

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA**

**Aplicação do método do domínio da frequência  
para a previsão de tensões estruturais em dutos  
flexíveis na configuração lazy wave**

Ana Letícia Von Borstel Galvão de Queirós

Prof. Orientador:

Alexandre Alves Santiago, D.Sc.

**Rio de Janeiro,  
Outubro de 2021**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA**

**Aplicação do método do domínio da frequência  
para a previsão de tensões estruturais em dutos  
flexíveis na configuração lazy wave**

Ana Letícia Von Borstel Galvão de Queirós

Projeto final apresentado em cumprimento às  
normas do Departamento de Educação  
Superior do Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca,  
CEFET/RJ, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Bacharel em Engenharia  
Mecânica.

Prof. Orientador:  
Alexandre Alves Santiago, D.Sc.

**Rio de Janeiro,  
Outubro de 2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

Q3 Queirós, Ana Letícia Von Borstel Galvão de  
Aplicação do método do domínio da frequência para a previsão  
de tensões estruturais em dutos flexíveis na configuração Lazy Wave  
/ Ana Letícia Von Borstel Galvão de Queirós. — 2021.  
80f.: il.(algumas color). ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2021.

Bibliografia : f. 77-80

Orientador: Alexandre Alves Santiago

1. Engenharia mecânica. 2. Simulação numérica. 3. Dutos  
flexíveis. 4. Análise funcional. I. Granado, Paulo Victor Orçai II.  
Santiago, Alexandre Alves (Orient.). III. Título.

CDD 621

Elaborada pela bibliotecária Tania Mello – CRB/7 nº 5507/04

## AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a todos que me ajudaram ao longo desta caminhada e que foram imprescindíveis para que eu não desistisse frente as dificuldades que apareceram no caminho. Em especial, agradeço às seguintes pessoas:

À minha Mãe por sempre me lembrar que depois das tempestades há de haver um arco-íris.

À Kamila, por embarcar junto comigo nessa rotina exaustiva durante a execução desse trabalho, por me apoiar, ajudar e confortar quando eu achava que não daria conta.

À Raphaella, por toda ajuda nas disciplinas, com certeza eu não conseguiria ter passado em muitas matérias sem a sua ajuda, em especial no período em que eu estava embarcada.

Ao Erik, Vinicius e Felipe, pelo apoio e flexibilidade que foram imprescindíveis para que eu conseguisse levar essa rotina de universidade e trabalho até o fim.

Ao André Ramiro pela paciência, disponibilidade e por compartilhar tanto conhecimento, me orientando e ajudando no descobrimento dessa área de pesquisa.

Ao Nicholas, por toda paciência e suporte no desenvolvimentos das ferramentas que foram imprescindíveis para a realização dessa pesquisa. Em seu nome, estendo meus agradecimentos a todos do time de Análise Numérica da Subsea7 que colaboraram para o meu aprendizado e desenvolvimento na área.

Ao meu orientador, por ter topado esse desafio comigo e por ter trazido algumas reflexões tão importantes ao desenvolvimento desse estudo. Em seu nome, estendo meu agradecimento ao CEFET/RJ e à todos os professores do curso de Engenharia Mecânica.

## RESUMO

Esse estudo consiste em uma avaliação da aplicabilidade de utilização do método do domínio da frequência em simulações numéricas de instalação de dutos flexíveis na configuração *lazy wave*. Através de simulações pelo método dos elementos finitos realizadas no *software* Orcaflex, são realizadas análises dinâmicas de quatro passos representativos para dois projetos de instalação utilizando da modelagem de ondas regulares no domínio do tempo, ondas irregulares no domínio da frequência e ondas irregulares no domínio do tempo com método desacoplado. Com isso, foram comparados os resultados encontrados em termos de máximas e mínimas tensões de topo, esforços em compressão e máximas curvaturas, além disso foram avaliados os estados de mar limitantes obtidos em cada método de simulação. Mesmo considerando as não linearidades inerentes aos sistemas produção de dutos flexíveis, o método da frequência foi eficiente em reproduzir os esforços encontrados durante os dois projetos de instalação avaliados para algumas combinações de ângulo de incidência, período e altura de onda. Ao fim do projeto, é realizada uma sugestão de metodologia de análise numérica, a qual mescla as potencialidades dos métodos de simulação estudados.

**Palavras-chave:** Métodos de Simulação Numérica; Dutos Flexíveis; Lazy Wave; Domínio da Frequência.

## ABSTRACT

This thesis consists in an evaluation of the applicability of using the frequency domain method in numerical simulations for the installation of lazy wave flexible systems. Using finite element methodologies through the software Orcaflex, dynamic analyzes of four representative installation steps are performed for 2 projects using the time domain regular waves model, frequency domain with irregular waves model and time domain with irregular waves and a decoupled simulation model. Thus, the results found in terms of maximum and minimum effective top tension, compressive tension along line and maximum curvatures were compared, and the limiting sea states obtained in each simulation method were also evaluated. Even considering the non-linearities inherent in a flexible pipe production system, the frequency method was efficient in reproducing the efforts found during the two installation projects evaluated for some combinations of wave direction, period and height. At the end of the study, a numerical analysis methodology is proposed, which combines the potential of the simulation methods studied.

**Keywords:** Numerical Simulation Methods; Flexible Pipes; Lazy Wave; Frequency Domain.

# SUMÁRIO

<b>Glossário</b>	<b>vi</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos do Trabalho	2
1.3 Organização do Estudo	2
<b>2 Sistemas de Produção</b>	<b>4</b>
2.1 Dutos Submarinos	4
2.2 Estruturas Submarinas	5
2.2.1 Árvore de Natal Molhada (ANM)	6
2.2.2 <i>Manifolds</i>	6
2.2.3 Dutos umbilicais (UEH)	7
2.2.4 <i>Pipeline End Manifold (PLEM)</i>	8
2.2.5 <i>Pipeline End Termination (PLET)</i>	8
2.2.6 FPSO	8
2.2.7 Plataformas Semissubmersíveis (SS)	10
2.3 Sistemas Flexíveis	10
2.3.1 Dutos Flexíveis	10
2.3.2 Acessórios	12
2.3.3 Equipamentos de acoplamento no poço submarino (MCV)	13
2.3.4 Navio de Lançamento de Dutos Flexíveis	14
2.3.5 Catenária em <i>lazy wave</i>	17
<b>3 Resposta do Sistema às Condições Ambientais</b>	<b>20</b>
3.1 Operadores de Amplitude de Resposta das Embarcações	20
3.2 Influência das Condições Meteorológicas e Oceanográficas	22
<b>4 Modelagem do Sistema</b>	<b>28</b>
4.1 Modelagem Estática	28
4.1.1 Equacionamento do Modelo Estático	30
4.2 Modelagem Dinâmica	35

<b>5</b>	<b>Simulação Numérica</b>	<b>38</b>
5.1	Análise Estática e Análise Dinâmica	38
5.2	Metodologia de Análise Acoplada e Desacoplada	40
5.3	Análises no Domínio do Tempo e da Frequência	41
5.3.1	Domínio do Tempo	43
5.3.2	Domínio da Frequência	46
5.4	Implementação no Orcaflex	47
5.4.1	Modelagem do <i>riser</i>	47
5.4.2	Modelos de Análise	50
<b>6</b>	<b>Metodologia e Matriz de Casos</b>	<b>53</b>
<b>7</b>	<b>Discussão dos Resultados</b>	<b>58</b>
7.1	Análise de Sensibilidade	58
7.2	Análise de Qualidade dos Resultados	61
7.3	Desempenho dos Métodos de Simulação	64
7.4	Tempo de Simulação	72
<b>8</b>	<b>Conclusão</b>	<b>74</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>76</b>



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1:	Arquitetura de campo na configuração em <i>lazy wave</i> .	4
FIGURA 2:	Estrutura típica de uma árvore de natal molhada.	6
FIGURA 3:	Estrutura típica de um <i>manifold</i> .	7
FIGURA 4:	Estrutura típica de um UEH.	7
FIGURA 5:	Estrutura típica de um PLEM.	8
FIGURA 6:	Estrutura típica de um PLET.	9
FIGURA 7:	Diferentes camadas de um FPSO.	9
FIGURA 8:	Exemplo de unidade de produção SS.	10
FIGURA 9:	Estrutura típica de camadas de um duto flexível.	11
FIGURA 10:	Estrutura típica de um conector.	12
FIGURA 11:	Exemplo de enrijecedor.	13
FIGURA 12:	Estrutura típica de um restritor de curvatura para dutos flexíveis.	13
FIGURA 13:	Flutuador para sistemas de instalação em <i>lazy wave</i> .	14
FIGURA 14:	Exemplo de MCV.	15
FIGURA 15:	Navio de lançamento horizontal.	15
FIGURA 16:	Navio de lançamento vertical.	15
FIGURA 17:	Extremidade de topo.	16
FIGURA 18:	Desenho esquemático de um sistema de instalação em configuração <i>lazy wave</i> .	17
FIGURA 19:	Unifilar de instalação de um duto flexível na configuração <i>lazy wave</i> .	18
FIGURA 20:	Principais movimentos de uma embarcação	20
FIGURA 21:	Sistemas de coordenadas em uma simulação numérica.	21
FIGURA 22:	Exemplo de RAO para um porta-aviões.	22
FIGURA 23:	Perfil de onda regular.	23
FIGURA 24:	Perfil de onda irregular.	23
FIGURA 25:	Mar irregular.	25
FIGURA 26:	Espectro de ondas de um mar totalmente desenvolvido para diferentes medidas de pistas realizadas por JONSWAP	27
FIGURA 27:	Princípio de arquimedes	29

FIGURA 28:	Equilíbrio de forças em um elemento de <i>riser</i> deformado.	32
FIGURA 29:	Equilíbrio de momentos em um elemento de <i>riser</i> deformado.	33
FIGURA 30:	Relação entre o momento fletor e a curvatura	34
FIGURA 31:	Distribuição de altura e período de onda no Brasil.	39
FIGURA 32:	Modelo de análise acoplado.	40
FIGURA 33:	Modelo de análise acoplado.	41
FIGURA 34:	Representação gráfica do comportamento das funções em ambos os domínios.	42
FIGURA 35:	Relação entre o domínio do tempo e o domínio da frequência.	43
FIGURA 36:	Catenária em <i>Lazy-S</i>	47
FIGURA 37:	Modelo discretizado no Orcaflex.	49
FIGURA 38:	Convenção de incidência de ondas.	54
FIGURA 39:	Passos de instalação do projeto - Caso 1	55
FIGURA 40:	Passos de instalação do projeto - Caso 2	56
FIGURA 41:	Características da embarcação.	57
FIGURA 42:	Convenção de eixos para os movimentos da embarcação.	59
FIGURA 43:	Distribuição cargas ao longo das simulações (tf).	61
FIGURA 44:	Máxima Curvatura (tf).	62
FIGURA 45:	Altura de Onda Significativa ( $H_s$ )[m] versus Máxima Tração de Topo [tf].	63
FIGURA 46:	Comportamento das cargas de topo conforme os passos de lançamento - Caso 1.	63
FIGURA 47:	Comportamento das cargas de topo conforme os passos de lançamento - Caso 2.	64
FIGURA 48:	Janela Operacional - Caso 1.	65
FIGURA 49:	Janela Operacional - Caso 2.	66
FIGURA 50:	Resultados mais expressivos - Caso 1.	67
FIGURA 51:	Resultados mais expressivos - Caso 2.	67
FIGURA 52:	Comportamento da curvatura durante as análises numéricas.	69
FIGURA 53:	Mínimas tensões ao longo do duto [tf].	71
FIGURA 54:	Posições - Mínimas tensões ao longo do duto [tf].	72

FIGURA 55: Tempo médio de simulação [s].

73

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1:	Parâmetros Gerais de Onda	53
TABELA 2:	Propriedades físicas dos sistemas analisados	54
TABELA 3:	Características do PLSV	57
TABELA 4:	Condições de Contorno	57
TABELA 5:	Parâmetros Adotados	59
TABELA 6:	Resultados mais significativos	60
TABELA 7:	Resultados mais significativos - Movimento do PLSV	60
TABELA 8:	Dispersão dos Resultados - Mín. TT e Máx. TT - Direções 150° e 180°	68
TABELA 9:	Dispersão dos Resultados - Mín. TT e Máx. TT - Todas as Direções	68
TABELA 10:	Dispersão dos Resultados - Máx. Curvatura - Direções 150° e 180°	70
TABELA 11:	Dispersão dos Resultados - Máx. Curvatura - Todas as Direções	70
TABELA 12:	Número total de simulações	73
TABELA 13:	Tempo por simulação	73

## LISTA DE ABREVIACÕES

ANM	rvore De Natal Molhada	5
BAP	Base Adaptadora De Produção	14, 18, 48
CAPEX	Capital Expenditure	5
CVD	Conexo Vertical Direta	18
ESDV	Emergency ShutDown Valve	76
FPSO	Floating, Production, Storage And Offloading	viii, 6, 9, 17, 22
HLS	Horizontal Lay System	14
IG	Injeo De Gs	54
JONSWAP	Join North Sea Waves Project	viii, 25, 26, 27, 45
LDA	Lmina D'gua	22, 29
MBR	Minimum Bending Radius	19, 75
MCV	Mdulo De Conexo Vertical	viii, 14, 15, 81
MEF	Método Dos Elementos Finitos	38
PLEM	Pipeline End Manifold	6
PLET	Pipeline End Termination	6, 13
PLSV	Pipe Laying Support Vessel	14, 16, 17, 22, 38, 39, 40, 45, 50, 56, 57, 64
PO	Produção	54
RAO	Response Amplitude Operator	19, 21, 35, 48, 50, 51, 75
SS	Semissubmersíveis	viii, 6, 10
TDP	Touchdown Point	17, 45, 71
UEH	Umbilical Eletro-Hidráulico	5, 7, 76
UEP	Unidade De Produção E Exploração	8, 17, 19, 38, 54, 56, 66
VLS	Vertical Lay System	14, 56

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Motivação

O crescimento da indústria de petróleo brasileiro atual é motivado principalmente pelo desenvolvimento dos campos localizados na camada de pré-sal da bacia de Santos, os quais tem como principais desafios a necessidade de desenvolvimentos exploratórios em lâminas d'água cada vez mais profundas e com condições ambientais com características consideravelmente piores quando comparadas à bacia de Campos.

Além disso, a indústria de petróleo brasileira é caracterizada por ser majoritariamente desenvolvida por um único operador, a Petrobrás. Nesse sentido, conforme [TONETO and VALENÇA, 2019] o principal conceito de arquitetura de campo utilizado no desenvolvimento da indústria petrolífera pela Petrobrás é o de campos satélites, onde há a perfuração de poços individuais espalhados nas áreas de maior concentração de óleo.

A utilização do conceito de poços satélites permitiu com que a Petrobrás desenvolvesse uma estratégia de padronização de equipamentos submarinos, navios exploratórios, dutos flexíveis, entre outros. Como os poços são ligados diretamente entre o poço e a plataforma, é possível realizar alterações no layout submarino do campo durante toda a vida exploratória do mesmo, sendo possível perfurar novos poços ou até mesmo desmobilizar poços que passaram a ter um decréscimo em sua taxa diária de produção. Visto que os equipamentos são padronizados e que as embarcações de lançamento de linhas são contratadas em acordos diários de execução de projetos, há uma grande mobilidade interna na empresa para desmobilizar equipamentos já instalados em determinadas áreas e os reinstalar em outras localidades.

Essa característica exploratória da principal empresa operadora brasileira levou ao desenvolvimento de um mercado de empresas prestadoras de serviço que tivessem como principal característica a alta agilidade no fornecimento de soluções de engenharia para o desenvolvimento dos campos submarinos.

Nesse sentido, no que concerne à instalação de linhas flexíveis e equipamentos submarinos que ligam os poços satélites as unidades estacionárias de produção (UEPs) é necessário a adoção

de metodologias simplificadas de análise das resultantes estruturais de sistemas de produção offshore, os quais possam fornecer resultados com alta confiabilidade e em baixo tempo de simulação.

## 1.2 Objetivos do Trabalho

Nesse contexto, o presente estudo tem como principal objetivo avaliar a aplicabilidade do método do domínio da frequência na realização de simulações numéricas de instalação de dutos flexíveis na configuração *lazy wave*. Esse método de análise numérica é caracterizado por apresentar um menor tempo de simulação ao passo que apresenta algumas desvantagens quando utilizado em sistemas físicos não lineares.

A avaliação desse projeto será realizada através de modelos e análises globais em elementos finitos considerando a adoção de metodologias de diferentes condições meteorológicas e em projetos com elementos estruturais com características diversas (tipo de estrutura flexível, número de flutuadores, peso dos acessórios, etc).

Nesse sentido, serão comparados os resultados de Máxima Tração de Topo [tf], Mínima Tração de Topo [tf], Mínima Tração ao Longo do Duto Flexível [tf] e Máxima Curvatura [1/m] nas matrizes de caso utilizadas no presente estudo. Serão avaliados 2 projetos de instalação de dutos flexíveis, sendo um deles contatado a presença de compressão na linha.

Por fim, espera-se realizar uma comparação do tempo de simulação entre as metodologias utilizadas, assim como avaliar a aplicabilidade de utilização do método do domínio da frequência de acordo com o *step* do projeto de instalação de dutos flexíveis. A partir disso, objetiva-se propor uma metodologia de realização de análises em *lazy wave* mesclada, a qual utilize tanto do método no domínio do tempo, quanto de análises no domínio da frequência, a depender do envelope de confiabilidade dos resultados obtidos em cada modelo de simulação.

## 1.3 Organização do Estudo

A presente monografia será dividida em 8 capítulos. Um breve resumo de cada capítulo é apresentado abaixo.

No capítulo 2 será abordado uma revisão bibliográfica dos principais conceitos que permeiam o desenvolvimento de um sistema de produção de petróleo, principalmente com ênfase das principais componentes que descrevem um duto flexível.

No capítulo 3 será descrito os principais fatores ambientais que definem as resultantes dinâmicas em um *riser*.

No capítulo 4 será descrito os principais aspectos físicos presentes em um sistema de *risers* flexíveis e modelagem matemática para a resolução das equações tanto na esfera de regime permanente quanto para problemas de cunho transiente.

No capítulo 5 será abordado conceitos de simulação numérica existentes e utilizados no trabalho para a resolução das análises numéricas tanto no método do tempo quanto no método da frequência.

No capítulo 6 será realizada a definição da matriz de casos que serão analisados no presente projeto, assim como será apresentado as simplificações utilizadas durante as simulações numéricas.

Já no Sétimo Capítulo serão apresentados os resultados obtidos e serão realizadas as comparações entre as metodologias de análise global implementadas.

Finalmente no capítulo 8 serão realizadas as principais conclusões deste estudo e as sugestões para o desenvolvimento de projetos futuros.

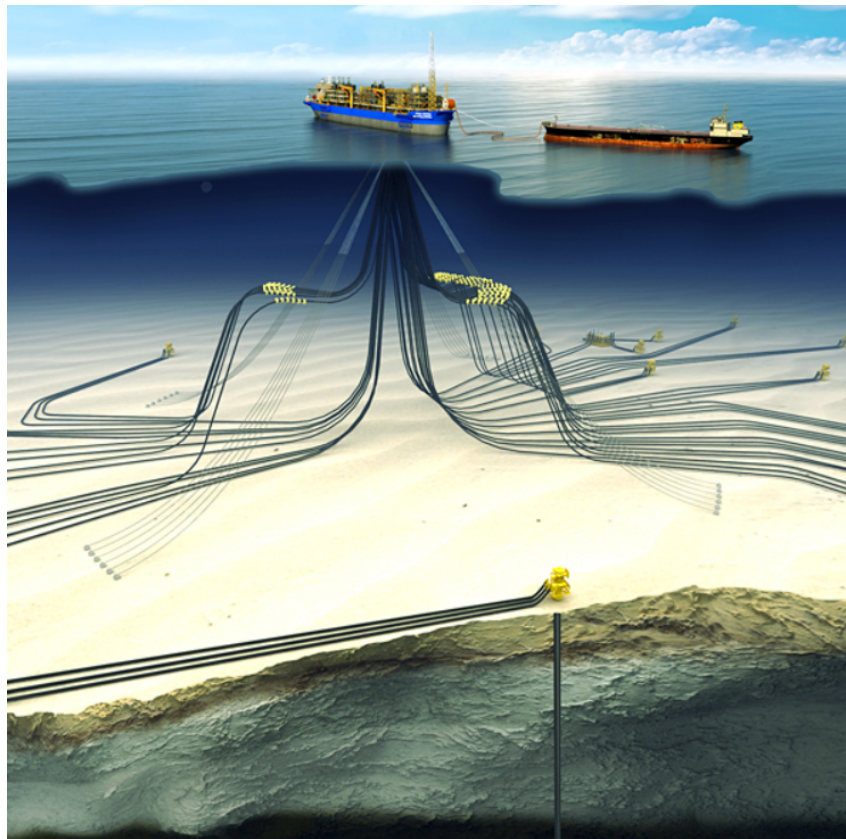


## Capítulo 2

### Sistemas de Produção

#### 2.1 Dutos Submarinos

Estruturas submarinas utilizadas no desenvolvimento dos campos exploratórios (árvores de natal, *manifolds*, unidades estacionárias de produção e exploração, etc) são conectadas entre si através da utilização de dutos submarinos, como pode ser verificado na figura 1.



**Figura 1:** Arquitetura de campo na configuração em lazy wave.

Fonte: [PETROBRAS, 2016]

Quando esses dutos estão posicionados na região suspensa entre o leito marinho e a unidade de produção são chamados de *risers*. Esses dutos têm como principal característica a resistência aos esforços dinâmicos resultantes da atuação das correntes, ondas e do vento da região de instalação, sendo alguns desses fenômenos naturais mais relevantes para o cálculo de esforços

dinâmicos no duto flexível que outros, como é o caso das ondas. Por outro lado, quando as linhas estão em contato direto com o leito marinho e não são submetidas a solicitações cíclicas das condições meteoceanográficas da região de instalação do duto são chamados de *flowlines*. Por último, existem as linhas responsáveis por fazer a ligação entre equipamentos submarinos, os quais são caracterizados por pequenos comprimentos e baixos carregamentos estáticos [LEÃO et al., 2014].

Do ponto de vista de estrutural, os dutos mencionados acima podem ser rígidos, flexíveis ou híbridos. A fabricação desses dutos envolvem desde a utilização de aços carbonos até materiais compósitos, a depender das características necessárias à linha.

A escolha do tipo de duto mais adequado para desenvolvimento da produção será baseada em alguns critérios, tal como as condições ambientais, perfil de correntes submarinas, profundidade e *layout* do campo, excursão e movimento da unidade flutuante, número de dutos submarinos, carga máxima do sistema de suspensão do *riser*, facilidade e custo de instalação.

Em termos práticos, a escolha entre a utilização de dutos rígidos ou dutos flexíveis é alinhada as características econômicas do projeto e as vantagens e desvantagens estruturais de cada solução. Apesar de dutos rígidos apresentarem um menor custo de aquisição, impactando principalmente nos valores de CAPEX dos projetos, esses apresentam uma menor flexibilidade de utilização apresentando desvantagens durante a vida útil do campo.

## 2.2 Estruturas Submarinas

Dentro de um projeto de desenvolvimento de campo de exploração de petróleo podem haver inúmeros arranjos de equipamentos e sistemas flutuantes que permitem a produção do petróleo nos campos *offshore*.

Conforme [PETROBRAS, 2015], o desenvolvimento da engenharia submarina tem um papel fundamental para permitir a exploração dos campos de petróleo localizados em águas profundas e ultraprofundas.

Vale ressaltar que atualmente existe uma tendência de desenvolvimento de equipamentos que permitem a realização do processamento da produção de forma *subsea*, tal que cada vez mais seja reduzido os equipamentos instalados nas estruturas de *topside* e a exposição das pessoas durante a operação.

Dentre esses equipamentos que ficam instalados no leito marinho podemos citar as árvores de natal molhada (ANM), os *manifolds* submarinos, os dutos umbilicais (UEH) e os equipa-

mentos de interligação PLET e PLEM. Já com relação às estruturas de *topside* utilizadas na produção dos campos podemos citar os navios FPSO e as plataformas semissubmersíveis (SS) utilizados na produção em lâminas d'água mais profundas.

### 2.2.1 **Árvore de Natal Molhada (ANM)**

As árvores de natal são equipamentos instalados no leito marinho e utilizados no controle remoto dos poços de petróleo. Conectadas às plataformas de produção através de dutos umbilicais (UEH), permitem a operação de um conjunto de válvulas que viabilizam a abertura e fechamento de poços, a variação dos fluxos de produção ou injeção, entre outras funcionalidades (Figura 2).



**Figura 2:** Estrutura típica de uma árvore de natal molhada.

Fonte: [PETROBRAS, 2015]

### 2.2.2 ***Manifolds***

Os *manifolds* são equipamentos que tem a função de unificar a produção de vários poços em apenas um duto coletor. Muito utilizados em arquiteturas de campo onde os poços estão localizados afastados do local de instalação da estrutura de *topside*, permitem a redução do

número de *risers* instalados nas plataformas e a diminuição do comprimento das linhas usadas no sistema de produção (Figura 3).



