20% na parcela dinâmica.

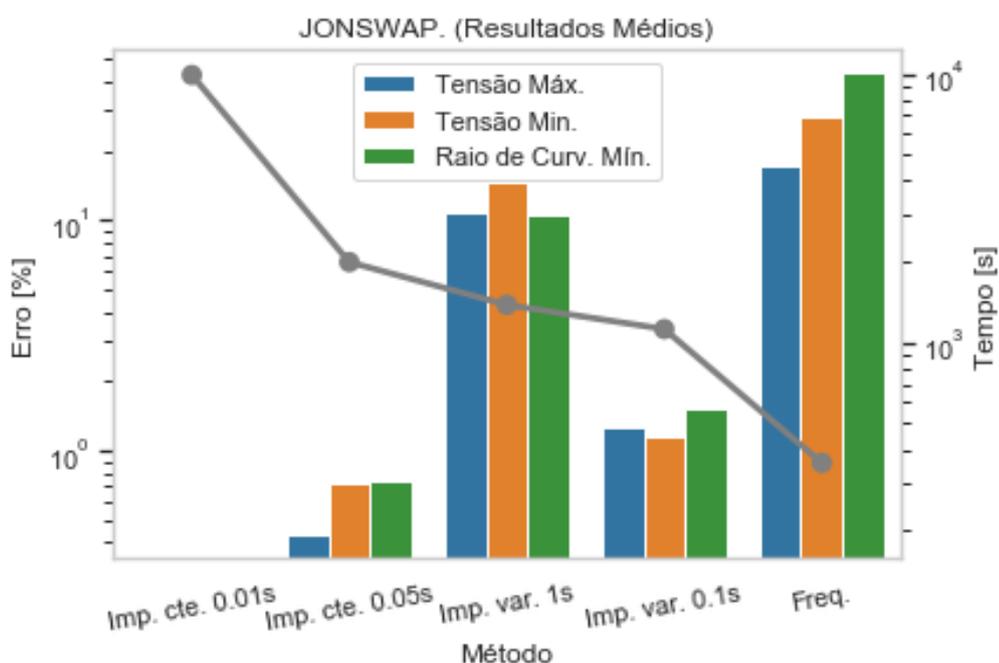


Figura 72: Resultados Médios da Análise Dinâmica com onda irregular JONSWAP.

A Figura 73 mostra o mesmo tipo de gráfico da Figura 72, mas agora para resultados máximos de cada método. É interessante observar como o caso de máxima duração do método com incremento de tempo de 1s foi superior ao método de 0,05s. Isso ocorre pois como o método é iterativo, quando os incrementos são largos demais, é possível que o modelo tenha que realizar muitas iterações até conseguir avançar aquele incremento. Nesses casos o método pode se tornar mais lento que outros com incrementos menores, porém mais estáveis.

Novamente os resultados do método de incremento 0,05s se mostram positivos, pois mesmo seu maior dos erros, não representou mais do que 10% da parcela dinâmica.

Com exceção do raio de curvatura mínimo, a solução no domínio da frequência apresentou erros similares ao método de incremento de tempo de 1 segundo, porém com desempenho computacional superior. Apresentando como a melhor opção entre os métodos menos precisos.

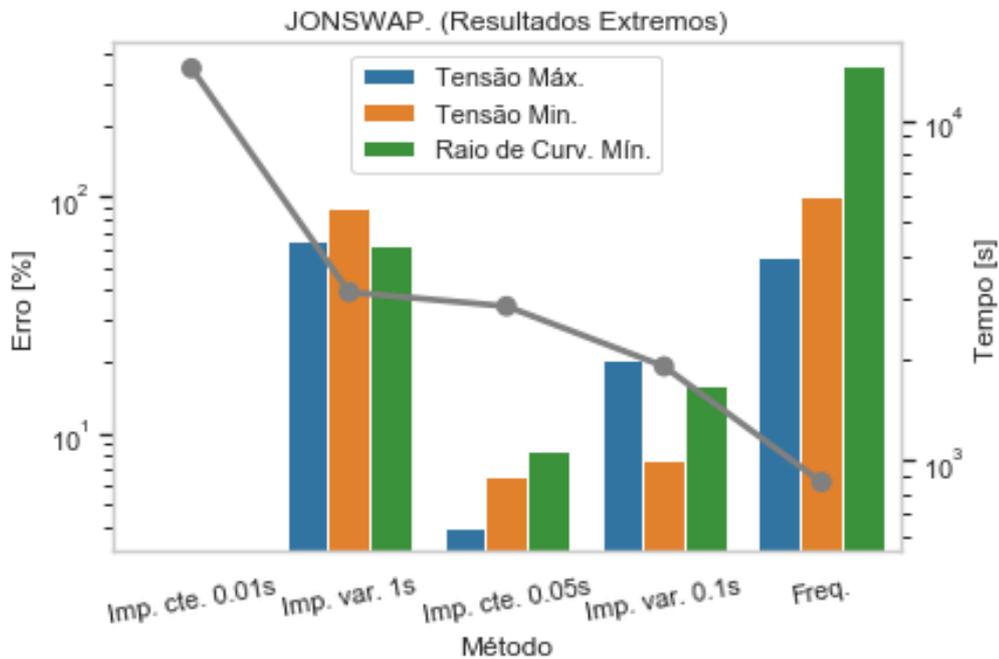


Figura 73: Resultados Extremos da Análise Dinâmica com onda irregular JONSWAP.

Com os resultados disponíveis, é possível analisar onde em qual ocasião selecionada na análise anterior ocorreram os resultados extremos. O objetivo desta análise de resultados é avaliar a correlação dos resultados no PLSV com os resultados na linha. Por exemplo, caso todos os resultados críticos da linha se mostrassem em apenas uma ocasião do PLSV, as outras poderiam ser dispensadas.

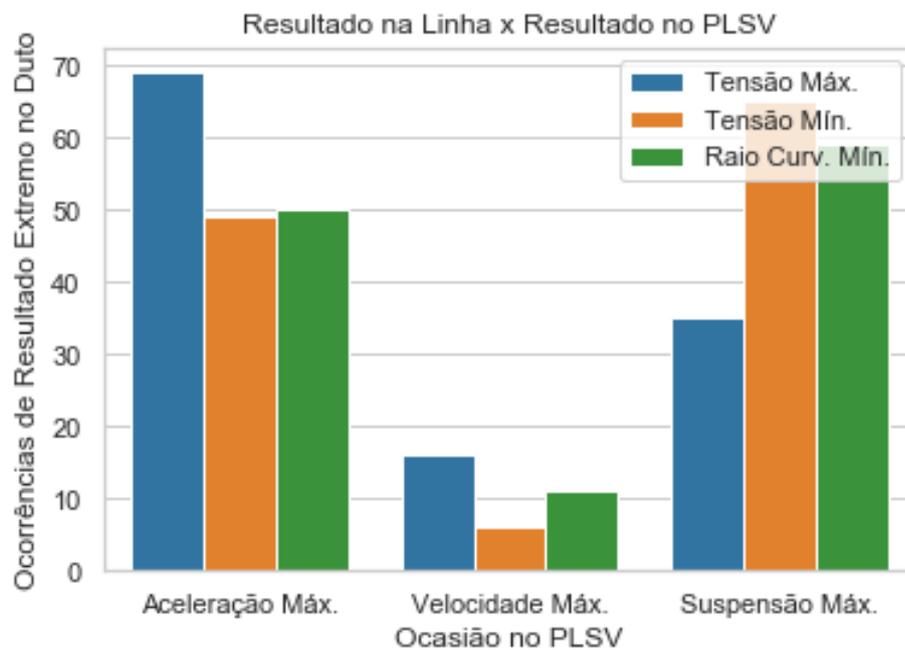


Figura 74: Ocorrência de resultados extremos para cada momento crítico.

