



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

YURI COELHO DEL'SARTO

**CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE UM DUTO
FLEXÍVEL EM UM EQUIPAMENTO
SUBMARINO**

CAMPINAS

2019

YURI COELHO DEL'SARTO

CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE UM DUTO FLEXÍVEL EM UM EQUIPAMENTO SUBMARINO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica e Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo, na área de Exploração.

Orientador: Prof. Dr. Celso Kazuyuki Morooka

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO YURI COELHO DEL'SARTO E ORIENTADA PELO PROF. DR. CELSO KAZUYUKI MOROOKA.

CAMPINAS

2019

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

D37c Del'Sarto, Yuri Coelho, 1987-
Conexão vertical direta de um duto flexível em um equipamento submarino /
Yuri Coelho Del'Sarto. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: Celso Kazuyuki Morooka.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade
de Engenharia Mecânica.

1. Estruturas marítimas. I. Morooka, Celso Kazuyuki, 1958-. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Vertical connection of a flexible pipe in a subsea equipment

Palavras-chave em inglês:

Marine structures

Área de concentração: Exploração

Titulação: Mestre em Ciências e Engenharia de Petróleo

Banca examinadora:

Celso Kazuyuki Morooka [Orientador]

Renato Pavanello

Ricardo Franciss

Pavanello, Renato

Franciss, Ricardo

Data de defesa: 18-12-2019

Programa de Pós-Graduação: Ciências e Engenharia de Petróleo

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: <https://orcid.org/0000-0001-9273-1844>

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/7842917555703485>

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
E INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO

CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE UM DUTO FLEXÍVEL EM UM EQUIPAMENTO SUBMARINO

Autor: Yuri Coelho Del'Sarto

Orientador: Prof. Dr. Celso Kazuyuki Morooka

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:

Prof. Dr. Celso Kazuyuki Morooka, Presidente
DEP / FEM / UNICAMP

Prof. Dr. Renato Pavanello
DMC / FEM / UNICAMP

Prof. Dr. Ricardo Franciss
Universidade Católica de Petrópolis

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 18 de dezembro de 2019.

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado a todos os professores que acreditam ser possível construir uma educação sólida neste país. E a todos os profissionais que trabalham no meio acadêmico e na indústria em busca de um desenvolvimento tecnológico pleno.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família: Regina Coeli Coelho, Carlla Coelho Del'Sarto e à minha companheira Graziela Sayuri Araujo Kazaoka, que me prestaram pleno apoio motivacional e operacional na realização da pós-graduação e em todos objetivos ao longo da vida.

Ao orientador, Prof. Dr. Celso Kazuyuki Morooka, pela oportunidade de trabalho oferecida e por toda orientação durante a realização desta pesquisa.

Aos prezados professores que participaram da comissão examinadora do presente trabalho, pela disponibilidade, sugestões e críticas ao texto.

Aos amigos de laboratório que acompanharam o desafio de realizar a pesquisa do Mestrado: Lucas Sevillano, Geniffer Martins, Walter Barberán, Leonardo de Pádua, Paulo Oliveira Kiryu e Patricia Mika Sakugawa, pela paciência, amizade e conselhos nos momentos oportunos.

Aos amigos e profissionais da indústria, Rosianita Balena, Ricardo Castrioto, Rafael Oliveira, Alecio Piva, Carlos Yoshio Kajihara, Nelson Assano Tadashi, Anilton Santos, Helvécio Silveira, Leonardo Cardoso, Paulo Refachinho de Campos, Andre de Almeida, Danilo Oliveira, Hugo Lopes, Luiz Aoki, Thiago Sartor, Andre Chavenco e Sidney Bertelli, pela amizade e pelo conhecimento profissional adquirido na oportunidade em que trabalhamos juntos.

Aos profissionais que compõe os grupos de pesquisa do *LabRiser*, CEPETRO e da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP.

Gostaria de agradecer também a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis e à Petrobras pelo suporte contínuo ao nosso grupo de pesquisas e atividades acadêmicas.