**Figura 3:** Estrutura típica de um *manifold*.  
Fonte: [PETROBRAS, 2015]

### 2.2.3 Dutos umbilicais (UEH)

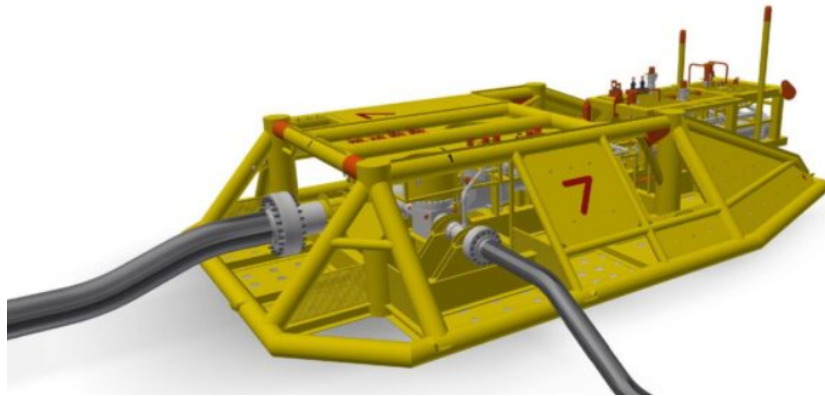
Os dutos umbilicais ou UEH como são mais conhecidos são linhas de transmissão de funções hidráulicas, elétricas e químicas entre as plataformas e os poços submarinos que permitem o controle remoto e o monitoramento de parâmetros operacionais (pressão e temperatura) dos equipamentos posicionados no leito marinho (Figura 4).



**Figura 4:** Estrutura típica de um UEH.  
Fonte: [PETROBRAS, 2015]

#### 2.2.4 *Pipeline End Manifold (PLEM)*

PLEMs são equipamentos de interligação instalados nas extremidades dos dutos (flexíveis ou rígidos) a fim de permitir a união com outros trechos de linhas. Dessa forma, permitem a divisão do fluxo de produção em várias rotas de escoamento.



**Figura 5:** Estrutura típica de um PLEM.  
Fonte: [PETROBRAS, 2015]

#### 2.2.5 *Pipeline End Termination (PLET)*

Os PLETs são utilizados em terminações de trechos de duto rígido e permitem a interligação entre linhas e equipamentos ou até mesmo entre seções de dutos rígidos e dutos flexíveis. Existem em diversas configurações de *design*, sendo uma delas apresentada pela figura 6.

#### 2.2.6 **FPSO**

Unidades flutuantes de produção, armazenamento e transferência de petróleo (FPSO) são navios petroleiros que foram convertidos em unidades estacionárias de produção (UEP) e que permitem a exploração de campos localizados em lâminas d'água muito profundas (Figura 7).

Além de receberem a produção dos poços, permitem o processamento primário do petróleo e a sua separação entre água produzida, gás e óleo. Para isso, são instalados diversos equipamentos no *topside* das embarcações.

Ademais, após o tratamento inicial do fluido produzido, essas embarcações tem a característica de permitir o armazenamento das frações do óleo nos tanques no navio petroleiro. Quando



**Figura 6:** Estrutura típica de um PLET.  
Fonte: [PETROBRAS, 2015]

é alcançado a capacidade máxima de armazenamento das embarcações, navios aliviadores se posicionam nas proximidades do FPSO e inicia-se a transferência do óleo através de uma operação chamada de *offloading*.

Existem diversas formas de construção dos (FPSOs) e por isso, juntamente com a mobilidade, essas unidades de produção apresentam a característica de grande versatilidade.



**Figura 7:** Diferentes camadas de um FPSO.  
Fonte: [PETROBRAS, 2019]

### 2.2.7 Plataformas Semissubmersíveis (SS)

Plataformas do tipo Semissubmersível (SS) são unidades flutuantes também utilizadas na produção ou perfuração dos campos de petróleo (Figura 8).

Essas plataformas podem ser posicionadas através dos modelos de ancoragem convencionais ou mesmo com sistemas de posicionamento dinâmicos. Em termos de transporte, essas unidades podem ser movimentadas entre os diferentes campos com equipamentos de propulsão própria ou mesmo através de embarcações de reboque.



**Figura 8:** Exemplo de unidade de produção SS.  
Fonte: [P&Q, 2019]

## 2.3 Sistemas Flexíveis

### 2.3.1 Dutos Flexíveis

Linhas flexíveis são tubulações constituídas por diversas camadas sobrepostas de material metálico e não metálico (Figura 9). Cada camada possui sua própria função dentro da operação do duto e sua própria mobilidade dentro do sistema flexível, sendo seu comportamento resultante principalmente do material utilizado em sua fabricação.

Existem dois principais tipos de duto flexível: *Bonded pipes* que apresentam as suas camadas coladas entre si e, portanto, trabalham como se fossem uma só superfície de atuação; e os *Unbonded pipes* que são caracterizados por camadas não aderentes e independentes entre si permitindo o movimento relativo entre as camadas.



**Figura 9:** Estrutura típica de camadas de um duto flexível.

Fonte: [PETROBRAS, 2015]

Ainda, os dutos *unbonded pipes* apresentam duas principais classificações de acordo com a sua camada mais interna: *Smooth Bore*, onde a camada interna é lisa e mais utilizada no transporte de fluidos não gasosos; e *Rough Bore*, quando a camada interna apresenta uma carcaça metálica que suporta fluxos com grande vazão e com presença de gás.

A definição das camadas utilizadas em cada configuração de duto flexível depende das características físicas e mecânicas exigidas pelo projeto, seja na fase de instalação do duto flexível ou durante toda a sua vida produtiva.

Para o presente trabalho, é importante notar que os dutos flexíveis apresentam elevada rigidez axial e torcional ao passo que permitem a realização de curvaturas com menores raios quando comparadas aos dutos rígidos. Entretanto, vale ressaltar que seu comportamento axial-torcional apresenta grande complexidade e depende do grau de interação das camadas que compõem o duto flexível.

Uma das principais características de influência nos projetos de instalação de flexíveis é a sua rigidez à flexão, visto que a utilização de diversas camadas de diferentes materiais permite a acomodação de elevadas taxas de deformação sem a ocorrência de falhas [RIBEIRO, 2021].



De acordo com o autor, em um mesmo duto flexível existem distintos valores de rigidez a flexão para diferentes curvaturas e condições de operação do duto, sendo esperado uma maior rigidez para as seções do duto que estão localizadas em lâminas d'água maiores.

### 2.3.2 Acessórios

Além do próprio duto, os sistemas flexíveis são compostos por acessórios que possuem funções específicas durante a sua instalação e operação. Dentre eles, podemos citar quatro elementos de maior importância: os conectores, enrijecedores, as vértebras e os flutuadores.

Conectores são acessórios de corpo metálico utilizados na interligação entre trechos de linhas flexíveis ou com equipamentos submarinos. Através deles são realizadas as terminações do duto flexível, permitindo o assentamento dos arames das armaduras de tração em uma estrutura de corpo tubular metálico (Figura 10).



**Figura 10:** Estrutura típica de um conector.  
Fonte: [BERTONI, 2017]

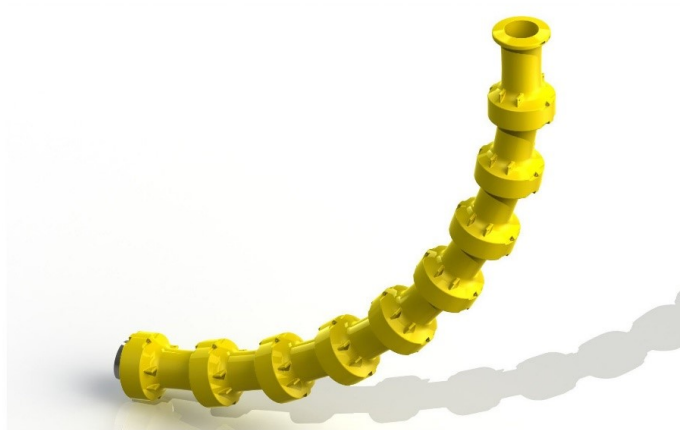
Enrijecedores são estruturas projetadas para aumentar a rigidez à flexão na interface rígido-flexível existente na parte traseira dos conectores. Fabricados de aço e polímeros, permitem realizar uma transição gradual de rigidez entre o duto flexível e os conectores rígidos (Figura 11).

Restritores de curvatura ou vértebras são estruturas utilizadas para proteger a linha flexível em regiões que estarão sujeitas à elevadas curvaturas durante a fase de instalação e operação do duto flexível. Na prática são estruturas que apresentam um raio mínimo de curvatura (MBR) menor que o raio mínimo de curvatura admissível no duto flexível, tal que quando expostos a grandes valores de curvatura protegem o duto flexível (Figura 12).

Por último são apresentados os flutuadores, os quais são acessórios de grande importância para o presente trabalho visto que são os itens mais relevantes em sistemas flexíveis na confi-



**Figura 11:** Exemplo de enrijecedor.  
Fonte: [BALMORAL, 2021]



**Figura 12:** Estrutura típica de um restritor de curvatura para dutos flexíveis.  
Fonte: [BARDOT, 2021]

guração *lazy wave*. Os flutuadores são acessórios utilizados com a função principal de gerar empuxo na linha, sendo instalados tal como uma abraçadeira na linha flexível. São fabricados principalmente por espumas sintéticas que apresentam boa flutuabilidade, resistência ao impacto e pouca perda de flutuação devido à absorção de água ao longo da vida útil do flutuador (Figura 13).

### 2.3.3 Equipamentos de acoplamento no poço submarino (MCV)

Para realizar a conexão entre a linha flexível e o equipamento submarino (árvore de natal, PLET ou *manifold*) são utilizados de equipamentos chamados de módulos de conexão. Esses



**Figura 13:** Flutuador para sistemas de instalação em *lazy wave*.

Fonte: Autoria própria.

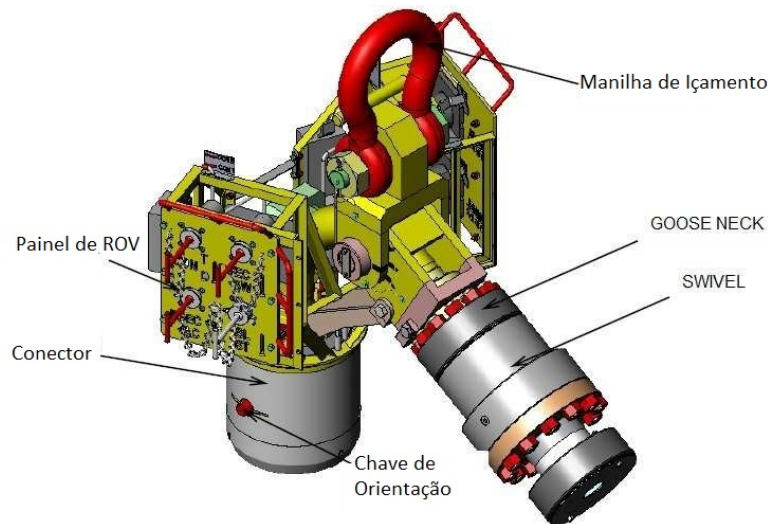
dispositivos podem ter seu *design* horizontal ou vertical, sendo esses últimos mais comumente utilizados na indústria.

Nesse sentido, os módulos de conexão vertical ou MCV (Figura 14) são equipamentos compostos principalmente por um flange que se conecta com a linha flexível, um pescoço curvilíneo chamado de *gooseneck* responsável pela estrutura vertical do equipamento, um sistema de içamento composto geralmente por uma manilha, um conector que se acopla à BAP do equipamento submarino onde será realizada a conexão e um sistema de travamento chamado de *softlanding*.

### 2.3.4 Navio de Lançamento de Dutos Flexíveis

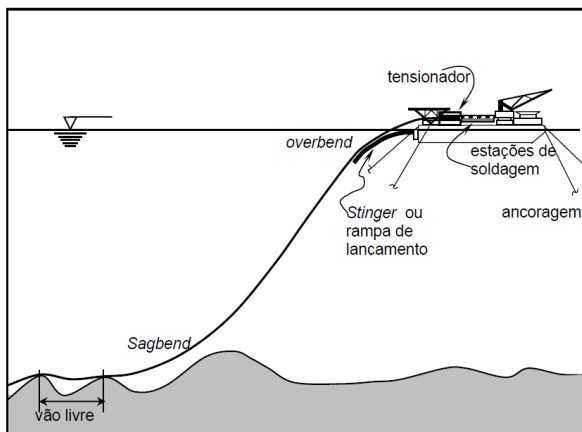
As embarcações utilizadas para a realização do lançamento de dutos são chamadas de PLSV. Esses navios apresentam diferentes capacidades construtivas que as permitem realizar projetos com diferentes características. De forma geral, para o lançamento de dutos flexíveis, existem dois principais sistemas de lançamento: Horizontal Lay System (HLS) e Vertical Lay System (VLS).

Para o primeiro sistema, o lançamento do duto é feito pela popa do navio através de um

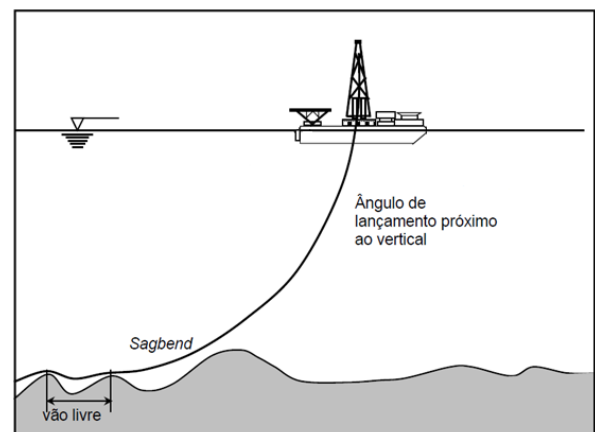


**Figura 14:** Exemplo de MCV.  
 Fonte: [PIMENTEL and FELIPE, 2013]

equipamento tensionador que é posicionado na horizontal (Figura 15). Já para o segundo sistema, existe uma torre vertical que é posicionada geralmente a meia nau da embarcação por onde o duto passa com ângulo de lançamento praticamente na vertical e sendo tracionado por tensionadores também verticais (Figura 16).



**Figura 15:** Navio de lançamento horizontal.  
 Fonte: REYES (2005) citado por [RIBEIRO, 2021]



**Figura 16:** Navio de lançamento vertical.  
 Fonte: REYES (2005) citado por [RIBEIRO, 2021]

Cada embarcação é projetada de acordo com a carga máxima de topo admissível no navio, a qual limita o envelope de projetos em que o navio de lançamento pode ser utilizado durante a operação. A partir desse valor máximo são definidos os equipamentos que serão instalados na embarcação para viabilizar a realização das manobras, tal como guinchos, guindastes, tensionadores, cestas de armazenamento, entre outros.

Para o presente projeto se faz necessário o entendimento do conceito de extremidade de topo, pois o mesmo será relevante no decorrer das discussões. Chamamos de extremidade de topo a seção de *riser* flexível referente ao topo da catenária e que fica posicionada no interior do navio PLSV. Para o presente trabalho, será adotado como extremidade de topo o ponto localizado na altura da mesa de trabalho do PLSV à aproximadamente 6,6 metros da superfície do mar. Como referência, a imagem 17 representa o momento do projeto onde a parte superior da catenária representada por uma extremidade de topo de duto flexível é apoiada a mesa de trabalho da embarcação e conectada ao guincho.

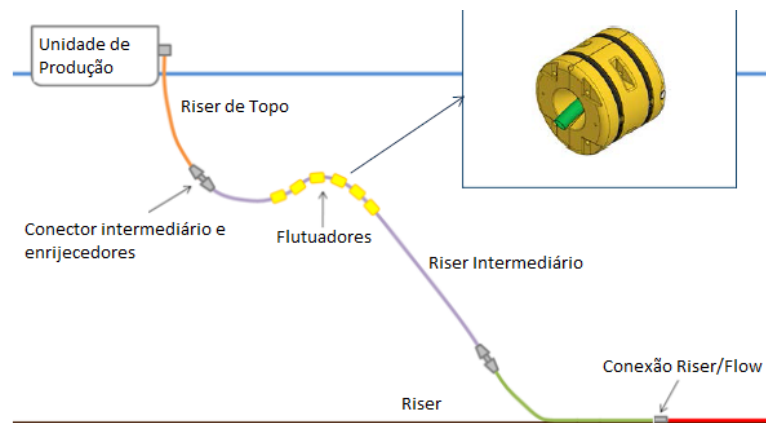


**Figura 17:** Extremidade de topo.

Fonte: *Autoria própria*

### 2.3.5 Catenária em *lazy wave*

Catenária é o termo utilizado para definir a curvatura assumida pelo duto entre o ponto de ancoragem na UEP/PLSV e o ponto de contato com o leito submarino TDP. Nesse sentido, sistemas na configuração de *lazy wave* são caracterizados por apresentarem uma catenária com geometria ondulada em formato de “S” devido a instalação de flutuadores distribuídos em um trecho do *riser* intermediário, tal como apresentado pela (Figura 18).



**Figura 18:** Desenho esquemático de um sistema de instalação em configuração *lazy wave*.

Fonte: [RIBEIRO, 2021]

Projetos caracterizados por uma catenária em *lazy wave* apresentam como principais vantagens a redução dos esforços de fadiga na interface entre o *riser* de topo e a UEP, assim como permitem um desacoplamento entre os movimentos da UEP e do TDP da linha ao longo da operação do duto.

Além disso, visto a flutuabilidade exercida pelos flutuadores na linha, há a redução do peso da estrutura submarina suspensa na catenária, tal que esse fator permite que a UEP seja projetada para suportar menores cargas de topo, permitindo por vezes um maior potencial de estoque de óleo no caso de UEPs do tipo FPSO.

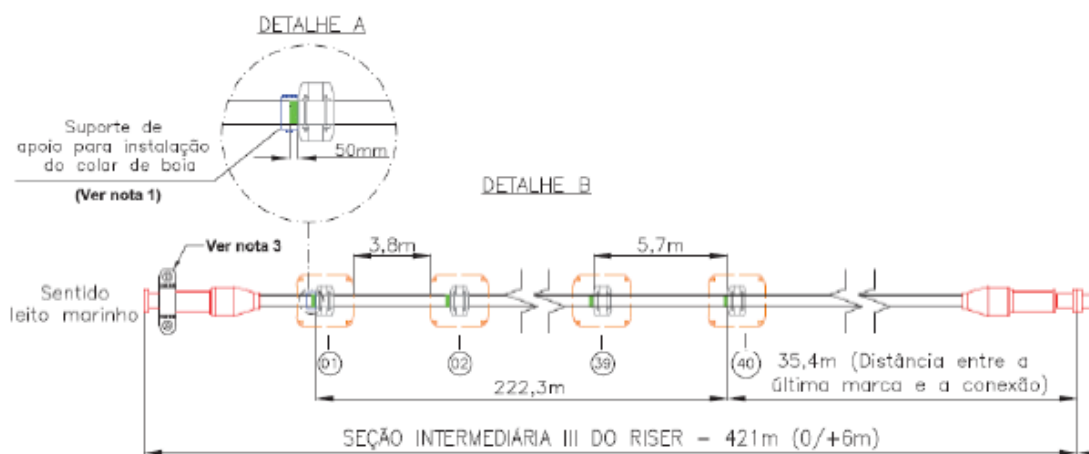
Já em termos de desvantagens da utilização de sistemas de *lazy wave* está o elevado tempo de instalação e o custo. O grande número de flutuadores necessários aos projetos demanda de um alto custo de aquisição, além disso, visto a dimensão estrutural elevada de cada flutuador há um tempo considerável que é consumido na instalação desses itens na linha pelo navio de lançamento.

Em termos de projeto, é preciso ressaltar que devido ao aumento da área superficial promovida pelos flutuadores, sistemas em *lazy wave* apresentam um maior arrasto frente as correntes marítimas. Além disso, ao passo que os flutuadores começam a gerar empuxo sob o duto flexível, há a redução das cargas do duto no topo da catenária, o que acarreta na geração de esforços compressivos elevados nessa região (MARINO, 2001).

Esses esforços compressivos são responsáveis por acarretar em uma não linearidade durante a simulação numérica, principalmente pois percebe-se que após a geração de uma compressão na linha, há a geração de grandes picos de força trativa, o que dificulta a convergência dos resultados numéricos.

Em termos práticos, conforme [ORLANDO, 2019] a compressão é um fenômeno que deve ser monitorado durante a instalação de dutos flexíveis pois expõem as armaduras de tração do flexível a um possível desalinhamento, acarretando em problemas a integridade do produto durante a operação.

Os sistemas usualmente utilizados nos projetos de exploração do pré-sal são caracterizados por linhas de serviço com diâmetro interno de 4 a 8 polegadas, onde são instalados em média 40 e 160 flutuadores, representando um empuxo líquido ao sistema entre 80 e 240 toneladas [RIBEIRO, 2021].



**Figura 19:** Unifilar de instalação de um duto flexível na configuração *lazy wave*.

Fonte: [RIBEIRO, 2021]

A simulação numérica de um projeto de instalação de catenária em *lazy wave* é composto pela análise das forças estáticas e dinâmicas atuantes em fases importantes do lançamento. Em um projeto padrão, o escopo inicia-se com a realização da CVD de 1ª extremidade na BAP

do poço de interesse, seguido do lançamento dos trechos de linha em *flowline*, chegando até o lançamento da seção do *riser* intermediário do duto, onde é previsto a instalação dos conjuntos de módulos de boias. Por fim, o projeto de instalação termina quando é realizado o lançamento da extremidade de topo do duto flexível e o mesmo é entregue a UEP em uma operação chamada de *Pull-in* de 2ª extremidade.

Além disso, usualmente são utilizados cachos de peso morto durante a realização da instalação de linhas na configuração de *lazy wave*. Esses cachos têm o intuito de reduzir a ação de forças compressivas atuantes na seção acima dos flutuadores, a fim de evitar a flambagem nessa região, e também auxiliam na operacionalidade dos equipamentos na seção de topo do navio, onde há uma alta exposição de colaboradores.

De acordo com [RIBEIRO, 2021], durante a simulação numérica da instalação de um duto flexível em *lazy wave* são determinados o passo a passo da operação, tal que seja definido o melhor posicionamento da embarcação com relação à catenária através das premissas obtidas na análise estática da instalação. Em seguida, são realizadas as análises dinâmicas dos carregamentos de topo em que o navio de lançamento será sujeito de acordo com os diferentes estados de mar, tal que não sejam ultrapassados os limites de carregamento dos equipamentos da embarcação. Através da análise dinâmica também são definidos as máximas curvaturas e os carregamentos em que o duto flexível será sujeito durante os passos de instalação dos projetos, de forma que os limites de segurança das estruturas sejam respeitados. Esse tema será abordado com mais detalhes nos próximos capítulos.

Para a realização das simulações são necessárias as seguintes informações: massa submersa por unidade de comprimento (kg/m), diâmetro externo da estrutura (in), diâmetro interno da estrutura (in), mínimo raio de curvatura admissível – MBR (m), rigidez à flexão ( $kN.m^2$ ), rigidez axial, coeficiente de Poisson, coeficiente de massa adicional, coeficiente de arrasto radial, coeficiente de arrasto axial e amortecimento estrutural.

Por fim, são importantes alguns parâmetros globais dos projetos, tal como a lâmina d'água do campo, o RAO do navio de lançamento, o ponto de referência dentro do navio de lançamento de linhas (mesa de trabalho, tensionador, centralizador, etc) e o ângulo de topo da catenária durante o lançamento.

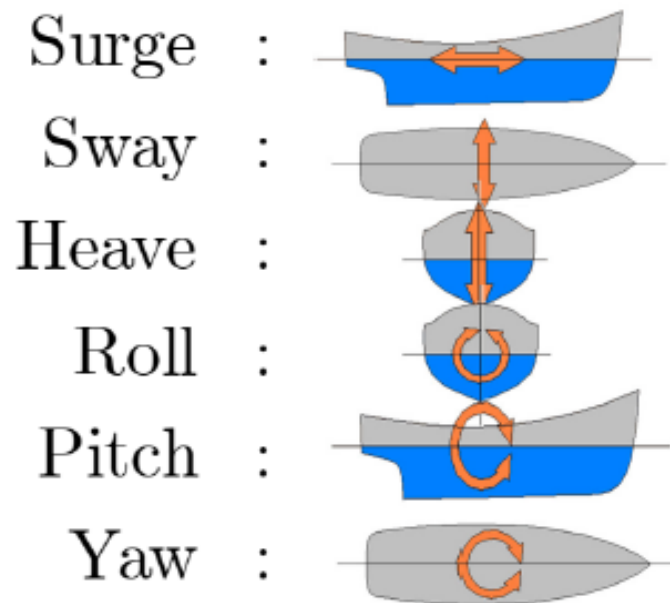


## Capítulo 3

### Resposta do Sistema às Condições Ambientais

#### 3.1 Operadores de Amplitude de Resposta das Embarcações

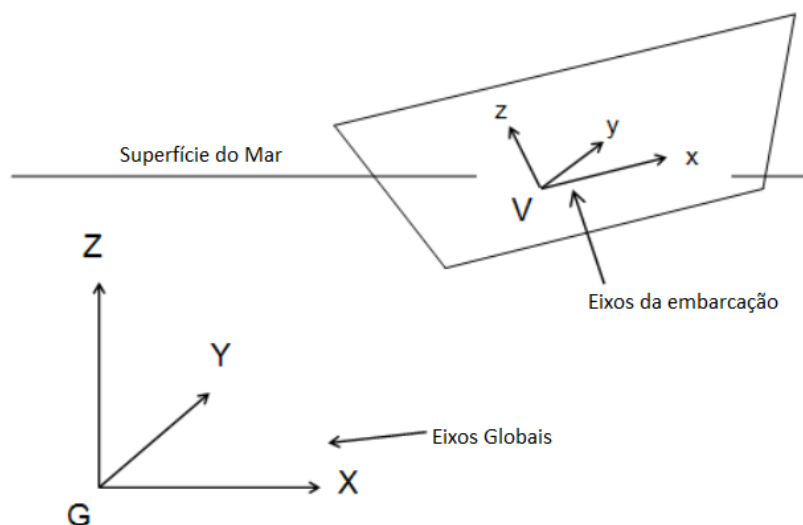
As condições ambientais são responsáveis por determinar os carregamentos dinâmicos incidentes nas estruturas submarinas desde a fase de instalação bem como durante toda a vida útil do projeto. De modo geral existem três principais fatores (ondas, ventos e correntes) influentes no carregamento e que resultam em movimentos com cerca de 6 graus de liberdade (Figura 20), sendo esses movimentos chamados de *heave*, *roll*, *pitch*, *sway*, *surge* e *yaw*.