Analisando a Figura 74, é possível notar que há baixa correlação entre a velocidade máxima no PLSV e resultados críticos na linha, ou seja, o momento de velocidade máxima no PLSV é responsável pela minoria dos registros de resultados que deseja-se observar. Portanto caso desejado reduzir o número de sementes analisadas, as primeiras que podem ser dispensadas, são as correspondentes à velocidade máxima no PLSV. Também é possível observar uma tendência de a tensão máxima estar associada aos casos de aceleração máxima no PLSV enquanto o raio de curvatura mínimo e tensão mínima aparecerem nas sementes de suspensão máxima.

Capítulo 7

7 Resultados

O objetivo de encontrar um modelo estático com o menor número de elementos possível foi atendido, identificando as regiões de interesse e aplicando uma malha refinada apenas nelas. Este passo foi muito importante para o restante do projeto. Pois se fossem usados modelos com maior quantidade de segmentos, a exigência de recursos computacionais seria ainda maior.

Após todas as simulações dinâmicas executadas e seus resultados extraídos, é possível analisar o desempenho da teoria de onda regular da expansão de 5ª ordem de Stokes e da função *Stream* de 3ª ordem em relação a onda irregular JONSWAP. Todos os erros que serão apresentados a seguir, serão em relação aos resultados das análises de onda irregular no domínio do tempo de 0,01 segundos, porque este é o resultado com menor incremento de tempo dentre os analisados para onda irregular e é, portanto, o mais confiável dentre todos.

As primeiras conclusões serão feitas para o método de referência. Comparando este caso mais confiável com seus correspondentes de onda regular, observou-se diferenças razoáveis se consideradas médias, porém grandes diferenças se considerados extremos.

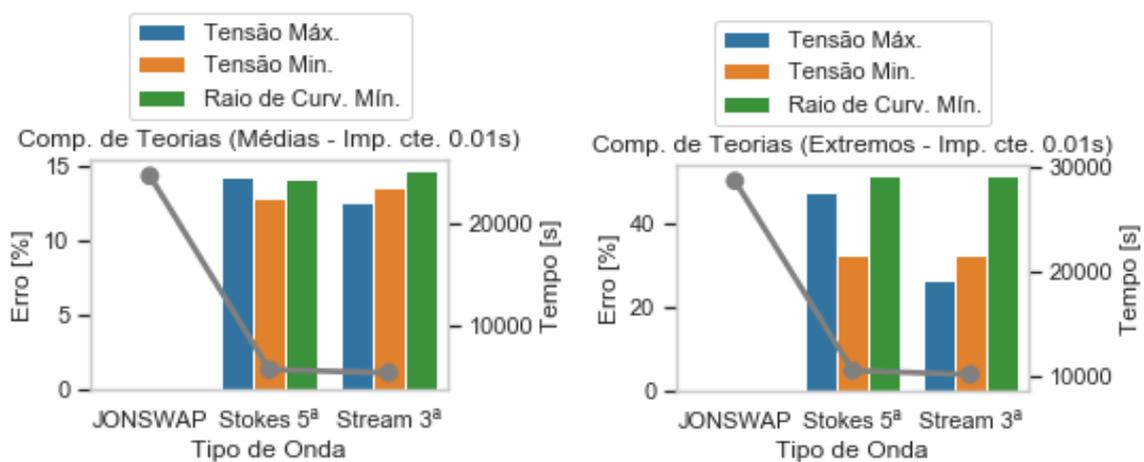


Figura 75: Resultados das teorias de ondas no domínio do tempo implícito com incremento de tempo constante de 0,01 s.

Isso mostra que o modelo de onda regular foi capaz de representar uma boa alternativa para a maioria dos casos, porém com grande desvio para certos casos. Os modelos de excitação foram muito mais ágeis, comparados aos de onda irregular. A Figura 76 e Figura 77 apresentam os erros máximos desse método por etapa de instalação do duto de 4" e 8" respectivamente.

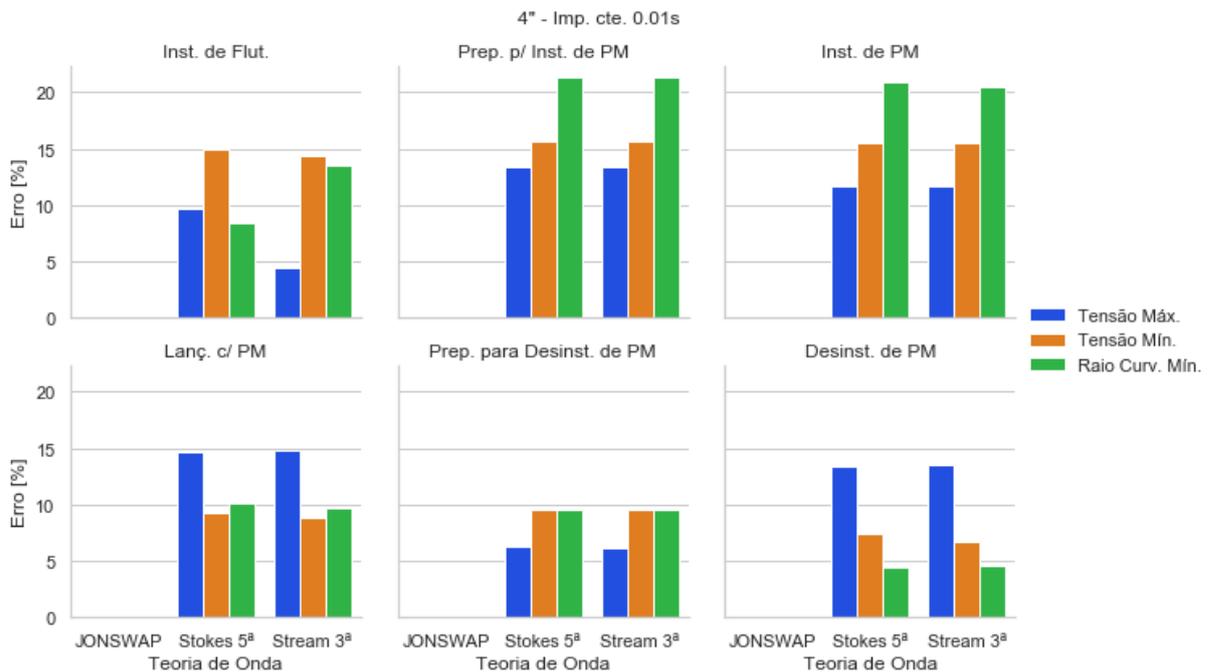


Figura 76: Resultados médios das teorias de onda por fase de instalação para o duto de 4".

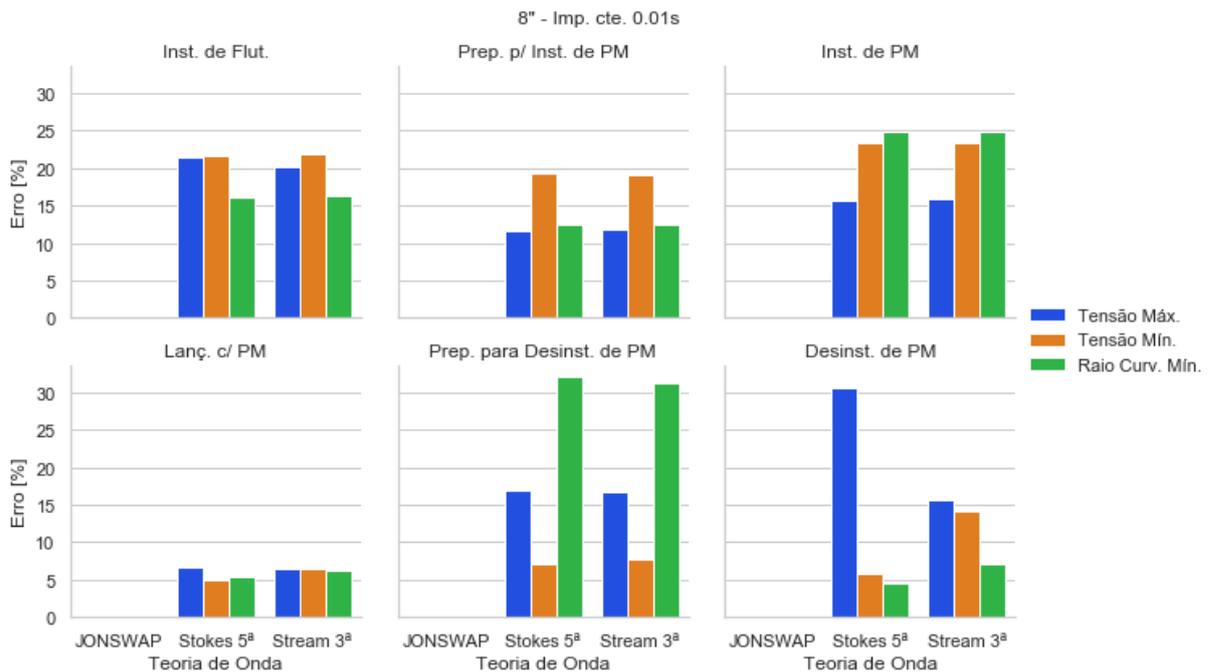


Figura 77: Resultados médios das teorias de onda por fase de instalação para o duto de 8".