RESUMO

Nas últimas décadas, as descobertas de campos de petróleo em águas ultra profundas levaram a desafios tecnológicos relacionados ao projeto de sistemas de produção marítimos e ao desenvolvimento de equipamentos submarinos. Nesse cenário, dutos flexíveis são amplamente utilizados para elevar o fluido de produção do equipamento submarino para a unidade flutuante, e eventualmente, para injetar fluidos no sistema de cabeça de poço molhada. Durante o desenvolvimento de campos marítimos, uma operação crítica é a conexão do duto flexível com o equipamento submarino. Um método para instalação tipicamente utilizado em campos marítimos no Brasil é conhecido como Conexão Vertical Direta. Nesse conceito, o Módulo de Conexão Vertical (MCV) é conectado a um duto flexível por meio de um flange parafusado e assentado no equipamento submarino com assistência de um cabo auxiliar. Durante a operação de conexão, esforços excessivos podem ocorrer devido à reação induzida pelo duto flexível conectado ao MCV. O presente trabalho tem como objetivo descrever a operação de Conexão Vertical Direta e propor uma metodologia para estudar os esforços induzidos pelo duto flexível durante sua instalação. Para esse propósito, um modelo numérico é desenvolvido para simular a operação de Conexão Vertical Direta e este é utilizado para simular o procedimento de instalação utilizando o programa comercial OrcaFlex. A solução numérica utiliza o conceito de parâmetros concentrados para representar o duto flexível. Uma função externa é implementada para simular a reação do equipamento submarino imposta ao MCV, em que a rigidez elástica de tal equipamento é estimada e substituída por uma viga Euler-Bernoulli. A interação hidrodinâmica entre o fluido e as estruturas são representadas de acordo com a formulação de Morison modificada. O comportamento dinâmico do sistema é estudado por meio da variação dos coeficientes hidrodinâmicos, e os resultados são apresentados em termos de reações na conexão flangeada do MCV com o duto flexível. Os resultados das simulações numéricas do presente trabalho permitem a avaliação da amplitude dos esforços que atuam no MCV durante a Conexão Vertical Direta com objetivo de auxiliar o planejamento operacional do processo de instalação.

Palavras Chave: Estruturas marítimas

ABSTRACT

In the last decade, offshore petroleum field discoveries in ultra-deepwater have led to technological challenges regarding the operational design of production systems and the development of subsea resources. In this scenario, flexible pipes have been extensively used to elevate the production fluid from the subsea equipment to the topside facilities, and sometimes, to conduct injection fluids into the wellhead system. During the development of offshore fields, one critical operation is the connection of a flexible pipe to the subsea equipment. An operational procedure for the installation commonly used in offshore Brazil is known as Direct Vertical Connection. In this concept, the Vertical Connection Module (VCM) is connected to the flexible pipe through a flanged joint, and lowered in to the subsea equipment with assistance of an auxiliary cable. During the connection operation, excessive loads may occur due to the reaction transfer from the flexible pipe to the VCM. The present work aims to describe the Direct Vertical Connection operation and to propose a methodology to study the forces induced by the flexible riser into the VCM during such operation. For this purpose, a numerical model is developed for the Direct Vertical Connection and it is employed to simulate the installation procedure through the commercial software OrcaFlex. Numerical solution uses the lumped mass concept to represent the flexible pipe. An external function is implemented to simulate the reaction of the subsea equipment to the VCM, i.e., the elastic stiffness of the subsea equipment is estimated and represented as a Euler-Bernoulli beam. The hydrodynamic interaction between the fluid and structures is represented according to the modified Morison formulation. The dynamic behavior of the system is investigated by varying the hydrodynamic coefficients, and the results are shown in terms of reaction forces acting on the flange of the VCM. Numerical simulation results in the present work allows to evaluate the range of loading which acts during the Direct Vertical Connection to help operational design of the installation process.