**Figura 20:** Principais movimentos de uma embarcação

Fonte: [WIKIPÉDIA, 2021]

Esses movimentos da embarcação são definidos através da utilização de sistemas de coordenadas (Figura 21). Podem ser adotados de Sistemas Globais, onde considera-se a origem dos eixos de forma genérica, e Sistemas Locais, os quais tem sua origem em regiões de interesse da embarcação [ORCINA, 2021].



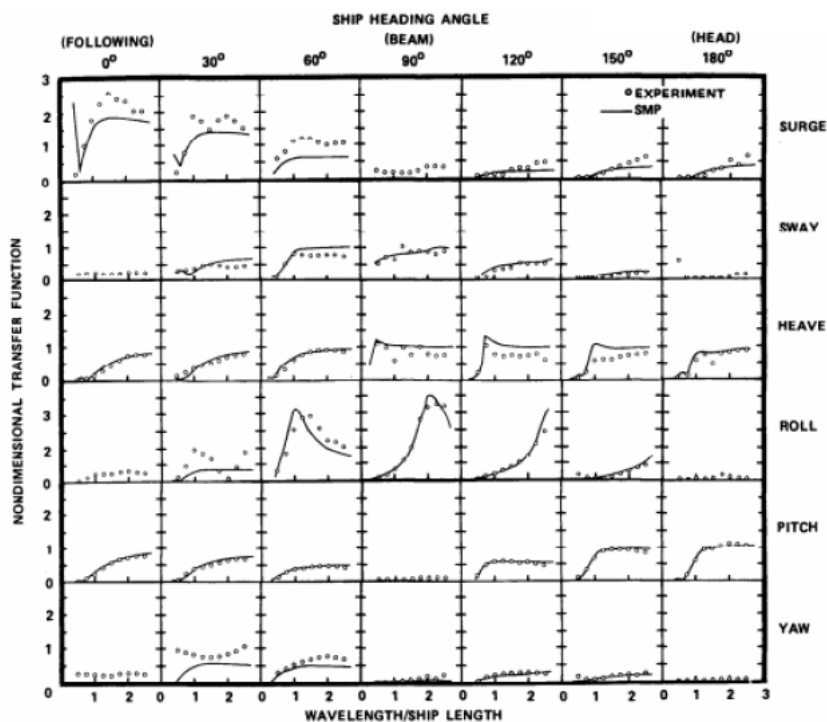
**Figura 21:** Sistemas de coordenadas em uma simulação numérica.  
Fonte: [ORCINA, 2021]

No que concerne a realização de projetos de embarcações e estruturas flutuantes são utilizados de funções de transferência chamadas de operadores de amplitude de resposta ou RAO. Esses operadores matemáticos tem a principal função de proporcionar uma estimativa do provável comportamento das estruturas flutuantes, de forma que através dele seja possível quantificar o efeito dos diferentes estados de mar na estabilidade da embarcação.

Conforme [ORLANDO, 2019], em termos práticos o RAO de cada embarcação se materializa em uma tabela de informações que relaciona os seis graus de movimento do barco com as características da onda, correlacionando a amplitude do sistema flutuante e a defasagem do movimento do barco com relação à amplitude da onda incidente e ao seu movimento, respectivamente.

De maneira geral, os RAOs são obtidos através de métodos computacionais ou análises em tanques de teste, e representam os 6 graus de liberdade do navio nos diversos ângulos de incidência de onda, tal como mencionado anteriormente. Cada RAO representa o comportamento de uma estrutura específica e por isso a resposta dinâmica esperada tem uma resultante diferente nos carregamentos em dutos flexíveis sendo instalados por diferentes embarcações (Figura 22).

De acordo com [RIBEIRO, 2021], durante a instalação de um duto flexível os movimentos mais críticos e que influenciam os carregamentos dinâmicos com mais intensidade são os movimentos de *heave*, *roll* e *pitch*. Já os movimentos de *sway*, *surge* e *yaw* são amortecidos devido aos sistemas de posicionamento dinâmico das embarcações que compensam os esforços.



**Figura 22:** Exemplo de RAO para um porta-aviões.

Fonte: [JOURNÉ and MASSIE, 2001]

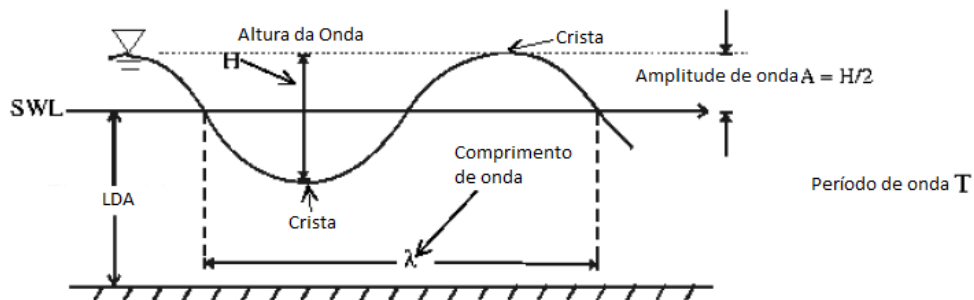
### 3.2 Influência das Condições Meteorológicas e Oceanográficas

Conforme [DNV-RP-C205, 2010], para o lançamento de linhas, considera-se que as ondas sejam os principais responsáveis pela excitação da estrutura no PLSV. Chamamos de movimentos de primeira ordem aqueles resultantes da incidência de ondas no casco da embarcação. Além disso, existem outros esforços na estrutura flutuante que influenciam diretamente os carregamentos nos *risers* submarinos, dentre eles podemos citar:

- *Offset* da UEP: Região livre de ancoragem para o passeio da estrutura submarina. Em geral, é representado por um círculo posicionado no ponto inicial de referência para a instalação do FPSO e de raio correspondente a um valor percentual da LDA;
- Movimentos de segunda ordem também chamados de deriva lenta decorrentes da excitação por baixa frequência e movimentos de deriva média oriundos da influência dos ventos, correntezas e das forças de segunda ordem das ondas;
- Efeitos combinados da interação das amarras de ancoragem e do *offset* da unidade marítima (Especificamente para UEPs).

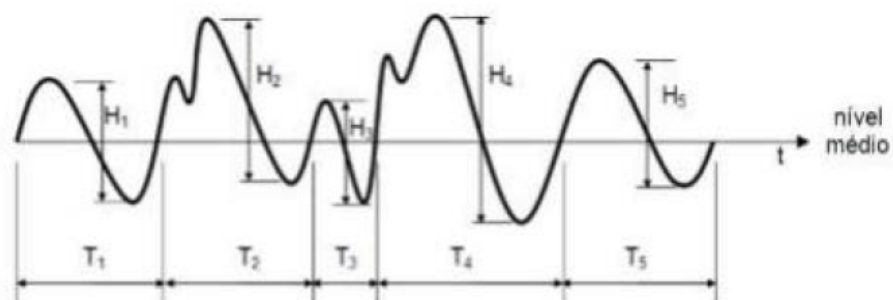
DAN & DALRYMPLE (1991) citado por [CURBANI, 2009] definem as ondas como manifestações de forças agindo em um fluido tendendo a deformá-lo contra a ação da gravidade e da tensão superficial, que, em sincronia, mantém o nível de superfície do fluido. De maneira geral, entende-se que as ondas são geradas pela pressão superficial induzida pela ação dos ventos.

Em vista disso, considera-se duas possibilidades de modelagem dos esforços das ondas: através da análise determinística ou de mar regular (figura 23), a qual considera um único trem de ondas com características constantes (altura, comprimento de onda, período, profundidade, nível médio e amplitude) e a análise estocástica ou de mar irregular (figura 24), a qual considera a superposição linear de várias ondas regulares e com diferentes valores de período, amplitude e fase.



**Figura 23:** Perfil de onda regular.

Fonte: [MIT, 2021]



**Figura 24:** Perfil de onda irregular.

Fonte: [MIT, 2021]

De acordo com [MARINO, 2015], para a utilização do método da onda regular é preciso avaliar uma quantidade significativa de períodos de onda que sejam capazes de identificar as respostas críticas em termos de carregamento tanto no curto prazo quanto em períodos mais

longos. Isso faz com que seja necessário avaliar um grande número de simulações a fim de determinar se o resultado obtido é representativo.

O método da onda regular para o presente trabalho irá se basear na teoria de Airy. Essa metodologia é aplicável para águas profundas e/ou ultraprofundas, onde considera-se que a altura de onda é pequena com relação ao seu comprimento e à profundidade da lâmina d'água. Matematicamente, o espectro de Airy é representado pela equação 3.1 [ORLANDO, 2019].

$$u = E(z) \times a \times \omega \times \cos(\omega t - \phi - kx) \quad (3.1)$$

- a: Amplitude de onda;
- $\omega$ : Frequência Angular;
- $\phi$ : Defasagem de fase;
- k: Número de ondas;
- x: Distância da origem da onda;
- k: Altura do nível médio de onda medido para cima;
- E(z): Fator de Escala;

Sendo que o fator de escala é representado pela equação 3.2. Onde d é uma variável exponencial que representa o decaimento da velocidade do fluido conforme o aumento da profundidade.

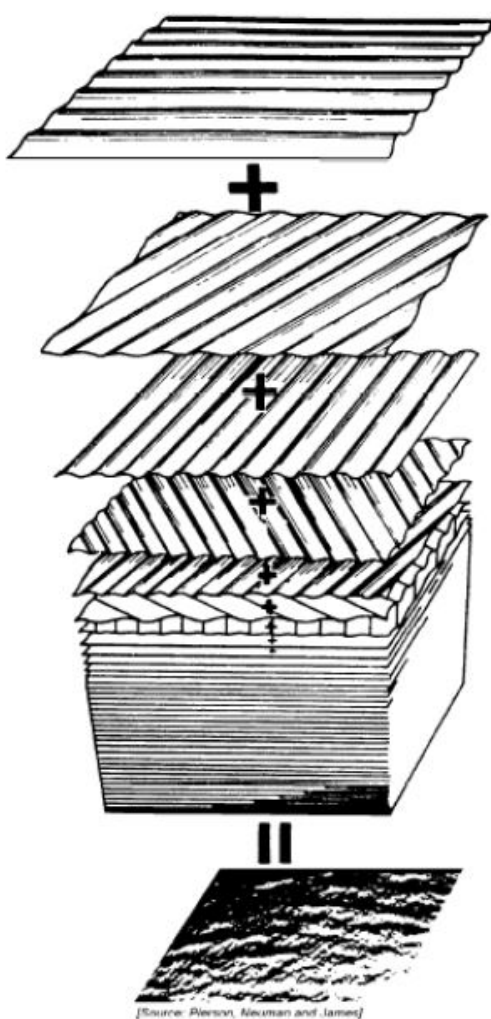
$$E(z) = \cosh\left(\frac{k \times (d + z)}{\sin(kd)}\right) \quad (3.2)$$

Já no método da onda irregular, ocorre uma descrição estocástica do estado de mar, onde o mesmo é representado como um espectro de ondas derivados de observações empíricas das propriedades das ondas oceânicas. Para esses métodos, de acordo com [DNV-OS-F201, 2010], o estado de mar é descrito através de uma análise estatística de alguns parâmetros de interesse, tal como:

- $H_s$ : Altura significativa de onda;
- $T_p$ : Período de pico;

- $T_{Hmax}$ : Período de ocorrência da altura máxima de onda;
- Formato e direção espectro de onda;

Conforme [MARINO, 2015], a energia é distribuída por uma faixa de frequências e pode ser representada como uma superposição de ondas (Figura 25). Existem diferentes equações desenvolvidas e em utilização em simulações com onda irregular, tal como o espectro de Pierson-Moskowitz e o espectro de JONSWAP.



**Figura 25:** Mar irregular.  
Fonte: [MARINO, 2015]

O primeiro método se baseia na premissa de estado de mar completamente desenvolvido, onde ocorre o equilíbrio entre as ondas e o vento que está atuando, tal que haja a completa transmissão da energia do vento para a superfície oceânica. Já o segundo considera que o mar nunca está completamente desenvolvido, pois conforme OCHI (1998) citado por [CURBANI,

2009], existem interações não-lineares do tipo onda-onda que fornecem energia de forma contínua para a formação do estado de mar, tal que nunca se alcance o equilíbrio.

Nesse sentido, o método de JONSWAP foi proposto por Hasselmann et al (1973) e se baseia em um programa de medições de ondas que foi realizado entre os anos de 1968 e 1969 no mar do Norte. A formulação matemática do método de JONSWAP de acordo com [JOURNEÉ and MASSIE, 2001] e citado por [MARINO, 2015] é apresentada pela equação 3.3.

$$S(w) = \alpha \frac{g^2}{2\pi^4 w^5} \exp[-1.25(\frac{w}{w_p})^{-4}] \gamma^{\exp[(\frac{w-w_p}{2\sigma^2 w_p^2})^2]} \quad (3.3)$$

Sendo  $\sigma$  dependente da relação entre a frequência  $w$  e a frequência de pico  $w_p$ .

- Se  $w \leq w_p$ ,  $\sigma = \sigma_a = 0.07$ .
- Se  $w > w_p$ ,  $\sigma = \sigma_b = 0.09$ .

$$\gamma = \exp(1.0394 - 0.01966 \frac{T_p}{\sqrt{H_s}}) \quad (3.4)$$

$$\alpha = 5.0609 \frac{H_s^2}{T_p^4} [1 - 0.287 \ln(\gamma)] \quad (3.5)$$

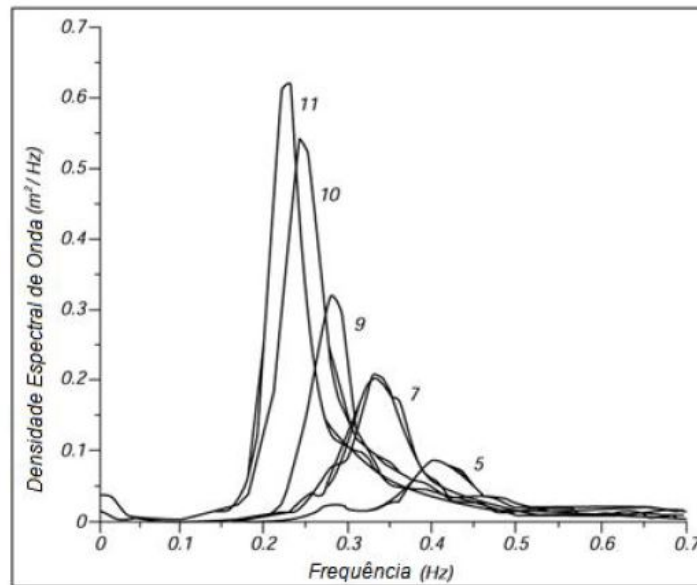
Onde:

- $S(w)$ : Função densidade espectral;
- $w$ : Frequência angular (circular) da onda;
- $w_p$ : Frequência de pico;
- $H_s$ : Altura de onda significativa;
- $T_p$ : Período de pico;
- $\gamma$ : Fator de pico;
- $\sigma$ : Parâmetro de forma;

Visto que as condições originais do espectro de JONSWAP são baseadas em parâmetros do Mar do Norte, a fim de permitir a utilização do método nas bacias brasileiras é realizado o ajuste do fator de pico  $\gamma$ . Conforme especificação técnica da Petrobras citada por [RIBEIRO, 2021], isso deve ser realizado através da seguinte formulação:

$$\gamma = 6.4 \times T_p^{-0.491} \quad (3.6)$$

Além disso, vale ressaltar que o espectro de onda de JONSWAP representa mares com limitação de pista, ou seja, mares onde há uma limitação de espaço livre para a atuação do vento. Nesse sentido, existe uma correlação entre a velocidade do vento e o comprimento da pista, cuja representação é apresentada pela figura 26.



**Figura 26:** Espectro de ondas de um mar totalmente desenvolvido para diferentes medidas de pistas realizadas por JONSWAP  
 Fonte: STEWART (2005) citado por CURBANI [2009].

O presente projeto irá utilizar tanto da abordagem de onda regular quanto da abordagem de onda irregular através do método de JONSWAP.



## Capítulo 4

### Modelagem do Sistema

Análises globais de sistemas mecânicos de *risers* flexíveis buscam determinar os esforços e movimentos do duto, sob diferentes condições meteorológicas, sem realizar a avaliação dos esforços internos presentes no flexível.

O desenvolvimento das análises globais é dividido em avaliações estáticas e dinâmicas que serão discutidos nas próximas seções.

#### 4.1 Modelagem Estática

Tendo como principal propósito a obtenção das configurações de equilíbrio, bem como a definição do comportamento da estrutura quando submetido a carregamentos de ordem constante no tempo, a análise estática do sistema flexível é a primeira componente que deve ser solucionada durante a realização de uma análise global do sistema.

Nesse sentido, conforme [TAKAFUJI, 2010], os principais esforços atuantes nos *risers* tem natureza gravitacional, hidrostática e hidrodinâmica. Enquanto o efeito gravitacional é causado pelo peso atuante na estrutura, seja o peso do duto flexível, como também o peso dos acessórios que compõem o sistema; os esforços hidrostáticos são causados pela pressão que o mar realiza sobre a estrutura do duto; por fim os esforços hidrodinâmicos se devem pelo movimento relativo entre o corpo físico do *riser* e o fluido ao seu redor.

Dessa forma, o esforço total atuante no sistema flexível pode ser representado pela equação 4.1

$$\vec{q}_0(s) = \vec{p}_0(s) + \vec{h}_0(s) + \vec{c}_0(s) \quad (4.1)$$

Sendo,

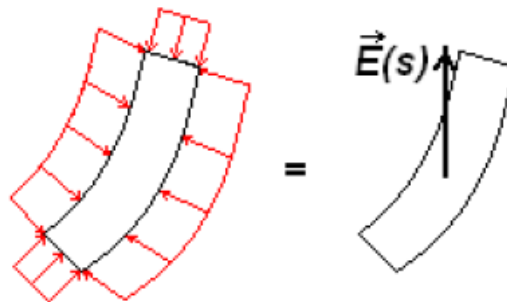
- $\vec{p}_0(s)$  os efeitos gravitacionais;
- $\vec{h}_0(s)$  os efeitos hidrostáticos;
- $\vec{c}_0(s)$  os efeitos hidrodinâmicos;

### Esforços Gravitacionais

Os esforços gravitacionais se devem ao peso próprio do sistema flexível e do fluido transportado. Em vista disso, em um projeto de lançamento de linha flexível, a medida que aumenta o comprimento de linha durante os *steps* de instalação, aumenta a carga estática resultante no topo do *PLSV*, até que em determinado momento do projeto, o comprimento de duto lançado seja igual ao comprimento da LDA. Após a primeira extremidade da linha lançada alcançar a superfície do leito marinho, há a variação nas cargas devido às propriedades de cada trecho de linha em lançamento, que podem variar de acordo com os aspectos construtivos de cada tramo de linha.

### Esforços Hidrostáticos

Os esforços hidrostáticos se devem principalmente ao efeito do empuxo sob o *riser* flexível e seus acessórios. De maneira geral, pela lei de Arquimedes, a força de empuxo atuante sobre um corpo é igual ao peso do fluido deslocado por ele mesmo (Figura 27).



**Figura 27:** Princípio de Arquimedes

Fonte: [TAKAFUJI, 2010].

A equação 4.2 representa o empuxo atuando sob um trecho de duto com as extremidades tamponadas.

$$\vec{E}(s) = \gamma_a \times A(s) \times \Delta s \times \vec{k} \quad (4.2)$$

Sendo:

- $\Delta s$ : Comprimento do duto;
- $A(s)$ : Área da seção transversal;

- $\vec{k}$ : Versor paralelo ao eixo vertical;
- $\gamma_a$ : Peso específico por unidade de volume;

Usualmente adota-se como prática a realização do lançamento dos dutos flexíveis com o *bore* preenchido com água do mar, tal que a força hidrodinâmica atuante no *riser* seja minimizada ou até mesmo desconsiderada.

Apesar disso, para catenárias em formato *lazy wave* a atuação da força de empuxo dos flutuadores instalados na linha tem uma importância fundamental, visto que reduzem as cargas de topo atuantes no sistema flexível e proporcionam um movimento vibratório dos trechos de dutos.

### **Esforços Hidrodinâmicos**

Conforme [TAKAFUJI, 2010] o principal esforço hidrodinâmico atuante nos *risers* no âmbito das análises estáticas está o efeito das correntes. Como a velocidade média da correnteza é na ordem de horas, e o movimento do duto e das ondas é na ordem dos segundos, considera-se que o efeito das correntes atua no regime permanente.

Além disso, o principal efeito da influência das correntezas no duto está atrelado ao aumento ou diminuição da tração ao longo da linha visto que há uma variação na rigidez da estrutura.

Apesar disso, considera-se que o efeito da correnteza na resposta estrutural do *riser* é tão inferior quando comparado ao efeito das ondas, que a mesma pode ser desconsiderada para algumas aplicações.

#### **4.1.1 Equacionamento do Modelo Estático**

Dados os principais fenômenos que atuam no duto flexível no regime permanente, no trabalho desenvolvido por [TAKAFUJI, 2010] são apresentados algumas equações matemáticas que podem ser solucionadas a fim de encontrar a posição de equilíbrio do *riser*. Essas equações serão descritas nos tópicos abaixo, entretanto, vale ressaltar que algumas simplificações podem ser consideradas a fim de reduzir o número de equações diferenciais ordinárias consideradas no sistema.

### Compatibilidade de Deformação

Quando um duto flexível de comprimento inicial igual a  $\Delta s$  é submetido a uma deformação axial  $\varepsilon_0(s)$ , há a geração de uma variação no comprimento final do *riser*, tal que o mesmo passa a ter o comprimento igual a  $\Delta \bar{s}$ . Esse fenômeno físico pode ser representado pela equação 4.3.

$$\Delta \bar{s} = \Delta s + \varepsilon_0(s) \times \Delta s \quad (4.3)$$

- $\Delta \bar{s}$ : Comprimento final do duto;
- $\Delta s$ : Comprimento inicial do duto;
- $\varepsilon_0(s)$ : Deformação Axial;

Considerando um *riser* de comprimento infinitesimal, ou seja, quando  $\Delta s \rightarrow 0$ , e dividindo a equação 4.3 por  $\Delta s$ , obtém-se a equação 4.4.

$$\frac{d\bar{s}}{ds} = 1 + \varepsilon_0(s) \quad (4.4)$$

### Compatibilidade Geométrica

A posição de um elemento de um duto flexível curvilíneo pode ser representado por um vetor  $\vec{r}_0(s)$  que liga a origem do sistema de coordenadas ao ponto da curva de interesse.

Para um *riser* deformado de comprimento  $\Delta \bar{s}$ , há também a variação do vetor posição, tal que a coordenada após deformação pode ser representada em função da posição inicial através da equação 4.5.

$$\vec{r}_0(s + \Delta \bar{s}) = \vec{r}_0(s) + \vec{t}_0(s) \Delta \bar{s} \quad (4.5)$$

Manipulando a equação 4.5 e fazendo  $\Delta s \rightarrow 0$ , obtém-se que o vetor tangente ao *riser*  $\vec{t}_0(s)$  é dado pela equação 4.6.

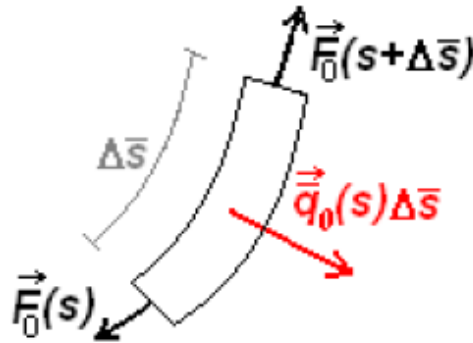
$$\vec{t}_0(s) = \frac{d\vec{r}_0(s)}{ds} \quad (4.6)$$

Substituindo a equação 4.6 na equação 4.4 e derivando, temos a equação 4.7.

$$\frac{d\vec{r}_0(s)}{ds} = \vec{t}_0(s) \times [1 + \varepsilon_0(s)] \quad (4.7)$$

## Equilíbrio de Forças

Quando um elemento de *riser* deformado é submetido a atuação de uma força externa  $\vec{q}_0(s)\Delta\bar{s}$ , há a geração de esforços internos  $\vec{F}_0(s)$  e  $\vec{F}_0(s + \Delta\bar{s})$  em sua seção transversal, tal como apresentado pela figura 28.



**Figura 28:** Equilíbrio de forças em um elemento de *riser* deformado.

Fonte: [TAKAFUJI, 2010].

Para a obtenção da posição de equilíbrio, é preciso que o somatório de forças presentes na figura 28 seja igual a zero, tal como apresentado pela equação 4.8.

$$\vec{F}_0(s + \Delta\bar{s}) + \vec{q}_0(s)\Delta\bar{s} - \vec{F}_0(s) = 0 \quad (4.8)$$

Por outro lado, considerando que não há deformação axial do elemento de *riser*, a força externa atuante pode ser simplificada e representada pela equação 4.10. Para esse caso, a variável  $\Delta\bar{s} \rightarrow 0$ .

$$\vec{q}_0(s)\Delta\bar{s} = \vec{q}_0(s)\Delta s \quad (4.9)$$

Dessa forma, a equação 4.8 pode ser simplificada conforme equação 4.10.

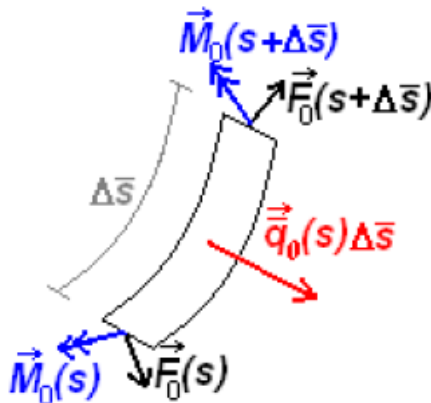
$$\frac{d\vec{F}_0(s)}{d\bar{s}} + \vec{q}_0(s)\frac{ds}{d\bar{s}} = 0 \quad (4.10)$$

Ainda, considerando a equação 4.4, a equação de equilíbrio de forças pode ser reescrita como apresentado pela equação 4.11.

$$\frac{d\vec{F}_0(s)}{ds} = -\vec{q}_0(s) \quad (4.11)$$

### Equilíbrio de Momentos

Por outro lado, o equilíbrio de momentos atuando em um elemento de *riser* deformado é apresentada pela figura 4.12.