Ratifica-se que, quando desejados resultados confiáveis de uma instalação em *Lazy Wave*, devem ser feitas análises de onda irregular. As análises de onda regular são incapazes de passar alto grau de confiança necessário para garantir que todos os resultados são precisos.

Isso não significa que análises de onda regular não devam ser feitas. Caso deseje-se avaliar rapidamente, os modelos de ondas regulares no domínio do tempo implícito com

incremento de tempo de 0,01 segundos até 0,1 segundos mostraram precisão razoável, enquanto exibem desempenho computacional muito melhor se comparados aos de onda irregular. A Figura 78 apresenta a comparação de teorias para o incremento de tempo de 0,05 segundos.

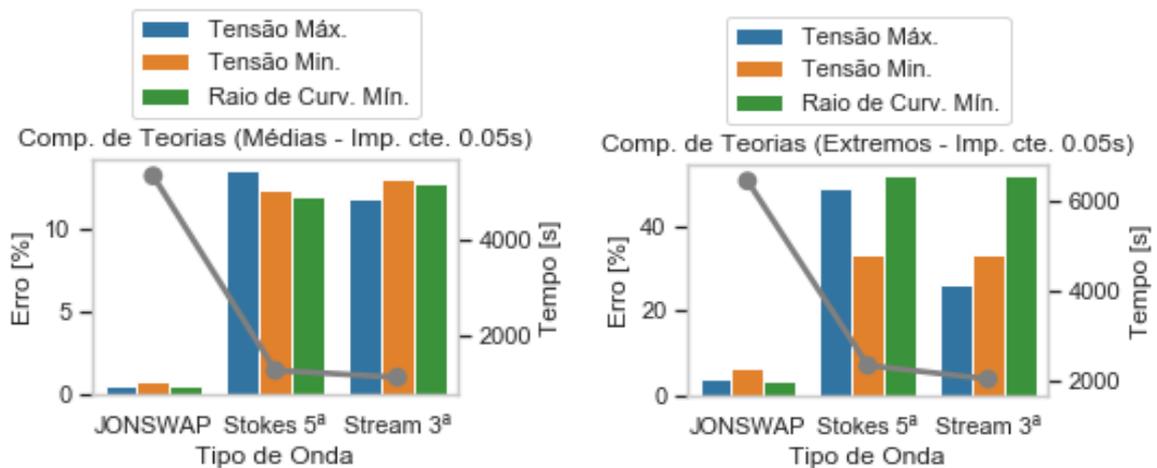


Figura 78: Resultados das teorias de ondas no domínio do tempo implícito com incremento de tempo constante de 0,05 s.

Existem casos onde o tempo é um fator mais importante do que a precisão, geralmente pela necessidade da rápida tomada de uma primeira decisão. Nesse caso, é oportuno utilizar modelos de onda regulares no domínio do tempo implícito com incrementos de 0,1 segundo. Apesar de assumir um pouco erro maior, Figura 79, estes apresentaram excelente desempenho em termos de tempo e se mostram adequados para estudos preliminares.

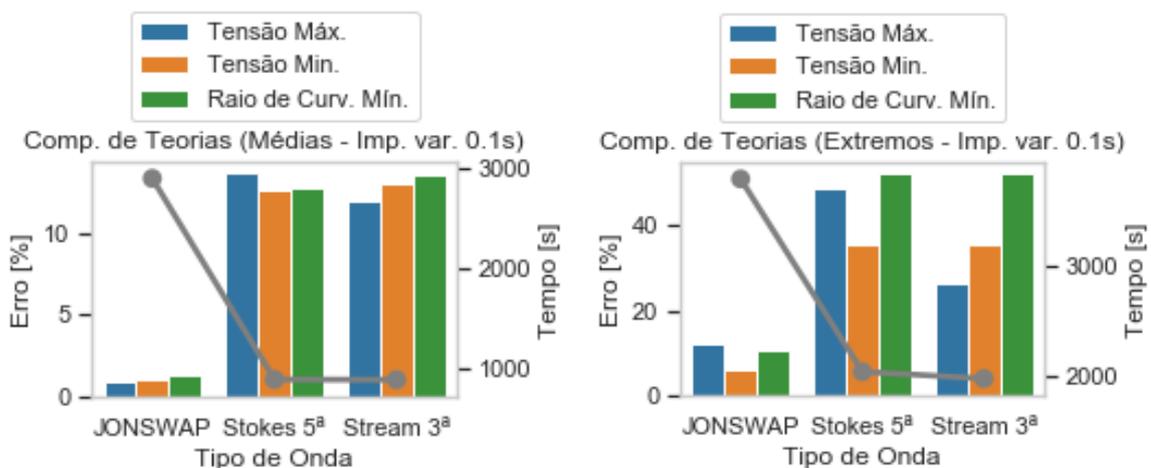


Figura 79: Resultados das teorias de ondas no domínio do tempo implícito com incremento de tempo constante de 0,1s.

O modelo com incremento de tempo de 1s, Figura 80, apresentou muita instabilidade, o que levou há muitas iterações e acabou por atrasar as análises. Portanto conclui-se que não há vantagem alguma na utilização deste método, já que ele tem mal desempenho tanto precisão, quanto em duração.

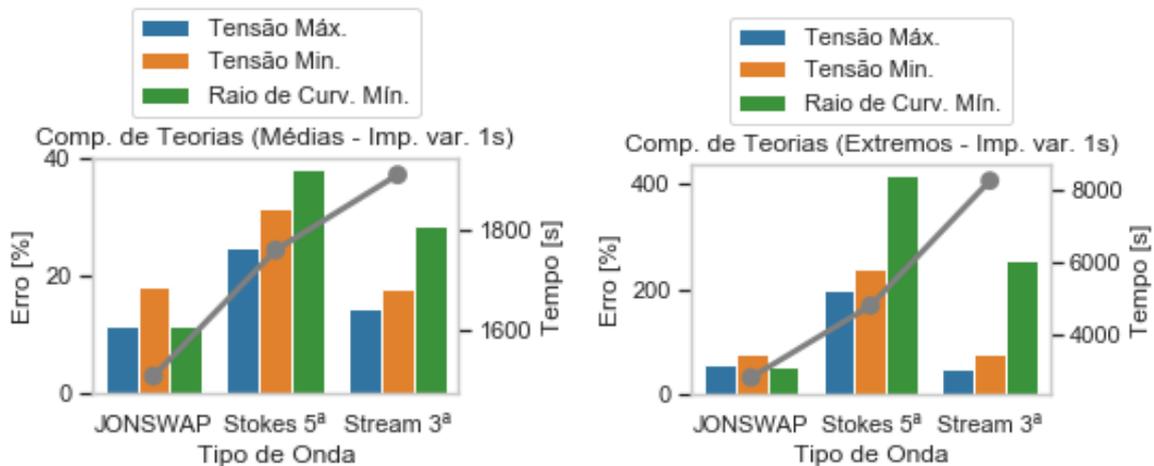


Figura 80: Resultados das teorias de ondas no domínio do tempo implícito com incremento de tempo constante de 1s.