Key Word: Marine structures

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Conexão vertical utilizando base de abandono temporário.....	25
Figura 2.2 – Conjunto Base Adaptadora de Produção e Árvore de Natal Molhada.....	28
Figura 2.3 – Módulo de Conexão Vertical. Adaptado de Moraes et al. (2001)	29
Figura 2.4 – Conexão Vertical Direta de (a) Primeira (b) Segunda extremidades	33
Figura 3.1 – Onda regular progressiva adaptado de Chakrabarti (1987).....	43
Figura 3.2 – Movimento de corpo rígido de um navio	47
Figura 3.3 – Operador de Amplitude de Resposta do PLSV adaptado de Bicudo (2009)	49
Figura 4.1 – Fluxograma das etapas necessárias para metodologia do estudo.....	53
Figura 4.2 – Estágio inicial da Conexão Vertical Direta	54
Figura 4.3 – Aproximação do sistema de Conexão Vertical Direta	55
Figura 4.4 - Representação esquemática da operação de Conexão Vertical Direta	56
Figura 4.5 – Componentes do sistema de instalação do duto flexível.....	57
Figura 4.6 – Conexão Vertical Direta – MCV acoplado ao equipamento submarino.....	58
Figura 4.7 – Modelo de parâmetros concentrados.....	60
Figura 4.8 – Representação do modelo numérico da Conexão Vertical Direta	62
Figura 4.9 – Estrutura primária de uma Base Adaptadora de Produção.....	66
Figura 4.10 – Modelo estrutural da Base Adaptadora de Produção	67
Figura 4.11 – Deflexão vertical do receptáculo da BAP	68
Figura 4.12 – Descrição do modelo numérico.....	69
Figura 4.13 – Dimensões principais de um MCV	70
Figura 4.14 – Fluxograma da rotina implementada para a função externa	71
Figura 5.1 – Simulação estática.....	74
Figura 5.2 – Esforços e deslocamentos induzidos pelo duto flexível.....	75
Figura 5.3 – Diagrama de corpo livre.....	78
Figura 5.4 – Simulação estática.....	79
Figura 5.5 – Simulação dinâmica para estudo de resposta do sistema	80
Figura 5.6 – Fator de amplificação do movimento dinâmico.....	81
Figura 5.7 – Resposta dinâmica do sistema – Período de excitação 8s.....	82
Figura 5.8 – Representação esquemática estudo hidrodinâmico	83
Figura 5.9 – Posição do MCV versus tempo	85
Figura 5.10 – Esforço reativo momento fletor (M_y).....	86

Figura 5.11 – Esforço reativo cortante (V_s).....	87
Figura 5.12 – Esforço reativo tração (T_w).....	88
Figura 5.13 – Estudo hidrodinâmico – Amplitude Momento fletor.....	90
Figura 5.14 – Estudo hidrodinâmico – Amplitude Esforço cortante.....	91
Figura 5.15 – Estudo hidrodinâmico – Amplitude Tração.....	92
Figura 5.16 – Representação esquemática do lançamento do cabo de instalação.....	95
Figura 5.17 – Estudo de lançamento do cabo $V_L = 0,1$ m/s.....	96
Figura 5.18 – Tração atuante no cabo de instalação $V_L = 0,1$ m/s.....	97
Figura 5.19 – Esforço reativo momento fletor (M_y) para $V_L = 0,1$ m/s.....	98
Figura 5.20 – Esforço reativo cortante (V_s) para $V_L = 0,1$ m/s.....	99
Figura 5.21 – Esforço reativo tração para $V_L = 0,1$ m/s.....	99
Figura 5.22 – Estudo de lançamento do cabo $V_L = 1,0$ m/s.....	100
Figura 5.23 – Tração atuante no cabo de instalação $V_L = 1,0$ m/s.....	101
Figura 5.24 – Esforço reativo momento fletor (M_y) para $V_L = 1,0$ m/s.....	102
Figura 5.25 – Esforço reativo cortante (V_s) para $V_L = 1,0$ m/s.....	103
Figura 5.26 – Esforço reativo tração para $V_L = 1,0$ m/s.....	104
Figura 5.27 – Estudo de velocidade de lançamento do cabo de instalação.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Evolução dos métodos de instalação de dutos flexíveis no Brasil.....	34
Tabela 3.1 – Principais dimensões do navio PLSV típico.....	48
Tabela 4.1 – Elementos estruturais do equipamento submarino	68
Tabela 5.1 – Propriedades geométricas e mecânicas do duto flexível	76
Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas do cabo de instalação	77
Tabela 5.3 – Resultado análise estática	79
Tabela 5.4 – Propriedades mecânicas da viga suporte	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM	Árvore de Natal Molhada
API	<i>American Petroleum Institute</i>
BAP	Base Adaptadora de Produção
DNV	<i>Det Norske Veritas</i>
KC	Número de Keulegan – Carpenter
LDA	Lâmina d'água
MCV	Módulo de Conexão Vertical
MEF	Método dos Elementos Finitos
PLET	<i>Pipeline End Terminal</i>
PLSV	<i>Pipelaying Support Vessel</i>
RAO	Operador de Amplitude de Resposta
ROV	<i>Remotely Operated Vehicle</i> – Veículo operado Remotamente
SLWR	<i>Steel Lazy Wave Risers</i>
VPL	Valor Presente Líquido
WAG	<i>Water Alternating Gas</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto Romano