**Figura 29:** Equilíbrio de momentos em um elemento de *riser* deformado.

Fonte: [TAKAFUJI, 2010].

Em suma, para qualquer elemento mecânico considera-se como premissa básica a existência de um momento de torção  $\vec{M}_{0,t}(s)$ , de um momento fletor  $\vec{M}_{0,f}(s)$ , tal que a equação de equilíbrio é dada por 4.12.

$$\vec{M}_0(s) = \vec{M}_{0,t}(s) + \vec{M}_{0,f}(s) \quad (4.12)$$

O momento de torção  $\vec{M}_{0,t}(s)$  é função da rigidez à torção da linha e pode ser representado pela equação 4.13. Na prática da realização de projetos de instalação de *risers* esse valor é fornecido pelo fabricante da linha para cada tramo utilizado no sistema flexível.

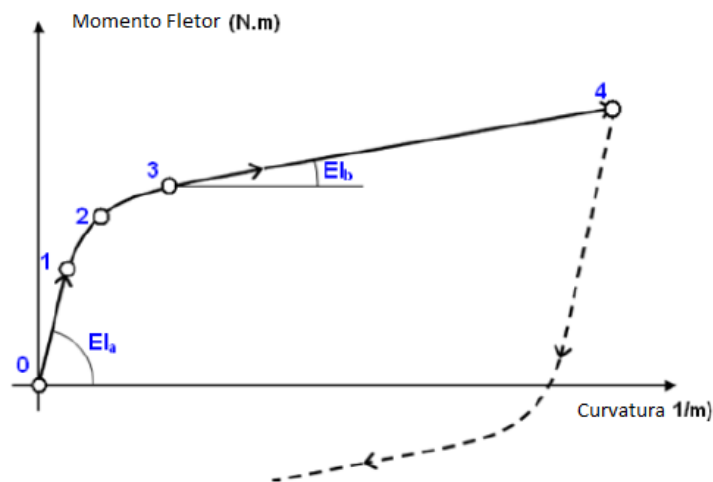
$$\vec{M}_{0,t}(s) = GJ(s) \times \tau(s) \quad (4.13)$$

Onde:

- $\tau(s)$ : Torção do elemento;

- $GJ(s)$ : Rigidez à torção;

Já o momento fletor é função da rigidez a flexão do *riser*, que conforme [ORLANDO, 2019], possui um comportamento variável para diferentes valores de curvatura visto que o duto flexível é formado por várias camadas. Essa relação é representado pela figura 30, onde o coeficiente angular da curva representa o valor de rigidez a flexão.



**Figura 30:** Relação entre o momento fletor e a curvatura  
Fonte: [RIBEIRO, 2021].

Na pratica de projetos esse valor é fornecido através da disponibilização pelo fabricante de curvas de rigidez que consideram as condições da linha flexível com anular alagado ou não.

### Equação Constitutiva

Considerando dutos constituídos de materiais equivalentes com comportamentos estruturais elástico lineares, a Lei de Hook pode ser utilizada para representar a deformação axial no flexível 4.14.

$$\epsilon_0(s) = \frac{\vec{F}_0(s) \cdot \vec{t}_0(s)}{EA(s)} \quad (4.14)$$

Onde:

- $\vec{F}_0(s) \cdot \vec{t}_0(s)$ : Tração solicitante no *riser*;
- $EA(s)$ : Rigidez Axial;

## 4.2 Modelagem Dinâmica

Em contrapartida, a análise dinâmica busca encontrar os esforços e deslocamentos em que o sistema flexível está submetido sob a ótica do regime transiente, onde há variação dos esforços ao longo do tempo. Conforme [VAILLANT, 2007], a origem das cargas dinâmicas está atrelada direta ou indiretamente pela ação das ondas, seja através da influência sobre a UEP através de seu RAO, *offset* ou movimentos de segunda ordem.

No que tange as cargas hidrodinâmicas oriundas da ação das ondas nas estruturas *offshore*, existem três principais teorias que orientam a realização dos cálculos: a Equação de Morison, a Teoria de Froude-Krylov e a Teoria da difração.

De acordo com [VAILLANT, 2007], a força das ondas ( $F_O$ ) é composta por uma parcela de força de inércia ( $F_I$ ) e outra parcela de força de arrasto ( $F_A$ ), tal como apresentado pela equação 4.15.

$$F_O = F_A + F_I \quad (4.15)$$

A aplicabilidade de cada uma das teorias mencionadas acima está relacionada a predominância de cada uma das parcelas que compõem a equação 4.15. Quando a estrutura *offshore* possui um tamanho pequeno quando comparado ao comprimento de onda incidente, há uma predominância do efeito da força de arrasto e nesses casos a força das ondas é bem descrita pela Equação de Morison.

Por outro lado, existem estruturas de pequeno porte onde há a predominância da força de inércia, e para esses casos se utiliza da Teoria de Froude-Krylov. Por fim, a Teoria da Difração é aplicada quando a estrutura possui um tamanho tão grande que altera o comprimento de onda em seu arredor.

Nesse sentido, visto que o tamanho dos *risers* é pequeno quando comparado a comprimento das ondas do mar, utiliza-se da Equação de Morison para representar as forças hidrodinâmicas atuantes.

### Equação de Morison

A teoria de Morison afirma que a força induzida sobre o corpo rígido é função dos movimentos do fluido ou do movimento relativo fluido-estrutura. Nesse sentido, a equação tem a formulação apresentada pela equação 4.16.



$$f = C_M A_T \ddot{u} - C_A A_T \ddot{x} + C_D A_D |\dot{u} \pm U - \dot{x}| (\dot{u} \pm U - \dot{x}) \quad (4.16)$$

$$C_M = 1 + C_A \quad (4.17)$$

$$A_D = \frac{1}{2} \rho D; \quad (4.18)$$

$$A_T = \frac{\pi}{4} \rho D^2; \quad (4.19)$$

Onde:

- $f$ : Força de Arrasto por comprimento de *riser*;
- $C_A$ : Coeficiente de massa adicionado;
- $C_A$ : Coeficiente de inércia;
- $C_D$ : Coeficiente de arrasto;
- $U$ : Velocidade de corrente;
- $D$ : Diâmetro Hidrodinâmico;
- $\dot{u}$ : Velocidade da partícula fluida devido a onda;
- $\ddot{u}$ : Aceleração da partícula fluida devido a onda;
- $\dot{x}$ : Velocidade da partícula fluida;
- $\ddot{x}$ : Aceleração da partícula fluida;
- $A_D$ : Área axial para o cilindro;
- $A_T$ : Área transversal para o cilindro;
- $\rho$ : Densidade do fluido;

Nessa equação, o primeiro termo e o segundo termo são chamados de parcela da inércia, os quais apresentam um comportamento linear com relação a aceleração das partículas, enquanto

que o terceiro termo representa a parcela do arrasto, o qual apresenta um comportamento não-linear quadrático com as velocidades das partículas.

Nesse sentido, a definição das forças hidrodinâmicas envolve inicialmente o cálculo dos valores de velocidade e aceleração das partículas fluidas. Isso pode ser realizado através da Teoria Linear de Airy, ou mesmo através de teorias mais complexas como o Método de Quinta Ordem de Stokes. De forma geral, deve ser solucionada a equação de movimento de Newton apresentado pela formulação 4.20.

$$\vec{M}\ddot{\vec{x}}(t) + \vec{C}\dot{\vec{x}}(t) + \vec{K}\vec{x}(t) = \vec{F}(t) \quad (4.20)$$

Onde:

- $\vec{M}$ : Matriz de Massa;
- $\vec{C}$ : Matriz de Amortecimento;
- $\vec{K}$ : Matriz de Rigidez;

## Capítulo 5

### Simulação Numérica

As metodologias de simulação numérica de carregamentos em *risers* devem determinar os estados de mar limitantes para cada fase do projeto. Conforme a norma [DNV-OS-F201, 2010], podem ser adotados cálculos analíticos, simulações numéricas, testes físicos e a combinação desses métodos para a predição dos carregamentos nas estruturas submarinas.

De maneira geral, considera-se a aplicação do método dos elementos finitos (MEF) para a realização de análises globais de esforços em *risers*. Conforme [VAILLANT, 2007], o método dos elementos finitos (MEF) realiza a resolução das equações diferenciais que compõem o sistema físico de interesse composto por infinitas variáveis através da discretização e representação do problema em um sistema menor com número finito de graus de liberdade. Após o estabelecimento do equilíbrio para esse sistema menor, o método MEF calcula a interação entre as regiões vizinhas que compõem o sistema físico, de forma a avaliar os deslocamentos que descrevem o sistema e estabelecer equações de equilíbrio que representem os deslocamentos desconhecidos.

Como já mencionado, as análises globais de *risers* devem considerar efeitos estáticos e dinâmicos, sendo que podem ser utilizadas técnicas de discretização no domínio do tempo ou no domínio da frequência em sistemas acoplados ou desacoplados. Todos esses conceitos serão apresentados nas próximas sessões.

#### 5.1 Análise Estática e Análise Dinâmica

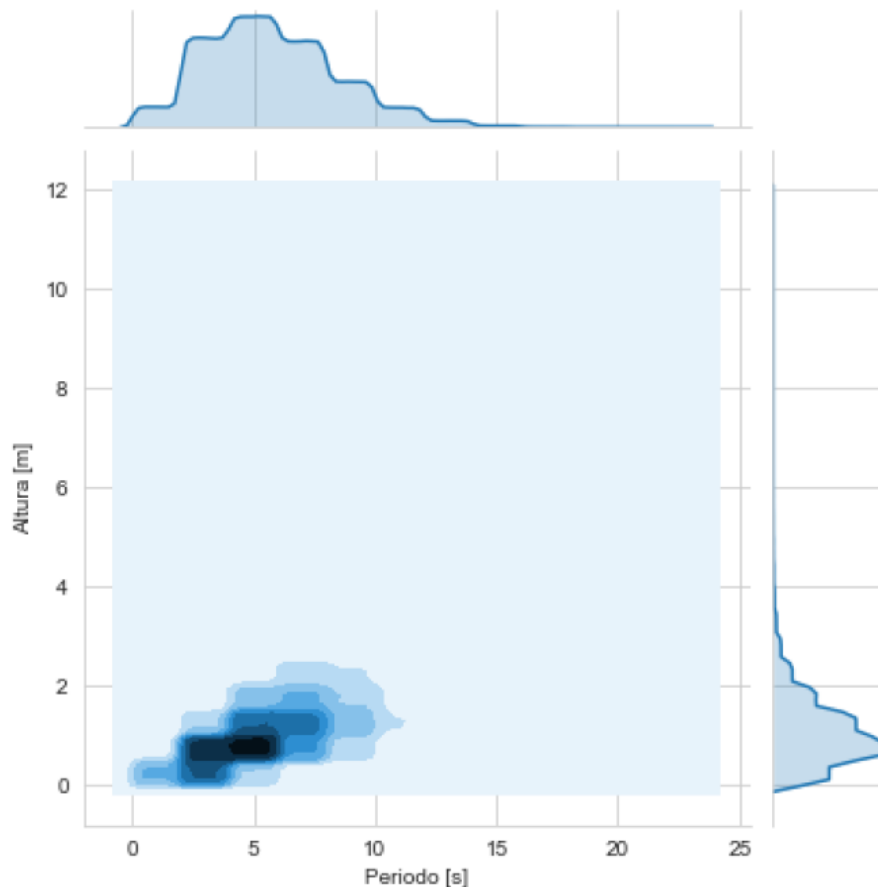
Análises estáticas tem como premissa básica a resolução de esforços de cunho permanente presentes nos dutos flexíveis ou de ações que variam lentamente no tempo, tal como o peso dos componentes, a ação do empuxo, a parcela estática do movimento de *offset* da unidade flutuante, incidência de correntes, entre outros [VIEIRA, 2008].

Nesse sentido, o objetivo final da análise estática é avaliar a configuração de equilíbrio do sistema flexível, sendo que é através dela que se define a posição do PLSV com relação a posição da UEP durante os *steps* de lançamento do projeto. Além disso, através da realização

dessas análises são definidas as cargas iniciais do problema físico que servirão como base para a determinação do problema dinâmico.

Em contrapartida, as análises dinâmicas são responsáveis por avaliar o impacto dos esforços de período próximo ao natural da estrutura, bem como avaliar as ações variáveis incidentes no sistema, tal como o efeito das ondas e do movimento do PLSV [VIEIRA, 2008].

Para a realização dessas análises usualmente são adotados de tempestades com aproximadamente 3 horas e com a incidência de ondas em várias direções da embarcação. Para o presente trabalho, por simplificação serão adotadas as direções de onda de 180°, 150°, 120°, 90°, 60°, 30° e 0° visto que são esperados valores similares nos demais ângulos de incidência da embarcação. Com relação ao período ( $T_p$ ) e altura de onda ( $H_s$ ), serão consideradas ondas de 6s à 13s com alturas que variam entre 1 metro e 3 metros, pois esses casos abrangem as condições de mar mais frequentes nas bacias brasileiras de forma conservadora (Figura 31).



**Figura 31:** Distribuição de altura e período de onda no Brasil.

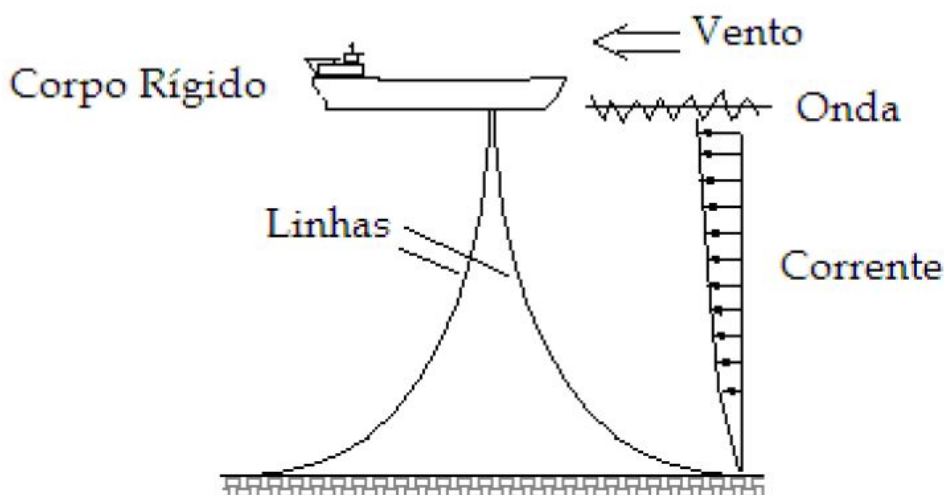
Fonte: [MARTINS and COUTO, 2018]

Com isso são encontrados os valores extremos do sistema e, através da comparação com os critérios *design* estabelecidos (limitações dos equipamentos de lançamento do PLSV ou mesmo

do próprio duto flexível e seus acessórios), são obtidos os carregamentos ambientais limitantes ao qual o *riser* pode ser submetido durante o lançamento, isto é, a janela operacional para execução do projeto de instalação da linha flexível.

## 5.2 Metodologia de Análise Acoplada e Desacoplada

Podem ser consideradas duas metodologias de análise para a modelagem do sistema estrutural de interesse do projeto de instalação do duto flexível no que concerne a interação entre embarcação de lançamento (PLSV) e *riser* flexível. A metodologia acoplada considera a incidência das condições meteorológicas em uma só estrutura hidrodinâmica, tal que o navio de lançamento e as linhas flexíveis estejam acoplados entre si, tal como apresentado pela Figura 32.

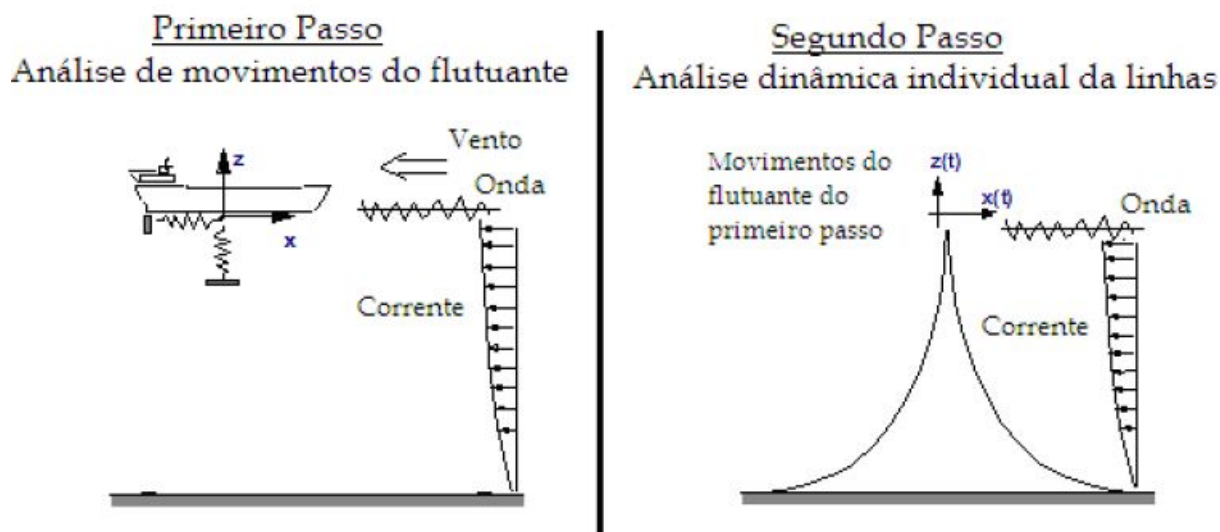


**Figura 32:** Modelo de análise acoplado.  
Fonte: [ORLANDO, 2019]

Esse método de análise considera tanto o efeito da incidência da partícula onda no duto flexível como também a interação entre o movimento resultante do PLSV no *riser* fixado à embarcação através de sua extremidade de topo. Computacionalmente esse método demanda de uma capacidade computacional maior para que haja a convergência entre os deslocamentos incidentes nessa região da malha de simulação.

Por outro lado, o método desacoplado consiste na análise do comportamento hidrodinâmico do sistema através de duas etapas (ver Figura 33). Inicialmente é simulado a incidência de ondas nas diferentes combinações de altura  $H_s$ , período  $T_p$  e direção de incidência de ondas na embarcação PLSV de forma individual, tal que sejam obtidos os movimentos de maior amplitude do navio durante uma tempestade. Em seguida esses movimentos críticos da embarcação

são replicados para incidirem na extremidade de topo do flexível de forma a permitir a avaliação dos esforços dinâmicos resultantes no sistema flexível.



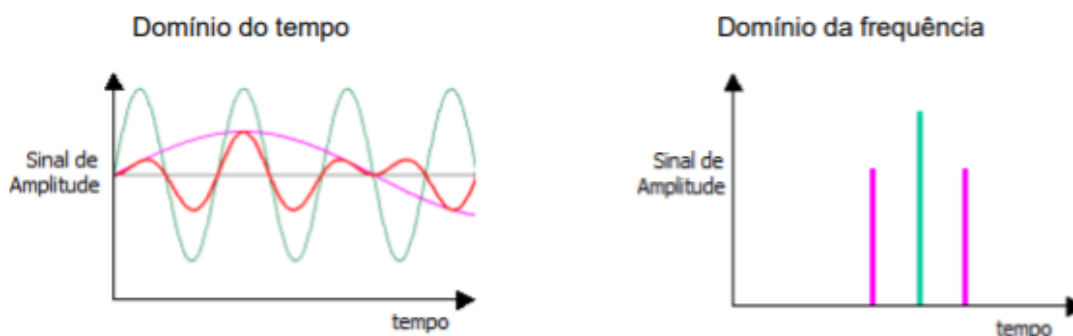
**Figura 33:** Modelo de análise acoplado.  
Fonte: [ORLANDO, 2019]

### 5.3 Análises no Domínio do Tempo e da Frequência

No que concerne as técnicas de discretização dos problemas de elemento finito existem dois principais métodos de investigação: à análise no domínio do tempo, onde as respostas das funções matemáticas são calculadas e conhecidas a qualquer instante de tempo escolhido, e a análise no domínio da frequência, onde as resultantes acontecem de forma espectral, sendo alternado a frequência do sinal de entrada e avaliando-se a resposta resultante dessa entrada, tal como se fosse uma série de fourier (Figura 34).

Em ambos os métodos de simulação, objetiva-se encontrar as resultantes críticas do sistema, ou seja, as condições de contorno do modelo que limitam as cargas dinâmicas admissíveis durante a execução do projeto, tal como mencionado anteriormente. Essas podem ser a capacidade dos equipamentos de manuseio do flexível presentes no PLSV ou mesmo características do duto flexível, tal como máxima tração de topo admissível, limite à compressão, MBR, entre outros.

Cada um dos métodos apresenta vantagens e desvantagens a depender dos critérios de relevância adotados para a análise numérica que está sendo realizada. Conforme a norma [DNV-OS-F201, 2010], é de grande importância a compreensão física básica da aplicabilidade e das limitações dos modelos teóricos comumente usados. Isso é de particular importância para uma avaliação crítica da modelagem e da análise de novos conceitos, de forma que seja possível ga-



**Figura 34:** Representação gráfica do comportamento das funções em ambos os domínios.  
Fonte: Autoria própria.

rantir que resultados adequados sejam obtidos quando estratégias simplificadas de modelagem e análise forem aplicadas.

Além disso, quando o modelo contém parâmetros que apresentem grandes incertezas, é recomendado a utilização de análises sensitivas. Nesse sentido, as variáveis caracterizadas como pontos de incerteza são alternadas à cada simulação enquanto que as demais variáveis da equação são mantidas constantes, tal que possa ser identificado a influência de cada incerteza no modelo utilizado.

Nesse sentido, enquanto as simulações dos esforços utilizando o método no domínio do tempo necessitam de alto processamento e tempo de simulação, análises no domínio da frequência apresentam grandes vantagens nesses dois aspectos.

Por outro lado, o método da frequência apresenta baixa confiabilidade ao lidar com problemas que apresentam não linearidades, tal como os esforços compressivos em análises de catenária no formato *lazy wave*. Conforme [ARMSTRONG et al., 2017], a aplicabilidade da utilização do método de frequência para análises numéricas de instalação de flexíveis são limitadas especialmente para condições meteorológicas extremas e em posições ao longo do *riser* que sejam expostos a maiores curvaturas, principalmente em regiões onde o *riser* flexível é conectado a estruturas com maior rigidez, tal como flutuadores e acessórios.

Conforme explica [CURBANI, 2009], visto ao comportamento irregular das ondas, no domínio do tempo utiliza-se de correlações avaliadas através de registros medidos de ondas que, baseadas na variável aleatória ou não, permitem calcular os primeiros resultados da simulação a cada instante de tempo utilizado. Já no domínio da frequência é realizada a avaliação da distribuição estatística da energia das ondas entre as várias frequências e direções de atuação, baseando-se na transformada de Fourier para a obtenção das funções de densidade espectral,





de cunho estocástico, ou seja, onde a previsibilidade do comportamento do estado de mar é aleatória.

Conforme [TORRES and DANTAS, 2005] citado por [VAILLANT, 2007], a metodologia de análise no domínio do tempo utilizando do método de onda regular não permite a representação da característica aleatória do carregamento ambiental, e por isso deve-se ter em mente os seguintes aspectos:

- A altura máxima de uma onda individual com um determinado período de tempo é, em geral, maior do que a altura extrema da onda mais provável de um estado de mar de curta duração (três horas);
- A condição mais extrema ou o maior efeito sobre uma estrutura não é necessariamente induzido pelo estado do mar mais extremo ou pela onda mais alta do estado do mar. Isso se deve à natureza da ação das ondas, à sensibilidade das estruturas e às particularidades geométricas da estrutura em questão [DNV-OS-F201, 2010].

Apesar disso, para algumas aplicações a utilização do método de análise no domínio do tempo com onda regular traz resultados suficientes. Nesse método de simulação são avaliados as respostas do sistema considerando um trem de ondas uniforme segundo a modelagem de Airy e caracterizado por sua altura ( $H_s$ ), período ( $T_p$ ) e direção de incidência na estrutura *offshore*. De maneira conservadora, pode ser utilizada de um trem de ondas com altura igual a altura máxima de onda esperada ( $H_{max}$ ), entretanto, como maneira de balizar qual deve ser a altura e período de onda utilizados nesse método, a norma [DNV-RP-C205, 2010] sugere a utilização da fórmula ??.

$$H_{max} = \frac{H_s}{2} \sqrt{(1 - \nu) \ln \left( \frac{t}{T_z} \right)} \quad (5.1)$$

$$\nu = -0.00091\gamma^3 + 0,00488\gamma^2 - 0,0525\gamma - 0,605 \quad (5.2)$$

- $\nu$ : Parâmetro representativo da Largura de Banda;
- $\gamma$ : Fator de aprimoramento de pico para a região em análise;
- $T_z$ : Período médio de cruzamento entre dois momentos sucessivos de onda;
- $H_s$ : Altura significativa de onda;

Para o presente estudo iremos considerar a variável altura significativa de onda ( $H_s$ ), que representa a média de alturas do maior terço de ondas incidentes no período avaliado. Conforme mencionado anteriormente, iremos considerar um  $H_s$  variando entre 1m e 3m, visto que essa condição satisfaz as condições de mar mais prováveis nas bacias brasileiras. Além disso, visto que as operações realizadas pelo PLSV são de curta direção, não é provável a incidência da onda centenária durante a realização do projeto.