O modelo de onda regular no domínio do tempo explícito, Figura 81, dificilmente achará uma aplicação, apesar da precisão superior entre os modelos utilizados nas análises de onda regular. O fato de que os modelos no domínio de tempo implícito apresentam uma pequena margem de erro, em relação ao explícito, em uma duração muito menor faz com que os modelo implícitos sejam muito mais interessantes do que os explícitos para a maioria das aplicações imagináveis.

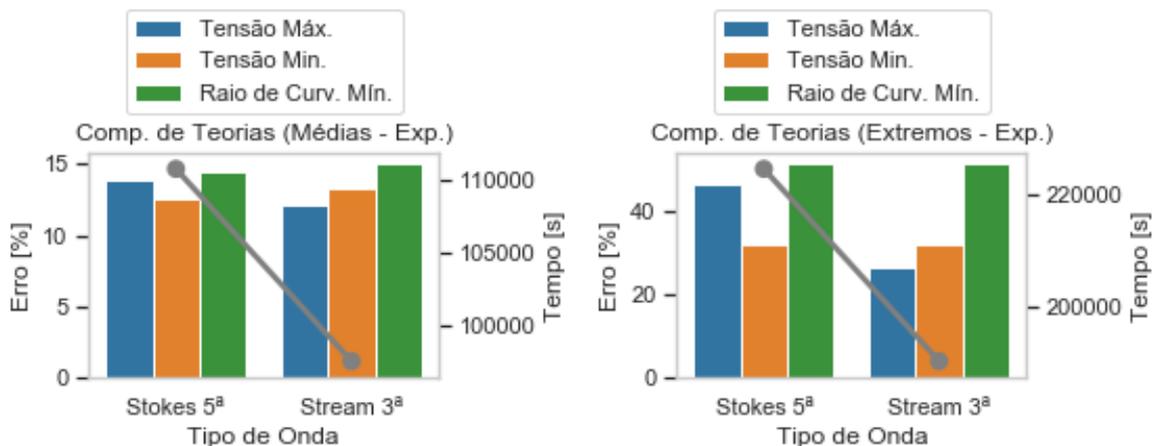


Figura 81: Resultados das teorias de ondas no domínio do tempo explícito.

A duração excessiva inviabiliza a utilização do método para análises ondas irregulares. No entanto os modelos no domínio do tempo explícito ainda encontram aplicação em análises de convergência devido ao seu grau de confiança.

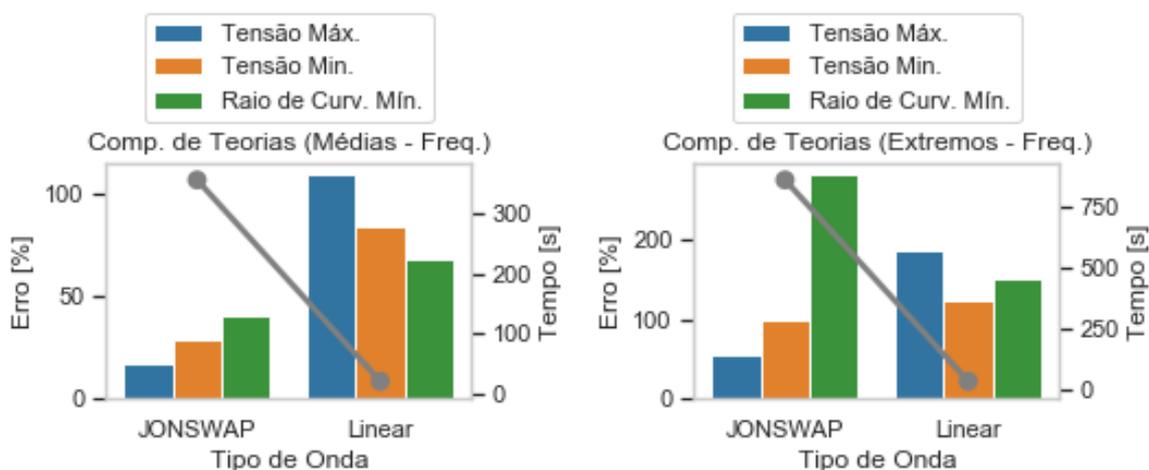


Figura 82: Resultados das teorias de ondas no domínio da frequência.

As análises no domínio da frequência, Figura 82, apresentaram grandes erros nos resultados da linha, especialmente para ondas regulares. Os resultados se mostraram grosseiros nas análises com excitações harmônicas, porém, para o caso onde foi analisada em onda irregular o desempenho não foi tão ruim. No caso onde foi analisado apenas o PLSV os erros foram até razoáveis. A análise no domínio da frequência teve bons resultados, com desempenho em termos de tempo extraordinário. A mesma pode ser usada para avaliar dentre um universo gigante de sementes, quais sementes implicam nas ocorrências mais críticas no PLSV, tudo isso em poucos minutos. É válido lembrar, também, que as mesmas não são dependentes do tempo e não conseguem identificar instantes. Para isso, pode-se utilizar o domínio do tempo implícito com grandes incrementos de tempo.

Capítulo 8

8 Conclusão

Ao longo de diversas análises, foi possível observar como cada tipo de excitação oferece diferentes maneiras de expressar um resultado dentro dos domínios de tempo e frequência avaliados.

As ondas regulares conseguiram excelente desempenho com erros razoáveis, se provando como uma sólida alternativa quando desejada agilidade nas análises. Já quando há recursos suficientes, e é desejado alto grau de precisão nas análises, os modelos de onda irregular se mostraram os únicos confiáveis. Porém, não se deve afirmar que um resultado é superior ao outro por apresentar maior precisão, ou que algum modelo seja o melhor pois é mais rápido. A escolha do modelo de excitação de uma análise deve ser feita baseada em três fatores.

- Prazo;
- Impacto às pessoas, ao meio-ambiente e aos ativos da empresa;
- Recursos disponíveis.

Não é o objetivo deste projeto apontar o melhor modelo de excitação para representar uma onda, ou então qual deveria ser usado em cada situação, mas sim apresentar os pontos positivos e negativos de cada uma, e os efeitos da variação de parâmetros em seus resultados. Sempre caberá ao responsável pelas análises, entender o problema, avaliar os fatores envolvidos, e determinar o modelo de excitação que melhor se adeque aos seus requisitos e objetivos.

Capítulo 9

9 Discussão para Trabalhos Futuros

Devido ao limite de recursos deste projeto (armazenamento, capacidade de processamento e tempo) foram analisadas ondas incidindo apenas em uma direção sobre o modelo. Apesar de ter liberdade para mudar seu aprofundamento conforme desejado, ondas em um mar estacionário não virão necessariamente sempre da mesma direção. Para trabalhos futuros, pode ser analisado o efeito de ondas em outras direções ou a excitação por mais de uma onda de direções distintas simultaneamente.

Também pode ser avaliado o comportamento dos parâmetros dos modelos de excitação para outros períodos de pico.

No atual projeto, foram discutidos apenas os efeitos das excitações de ondas no modelo. No entanto, a operação real também é afetada por diversos outros fatores não analisados, como correnteza, maré e ventos. Para trabalhos futuros, tais fatores podem ser avaliados nos modelos, além dos efeitos que ocorrem em diferentes teorias e parâmetros. Também podem ser avaliados parâmetros meteoceanográficos de outras regiões, assim como configurações diferentes de *Lazy Wave* ou outras operações de um PLSV.