A	Parâmetro da equação de Morison
A_b	Área da seção transversal da viga suporte, m^2
A_c	Área da seção transversal do cabo auxiliar de instalação, m^2
A_i	Área transversal da seção interna do duto, m^2
A_o	Área transversal da seção externa do duto, m^2
A_w	Amplitude da onda, m
c	Curvatura do duto flexível, $1/m$
c_w	Velocidade de propagação da onda, m/s
C	Matriz de amortecimento
C_a	Coeficiente de massa adicional
C_c	Amortecimento estrutural do cabo auxiliar de instalação
C_D	Coeficiente de arrasto hidrodinâmico
C_M	Coeficiente de inércia
$\{d\}$	Deslocamento do grau de liberdade, m
$\{\dot{d}\}$	Velocidade do grau de liberdade, m/s
$\{\ddot{d}\}$	Aceleração do grau de liberdade, m/s^2
D_o	Diâmetro externo do duto flexível, m
d_w	Profundidade do mar, m
E	Módulo de Young, MPa
E_c	Módulo de Young do cabo auxiliar de instalação, MPa
EI	Rigidez flexional de um duto, $N \times m^2$
EI_b	Rigidez flexional da viga suporte, $N \times m^2$
EA	Rigidez axial de um duto, N
f	Força hidrodinâmica por unidade de comprimento, N/m
f_{xs}	Força externa por unidade de comprimento no sentido do eixo x , N/m
f_{zs}	Força externa por unidade de comprimento no sentido do eixo z , N/m
F_w	Força peso do segmento tubular
F_{xs}	Força externa atuante no duto no sentido do eixo x , N

F_{zs}	Força externa atuante no duto no sentido do eixo z, N
g	Aceleração da gravidade, m/s ²
H_w	Altura de onda, m
I_b	Momento de inércia de área plana, m ⁴
k	Número de onda
K_c	Rigidez axial equivalente do cabo auxiliar de instalação, N/m
K	Matriz de rigidez
l	Comprimento do segmento, m
L	Comprimento da viga suporte, m
L_c	Comprimento do cabo de instalação, m
L_D	Comprimento do duto flexível, m
L_w	Comprimento de onda, m
M	Matriz de massa concentrada
M_y	Esforço interno de flexão no segmento tubular, N × m
P	Força concentrada na extremidade da viga suporte, N
$P(z)$	Deslocamento do MCV no eixo z, m
P_i	Pressão interna no duto, Pa
P_o	Pressão externa no duto, Pa
q	Força por unidade de comprimento na viga suporte, N/m
R_{RAO}	Operador de amplitude de resposta da embarcação
t	Tempo, s
T_e	Tração efetiva atuante no duto, N
T_o	Período de onda, s
T_w	Esforço interno de tração no segmento tubular, N
V_c	Velocidade da corrente marítima na superfície do mar, m/s
V_s	Esforço interno cortante no segmento tubular, N
u_f	Velocidade da partícula de fluido na direção horizontal, m/s
$\dot{u}_f$	Aceleração da partícula de fluido na direção horizontal, m/s ²
w	Deflexão vertical da viga suporte, m
w_a	Peso por unidade de comprimento do sistema equivalente, N/m
w_e	Peso por unidade de comprimento da coluna de fluido deslocado, N/m
w_f	Velocidade da partícula de fluido na direção vertical, m/s