Apesar dessa simplificação ser suficiente para a obtenção de resultados rápidos e confiáveis em um grande número de simulações numéricas, a utilização do método determinístico de representação do mar não retrata a condição real e multidirecional das ondas encontradas nos campos *offshore* brasileiros. Logo, considera-se o método de simulação no domínio do tempo com onda irregular como o método *benchmark* para obtenção de respostas confiáveis em análises de carregamentos em dutos flexíveis.

Entretanto, visto que esse método demanda de uma alta capacidade computacional e grande tempo de simulação, será adotado a metodologia desacoplada para obtenção dos resultados no domínio do tempo com onda irregular.

Nesse sentido, inicialmente será simulado a incidência de um mar caracterizado pelo espectro de JONSWAP na embarcação PLSV, e em seguida serão transmitidos na extremidade de topo do *riser* flexível os movimentos do navio de interesse para o projeto.

Conforme estudos realizados por [LEGRAS, 2010], o comportamento da parte inferior do duto flexível é associado com a velocidade de *heave* da embarcação, enquanto que a tração de topo é bem representada pelo maior valor de aceleração de *heave* do barco. Além disso, conforme o autor, os maiores valores de curvatura no TDP ocorrem nos pontos de maior velocidade de *heave* da embarcação para baixo.

Como para projetos de instalação de *riser* com catenária em *lazy wave* há uma grande preocupação com os esforços de compressão e de curvatura, será utilizado no presente trabalho dos maiores valores de velocidade para baixo da embarcação como referência para as análises. Além disso, no capítulo 7 é apresentada a análise de sensibilidade realizada a fim de avaliar os impactos dessa tomada de decisão.

Dessa maneira, após as simulações de onda irregular incidindo no casco da embarcação, a maior velocidade para baixo do barco gerada durante a tempestade de 3 horas será transmitida para o sistema flexível e, durante um intervalo de 500 segundos ao redor desse movimento, serão obtidos os esforços críticos incidentes no sistema flexível.

Nesse sentido, as simulações no domínio do tempo de onda irregular irão nortear a qualidade das resultantes obtidas durante as simulações numéricas simplificadas utilizadas no presente trabalho.

### 5.3.2 Domínio da Frequência

Conforme mencionado anteriormente, análises numéricas de *risers* no domínio da frequência apresentam grandes limitações no que concerne a modelagem das não linearidades presentes nos sistemas. Entretanto, essas análises têm sido utilizadas de maneira satisfatória em simulações numéricas que visam a predição do efeito da fadiga de dutos submarinos [VAILLANT, 2007].

Dentre os principais aspectos que influenciam a qualidade dos resultados do método do domínio da frequência, podemos citar:

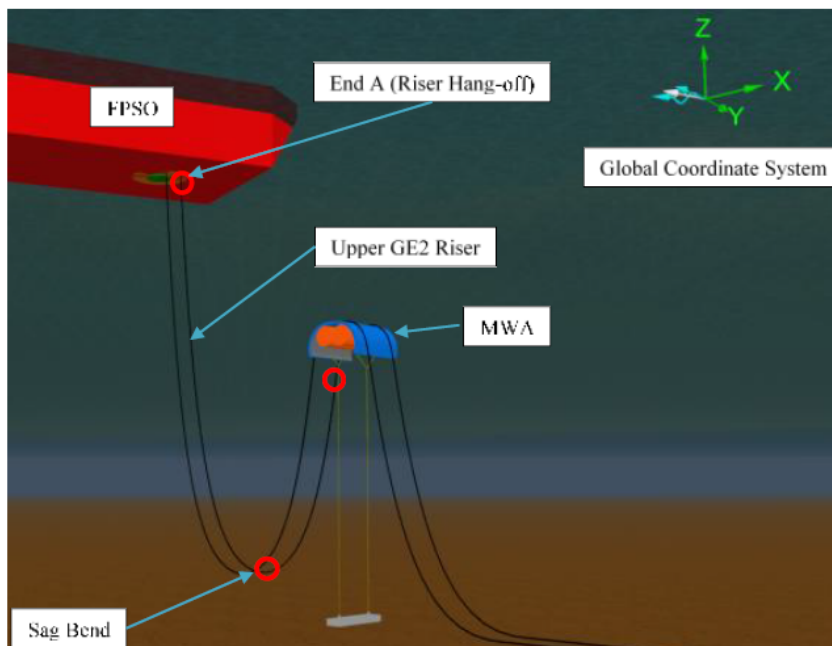
- A existência de uma parcela não-linear da força de arrasto na equação de Morison, a qual apresenta grandes dificuldades para ser linearizada;
- O método da frequência não é capaz de atualizar o posicionamento das estruturas do *riser* após a determinação da posição de equilíbrio durante a análise estática de instalação, de forma que o duto flexível fica fixo durante as simulações dinâmicas, acarretando em inconsistências ao longo do comprimento duto e também nas partes inferiores em contato com o solo.

Visto essas limitações, [VAILLANT, 2007] cita em seu trabalho diversos autores que desenvolveram estudos que visavam linearizar a força de arrasto da equação de Morison dentro dos modelos matemáticos no domínio da frequência a fim de reduzir os impactos nas simulações. Além disso, no que concerne a limitação de posicionamento do duto durante todo o intervalo de simulação dinâmica, realiza-se um refino maior da malha nas regiões críticas do duto flexível a fim de reduzir os impactos.

Apesar dos aspectos mencionados acima, objetiva-se com esse estudo avaliar a influência da não consideração dessas linearidades nos resultados obtidos em simulações numéricas no domínio da frequência de sistemas flexíveis na configuração de *lazy wave*.

Um estudo similar foi realizado por [ARMASTRONG et al., 2017] em um projeto de instalação de um *riser* flexível em catenária na configuração *Lazy-S* em LDA de 180m (Figura 36).

Nele o ator concluiu que os resultados no domínio da frequência foram suficientemente precisos para prever os intervalos da tempestade onde houveram os esforços críticos do sistema em termos de máxima tração, *heave* e curvatura, sendo que o método foi satisfatório para substituir a metodologia no domínio do tempo. Entretanto, é preciso a realização de um número maior de análises para se concluir com maior compreensão os impactos da adoção do método de discretização no domínio da frequência.



**Figura 36:** Catenária em *Lazy-S*  
 Fonte: [ARMASTRONG et al., 2017]

## 5.4 Implementação no Orcaflex

### 5.4.1 Modelagem do riser

Para a realização das análises numéricas foi utilizado o *software* Orcaflex versão 10.3 desenvolvido pela empresa Orcina. Esse *software* utiliza do método dos elementos finitos para a realização de simulações estáticas e dinâmicas de sistemas *offshore*, sendo possível realizar a modelagem tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.

Os sistemas flexíveis são modelados no *software* através de diversos objetos, sendo os principais: *Environment*, *Line*, *Attachment* e *Vessel*.

### ***Environment***

O objeto *Environment* define as condições meteorológicas que irão incidir durante a realização da análise dinâmica do problema, incluindo desde as características da onda incidente, valores de correnteza, vento, densidade da água do mar, número de Reynolds, entre outros.

### ***Vessel***

Esse objeto tem como principal objetivo a realização da modelagem da estrutura submarina ou plataforma de dimensão grande o suficiente para que haja significativa difração da onda. Sua principal função é imputar o RAO da embarcação dentro do modelo.

### ***Line***

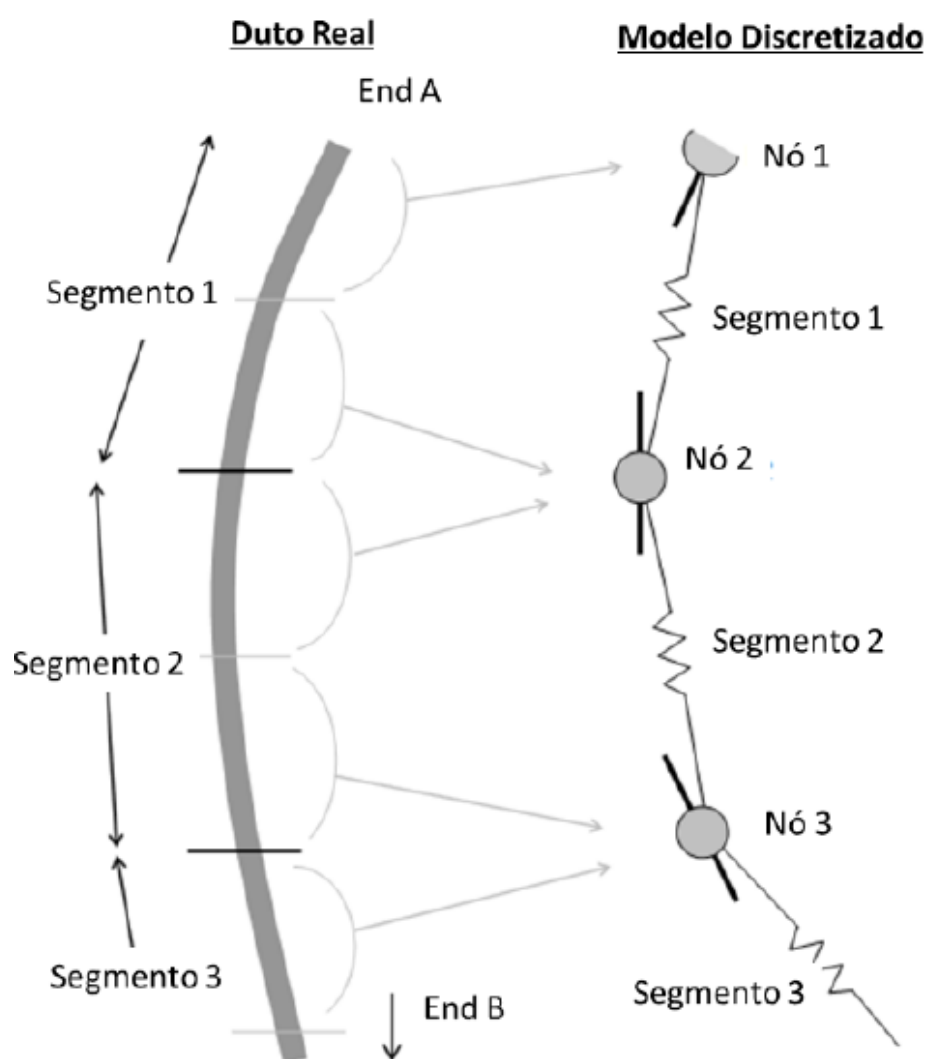
O objeto *Line* representa os elementos do sistema flexível mencionados anteriormente no capítulo 2, tal como dutos, cabos, correntes, entre outros.

Para análises de dutos flexíveis são utilizados de modelos com massa concentrada (chamados de nós) interligadas por molas sem peso (chamadas de segmentos). Dessa forma, cada segmento de reta é modelado a partir das propriedades axiais e flexionais do duto flexível, enquanto que as propriedades de massa, rigidez flexional, diâmetro, fatores de arrasto, atrito e amortecimento ficam concentradas apenas nas extremidades.

Esses segmentos de reta são retilíneos (ver figura 37) e admitem cerca de 6 graus de liberdade para cada nó, tal que em cada objeto *Line* definido do modelo seja possível armazenar a posição, velocidade, aceleração e tração de cada nó. Outras propriedades podem ser obtidas no pós processamento dos resultados considerando a posição final de cada nó no sistema, como é o caso da curvatura.

Conforme a [DNV-OS-F201, 2010], deve ser considerado um número suficiente de pontos do *riser* para representar com acurácia o sistema flexível. Dessa forma, é necessário um maior refino da malha de simulação do objeto *Line* para algumas regiões do duto, tal como às áreas com elevadas curvaturas, áreas em contato com o solo ou fixas à UEPs, regiões de elevadas cargas estruturais como a *splash zone* e áreas do sistema submarino com mudança de área/propriedade transversal.

As extremidade do objeto *Line* chamadas de *End A* e *End B* podem estar fixas, livres, ancoradas ou conectadas a outro objeto. Para o presente trabalho a extremidade *End B* está fixa ligada à BAP do poço do projeto, enquanto que a extremidade *End A* está conectada ao objeto



**Figura 37:** Modelo discretizado no Orcaflex.  
Fonte: [ORCINA, 2021]

*Vessel*, e por isso segue o posicionamento da embarcação no que concerne aos movimentos de translação, funcionando tal como uma rótula visto que os movimentos de rotação continuam livres. Os demais pontos da linha estarão livres para encontrar suas posições de equilíbrio durante a análise estática.

### ***Attachment***

Os *Attachments* são os itens conectados aos nós do objeto *Line*. De maneira prática, são utilizados para representar os acessórios que compõem o sistema flexível, tal como conectores, enrijecedores, flutuadores, colares de peso morto, colar de ancoragem, cabeças de tração, entre outros.

### 5.4.2 Modelos de Análise

Definidos os principais objetos necessários para a realização de uma análise numérica no Orcaflex, o sistema flexível deve ser modelado a fim de iniciar as simulações. Nesse sentido são determinados:

- O objeto *Vessel* que irá representar o PLSV;
- O objeto *Vessel type* que irá receber as características do PLSV em termos de RAO;
- O objeto *Line* que representará o duto flexível;
- O objeto *Line type* que irá representar as propriedades dos acessórios ligados ao flexível tal como conectores e o guincho de topo do PLSV;
- Os objetos *Attachment* que irão representar todos os acessórios da linha;
- Os objetos *Attachment type* também chamados de *clump types* que irão receber as propriedades dos acessórios;

Além disso, é necessário a definição do ambiente *Environment*, bem como a escolha dos parâmetros gerais que o *software* irá considerar nas análises estáticas e dinâmicas, tal como número de iterações máximo, *time step*, método de resolução matemático das equações, entre outros.

Dentre os métodos de resolução matemática das análises dinâmicas existem três formas utilizadas pelo *software*: Domínio do tempo com integração explícita, Domínio do tempo com integração implícita e Domínio da frequência.

Todos esses métodos visam solucionar a equação 4.20 apresentada no capítulo anterior. Entretanto, para o método no domínio da frequência assume-se que as matrizes de massa  $\vec{M}$ , rigidez  $\vec{K}$  e amortecimento  $\vec{C}$  são mantidas constantes ao longo da análise. Já durante as análises no domínio do tempo, é obtido a variação das acelerações e velocidades das partículas fluidas ao longo da análise [VAILLANT, 2007].

Para esse último, o *software* utiliza de diferente formas para fazer o incremento de tempo da análise, enquanto no modo explícito os valores ao final do incremento de tempo são estimados através de uma formulação concentrada e um incremento constante, no método implícito toda a

equação 4.20 é solucionada ao final do incremento de tempo adotado naquele passo de simulação iterando os valores de posição, aceleração e velocidade encontrados.

No presente trabalho iremos utilizar o método do domínio da frequência e o método do domínio do tempo de integração explícita.

Abaixo são resumidos os principais passos que serão ser seguidos dentro do ambiente computacional do Orcaflex durante as simulações envolvendo tanto o método no domínio da frequência quanto o método no domínio do tempo com onda regular.

1. Gerar o modelo da *Lazy Wave* no Orcaflex:
  - (a) Informar os dados técnicos dos acessórios, tramos e flutuadores que compõem o sistema submarino em *lazy wave*;
  - (b) Informar a embarcação e atrelar seu respectivo RAO;
2. Realizar o refino da malha;
3. Realizar as análises estáticas;
4. Realizar as análises dinâmicas com o método e modelo de onda definidos;
5. Colher os resultados e concatená-los em um relatório;

Já para o método no domínio do tempo com onda irregular, visto as simplificações que estão sendo utilizadas para contornar as dificuldades de processamento computacional, será utilizado de uma abordagem diferente, tal que:

1. Criar um modelo no Orcaflex que só inclua a embarcação e seu respectivo RAO - Modelo 1;
2. Criar um modelo da *Lazy Wave* no Orcaflex que inclua tanto a embarcação e seu respectivo RAO, quanto as informações dos dutos e acessórios - Modelo 2;
3. Realizar o refino da malha do Modelo 2;
4. Realizar as análises estáticas do Modelo 2;
5. Realizar a análise dinâmica com a onda irregular incidindo no Modelo 1 em uma tempestade de 10800s (3 horas);



6. Avaliar os movimentos mais críticos resultantes na embarcação durante a simulação do item anterior;
7. Introduzir os movimentos mais críticos da embarcação dentro do Modelo 2 e avaliar os esforços no *riser* durante um intervalo de 500s de duração ao redor do movimento mais crítico do navio;
8. Colher os resultados e concatená-los em um relatório;

## Capítulo 6

### Metodologia e Matriz de Casos

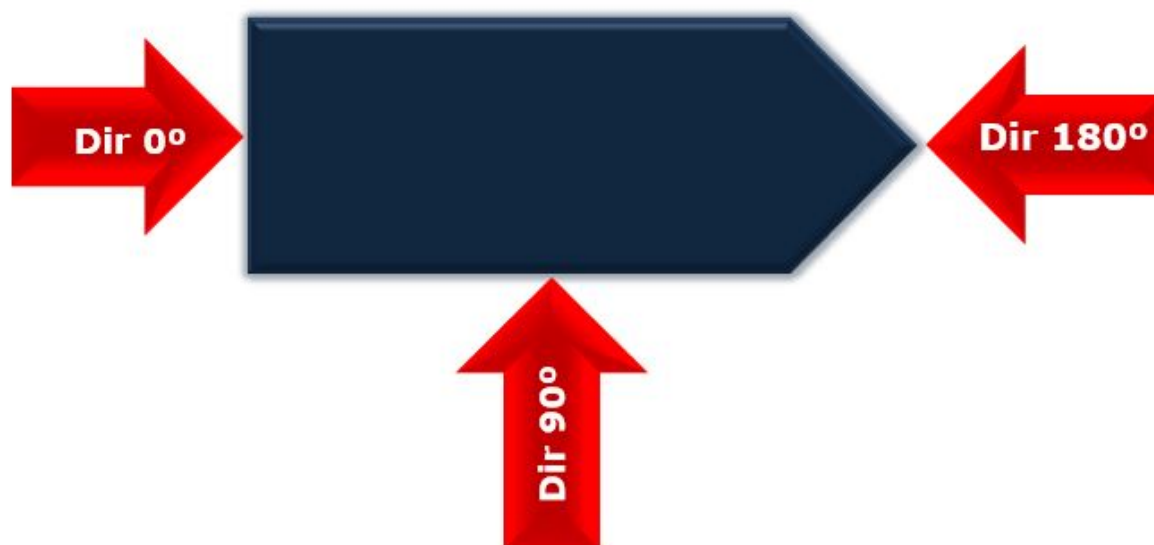
A fim de avaliar os impactos da adoção de diferentes metodologias de simulação no amplo ambiente de projetos, serão realizadas as simulações numéricas considerando a utilização dos seguintes métodos:

- Método no domínio do tempo com onda regular e modelo acoplado;
- Método no domínio do tempo com onda irregular e modelo desacoplado;
- Método no domínio da frequência com onda irregular e modelo acoplado;

As condições meteorológicas para todas as simulações consideraram a adoção dos parâmetros de mar apresentados pela tabela 1 conforme convenção de ângulo de incidência apresentado pela figura 38.

**Tabela 1:** Parâmetros Gerais de Onda

Parâmetro	Valores
Altura de Onda ( $H_s$ )	1,0m
	1,5m
	2,0m
	2,5m
	3,0m
Período ( $T_p$ )	6s
	7s
	8s
	9s
	10s
	11s
	12s
	13s
Ângulo de Incidência	0°
	30°
	60°
	90°
	120°
	180°



**Figura 38:** Convenção de incidência de ondas.  
Fonte: Autoria Própria

Dessa forma, inicialmente foram selecionados dois projetos diferentes onde foram encontrados resultados opostos durante a realização das simulações no domínio do tempo com onda regular. Isso se justifica pois o principal objetivo do presente trabalho é de avaliar a aplicação das metodologias de simulação mencionadas acima nos diferentes projetos existentes, tal que possa ser analisado a convergência dos resultados entre os métodos para projetos de instalação de linha em *lazy wave* que apresentem comportamentos lineares e também aqueles em que o comportamento seja não-linear.

Nesse sentido, foram escolhidos dois *base cases* com resultados frente a compressão opostos, chamaremos de Caso 1 o projeto que apresenta baixos valores frente a compressão e de Caso 2 o projeto onde foram encontradas resultantes compressivas significantes. As características físicas de cada sistema de instalação de *lazy wave* é apresentado pela tabela 2.

**Tabela 2:** Propriedades físicas dos sistemas analisados

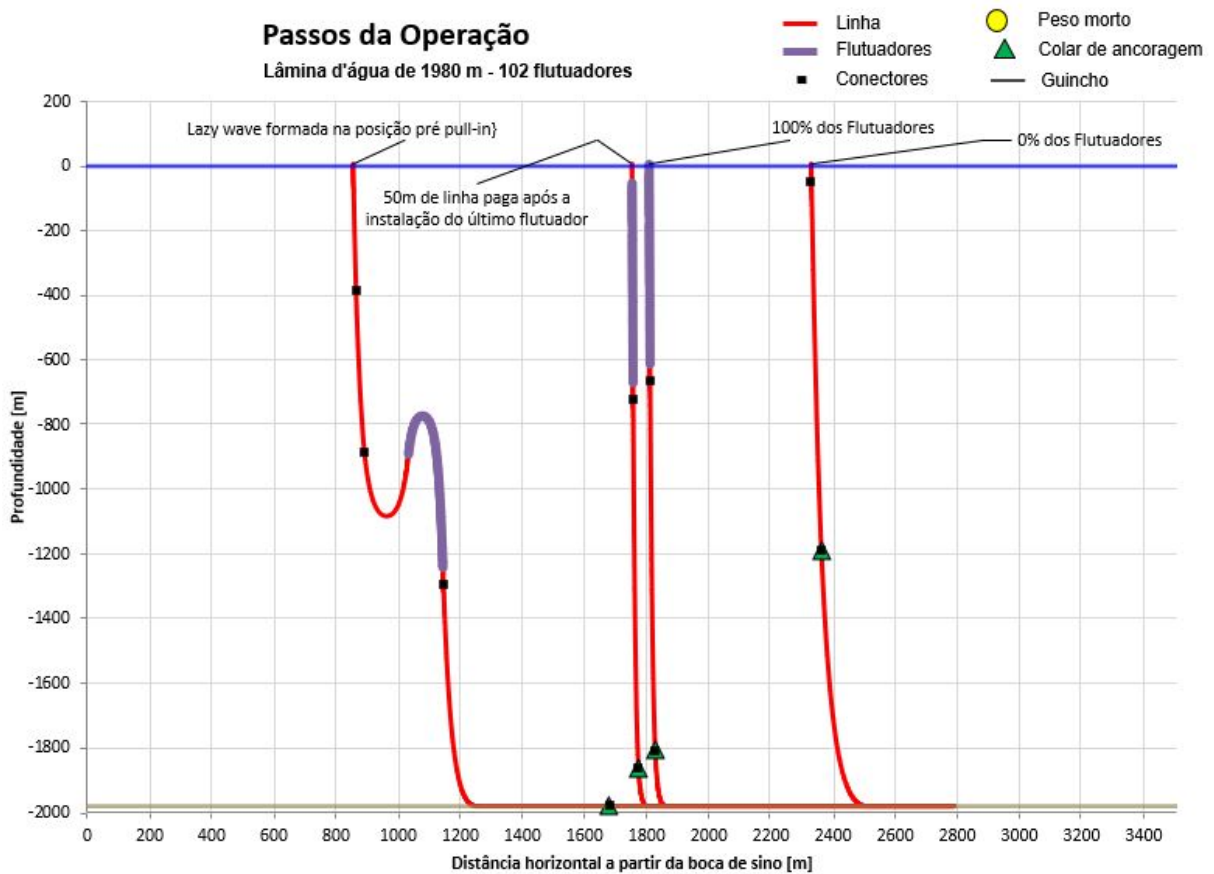
Caso	Caso 1	Caso 2
Localização	Bacia de Santos	Bacia de Santos
UEP	FPSO	FPSO
Tipo de Linha	IG	PO
ID	6"	8"
Número de tramos - <i>riser</i>	5	5
Número de tramos - <i>flowline</i>	3	3
Número de Flutuadores	102	170

A fim de otimizar os estudos, optou-se pela realização das análises numéricas em quatro

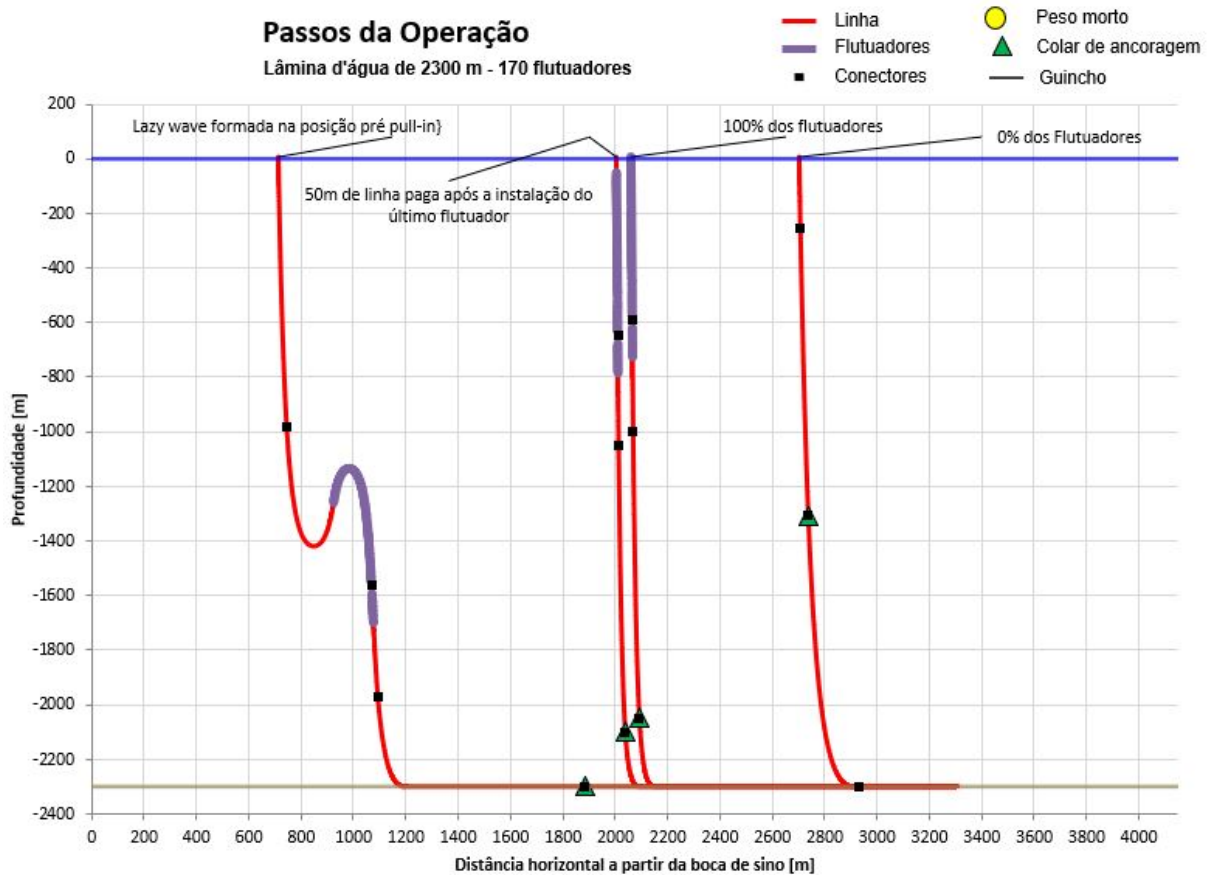
*steps* do projeto de instalação do duto flexível em *lazy wave*, sendo eles:

- 0% dos flutuadores instalados;
- 100% dos flutuadores instalados;
- 50m de linha paga após a instalação do último flutuador;
- *Lazy wave* formada na posição pré *pull-in*;

Esses *steps* foram selecionados pois são representativos dos diferentes passos de instalação que podem estar presentes em uma análise de instalação em *lazy wave*, e entende-se que contemplam os momentos de instalação com os esforços mais críticos para o navio de instalação que estará executando o projeto. Na figura 39 está representado os passos de instalação para o Caso 1, já a figura 40 apresenta os passos de instalação para o Caso 2.