Capítulo 10

10 Referências Bibliográficas

- Balmoral Offshore Engineering. (2018). *Balmoral Offshore Engineering*. Acesso em 10 de 06 de 2018, disponível em Distributed Buoyancy: <https://www.balmoraloffshore.com/index.php/products/surf/distributed-buoyancy>
- BELOV. (11 de Novembro de 2018). Fonte: <http://www.belov.com.br/servicos-offshore-emersos/materiais-de-ancoragem/index.html>
- Codecogs. (6 de Junho de 2014). *Library*. Fonte: Codecogs: http://www.codecogs.com/library/engineering/fluid_mechanics/waves/spectra/pierson_moskowitz.php
- Det Norske Veritas. (2010). *Recommended Practice DNV-RP-C205*.
- DOF Subsea. (11 de Novembro de 2018). Fonte: <http://www.dof.no/en-GB/DOF-Fleet/CSV/Skandi-Recife>
- Driemeier, L. (2017). *Escola Politécnica da Universidade de São Paulo*. Acesso em 24 de 06 de 2018, disponível em Departamento de Engenharia Mecânica: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2247566/mod_resource/content/1/Material_Aulas01e02.pdf
- Flexi France. (2006). *Technip*. Acesso em 18 de 06 de 2018, disponível em Flexi France Technology: http://www.technip.com/sites/default/files/technip/page/attachments/flexible_pipe_technology.pdf
- Flexi France. (2011). *Technip*. Acesso em 19 de 05 de 2018, disponível em Flexi France Technology: <http://www.technip.com/en/entities/flexi-france/flexi-france-technology>
- Orcina. (2018). *Orcina*. Acesso em 24 de 06 de 2018, disponível em About Orcina: <https://www.orcina.com/AboutOrcina/index.php>
- Orcina. (2018). *Orcina*. Acesso em 10 de 06 de 2018, disponível em Orcaflex Documentation: <https://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/Documentation/Help/>
- Petrobras. (2005). *Metoccean Data*.
- Petrobras. (2015). *Petrobras*. Acesso em 26 de 06 de 2018, disponível em News: <http://www.petrobras.com.br/en/news/petrobras-receives-highest-award-in-global-oil-industry.htm>

- Petrobras. (2015). *Petrobras*. Acesso em 26 de 06 de 2018, disponível em Fatos e Dados: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-curiosidades-sobre-equipamentos-de-nossos-sistemas-submarinos.htm>
- Rao, S. S., & Griffin, P. (2011). *Mechanical Vibrations* (5^a ed.). (M. J. Horton, Ed.) Upper Saddle River: Pearson Education, Inc.
- Segerlind, L. J. (1984). *Applied Finite Element Analysis* (2^a ed.). John Wiley and Sons.
- Technip. (2015). *Technip*. Acesso em 20 de 05 de 2018, disponível em Publications: http://www.technip.com/sites/default/files/technip/fields/publications/attachments/flexible_pipe_july_2015_web.pdf
- TechnipFMC. (2014). Acesso em 10 de 06 de 2018
- Trelleborg. (2017). *Trelleborg*. Acesso em 26 de 06 de 2018, disponível em Subsea Bend Stiffeners: <http://www.trelleborg.com/en/offshore/products/bend--control--solutions/subsea--bend--stiffeners>
- Trelleborg. (2017). *Trelleborg*. Acesso em 26 de 06 de 2018, disponível em Subsea Bend Restrictors: <http://www.trelleborg.com/en/offshore/products/bend--control--solutions/subsea--bend--restrictors>
- Trelleborg. (11 de Novembro de 2018). (M. J. Horton, Editor) Fonte: <http://www.trelleborg.com/en/offshore/products/subsea--buoyancy/standardized--buoyancy--module>
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. (1998). *Guide to Wave Analysis and Forecasting* (2^a ed.). Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization.

APÊNDICE I – Determinação Numérica do Intervalo de Altura e Período de Ondas

Determinação Numérica do Intervalo de Altura e Período de ondas.

Biblioteca que sero usadas para examinar os dados

```
In [1]: 1 import pandas as pd
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 import seaborn as sns
4 # configura o estilo dos gráficos
5 sns.set_style('whitegrid')
6 import warnings
7 warnings.filterwarnings('ignore')
```

Os dados, uma distribuição de altura e periodo de onda, estão em um arquivo csv, e é importado através do pandas.

```
In [2]: 1 dist = pd.read_csv('dist_normalized.csv')
```

É possível inspecionar os datasets através do método `describe()` .

```
In [3]: 1 # descrição da distribuição
2 dist.describe()
```

```
Out[3]:
```

	altura	periodo
count	1.831442e+06	1.831442e+06
mean	1.115699e+00	5.743301e+00
std	7.220474e-01	2.799878e+00
min	1.421425e-06	8.348817e-05
25%	6.144102e-01	3.675846e+00
50%	9.859896e-01	5.452484e+00
75%	1.471014e+00	7.496907e+00
max	1.197367e+01	2.343239e+01

Através do método `quantile()` é possível saber qual os valores máximo com 99,5% de confiança. Ou seja, pode-se afirmar com 99,5% de certeza que o valor sempre será igual ou inferior ao valor encontrado.

```
In [4]: 1 dist.quantile(0.995)
```

```
Out[4]: altura      3.846880
periodo      13.944079
Name: 0.995, dtype: float64
```

APÊNDICE II – Determinação dos Parâmetros e Aplicabilidade das Teorias de Ondas Regulares

Apêndice II

Determinação dos parâmetros e aplicabilidade das teorias de ondas regulares.

Referências

[DNV GL \(https://www.dnvgl.com/\)](https://www.dnvgl.com/) é uma fundação autônoma e independente com sede na Noruega que certifica, classifica, oferece serviço de consultoria para serviços de navegação marítima, instalações offshore e onshore ao redor do mundo. A DNV oferece uma série de documentos de Prática Recomendadas. A modelagem de ondas regulares é abordada na [DNV-RP-205 \(https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnv/codes/docs/2010-10/rp-c205.pdf\)](https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnv/codes/docs/2010-10/rp-c205.pdf), cujo título em tradução livre é Condições Ambientais e Carregamentos Ambientais.



A escocesa [Orcina \(https://www.orcina.com/index.php\)](https://www.orcina.com/index.php), desenvolvedora do [Orcaflex \(https://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/index.php\)](https://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/index.php), software utilizado para as simulações do estudo. A Orcina disponibiliza gratuitamente seu manual, onde suporta usuários na modelagem, execução e extração de modelos através do *Orcaflex*.

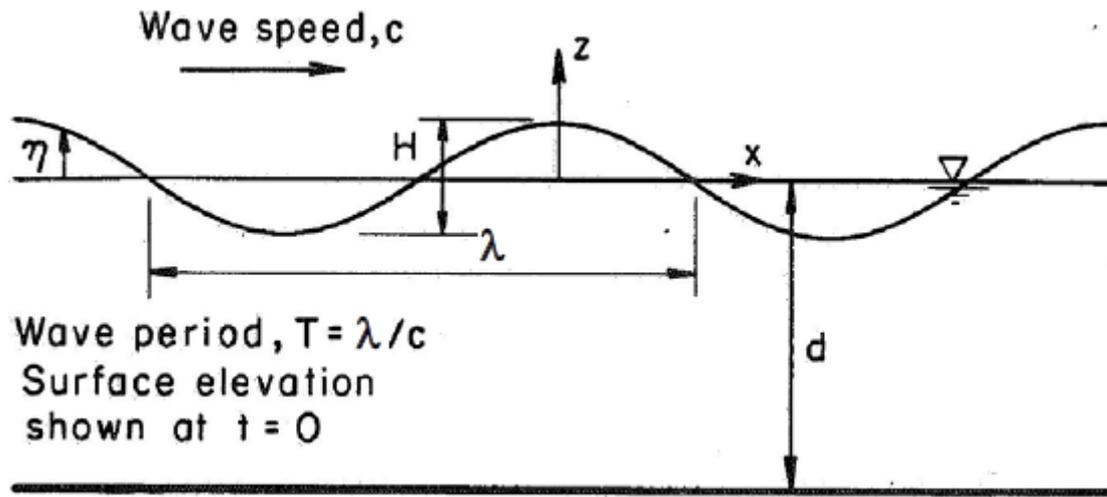


Metocean Data da Bacia de Campos. Conjunto de dados meteoceanográficos da bacia de Campos.

Parâmetros de Ondas Regulares

Apesar de ondas serem irregulares por natureza, como forma de simplificar modelos, a mesma pode ser representada por ondas regulares.

A imagem abaixo apresenta os parâmetros que serão usados ao longo do estudo para Ondas Regulares



- H = Altura de onda;
- λ = Comprimento de onda;
- d = Profundidade (em relação a nível médio);
- η = Perfil da onda.