$\dot{w}_f$	Aceleração da partícula de fluido na direção vertical, m/s ²
w_i	Peso por unidade de comprimento da coluna de fluido interna, N/m
w_t	Peso por unidade de comprimento do duto, N/m
X	Movimento da embarcação, m

Alfabeto Grego

γ_i	Peso específico do fluido interno ao duto, kgf/m ³
γ_o	Peso específico do fluido externo ao duto, kgf/m ³
γ_s	Peso específico do duto, kgf/m ³
ε	Deformação do duto flexível
η	Elevação do mar, m
ν	Coeficiente de Poisson
ρ	Raio de curvatura do segmento tubular, m
ρ_w	Densidade da água do mar, kg/m ³
ρ_b	Densidade do material da viga suporte, kg/m ³
ϕ_{RAO}	Operador de amplitude de resposta da fase de uma embarcação
Φ	Potencial de velocidade, m ² /s
ω	Frequência angular da onda, rad/s

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Motivação	21
1.2	Objetivos.....	21
1.3	Estrutura da dissertação	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1	Conexão de dutos flexíveis em equipamentos submarinos	23
2.2	Métodos de simulação	35
2.3	Simulações numéricas da Conexão Vertical Direta.....	39
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	42
3.1	Carregamentos Ambientais.....	42
3.2	Navio de instalação de dutos flexíveis.....	46
3.3	Forças hidrodinâmicas	49
4	METODOLOGIA.....	53
4.1	Conexão Vertical Direta	54
4.2	Modelo Numérico	59
4.3	Função externa.....	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
5.1	Análise estática	73
5.2	Estudo de resposta dinâmica do sistema.....	80
5.3	Estudo hidrodinâmico	83
5.4	Estudo de lançamento do cabo de instalação.....	93
6	CONCLUSÕES.....	107
	REFERÊNCIAS	110
	APÊNDICE A – Função externa.....	114

1 INTRODUÇÃO

O avanço das descobertas de campos marítimos de produção de hidrocarbonetos nas últimas décadas apresenta desafios tecnológicos relacionados ao projeto e à operação dos sistemas marítimos de produção. Historicamente, a produção de hidrocarbonetos iniciou-se em campos localizados em terra (*onshore*) e direcionou-se a campos de produção no mar (*offshore*). Inicialmente, os campos de produção no mar estavam localizados em profundidades baixas, nas quais os equipamentos submarinos poderiam ser instalados e operados por um mergulhador. Entretanto, à medida que campos de hidrocarbonetos começam a ser explorados em águas profundas, existe a necessidade do desenvolvimento de novas tecnologias operadas sem a assistência do mergulhador: os equipamentos conhecidos como *diverless*. Atualmente, os campos marítimos mais economicamente atrativos no Brasil estão localizados em grandes profundidades, na qual o mergulhador não é capaz de auxiliar na instalação e operação dos equipamentos submarinos. Dessa forma, o projeto de tais equipamentos traz a necessidade da execução de operações utilizando veículos operados remotamente combinados com auxílio de unidades flutuantes. Por esse motivo, plataformas flutuantes e navios são tipicamente utilizados para operações de instalação, recuperação e intervenção de equipamentos submarinos.

Nesse cenário, dutos submarinos são estruturas tubulares amplamente utilizadas para o transporte de fluidos nas diversas fases da exploração e produção de campos de hidrocarbonetos no mar. A depender de sua fabricação, os dutos podem ser classificados como rígidos ou flexíveis. Dutos rígidos são fabricados em aço carbono, enquanto os flexíveis utilizam camadas poliméricas e armaduras de material metálico entrelaçadas de forma helicoidal conforme proposto por Bai e Bai (2014). Durante a fase de perfuração de um poço, dutos rígidos são utilizados para conduzir os fluidos de perfuração da sonda ao poço com principais objetivos de formar uma coluna hidrostática para controle do poço, transportar os detritos resultantes da perfuração e resfriar a coluna de perfuração e a broca. Durante a fase de produção de um campo, dutos rígidos e flexíveis podem ser usados para o transporte de hidrocarbonetos e fluidos de injeção no poço. Os dutos de produção podem ser instalados em diversas configurações que geralmente têm por objetivo minimizar os movimentos inferidos pela unidade flutuante e reduzir o esforço de tração na conexão com a plataforma. Tipicamente, dutos flexíveis apresentam baixa rigidez à flexão quando comparado aos dutos rígidos, características essenciais para sua aplicação em campos de grande profundidade.