**Figura 39:** Passos de instalação do projeto - Caso 1  
Fonte: Autoria própria.



**Figura 40:** Passos de instalação do projeto - Caso 2  
Fonte: Autoria própria.

Dessa maneira, para o passo onde ainda não foram instalados flutuadores serão simulados os esforços mecânicos em uma catenária do tipo simples. Já quando 100% dos flutuadores estão instalados nos tramos intermediários da linha flexível, espera-se as maiores resultantes compressivas no duto, visto que o empuxo de todos os flutuadores estará atuando no comportamento dinâmico do flexível. Para o passo onde o último flutuador está a 50m de profundidade, haverá um sistema físico posicionado na *splash zone* caracterizado por um trecho de duto flexível intercalado por uma sessão de flutuadores e novamente por um trecho reto de duto flexível, resultando em um comportamento dinâmico único para a simulação numérica. Por fim, no passo onde a catenária em *lazy wave* está na posição pré operação de *pull-in* poderá ser avaliado os esforços de todo o sistema flexível instalado antes da transferência da linha para a UEP.

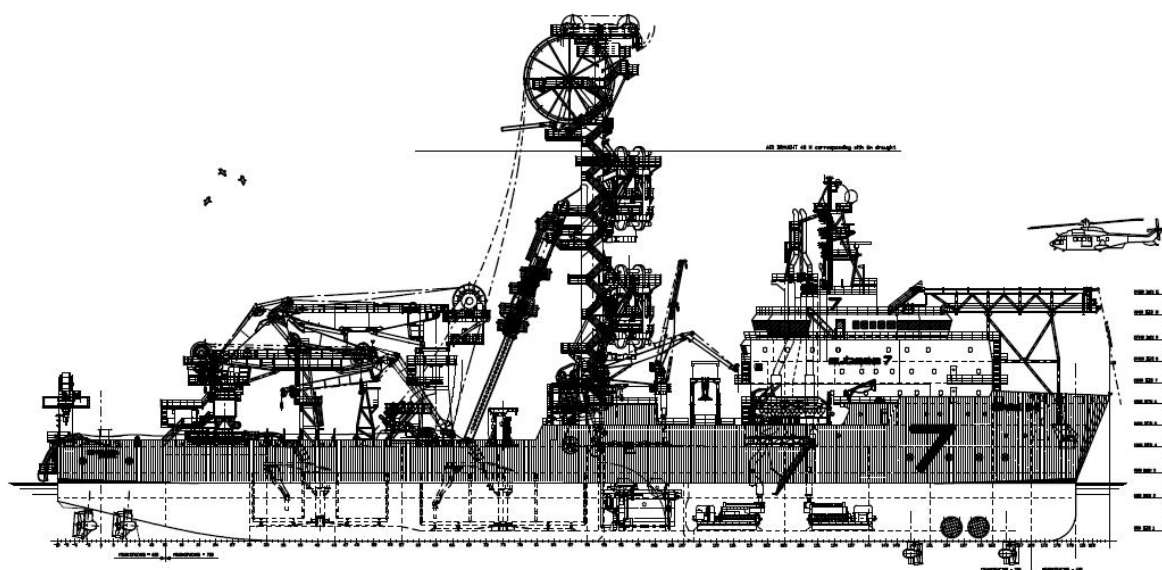
Com relação ao PLSV utilizado na geração dos modelos, foi considerado uma embarcação com torre vertical (VLS) e com capacidade de lançamento de até 550 toneladas (Figura 41).

Esse navio realiza o lançamento dos dutos flexíveis através da mesa de trabalho posicionada a meia nau da embarcação, e apresenta a dimensões conforme características apresentadas na

**Tabela 3:** Características do PLSV

Geometria	Valor (m)
Calado Operacional	8,3
Boca	29,94
Comprimento	145,95
Altura da mesa de trabalho	6,6

tabela 3.

**Figura 41:** Características da embarcação.

Fonte: Autoria própria.

Durante as simulações numéricas, para cada projeto serão adotados as condições de contorno apresentadas pela tabela 4. Essas limitações se devem ora por fatores limitantes na embarcação PLSV, ora devido as propriedades do sistema de produção em lançamento.

**Tabela 4:** Condições de Contorno

Casos	Caso 1	Caso 2
Mínima Tração de Topo [tf]	50	50
Máxima Tração de Topo [tf]	385	420
Mínima Tração ao Longo do Duto [tf]	-5	-5
Máxima Curvatura [1/m]	0.33	0.22

## Capítulo 7

### Discussão dos Resultados

#### 7.1 Análise de Sensibilidade

Conforme mencionado no capítulo 5, durante a realização das simulações numéricas no domínio do tempo sob incidência de onda irregular foi adotada a metodologia de análises simplificada, a qual calcula os esforços no sistema flexível através do método desacoplado.

Nesse sentido, as análises são realizadas considerando inicialmente a incidência de ondas na embarcação de forma isolada, tal que seja possível capturar os principais movimentos do barco que serão transmitidos para o sistema flexível fixo ao *PLSV* através da extremidade de topo da linha.

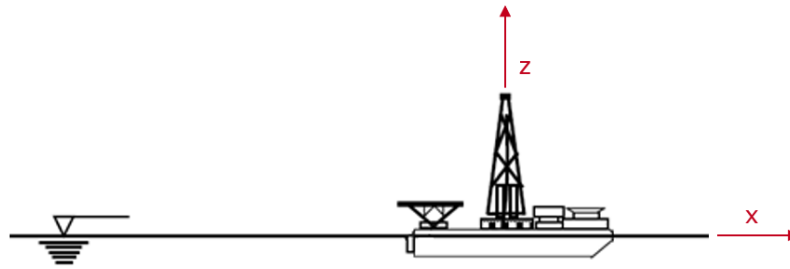
Os principais fatores que influenciam nos esforços atuantes no duto flexível são a aceleração, velocidade e o deslocamento de *heave* da embarcação [LEGRAS, 2010]. Nesse sentido, foi realizada uma análise de sensibilidade a fim de avaliar o impacto da adoção de cada um desses fatores no cálculo dos esforços do sistema flexível.

Esses movimentos são resultantes dos 6 graus de liberdade gerados na embarcação de acordo com a excitação gerada pelas ondas e pela função de transferência RAO do barco.

Chamaremos de máximo os movimentos da embarcação no sentido positivo do eixo *z* e de mínimo os movimentos no sentido negativo, conforme convenção apresentada na figura 42. Dessa forma, serão analisadas as resultantes encontradas quando avaliado os seguintes movimentos da embarcação:

- Max. *Heave*: Maior deslocamento do *PLSV* para cima.
- Max. *GZ Velocity*: Maior velocidade do *PLSV* para cima.
- Max. *GZ Acceleration*: Maior aceleração do *PLSV* para cima.
- Min. *Heave*: Maior deslocamento do *PLSV* para baixo.
- Min. *GZ Velocity*: Maior velocidade do *PLSV* para baixo.

- Min. *GZ Acceleration*: Maior aceleração do PLSV para baixo.



**Figura 42:** Convenção de eixos para os movimentos da embarcação.

Fonte: Autoria própria.

Para isso, considerando o *step* "100% dos flutuadores instalados" do projeto de instalação referente ao Caso 2 do presente estudo, e considerando a altura significativa ( $H_s$ ) de onda de 2 metros e um período ( $T_p$ ) de 9 segundos, foi realizada a simulação desacoplada através do Orcasflex considerando 7 cenários de incidência de onda no PLSV ( $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  e  $180^\circ$ ) e adotando como critério os 3 movimentos da embarcação mencionados no parágrafo anterior (Tabela 5).

**Tabela 5:** Parâmetros Adotados

Altura de Onda ( $H_s$ )	2,0m
Período ( $T_p$ )	9s
Ângulo de Incidência	$0^\circ$
	$30^\circ$
	$60^\circ$
	$90^\circ$
	$120^\circ$
	$150^\circ$
	$180^\circ$

Dessa forma, foram gerados 42 arquivos de simulação em que os resultados para Máxima Tração de Topo (tf), Mínima Tração de Topo (tf), Mínima Tração ao Longo do duto flexível (tf) e Curvatura ( $\frac{1}{m}$ ) foram avaliados.

Na tabela 6 são apresentados os valores mais significativos para cada direção de incidência de onda de acordo com o critério de avaliação. Já na tabela 7 é realizada a correlação entre o movimento do barco que gerou o resultado de maior/menor amplitude.

Visto a dispersão de resultados apresentada na tabela 7, concluímos que não houve um só movimento do barco que gerasse os valores mais pronunciados de resultados, havendo uma



**Tabela 6:** Resultados mais significativos

Direção (°)	Máxima Tração de Topo (tf)	Mínima Tração de Topo (tf)	Máxima Curvatura (1/m)	Mínima Tração ao Longo do Duto (tf)
0	269.51	142.95	0.06	1.55
30	285.01	126.24	0.06	1.43
60	341.84	79.36	0.08	0.36
90	444.92	-23.74	0.13	-31.72
120	341.83	72.01	0.09	0.25
150	270.18	126.24	0.06	1.39
180	266.61	128.49	0.06	1.39

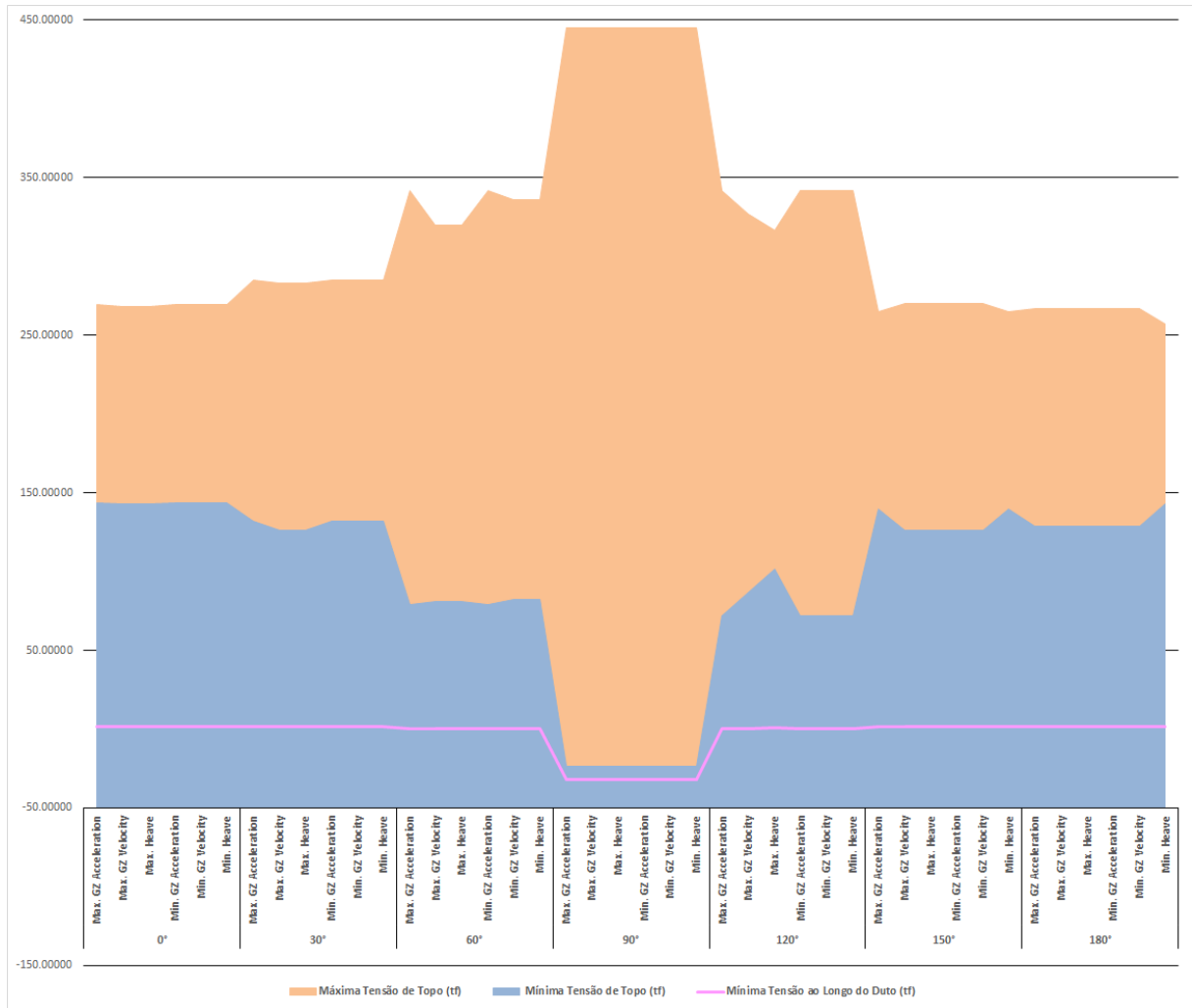
**Tabela 7:** Resultados mais significativos - Movimento do PLSV

Direção (°)	Máxima Tração de Topo (tf)	Mínima Tração de Topo (tf)	Máxima Curvatura (1/m)	Mínima Tração ao Longo do Duto (tf)
0	Min. Heave	Max. Heave	Max. GZ Velocity	Max. GZ Velocity
30	Min. Heave	Max. Heave	Min. Heave	Min. Heave
60	Min. Heave	Max. GZ Acceleration	Min. Heave	Min. GZ Velocity
90	Min. GZ Acceleration	Max. GZ Acceleration	Min. Heave	Min. GZ Velocity
120	Min. Heave	Min. Heave	Max. GZ Acceleration	Min. Heave
150	Min. GZ Velocity	Min. GZ Velocity	Min. GZ Velocity	Min. GZ Velocity
180	Min. GZ Velocity	Min. GZ Velocity	Min. GZ Velocity	Min. GZ Velocity

grande representatividade dos valores encontrados quando adotada a maior velocidade e *heave* para baixo (Min. *Heave* & Min. *GZ Velocity*).

Isso se justifica pois ao avaliar os resultados encontrados em cada simulação não foram obtidos grandes variações, tal que podemos concluir que qualquer movimento da embarcação adotado nas análises no domínio do tempo com onda irregular irão ser bons representantes dos resultados de esforços máximos e mínimos encontrados no sistema flexível. Nos gráficos apresentados pelas figuras 43 e 44 são apresentas os valores encontrados, havendo uma grande continuidade de resultados para cada direção de incidência de onda avaliada e seus respectivos movimentos associados.

Como já mencionado anteriormente, um dos objetivos do presente trabalho é avaliar o impacto da adoção do método da frequência em projetos submetidos à compressão de topo, por



**Figura 43:** Distribuição cargas ao longo das simulações (tf).

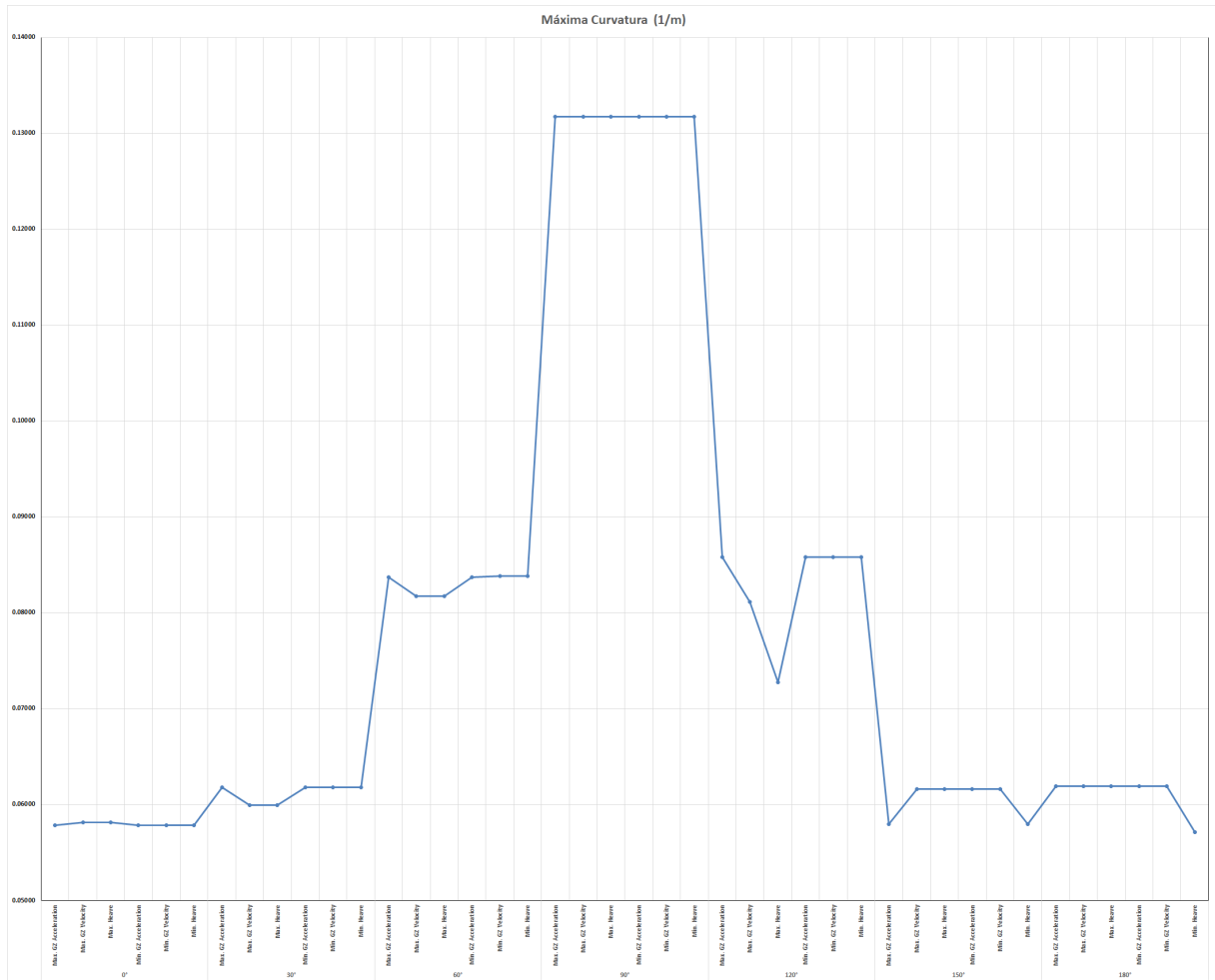
Fonte: Autoria própria.

isso iremos adotar a velocidade para baixo da embarcação como referência para as análises de onda irregular. Além desse movimento ter se mostrado representativo durante a análise de sensibilidade realizada, entende-se que esse movimento tem grande correlação com o fenômeno da compressão.

## 7.2 Análise de Qualidade dos Resultados

Existem alguns critérios que podem ser considerados a fim de avaliar qualitativamente os resultados obtidos durante as análises com o *software* Orcaflex. Isso é importante, pois os resultados obtidos precisam ser validados sob algum critério de avaliação de forma a confirmar a veracidade e acuracidade dos resultados obtidos.

Nesse sentido, para projetos de instalação, quanto maior o tamanho de onda ( $H_s$ ) adotado

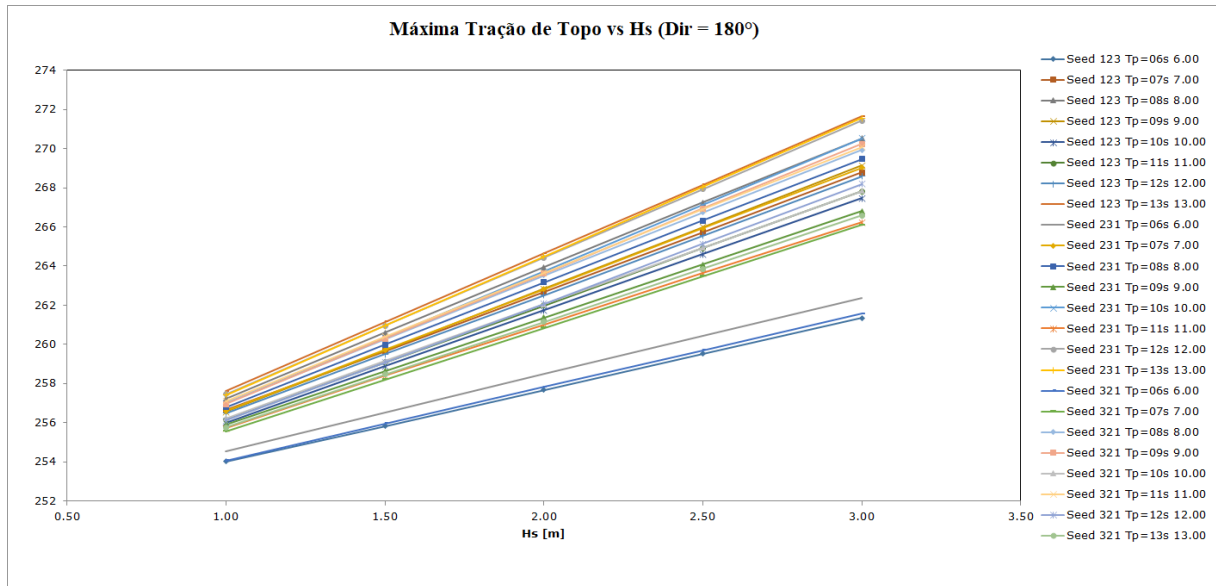


**Figura 44:** Máxima Curvatura (tf).  
Fonte: Autoria própria.

nas análises numéricas, maior serão as cargas dinâmicas de topo esperadas no projeto. Para o presente trabalho, visto que estamos avaliando os resultados para ondas que variam entre 1 metro e 3 metros, condição esperada para os estados de mar das bacias brasileiras, ao plotar gráficos de Altura de Onda Significativa ( $H_s$ )[m] versus Máxima Tração de Topo [tf], são esperadas curvas lineares crescentes.

Isso foi realizado para todas as simulações geradas durante o estudo, de forma que foram obtidos gráficos tal como apresentado pela figura 45.