Altura de Onda Máxima

A altura máxima de uma onda regular é limitada pela quebra da mesma. Segundo a DNV-RP-C205 a altura máxima de onda é encontrada pela fórmula:

$$\frac{H_b}{\lambda} = 0.142 \tanh \frac{2\pi d}{\lambda}$$

Onde o comprimento de onda λ é dado pela fórmula a seguir para águas profundas:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$$

In [1]:

```

1  from scipy.constants import pi, g
2  from numpy import tanh, arange
3  import seaborn as sns
4  sns.set_style('whitegrid')
5  import pandas as pd
6  import matplotlib.pyplot as plt
7
8  # periodo máximo
9  tp_max = 14
10
11 # range de profundidade do estudo
12 d_min = 2010
13 d_max = 2220
14
15 hb1 = []
16 hb2 = []
17 xax = arange(0.1, tp_max+1, 0.1)
18
19 df = pd.DataFrame(columns={'tp', 'hb', 'lmbd', 'profundidade'})
20 for tp in xax:
21     lmbd = (g*tp**2)/(2*pi)
22     hb1 = lmbd*0.142*tanh(2*pi*d_min/lmbd)
23     df = df.append({'tp':tp, 'hb':hb1, 'profundidade':d_min, 'lmbd':lmbd},
24                   ignore_index = True)
25     hb2 = lmbd*0.142*tanh(2*pi*d_max/lmbd)
26     df = df.append({'tp':tp, 'hb':hb2, 'profundidade':d_max, 'lmbd':lmbd},
27                   ignore_index = True)
28
29 ax = sns.relplot(x = 'tp', y = 'hb', data = df, kind = 'line',
30                 style = 'profundidade')
31 ax.set_axis_labels('Periodo [s]', 'Altura [m]')
32 plt.savefig('hb.png')
33
34 ax = sns.relplot(x = 'tp', y = 'lmbd', data = df, kind = 'line')
35 ax.set_axis_labels('Periodo [s]', 'Comprimento [m]')
36 plt.savefig('lambda.png')

```

Estado de Mar Estacionário

Segundo a DNV GL, uma prática corriqueira em análises é assumir que estados de mar são estáveis em períodos de até 6 horas. Este tipo de premissa se chama estado de mar estacionário. O mesmo pode ser definido em três características:

- H_s = Altura significativa de onda. A média de altura do maior terço de ondas durante um período;
- T_p = Período de pico. O inverso da frequência de maior energia no espectro de onda.;
- T_z = A média dos intervalos de tempo entre dois momentos sucessivos onde a onda esteve no nível médio.

Altura de Onda Máxima em um Mar Estacionário (H_{max})

A altura máxima de onda esperada em uma amostragem de duração e com altura significativa, em relação ao período, é descrita pela seguinte equação recomendada pela *Orcina*:

$$H_{\max} = kH_s \left(\frac{1}{2} \ln N \right)^{1/2}$$

$$N = t/T_z$$

Onde k é um fator aplicado devido ao fato de em um intervalo de tempo razoável, os maiores picos e vales geralmente não ocorrem seguidos. A Orcina recomenda um fator de 0,9 para operações de duração curta, como a deste projeto, e 1 para operações de longa duração, como um estudo de fadiga.

O parâmetro de aprimoramento de pico γ é fornecido pelo Metocean da Bacia de Campos:

$$\gamma = 6.4 \times T_p^{(-0.491)}$$

A relação T_p/T_z é fornecido pelo Metocean da Bacia de Campos:

$$T_z = T_p \sqrt{\frac{5 + \gamma}{10.89 + \gamma}}$$

In [17]:

```

1  from numpy import log
2
3  # hs
4  hs = 4
5  # duração
6  t = 3600*3
7  # fator de duração da operação
8  k = 0.9
9
10 # período mínimo. Não é possível ter certeza se o hmax
11 # do período mínimo é possível antes de calculá-lo e compará-lo
12 # com o hb do período, portanto deve ser calculado iterativamente.
13 # Um palpite razoável é começar com hmax = 2*hs
14 tp_min = 6
15
16 # parâmetro de aprimoramento de pico
17 gamma_min = 6.4*tp_max**-0.491
18 gamma_max = 6.4*tp_min**-0.491
19
20 print(f'O menor γ é {gamma_min}')
21 print(f'O maior γ é {gamma_max}')
22
23 # período entre zeros
24 tz_min = tp_min*((5+gamma_min)/(10.89+gamma_min))**0.5
25 tz_max = tp_max*((5+gamma_max)/(10.89+gamma_max))**0.5
26
27 print(f'O menor Tz é {tz_min}')
28 print(f'O maior Tz é {tz_max}')
29
30 N_min = t/tz_max
31 N_max = t/tz_min
32
33 # altura máxima pela equação apresentada pela Orcina
34 hmax_min_orc = k*hs*(0.5*log(N_min))**0.5
35 hmax_max_orc = k*hs*(0.5*log(N_max))**0.5
36
37 print(f'A altura máxima de onda em {t/3600} horas é {hmax_min_orc}m \
38 para o maior período. hmax/hs = {hmax_min_orc/hs}')
39 print(f'A altura máxima de onda em {t/3600} horas é {hmax_max_orc}m \
40 para o menor período. hmax/hs = {hmax_max_orc/hs}')

```

O menor γ é 1.7515845607289702

O maior γ é 2.6552640164515786

O menor T_z é 4.384835943121045

O maior T_z é 10.524812924377908

A altura máxima de onda em 3.0 horas é 6.702947593151696m para o maior período. $h_{max}/h_s = 1.675736898287924$

A altura máxima de onda em 3.0 horas é 7.113598725237045m para o menor período. $h_{max}/h_s = 1.7783996813092613$

Já a DNV GL apresenta a seguinte equação na DNV-RP-C205 para determinação da altura máxima em determinado intervalo de tempo:

$$H_{\max,c} = \frac{H_s}{2} \sqrt{(1-\rho) \ln(t/T_z)}$$

Onde ρ é o parâmetro que representa os efeitos de largura de banda. Segundo a DNV GL valores típicos variam de -0,6 a -0,75. O mesmo pode ser calculado por quando $1 < \gamma < 10$:

$$\rho = -0.000191 \cdot \gamma^3 + 0.00488 \cdot \gamma^2 - 0.0525 \cdot \gamma - 0.605$$

In [3]:

```

1 # parâmetro de efeito de largura de banda
2 ro_min = -0.000191*gamma_min**3+0.00488*gamma_min**2-0.0525*gamma_min-0.605
3 ro_max = -0.000191*gamma_max**3+0.00488*gamma_max**2-0.0525*gamma_max-0.605
4
5 print(f'O menor ρ é {ro_min}')
6 print(f'O maior ρ é {ro_max}')
7
8 # altura máxima pela equação da DNV
9 hmax_min_dnv = hs/2*((1-ro_min)*log(N_min))**0.5
10 hmax_max_dnv = hs/2*((1-ro_max)*log(N_max))**0.5
11
12 print(f'A altura máxima de onda em {t/3600} horas é {hmax_min_dnv}m \
13 para o maior período. hmax/hs = {hmax_min_dnv/hs}')
14 print(f'A altura máxima de onda em {t/3600} horas é {hmax_max_dnv}m \
15 para o menor período. hmax/hs = {hmax_max_dnv/hs}')

```

O menor ρ é -0.6830125366386282

O maior ρ é -0.7135709394332731

A altura máxima de onda em 3.0 horas é 6.832065040280063m para o maior período. hmax/hs = 1.7080162600700157

A altura máxima de onda em 3.0 horas é 7.316155037409533m para o menor período. hmax/hs = 1.8290387593523834

Com as alturas calculadas, é prudente seguir com a de maior e menor valor.