O presente trabalho estudará o comportamento dinâmico de dutos flexíveis de produção durante a operação de conexão com o equipamento submarino. A necessidade de operações em campos de produção de hidrocarbonetos localizados em águas profundas promove o desenvolvimento de diferentes técnicas de instalações de equipamentos no leito marinho. De particular interesse para o presente trabalho, será estudada a fase de lançamento dos dutos flexíveis e a posterior conexão com o equipamento submarino.

O acoplamento do duto flexível ao equipamento submarino é uma operação crítica e ocorre durante a fase de desenvolvimento de um campo marítimo. As operações em ambientes marítimos estão continuamente expostas aos carregamentos dinâmicos resultantes do ambiente, os quais são tipicamente causados por ventos, ondas e correntes marítimas. Tais carregamentos são responsáveis por inferir movimentos na unidade flutuante que executa a instalação e impor esforços hidrodinâmicos nos equipamentos a serem instalados. Parâmetros do duto tais como: rigidez à flexão, rigidez axial e raio de curvatura são responsáveis por induzir esforços aos equipamentos submarinos envolvidos na operação de instalação como descreve Johnston (1992). Uma avaliação criteriosa dos esforços induzidos pelo duto flexível é importante para garantir a segurança da operação de instalação, bem como o correto dimensionamento dos equipamentos que compõem o sistema.

Uma operação típica de instalação de dutos flexíveis em águas profundas e ultra profundas utilizada em campos de produção de hidrocarbonetos no Brasil é conhecida como Conexão Vertical Direta. Nesse método, o duto flexível e o equipamento submarino podem ser instalados em etapas diferentes do cronograma de desenvolvimento do campo. A instalação é realizada por meio de um Módulo de Conexão Vertical (MCV), responsável por conectar verticalmente a extremidade do duto flexível ao equipamento submarino. Durante essa operação, o duto flexível é transportado em um navio de instalação e lançado ao leito marinho à medida que a embarcação navega pela trajetória desejada. O acoplamento do MCV é executado pelo próprio navio de instalação, que mantém a extremidade superior do duto instalada em bobinas ou em cestas de lançamento.

Para manter a integridade estrutural dos equipamentos submarinos durante a conexão do duto flexível, o MCV deve ser o fusível mecânico do sistema. Dessa forma, o sistema de conexão deve apresentar resistência mecânica suficiente para resistir aos esforços de instalação, porém deve ser o ponto fraco na linha de atuação dos esforços. Entretanto, por muitas vezes o acoplamento do MCV com o equipamento submarino apresenta dificuldades operacionais devido aos movimentos da embarcação e aos carregamentos ambientais que induzem esforços ao duto flexível. Tais eventos inesperados podem causar falha mecânica de

componentes, o que atrasa o cronograma de desenvolvimento do campo, aumenta o custo da instalação e reduz a eficiência da operação.

Para evitar falhas no sistema de instalação do duto flexível, tipicamente são realizadas simulações computacionais para estimar os esforços induzidos durante a operação de conexão do duto flexível com o equipamento submarino. A análise do problema de instalação do duto flexível é realizada por meio de simulações numéricas no domínio do tempo. Nesse contexto, o programa computacional comercial OrcaFlex é aplicado para executar as simulações, no qual um modelo matemático baseado no método dos parâmetros concentrados é utilizado.

Nessa abordagem, os esforços externos são concentrados em cada nó que une os elementos adjacentes e a modelagem dos esforços hidrodinâmicos atuantes no duto flexível é implementada conforme a equação de Morison. Essa abordagem é vantajosa por possibilitar uma modelagem simplificada dos dutos flexíveis para uma solução do problema no domínio do tempo visando um menor custo computacional.