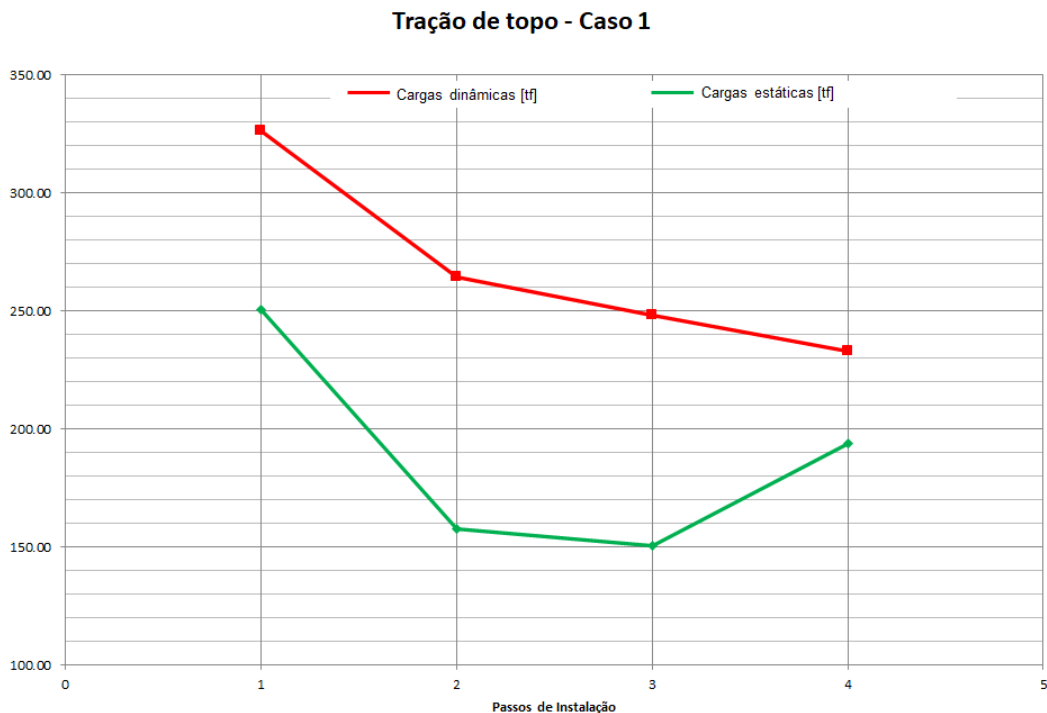
Além disso, é possível realizar uma análise qualitativa dos resultados conforme o comportamento das cargas esperadas em cada *step* de instalação. Para um projeto de catenária em *lazy wave*, são esperadas grandes valores de carga de topo no início do lançamento, quando a linha ainda está no formato de catenária simples. Em seguida, quando todos os flutuadores já foram instalados no duto flexível, é esperado uma redução da carga de topo devido ao empuxo atuante. Por fim, ao realizar o lançamento dos *risers* de topo quando todo o projeto já foi lançado ao mar,



**Figura 45:** Altura de Onda Significativa ( $H_s$ ) [m] versus Máxima Tração de Topo [tf].  
Fonte: Autoria própria.

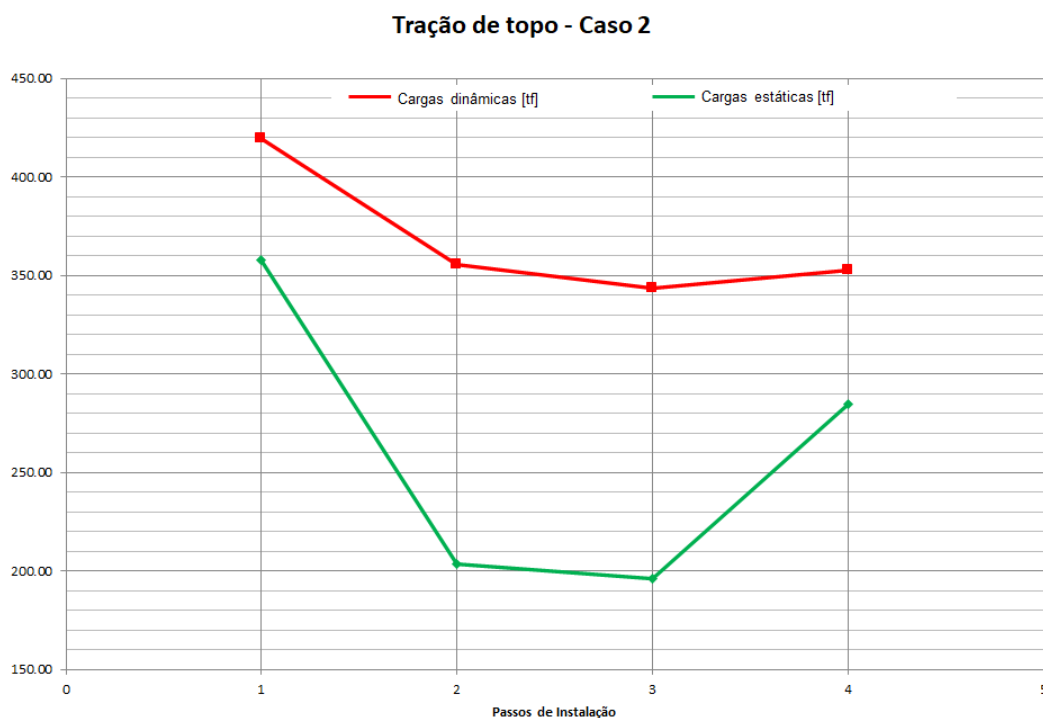
pode ser esperada uma constância ou um aumento suave das cargas de topo.

Nesse sentido, foram avaliados os resultados encontrados em termos de máximas cargas dinâmicas e estáticas à cada passo de instalação. Sendo analisado o comportamento das cargas de topo conforme descrito no parágrafo anterior (Figuras 46 e 47).



**Figura 46:** Comportamento das cargas de topo conforme os passos de lançamento - Caso 1.

Fonte: Autoria própria.



**Figura 47:** Comportamento das cargas de topo conforme os passos de lançamento - Caso 2.

Fonte: Autoria própria.

### 7.3 Desempenho dos Métodos de Simulação

Realizada a análise qualitativa dos resultados encontrados, é possível analisar a convergência entre os métodos. De maneira geral, um projeto de instalação de duto flexível é realizado em um intervalo de tempo curto, e por isso, o principal *output* das análises numéricas realizadas é a janela operacional da embarcação, onde é apresentada qual o tamanho limite de onda ( $H_s$ ) para cada aproamento e período de onda ( $T_p$ ). Na prática, esses valores são comparados com as condições de mar reais encontradas no momento de realização do projeto de lançamento, sendo possível interromper o projeto ou aguardar uma condição de mar mais favorável quando são encontrados condições meteorológicas extremas não previstas pelo projeto de instalação.

Nesse sentido, para o presente estudo inicialmente serão analisadas as janelas operacionais proporcionadas por cada método de simulação, buscando encontrar quando cada modelo é mais restritivo ou abrangente. Além disso, iremos avaliar os resultados obtidos em termos de Mínima Tração de Topo [tf], Máxima Tração de Topo [tf], Máxima Curvatura [1/m] e Mínima Tração ao Longo do Duto [tf] em todas as direções de incidência de onda no PLSV e também para os casos específicos de incidência de onda entre  $150^\circ$  e  $180^\circ$ .

Dessa maneira, nas figuras 48 e 49 são apresentadas as janelas operacionais encontradas durante a realização das simulações no domínio do tempo com onda irregular, no domínio do tempo com onda regular e no domínio da frequência para o Caso 1 e Caso 2, respectivamente. Para fazer a leitura das informações da tabela, é preciso correlacionar a coluna, referente ao período de onda ( $T_p$ ), e a linha, representativa do aproamento da embarcação no momento, sendo o valor encontrado representante da máxima altura de onda ( $H_s$ ) tolerada para cada passo do projeto de instalação que está sendo analisado. As células grifadas em verde, representam estados de mar mais abrangentes, enquanto que as células em amarelo ou vermelho, apresentam condições mais restritas, onde o projeto deve ser devidamente planejado para que não sejam assumidas condições inseguras durante a operação.

Caso 1																										
DOMÍNIO DO TEMPO COM ONDA IRREGULAR						DOMÍNIO DO TEMPO COM ONDA REGULAR						DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA														
Passo 1																										
Crítérios	Min. TT	50.00	Máx. TT	385.00	Curv.	0.33	Compressão	-5.00	Crítérios	Min. TT	50.00	Máx. TT	385.00	Curv.	0.33	Compressão	-5.00	Crítérios	Min. TT	50.00	Máx. TT	385.00	Curv.	0.33	Compressão	-5.00
Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13	Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13	Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13
0	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30	30	30
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
60	30	30	30	30	30	30	30	30	60	30	30	30	30	30	30	30	30	60	30	30	30	30	30	30	30	30
90	30	25	25	25	25	25	25	30	90	30	30	20	20	20	25	30	30	90	30	30	30	30	30	30	30	30
120	30	30	30	30	30	30	30	30	120	30	30	30	30	30	30	30	30	120	30	30	30	30	30	30	30	30
150	30	30	30	30	30	30	30	30	150	30	30	30	30	30	30	30	30	150	30	30	30	30	30	30	30	30
180	30	30	30	30	30	30	30	30	180	30	30	30	30	30	30	30	30	180	30	30	30	30	30	30	30	30
Passo 2																										
Crítérios	Min. TT	50.00	Máx. TT	385.00	Curv.	0.33	Compressão	-5.00	Crítérios	Min. TT	50.00	Máx. TT	385.00	Curv.	0.33	Compressão	-5.00	Crítérios	Min. TT	50.00	Máx. TT	385.00	Curv.	0.33	Compressão	-5.00
Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13	Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13	Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13
0	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30	30	
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
60	30	30	30	30	30	30	30	30	60	30	30	30	20	20	25	25	30	60	30	30	30	30	30	30	30	
90	20	15	15	15	20	20	20	25	90	30	15	10	10	10	20	25	25	90	20	15	15	15	15	20	25	
120	30	30	30	30	30	30	30	30	120	30	30	30	25	25	25	30	30	120	30	30	30	30	30	30	30	
150	30	30	30	30	30	30	30	30	150	30	30	30	30	30	30	30	30	150	30	30	30	30	30	30	30	
180	30	30	30	30	30	30	30	30	180	30	30	30	30	30	30	30	30	180	30	30	30	30	30	30	30	
Passo 3																										
Crítérios	Min. TT	50.00	Máx. TT	385.00	Curv.	0.33	Compressão	-5.00	Crítérios	Min. TT	50.00	Máx. TT	385.00	Curv.	0.33	Compressão	-5.00	Crítérios	Min. TT	50.00	Máx. TT	385.00	Curv.	0.33	Compressão	-5.00
Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13	Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13	Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13
0	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30	30	
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
60	30	30	30	30	30	30	30	30	60	30	30	25	20	20	20	25	30	60	30	30	25	25	25	25	30	
90	20	15	15	15	20	20	20	25	90	20	10	10	10	10	15	20	25	90	15	10	10	10	15	15	20	
120	30	30	30	30	30	30	30	30	120	30	30	25	20	20	25	25	30	120	30	30	25	25	25	30	30	
150	30	30	30	30	30	30	30	30	150	30	30	30	30	30	30	30	30	150	30	30	30	30	30	30	30	
180	30	30	30	30	30	30	30	30	180	30	30	30	30	30	30	30	30	180	30	30	30	30	30	30	30	
Passo 4																										
Crítérios	Min. TT	50.00	Máx. TT	385.00	Curv.	0.33	Compressão	-5.00	Crítérios	Min. TT	50.00	Máx. TT	385.00	Curv.	0.33	Compressão	-5.00	Crítérios	Min. TT	50.00	Máx. TT	385.00	Curv.	0.33	Compressão	-5.00
Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13	Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13	Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13
0	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30	30	
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	
60	30	30	30	30	30	30	30	30	60	30	30	30	30	30	30	30	30	60	30	30	30	30	30	30	30	
90	30	30	30	30	30	30	30	30	90	30	30	30	30	30	30	30	30	90	30	30	30	30	30	30	30	
120	30	30	30	30	30	30	30	30	120	30	30	30	30	30	30	30	30	120	30	30	30	30	30	30	30	
150	30	30	30	30	30	30	30	30	150	30	30	30	30	30	30	30	30	150	30	30	30	30	30	30	30	
180	30	30	30	30	30	30	30	30	180	30	30	30	30	30	30	30	30	180	30	30	30	30	30	30	30	

Figura 48: Janela Operacional - Caso 1.  
 Fonte: Autoria própria.

De modo geral, avaliando as janelas operacionais encontradas com cada um dos métodos de simulação, podemos concluir que o método no domínio do tempo com onda regular se provou mais conservador quando comparado aos demais, inviabilizando inclusive a realização do projeto referente ao Caso 2 em algumas condições de incidência da onda de través.

Por outro lado, enquanto que para o Caso 1 o método da frequência apresentou condições ligeiramente mais abrangentes para a realização do projeto, para o Caso 2 esse método se mostrou mais restritivo quando comparado a janela operacional proporcionada pelo método no domínio do tempo de onda irregular.

Em suma, para o Caso 1 foi encontrado convergência entre os três métodos de simulação para os seguintes casos:

Caso 2																										
DOMÍNIO DO TEMPO COM ONDA IRREGULAR						DOMÍNIO DO TEMPO COM ONDA REGULAR						DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA														
Passo 1						Passo 2						Passo 3														
Crítérios	Min. TT	50.00	Máx. TT	420.00	Curv.	0,22	Compressão	-5,00	Crítérios	Min. TT	50,00	Máx. TT	420,00	Curv.	0,22	Compressão	-5,00	Crítérios	Min. TT	50,00	Máx. TT	420,00	Curv.	0,22	Compressão	-5,00
Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13	Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13	Dir [deg]	6	7	8	9	10	11	12	13
0	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30	30	30	0	30	30	30	30	30	30	30	30
30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
60	30	20	20	20	20	20	20	20	60	30	30	25	15	15	20	20	25	60	30	30	20	20	20	20	25	25
90	15	10	10	10	10	10	10	15	90	20	10	10	10	15	20	25	25	90	15	10	10	10	10	15	15	15
120	25	30	20	20	25	25	25	25	120	30	30	25	20	15	20	25	25	120	30	25	25	20	20	25	25	25
150	30	30	30	30	30	30	30	30	150	30	30	25	30	30	30	30	30	150	30	30	30	30	30	30	30	30
180	30	30	30	30	30	30	30	30	180	30	30	30	30	30	30	30	30	180	30	30	30	30	30	30	30	30

Figura 49: Janela Operacional - Caso 2.

Fonte: Autoria própria.

- Para todo o envelope de simulação quando o projeto encontra-se no passo 4, referente ao momento em que a catenária em *lazy wave* já encontra-se pronta, na iminência de realizar a transferência para a UEP.
- Para todos os períodos de onda ( $T_p$ ) quando o aproamento da embarcação encontra-se em  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $150^\circ$  e  $180^\circ$ .

Já para o Caso 2 foi encontrada convergência apenas para o passo 4, de forma que podemos concluir que todos os métodos poderiam ser utilizados nesse *step* de análise sem perdas significativas ao projeto.

Além disso, apenas analisando a convergência entre o método da frequência e o método de onda irregular, *benchmark* para o presente estudo, foi verificada convergência para o Caso 2 em todos os períodos de onda ( $T_p$ ) quando o aproamento da embarcação encontra-se em  $150^\circ$  e  $180^\circ$ . Nos passos de instalação 1 e 2, houve concordância dos resultados encontrados também para os momentos em que o aproamento da embarcação estava em  $0^\circ$  e  $30^\circ$ . Para o passo 3, as variações encontradas entre esses ângulos de incidência também não são bruscas, ficando as condições limitantes do projeto entre ondas de 2.5m e 3m.

Para ondas variando entre  $60^\circ$  e  $120^\circ$ , houve uma variação bem significativa entre os métodos analisados. As simulações realizadas com onda regular se mostraram bem restritivas, enquanto que para o método da frequência, quando comparado ao método *benchmark* houve uma variação entre momentos do projeto em que a simulação se mostrou mais conservadora ou mais arrojadada.

Nas imagens 50 e 51 são apresentados os valores de maior amplitude encontradas nas simulações numéricas do Caso 1 e Caso 2, respectivamente. Nas matrizes são apresentados os valores quando considerados todos os aproamentos da embarcação avaliados, como também quando filtramos os resultados apenas para as direções de incidência de onda de 150° e 180°.

Caso 1						
	ONDA IRREGULAR		ONDA REGULAR		DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	
Passo 1						
Parâmetro	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções
Mínima Tração de Topo [tf]	230.47	195.74	220.03	182.67	227.58	174.25
Máxima Tração de Topo [tf]	275.19	317.02	280.45	317.21	273.04	326.36
Máxima Curvatura [1/m]	0.05	0.32	0.05	0.27	0.06	0.13
Mínima Tração ao Longo do Duto [tf]	3.01	-0.09	2.42	-1.03	3.18	-0.29
Passo 2						
Parâmetro	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções
Mínima Tração de Topo [tf]	101.44	50.25	71.62	51.61	101.74	50.96
Máxima Tração de Topo [tf]	224.00	300.18	243.24	270.15	213.46	264.23
Máxima Curvatura [1/m]	0.16	0.31	0.15	0.24	0.15	0.21
Mínima Tração ao Longo do Duto [tf]	0.50	-0.17	0.32	-0.28	0.52	0.03
Passo 3						
Parâmetro	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções
Mínima Tração de Topo [tf]	92.06	50.14	55.24	50.05	83.02	52.39
Máxima Tração de Topo [tf]	223.54	301.73	245.99	258.53	217.54	248.18
Máxima Curvatura [1/m]	0.17	0.33	0.18	0.22	0.16	0.21
Mínima Tração ao Longo do Duto [tf]	0.42	-0.10	0.14	-0.15	0.43	0.11
Passo 4						
Parâmetro	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções
Mínima Tração de Topo [tf]	182.20	157.47	176.92	142.39	179.87	154.82
Máxima Tração de Topo [tf]	209.75	237.03	210.38	244.14	207.78	232.84
Máxima Curvatura [1/m]	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.12
Mínima Tração ao Longo do Duto [tf]	2.99	2.68	2.89	2.41	2.95	2.65

**Figura 50:** Resultados mais expressivos - Caso 1.  
Fonte: Autoria própria.

Caso 2						
	ONDA IRREGULAR		ONDA REGULAR		DOMÍNIO DA FREQUÊNCIA	
Passo 1						
Parâmetro	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções
Mínima Tração de Topo [tf]	317.14	295.22	300.35	292.80	311.56	296.18
Máxima Tração de Topo [tf]	408.82	419.72	415.97	419.91	404.29	419.67
Máxima Curvatura [1/m]	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.05
Mínima Tração ao Longo do Duto [tf]	3.54	1.18	2.50	0.91	3.93	3.00
Passo 2						
Parâmetro	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções
Mínima Tração de Topo [tf]	91.59	50.99	54.91	50.39	75.79	51.13
Máxima Tração de Topo [tf]	336.17	410.76	353.21	367.95	330.80	355.46
Máxima Curvatura [1/m]	0.09	0.13	0.09	0.11	0.07	0.08
Mínima Tração ao Longo do Duto [tf]	0.80	-0.45	-0.03	-0.59	0.67	0.45
Passo 3						
Parâmetro	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções
Mínima Tração de Topo [tf]	68.75	50.05	56.12	50.96	53.20	48.55
Máxima Tração de Topo [tf]	335.71	413.70	334.76	345.98	338.95	343.59
Máxima Curvatura [1/m]	0.09	0.13	0.09	0.10	0.07	0.08
Mínima Tração ao Longo do Duto [tf]	0.48	-0.05	0.23	-0.18	0.47	0.45
Passo 4						
Parâmetro	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções	Direções 150° e 180°	Todas as Direções
Mínima Tração de Topo [tf]	264.27	220.24	255.40	194.82	260.32	216.27
Máxima Tração de Topo [tf]	312.07	362.55	313.59	373.43	308.61	352.65
Máxima Curvatura [1/m]	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Mínima Tração ao Longo do Duto [tf]	4.47	3.82	4.35	3.36	4.41	3.76

**Figura 51:** Resultados mais expressivos - Caso 2.  
Fonte: Autoria própria.

Para realizar as análises, iremos considerar os valores obtidos na simulação no domínio do tempo com onda irregular como os resultados mais acurados obtidos no presente estudo. Nesse



sentido, utilizaremos a equação do erro percentual para avaliar o desvio apresentado tanto pelo método da frequência quanto do método com onda regular.

$$Erro(\%) = \left[ \frac{ValorReal - ValorExperimental}{ValorReal} \right] \quad (7.1)$$

Nesse sentido, nas tabelas 8 e 9 são apresentados os desvios percentuais encontrados para os valores de Mínima Tração de Topo [tf] e Máxima Tração de Topo [tf] em ambos os métodos.

**Tabela 8:** Dispersão dos Resultados - Mín. TT e Máx. TT - Direções 150° e 180°

Passo	Esforço	Caso 1		Caso 2	
		Onda Regular	Domínio da Frequência	Onda Regular	Domínio da Frequência
Passo 1	Mín.TT	5%	1%	5%	2%
	Máx. TT	2%	1%	2%	1%
Passo 2	Mín.TT	29%	0%	40%	17%
	Máx. TT	9%	5%	5%	2%
Passo 3	Mín.TT	40%	10%	18%	23%
	Máx. TT	10%	3%	0%	1%
Passo 4	Mín.TT	3%	1%	3%	1%
	Máx. TT	0%	1%	0%	1%

**Tabela 9:** Dispersão dos Resultados - Mín. TT e Máx. TT - Todas as Direções

Passo	Esforço	Caso 1		Caso 2	
		Onda Regular	Domínio da Frequência	Onda Regular	Domínio da Frequência
Passo 1	Mín.TT	7%	11%	1%	0%
	Máx. TT	0%	3%	0%	0%
Passo 2	Mín.TT	3%	1%	1%	0%
	Máx. TT	10%	12%	10%	13%
Passo 3	Mín.TT	0%	4%	2%	3%
	Máx. TT	14%	18%	16%	17%
Passo 4	Mín.TT	10%	2%	12%	2%
	Máx. TT	3%	2%	3%	3%

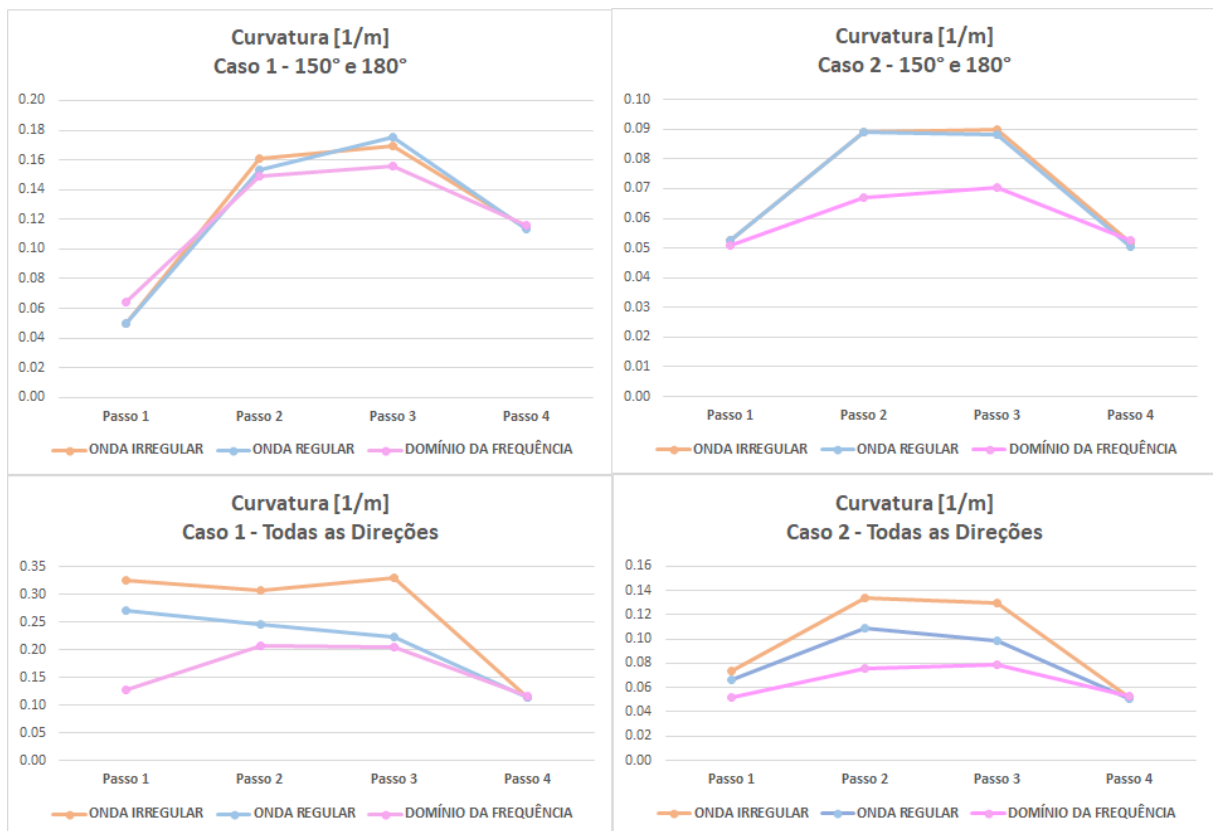
De forma geral, pode-se concluir que houve um menor desvio dos valores quando utilizado o método no domínio da frequência. Entretanto, essa análise deve ser utilizada criteriosamente, pois caso essa variação leve a valores que infrinjam as condições de contorno do projeto em execução, isso poderá levar a embarcação à estar em uma condição de risco.

Pelos valores apresentados, pode ser verificado que para o Caso 2, quando há um desvio expressivo dos resultados, o mesmo acontece tanto para o método da frequência quanto para o

método de onda regular. Além disso, pode-se perceber que os maiores erros percentuais são encontrados nos *steps* que têm parcela mais significativa de influência da atuação dos flutuadores, passos 2 e 3.

Por outro lado, avaliando os valores encontrados para as Mínimas Cargas de Topo [tf] (Figuras 50 e 51), houve uma variação significativa quando comparamos o método da onda regular e o método *benchmark*, afirmando mais uma vez que esse modelo de simulação se apresenta como uma alternativa de análise numérica muito conservativa.

Com relação aos valores de Máxima Curvatura [1/m], com exceção do Passo 4, onde houve uma grande convergência entre os três métodos de simulação, foi encontrado um comportamento diverso nos resultados obtidos (Figura 52).



**Figura 52:** Comportamento da curvatura durante as análises numéricas.

Fonte: Autoria própria.

Enquanto que para o Caso 1, as simulações no domínio do tempo apresentaram resultados próximos um do outro, para o Caso 2, os valores obtidos com o método *benchmark* foram superiores aos demais. Nas tabelas 10 e 11, são apresentados os valores de erro percentual obtidos com cada método.