In [4]:

```

1 hmax_min = hmax_min_orc
2 hmax_max = hmax_max_dnv

```

Parâmetros Adimensionais

Existem alguns parâmetros adimensionais que ajudam a classificar o tipo de onda e portanto servem de guia para escolher adequadamente qual a teoria de onda mais aplicável para o modelo, são eles:

- Parâmetro de declividade de onda;

$$S = 2\pi \frac{H}{gT^2} = \frac{H}{\lambda_0}$$

In [5]:

```

1 from numpy import log
2
3 # S = Parâmetro de declividade de onda.
4 s_min = (2*pi*hmax_min)/(g*tp_max**2)
5 s_max = (2*pi*hmax_max)/(g*tp_min**2)
6
7 print(f'O parâmetro de declividade de onda mínimo é {s_min}')
8 print(f'O parâmetro de declividade de onda máximo é {s_max}')
```

O parâmetro de declividade de onda mínimo é 0.021911340374344848
O parâmetro de declividade de onda máximo é 0.130208576822019

- Parâmetro de água rasa;

$$\mu = 2\pi \frac{d}{gT^2} = \frac{d}{\lambda_0}$$

In [6]:

```

1 # mi = Parâmetro de água rasa.
2 mi_min = (2*pi*d_min)/(g*tp_max**2)
3 mi_max = (2*pi*d_max)/(g*tp_min**2)
4
5 print(f'O parâmetro de água rasa mínimo é {mi_min}')
```

O parâmetro de água rasa mínimo é 6.570511486234803
O parâmetro de água rasa máximo é 39.51023988240033

- Número de *Ursell*

$$U_R = \frac{S}{\mu^3}$$

In [7]:

```

1 # u = Número de Ursell
2 u_min = s_min / mi_max**3
3 u_max = s_max / mi_min**3
4
5 print(f'O número de Ursell mínimo é {u_min}')
```

O número de Ursell mínimo é 3.5525479291503956e-07
O número de Ursell máximo é 0.0004590310418327384

Teoria de Ondas Regulares

Existem diversas teoria de modelagem de ondas regulares, entre elas pode-se citar:

- *Liner (Airy)*;
- *Stokes*;
- *Cnoidal*;

- Solitária;
- *Stream*.

Linear (*Airy*)

A teoria de onda mais simples. É a onda senoidal, sua utilização tem como premissa o tamanho de onda ser muito menor que o comprimento e profundidade do oceano. Também é conhecida como *Airy*.

Expansão de *Stokes*

A expansão de ondas de *Stokes* é a uma expansão da superfície de elevação à potência da altura de onda linear. Portanto, uma onda de *Stokes* de primeira ordem é uma onda linear elevada a primeira potência, ou seja, igual a própria onda linear.

A partir de expansões de segunda ordem, as ondas se tornam assimétricas, com picos mais agudos e vales mais compridos em relação a onda linear (*Airy*).

Cnoidal

A onda *cnoidal* é uma onda periódica com pico agudo separada por largos vales, onde os picos são pelo menos 73% maior que o vale. A teoria encontra sua aplicação para $\mu < 0,125$ e $UR > 30$.

Solitária

Para ondas muito longas, onde o comprimento de uma onda *cnoidal* tende ao infinito, os vales se tornam desprezíveis, resultando em uma onda de um pico solitário. Portanto, a solitária, é um tipo de onda *cnoidal* específico para UR muito elevado.

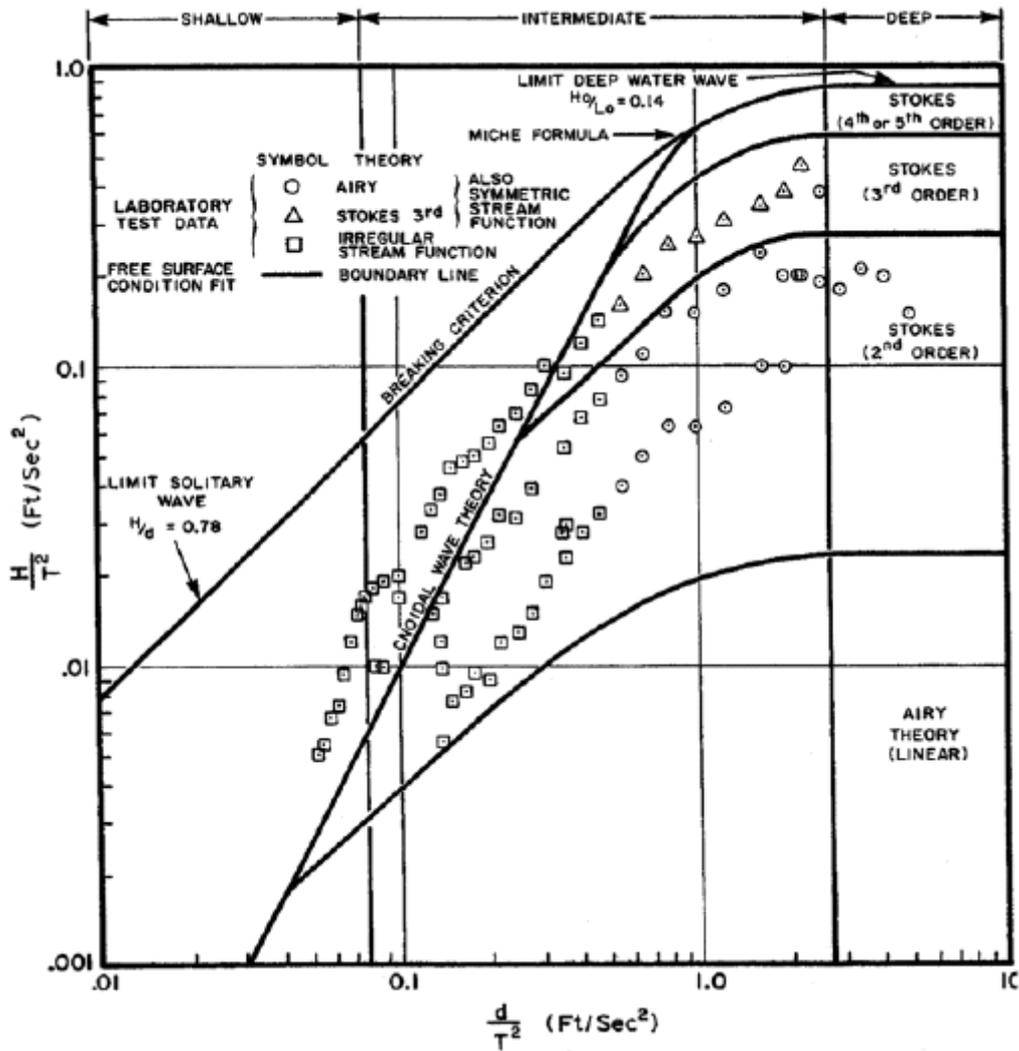
Stream

A função *Stream* é um procedimento puramente numérico para aproximar o perfil de uma onda.

Aplicabilidade das Teorias de Ondas Regulares

Escolha da Teoria

Neste documento a DNV apresenta a seguinte figura para a seleção da teoria de onda mais aplicável.



In [8]:

```

1 x_min = (d_min*3.28084) / (tp_max**2)
2 x_max = (d_max*3.28084) / (tp_min**2)
3
4 print(f'O valor mínimo para o eixo X é {x_min}')
```

O valor mínimo para o eixo X é 33.64534897959184
O valor mínimo para o eixo X é 202.31846666666667

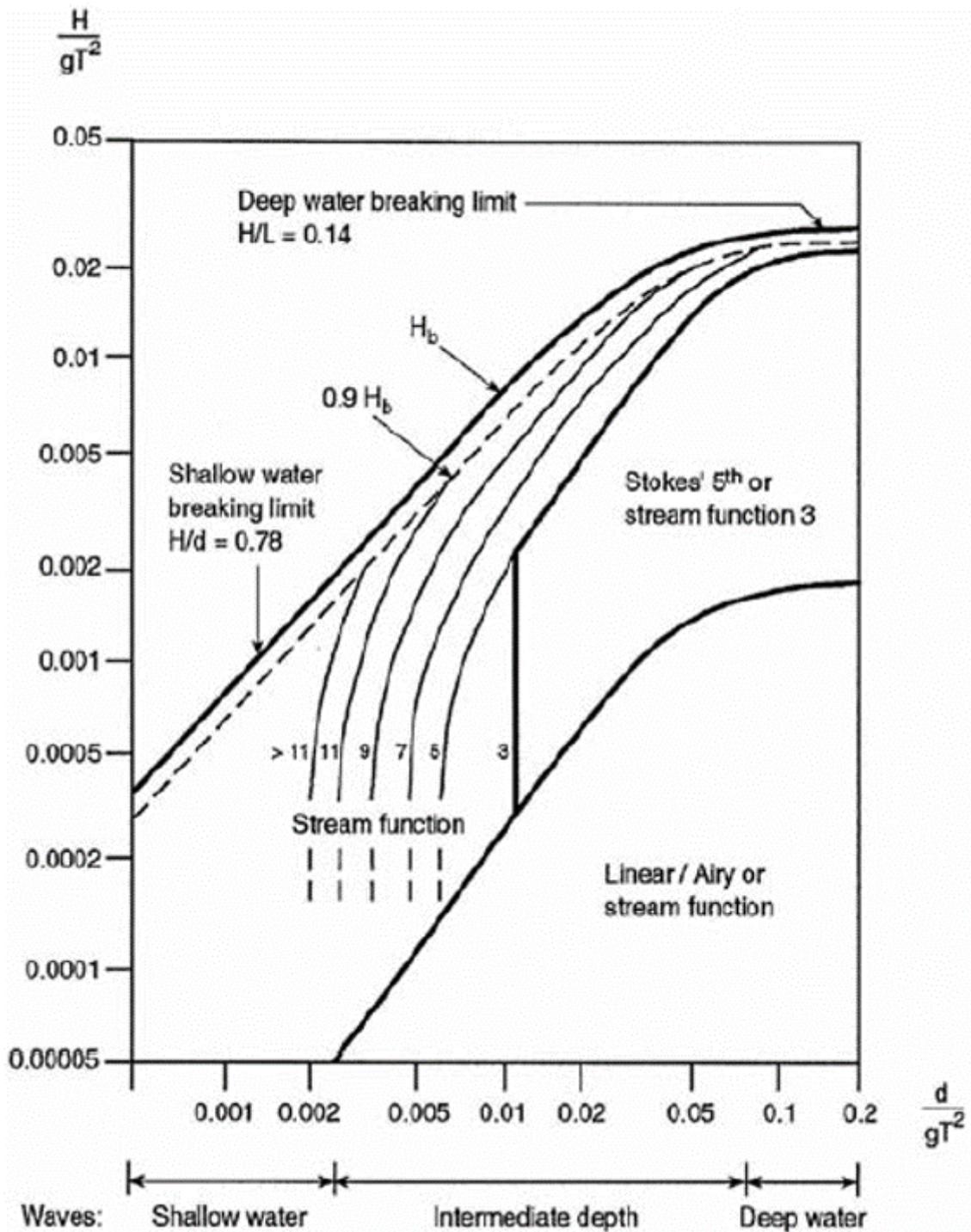
In [9]:

```

1 y_min = (hmax_min*3.28084) / (tp_max**2)
2 y_max = (hmax_max*3.28084) / (tp_min**2)
3
4 print(f'O valor mínimo para o eixo Y é {y_min}')
```

O valor mínimo para o eixo Y é 0.1122005029669174
O valor mínimo para o eixo Y é 0.6667537248037415

O gráfico a seguir, também apresentado pela DNV, também auxilia a escolha da teoria de ondas, porém com mais detalhes para a ordem da teoria de *Stream*.



In [10]:

```

1 x_min = (d_min) / (g*tp_max**2)
2 x_max = (d_max) / (g*tp_min**2)
3
4 print(f'O valor mínimo para o eixo X é {x_min}')
```

O valor mínimo para o eixo X é 1.0457293816763449

O valor mínimo para o eixo X é 6.288249980030558

In [11]:

```
1 y_min = (hmax_min) / (g*tp_max**2)
2 y_max = (hmax_max) / (g*tp_min**2)
3
4 print(f'O valor mínimo para o eixo Y é {y_min}')
```

O valor mínimo para o eixo Y é 0.0034872981303460033

O valor mínimo para o eixo Y é 0.02072333863418512

, apresenta a seguinte [recomendação](#)

(<https://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/Documentation/Help/>) para seleção de teoria de onda:

- Número de *Ursell* << 40 (Ondas Curtas): *Stream* ou *Stokes 5th*
- Número de *Ursell* ~ 40: *Stream*
- Número de *Ursell* >> 40 (Ondas Longas): *Stream* ou *Cnoidal*

A desenvolvedora também reforça que se o número de *Ursell* for próximo a 40, tanto *Stokes 5th* como *Cnoidal* não são apropriados.

Na DNV-RP-205 a DNV faz uma recomendação similar, onde:

- Número de *Ursell* << 30 (Ondas Curtas): *Stream* ou *Stokes 5th*
- Número de *Ursell* ~ 30: *Stream*
- Número de *Ursell* >> 30 (Ondas Longas): *Stream* ou *Cnoidal*

In [12]:

```
1 # Número de Ursell
2 print(f'O número de Ursell mínimo é {u_min}')
```

O número de Ursell mínimo é 3.5525479291503956e-07

O número de Ursell máximo é 0.0004590310418327384

ANEXO I – Distribuição Individual de Altura de Ondas e Períodos Associados

Distribution of Individual Wave Heights and Associated Periods

Period → Height ↓	0 - 2	2 - 4	4 - 6	6 - 8	8 - 10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24	Total	%	Tmed
0.0-0.5	85171	166779	50632	10991	2167	425	110	25	13	7	5	0	316325	17.27	3.31
0.5-1.0	11867	208032	229458	111698	40289	11835	2862	547	132	49	17	0	616786	33.70	5.38
1.0-1.5	322	47777	164356	145537	73169	27184	7458	1481	271	55	32	0	467642	25.53	6.91
1.5-2.0	6	6545	64094	85930	53460	23925	7570	1592	266	41	25	0	243454	13.30	7.77
2.0-2.5	0	742	19753	38224	27785	14938	5669	1263	190	37	13	2	108616	5.93	8.41
2.5-3.0	0	82	5311	14769	12522	8057	3290	798	149	11	3	0	44992	2.46	8.96
3.0-3.5	0	6	1277	5433	5522	4149	1907	510	90	10	3	0	18907	1.03	9.50
3.5-4.0	0	1	309	2006	2350	1963	987	265	51	3	0	0	7935	.43	9.90
4.0-4.5	0	0	69	733	1117	973	535	168	33	1	0	0	3629	.20	10.32
4.5-5.0	0	0	12	234	513	507	321	60	11	0	0	0	1658	.09	10.68
5.0-5.5	0	0	4	83	230	271	165	52	6	0	0	0	811	.04	11.31
5.5-6.0	0	0	1	30	115	123	86	23	1	0	0	0	379	.02	10.98
6.0-6.5	0	0	0	8	39	69	35	12	0	0	0	0	163	.00	12.14
6.5-7.0	0	0	0	3	21	26	16	2	0	0	0	0	68	.00	11.16
7.0-7.5	0	0	0	0	5	18	15	2	0	0	0	0	40	.00	11.93
7.5-8.0	0	0	0	2	3	3	7	0	0	0	0	0	15	.00	11.60
8.0-8.5	0	0	0	0	2	3	1	0	0	1	0	0	7	.00	10.34
8.5-9.0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	0	0	4	.00	12.00
9.0-9.5	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	0	4	.00	11.25
9.5-10.0	0	0	0	0	1	1	2	0	0	0	0	0	4	.00	11.50
10.0-10.5	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	2	.00	13.00
10.5-11.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00	-	-
11.0-11.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.00	-	-
11.5-12.0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	.00	12.00
Total	97366	429964	535276	415681	219311	94475	31041	6800	1213	215	98	2	1831442	100.00	
%	5.32	23.48	29.23	22.70	11.97	5.16	1.69	.37	.07	.01	.00	.00			
Mean Height	.31	.64	1.06	1.39	1.60	1.81	2.01	2.10	2.02	1.62	1.49	2.17			

SOURCE: Measured data in Campos Basins (GAROUA, PROCAP1, AND PROCAP2)

2295 wave staff tiem series of 1539 sec plus 7531 buoy time series of 1024 sec = 11243749 sec