Com relação as simulações no domínio da frequência, considerando apenas o Caso 1, po-

**Tabela 10:** Dispersão dos Resultados - Máx. Curvatura - Direções 150° e 180°

Passo	Esforço	Caso 1		Caso 2	
		Onda Regular	Domínio da Frequência	Onda Regular	Domínio da Frequência
Passo 1	Máx. Curvatura	0%	28%	0%	3%
Passo 2	Máx. Curvatura	5%	8%	0%	25%
Passo 3	Máx. Curvatura	4%	8%	2%	21%
Passo 4	Máx. Curvatura	1%	1%	2%	2%

**Tabela 11:** Dispersão dos Resultados - Máx. Curvatura - Todas as Direções

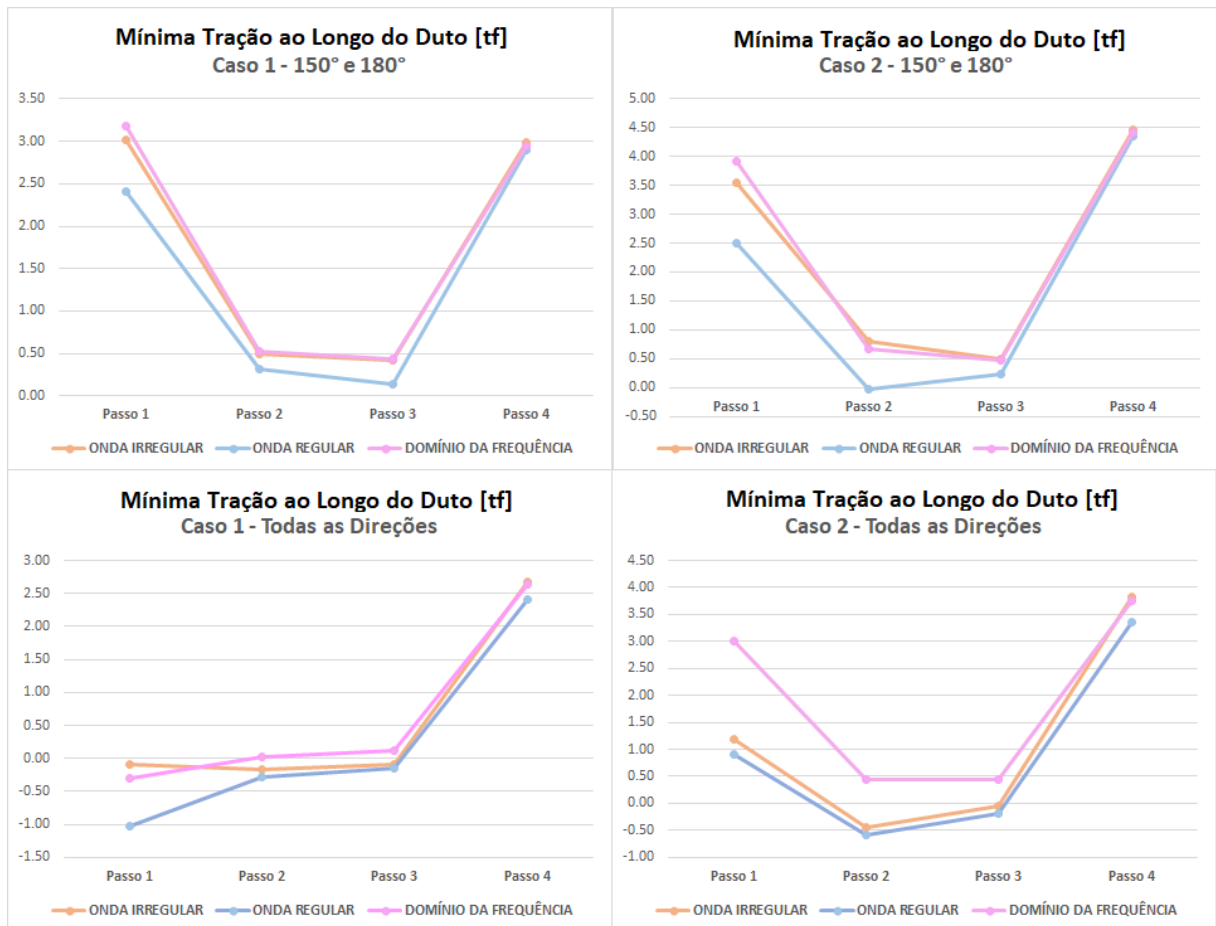
Passo	Esforço	Caso 1		Caso 2	
		Onda Regular	Domínio da Frequência	Onda Regular	Domínio da Frequência
Passo 1	Máx. Curvatura	17%	61%	10%	30%
Passo 2	Máx. Curvatura	20%	32%	19%	43%
Passo 3	Máx. Curvatura	32%	38%	24%	39%
Passo 4	Máx. Curvatura	1%	1%	2%	2%

demos afirmar que houve uma convergência com os demais métodos ao considerar apenas o envelope de incidência das ondas nas direções de 150° e 180°. Entretanto, quando as análises são extrapoladas para todas as direções, há uma dispersão dos resultados. Considerando que houve uma convergência entre os valores de  $H_s$  encontrados entre o método da frequência e o método *benchmark* para ondas de través, podemos afirmar que a utilização do método da frequência não foi satisfatório ao reproduzir os resultados de máxima curvatura nesse caso.

Por outro lado, para o Caso 2, os resultados encontrados para o Passo 1 foram muito próximos dos demais métodos de simulação em ambos os envelopes de direção de incidência de onda considerados. Em contrapartida, para os *steps* 2 e 3, os resultados obtidos foram menores que nos demais métodos de simulação.

No que diz respeito as mínimas tensões ao longo do duto, a imagem 53 apresenta os resultados obtidos para os diferentes momentos do projeto de instalação. Pela análise pode ser verificado que há uma conformidade do comportamento das curvas ao longo dos passos do projeto de instalação.

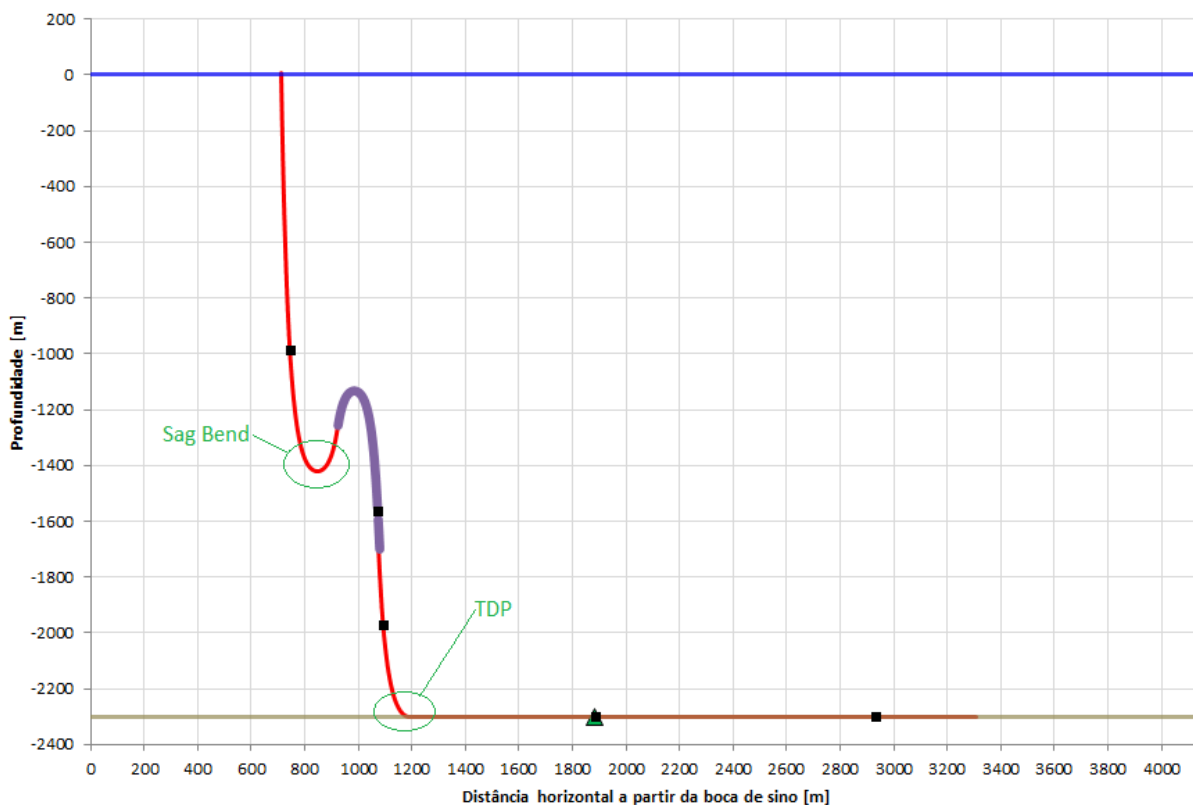
Além disso, podemos concluir que as simulações utilizando o domínio da frequência não foram capazes de reproduzir os esforços em compressão, visto que a grande maioria dos resultados nesse método é positivo. Isso está de acordo com a teoria, visto que os efeitos da compressão podem ser considerados como não-linearidades presentes no sistemas de dutos flexíveis.



**Figura 53:** Mínimas tensões ao longo do duto [tf].

Fonte: Autoria própria.

Com relação à posição do duto onde foram encontradas as menores tensões e os máximos valores de curvatura, houve uma grande conformidade entre os 3 métodos de simulação. Para os três primeiros passos, o ponto de mínima tração e máxima curvatura está localizado na região do TDP, enquanto que para o Passo 4, as mínimas tensões do duto e máximas curvaturas estão localizadas na região do *sag bend* da catenária (Ver Figura 54).



**Figura 54:** Posições - Mínimas tensões ao longo do duto [tf].

Fonte: Autoria própria.

## 7.4 Tempo de Simulação

Um dos objetivos do presente trabalho é de quantificar o tempo de processamento de cada método de análise numérica adotado durante o estudo. Visto que estamos avaliando principalmente a adoção do método no domínio da frequência em detrimento ao método de onda regular, foi realizado a contagem do tempo de simulação utilizado.

Nesse sentido, na tabela 12 são apresentados os números totais de análises realizadas nesses dois modelos de análise. Para o método da frequência, visto que para as condições de mar foram utilizadas de ondas irregulares, há um número maior de simulações pois foram adotados três *seeds* para cada análise. Há uma pequena variação entre o número de simulações por passo entre os diferentes métodos devido há problemas de convergência, os quais levaram a necessidade de repetir algumas análises numéricas propostas, mas de modo geral, há no mínimo 840 arquivos de simulação para cada *step* de instalação no método da frequência e 280 para cada *step* no método de onda regular, de modo que todo o envelope de casos propostos nos capítulos anteriores foram cobertos.

Já na tabela 13 é apresentado o tempo médio por simulação obtido com cada uma das me-

**Tabela 12:** Número total de simulações

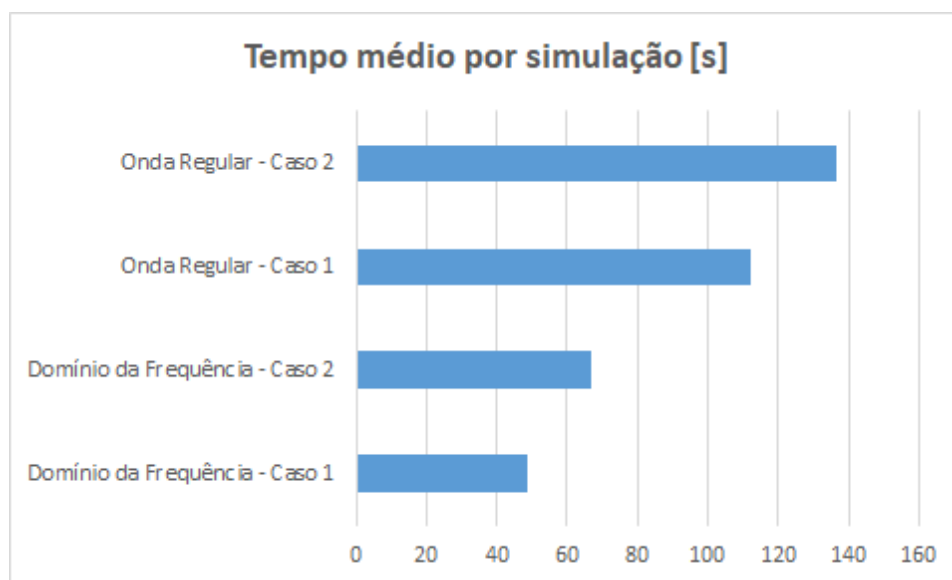
Método - Caso	Total	Simulações/Passo
Domínio da Frequência - Caso 1	3414	853.5
Domínio da Frequência - Caso 2	3364	841
Domínio do Tempo com Onda Regular - Caso 1	1120	280
Domínio do Tempo com Onda Regular - Caso 2	1130	282.5

todologias.

**Tabela 13:** Tempo por simulação

Método - Caso	Total [s]	Tempo médio por Simulação [s]
Domínio da Frequência - Caso 1	165358	194
Domínio da Frequência - Caso 2	224574	267
Domínio do Tempo com Onda Regular - Caso 1	125581	449
Domínio do Tempo com Onda Regular - Caso 2	154303	546

Para ambos os casos estudados, o tempo necessário para rodar as análises de onda regular foram o dobro quando comparado com o método da frequência. Isso fica evidente pela imagem 55, a qual vai ao encontro a vantagem de alto processamento do método da frequência exposto no referencial bibliográfico do presente trabalho.

**Figura 55:** Tempo médio de simulação [s].

Fonte: Autoria própria.

## Capítulo 8

### Conclusão

A partir dos resultados obtidos com essa pesquisa constatou-se a importância da realização de estudos desse tipo a fim de desenvolver novas metodologias de análise numérica. Visto às vantagens e desvantagens de cada método de simulação numérica, é possível utilizar de técnicas computacionais para desenvolver modelos que abranjam as potencialidades de cada tipo de simulação.

Nesse sentido, pela análise realizada no capítulo 7, verificamos que o tempo de simulação do método no domínio da frequência apresentou valores muito inferiores para a obtenção dos resultados numéricos quando comparado ao método da onda regular. Além disso, por mais que tenhamos considerado a utilização de três *seeds* para esse método de simulação, um dos grandes aprendizados do presente trabalho foi que isso não é necessário, como o método da frequência se baseia na obtenção da energia das ondas, a aleatoriedade da onda não influencia nos resultados finais da simulação. Em vista disso, o tempo total para a obtenção das análises numéricas no método da frequência poderia ter sido reduzida em três vezes, sendo simulados apenas 280 arquivos.

Em termos de janela operacional, além do método da frequência ter apresentado uma grande convergência com o método *benchmark*, ele foi menos restritivo que o modelo no domínio do tempo da onda regular, e por isso apresenta grandes vantagens em termos de tempo e custo de embarcação, o que é muito positivo para o desenvolvimento de um projeto de instalação de dutos flexíveis.

Com relação as cargas de topo encontradas, o método da frequência apresentou um desvio menor dos resultados quando comparado ao modelo de onda regular. Em suma, as maiores variações foram encontradas nos resultados obtidos para as simulações dos passos 2 e 3, nas quais há a instalação de flutuadores na linha e por isso uma grande não linearidade nas cargas de topo, haja vista a alta amplitude de movimentação do duto flexível proporcionada pela atuação do empuxo na linha. Nesse sentido, podemos afirmar que o método da frequência foi suficiente para reproduzir os expostos do topo do PLSV ao longo do projeto de instalação.

Em contrapartida, para reproduzir a máxima curvatura no duto e as tensões compressivas

ao longo da linha, o método da frequência não foi tão eficiente quanto os demais modelos analisados no decorrer desse estudo. De forma geral, os valores encontrados para máxima curvatura com o método da frequência foram inferiores que os demais modelos avaliados. Já para as mínimas tensões ao longo do duto, os valores encontrados foram superiores.

Para o Caso 1, o método da frequência foi mais satisfatório ao reproduzir os valores de máxima curvatura quando restringido o ângulo de incidência de ondas para  $150^\circ$  e  $180^\circ$ . Além disso, para essas direções houve uma grande convergência entre o método da frequência e o método de onda regular ao reproduzir os valores de mínima tração ao longo do duto em ambos os projetos avaliados.

Já para o envelope que engloba todas as direções de incidência de onda, houveram grandes dispersões em ambos os projetos estudados quando analisado os valores de máxima curvatura. Quando comparado ao método *benchmark*, por mais que o limite de máxima curvatura do produto não tenha sido excedido em nenhum dos projetos analisados, entende-se que há um risco ao adotar o método da frequência pois ele apresentou valores mais brandos de curvatura, tal que em outros projetos a adoção desse tipo de análise possa levar à infringir os valores de MBR do duto flexível.

Nesse sentido, a partir dos resultados obtidos com o presente trabalho, sugere-se que seja adotada uma metodologia mista de simulação numérica. Essa será descrita abaixo:

- Passo 1: Utilização do método da frequência para as direções  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $120^\circ$ ,  $150^\circ$  e  $180^\circ$ . Para ondas de través ( $90^\circ$ ), utilização do método no domínio do tempo de onda regular;
- Passos 2 e 3: Adoção do método da frequência para as direções  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $150^\circ$  e  $180^\circ$ . Para ondas de  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $120^\circ$  de incidência no PLSV, utilização do método no domínio do tempo com onda regular;
- Passo 4: Utilização do método da frequência em todo o envelope de simulação;

A metodologia sugerida se justifica pela grande conformidade encontrada nas variáveis analisadas entre os diferentes métodos de simulação quando considerado apenas o envelope de ondas com incidência de  $150^\circ$  e  $180^\circ$ . Além disso, podemos afirmar que os resultados encontrados para ondas com  $0^\circ$  e  $30^\circ$  são muito semelhantes a esse envelope, haja vista ao RAO da embarcação. As maiores dispersões entre os resultados foram encontradas para ondas de través, e em alguns casos essa dispersão foi relevante ao considerar ondas de  $60^\circ$  e  $120^\circ$ .



Em suma, o método da frequência foi muito eficaz para reproduzir a janela operacional da embarcação, assim como os valores de mínima e máxima tração de topo. Já com relação a máxima curvatura e mínima tração ao longo do duto, apesar do método não ter sido tão eficiente para alguns casos, em algumas configurações foi capaz de apresentar bons resultados.

Considerando o tempo de simulação médio obtido durante o estudo para ambos os métodos de análise, com a metodologia proposta é estimado a realização de todo o escopo de análise em um intervalo de tempo de 82010 segundos. Esse valor representa uma redução de 44% e 40% quando considerada apenas a utilização do método da onda regular para o Caso 1 e 2, respectivamente.

Por fim, como sugestão para trabalhos futuros recomenda-se a extrapolação do presente estudo para os demais passos de instalação de um projeto de *lazy wave*, de forma a validar o presente trabalho para todo um projeto de simulação numérica. Além disso, entende-se que essa mesma análise pode ser realizada para outros tipos de projetos, tal como a instalação de UEH, ESDV, entre outros.

Para a melhoria dos resultados no método da frequência, entende-se que um refino da malha maior em algumas regiões poderia impactar nos resultados. Entretanto, para o presente estudo isso não foi considerado e por isso, torna-se uma oportunidade para trabalhos futuros.

Ainda, foi adotada a simplificação de apenas considerar o movimento de *heave* da embarcação durante as análises com onda irregular no domínio do tempo. Em trabalhos futuros poderia ser avaliado a influência dos movimentos de *pitch* e *roll* da embarcação, os quais também compõem o movimento vertical do barco.

## Referências Bibliográficas

ARMASTRONG, C., CHIN, C., and DROBYSHEVCKII, Y. (2017). Application of frequency domain methods for response based analysis of flexible risers. In *Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Proceedings of OMAE2017. 37th International Conference on*, page 11. ASME.

BALMORAL (2021). Balmoral | are you seeking surety in bend stiffener design, manufacture and delivery? Disponível em: <https://www.balmoraloffshore.com/solutions/protection/bend-stiffeners>. Acesso em: 14 de julho de 2021.

BARDOT, A. (2021). Ais bardot | bend restrictors. Disponível em: <https://www.bardotgroup.com/products/bend-restrictors-are-made-of-fully-qualified-and-field-proven-rigid-polyurethane>. Acesso em: 14 de julho de 2021.

BERTONI, F. (2017). Simeros | end fitting for unbonded flexible pipes. Disponível em: <http://simeros.com/end-fitting-for-unbonded-flexible-pipes/?lang=en>. Acesso em: 14 de julho de 2021.

CURBANI, F. (2009). Caracterização de ondas na região adjacente ao porto de barra do riacho, aracruz-es, para o ano de 2008. Graduação, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

DNV-OS-F201 (2010). *DNV OS-F201: Dynamic Riser*. DNV GL.

DNV-OS-H10 (2011). *DNV OS-H101: Marine Operations*. DNV GL.

DNV-RP-C205 (2010). *DNV RP-C205: Environmental conditions and environmental loads*. DNV GL.

JOURNÉÉ, J. M. J. and MASSIE, W. W. (2001). *Offshore Hyromechanics*. Delft University of Technology.

LEÃO, A. P. D., SARDINHA, C. C., AMARAL, M., and SANTANA, A. P. (2014). Análise dos sistemas de risers utilizados na produção de óleo em sistemas submarinos. *Ciências exatas e tecnológicas*, 2(2):23–36.

- LEGRAS, J. (2010). Criteria for pipe lay operations based on the installation vessel motion. In *Rio Oil & Gas, Expo and Conference on*, page 10.
- LIMA, A. L. L. S. (2011). Análise no domínio da frequência de linhas de embarcação ancorado em mar aleatório. Mestrado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MARINO, L. A. C. (2015). Instalação de riser na configuração lazy wave. Graduação, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- MARTINS, L. X. and COUTO, M. C. (2018). Influência dos diferentes modos de excitação nos modelos de análise de configuração lazy wave. Graduação, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ), Rio de Janeiro.
- MIT (2021). Linearized (airy) wave theory. Disponível em: [http://web.mit.edu/fluids-modules/www/potential\\_flows/LecturesHTML/lec19/node3.html](http://web.mit.edu/fluids-modules/www/potential_flows/LecturesHTML/lec19/node3.html). Acesso em: 14 de julho de 2021.
- ORCINA, L. T. C. (2021). *OrcaFlex User Manual: OrcaFlex Version 10.3*. ORCINA.
- ORLANDO, F. O. (2019). Análise de instalação de um riser lazy wave para águas ultraprofundas. Mestrado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- PESCE, C. P. (1997). Mecânica de cabos e tubos submersos lançados em catenária: uma abordagem analítica e experimental. Tese de livre docência, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.
- PESCE, C. P., ARANHA, J. A. P., RICARDO, C. A., and SILVA, S. (1998). Dynamic curvature in catenary risers at the touch down point region: An experimental study and the analytical boundary-layer solution. Master's thesis, International Journal of Offshore and Polar Engineering, Rio de Janeiro.
- PETROBRAS (2015). Fatos e dados | conheça curiosidades sobre equipamentos de nossos sistemas submarinos. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/conheca-curiosidades-sobre-equipamentos-de-nossos-sistemas-submarinos.htm>. Acesso em: 14 de julho de 2021.

PETROBRAS (2016). Fatos e dados | colocamos em produção 25 poços marítimos no primeiro semestre. Disponível em: <https://petrobras.com.br/fatos-e-dados/colocamos-em-producao-25-pocos-maritimos-no-primeiro-semester.htm>.

Acesso em: 14 de julho de 2021.

PETROBRAS (2019). Conheça alguns tipos de plataforma de petróleo e como elas funcionam. Disponível em: <https://medium.com/petrobras/conheca-alguns-tipos-de-plataforma-de-petroleo-e-como-elas-funcionam-c1937cfb9ab>.

Acesso em: 14 de agosto de 2021.

PIMENTEL, J. F. and FELIPE, L. A. (2013). Mobo – an alternative type of subsea boosting.

P&Q, E. J. (2019). 6 tipos de plataformas petrolíferas que você provavelmente já viu e não sabe. Disponível em: <https://peqengenhariajr.com.br/plataforma-petrolifera/>.

Acesso em: 14 de agosto de 2021.

RIBEIRO, F. (2021). Influência da rigidez a flexão não linear de dutos flexíveis em análises globais de instalação de águas ultraprofundas. Graduação, Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói.

TAKAFUJI, F. C. M. (2010). Dinâmica tridimensional de risers. Dourado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo.

TONETO, R. M. D. and VALENÇA, C. J. G. M. (2019). Efforts and experiences, developing deepwater projects in brazil. In *Proceedings of OTC Brazil. Offshore Technology Conference Brasil*. OTC.

TORRES, A. L. F. L. and DANTAS, C. M. S., S. M. Q. e. a. (2005). Utilização do anflex, alfreq e posfal na análise de fadiga de scr. Master's thesis, Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello, Rio de Janeiro.

VAILLANT, A. G. (2007). Estudo comparativo de análises no domínio do tempo e da frequência em risers flexíveis. Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

VIEIRA, L. T. (2008). Otimização de sistemas de risers para exploração de petróleo offshore através de algoritmos genéticos paralelos. Doutorado, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

WIKIPÉDIA (2021). Wikipédia | movimentos da embarcação. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Movimentos\\_da\\_embarcaçao](https://pt.wikipedia.org/wiki/Movimentos_da_embarcaçao). Acesso em: 14 de julho de 2021.

## Glossário

**Ângulo de Topo:** Ângulo que a catenária da linha flexível faz com a vertical na região do topo do duto fixado ao PLSV.

**Gooseneck:** Parte mecânica do MCV que se assemelha a um pescoço e permite que a conexão com a árvore de natal molhada seja vertical. De forma geral é o ente mecânico mais suscetível para a operação de instalação.

**Heave:** Também chamado de Afundamento ou Alteamento, é o movimento da embarcação para baixo ou para cima sobre seu eixo vertical.

**Pitch:** Também chamado de Caturro ou Arfagem, é a rotação da embarcação sobre seu eixo transversal.

**Roll:** Também chamado de Balanço, é a rotação da embarcação sobre seu eixo longitudinal.

**Seed:** Variável numérica inserida nas simulações de onda irregular para garantir o comportamento randômico das ondas inseridas na análise numérica.

**Surge:** Deslocamento avante ou atrás, é o movimento da embarcação em seu eixo longitudinal.

**Sway:** Chamados de Deslizamento ou Deriva, são os movimentos da embarcação em seu eixo transversal.

**Tração de Topo:** Esforços mecânicos encontrados na região do duto flexível fixada ao PLSV referente ao topo da catenária.

**Yaw:** Também chamado de Cabeceio, é o movimento de rotação da embarcação sobre seu eixo vertical que afeta o rumo do movimento do barco.