Com a finalidade de representar o equipamento submarino nas simulações numéricas, uma função externa é implementada por meio do programa computacional por meio de uma rotina programada em Python. Para representar a rigidez do equipamento submarino, é proposta uma metodologia em que a rigidez elástica da linha de atuação dos esforços do equipamento submarino é representada por meio de uma viga Euler-Bernoulli.

Dessa forma, o comportamento do esforço quase-estático do equipamento submarino é substituído pela representação numérica de uma viga engastada em uma das extremidades. É considerado um esforço pontual concentrado na extremidade livre, no qual o MCV realiza o acoplamento com o equipamento submarino. A função externa implementada junto ao modelo numérico do programa computacional proporciona um estudo simplificado dos esforços induzidos pelo duto flexível durante a sua fase de conexão ao equipamento submarino.

Devido à complexidade geométrica dos equipamentos que compõe o sistema de instalação do duto flexível, inicialmente é executado um estudo de sensibilidade para avaliar o comportamento do sistema para diferentes coeficientes hidrodinâmicos conforme a equação de Morison.

O objetivo é analisar a tendência do sistema de instalação conforme a variação de tais coeficientes. Em seguida é executado um estudo em que são considerados diferentes valores de velocidade de lançamento do cabo de instalação do MCV. Dessa forma, é possível avaliar os esforços atuantes durante a conexão do duto flexível para diversas velocidades de

lançamento do cabo de instalação, bem como estudar o comportamento do sistema durante a operação.

Por fim, os resultados são mostrados em termos de esforços reativos no flange de conexão entre o MCV e o duto flexível. Tais esforços são momento fletor, esforço cortante e tração atuante no duto. Os resultados obtidos possibilitam uma avaliação dos esforços atuantes no MCV que podem ocorrer durante a Conexão Vertical Direta.

1.1 Motivação

Durante a operação de conexão de dutos flexíveis, esforços excessivos podem ocorrer nos equipamentos que compõem o sistema de instalação. Esses esforços ocorrem principalmente devido a problemas no posicionamento dinâmico do navio de instalação ou a eventuais carregamentos ambientais inesperados. Esforços excessivos podem ocasionar danos ou até mesmo falha mecânica em componentes do sistema de instalação.

A falha desses componentes em campo produz um conhecimento importante para a fase de projeto, a qual pode ser modificada com objetivo de melhorar a segurança operacional e evitar posteriores falhas dos componentes. O conhecimento obtido por meio de uma avaliação criteriosa dos esforços induzidos pelo duto flexível torna possível auxiliar posteriormente o desenvolvimento e a fabricação dos equipamentos submarinos com vistas à minimização de falhas durante a instalação.

1.2 Objetivos

Com base na contextualização apresentada, o objetivo geral do presente trabalho é avaliar os esforços induzidos pelo duto flexível no MCV durante a operação de Conexão Vertical Direta.

Nesse contexto, o presente trabalho inicialmente buscará descrever a operação de Conexão Vertical Direta e estabelecer uma metodologia para estudar os esforços induzidos durante a operação de instalação de dutos flexíveis em equipamentos submarinos. Propõe-se avaliar a operação por meio de simulações numéricas e modelar a instalação considerando diversos coeficientes hidrodinâmicos.

1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho está organizado em seis capítulos. O capítulo atual apresentou a contextualização do problema a ser estudado, bem como estabeleceu a motivação e os objetivos.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura referente à instalação de dutos flexíveis em equipamentos submarinos. Inicialmente, apresenta-se o histórico dos métodos de conexão utilizados no Brasil. Em seguida, são revisadas as técnicas de simulações numéricas e a descrição dos modelos matemáticos para representar dutos flexíveis. Por fim, é apresentada uma revisão bibliográfica dos trabalhos dedicados ao estudo do método de Conexão Vertical Direta de dutos flexíveis.

O Capítulo 3 descreve a fundamentação teórica utilizada para o estudo de instalação de dutos flexíveis em ambiente marítimo. Serão apresentadas a teoria de ondas utilizada, os movimentos da unidade flutuante de instalação de dutos e a modelagem de forças hidrodinâmicas que será utilizada para interação com os dutos submersos.

O Capítulo 4 expõe a metodologia utilizada no trabalho para avaliar os esforços induzidos por dutos flexíveis durante a operação de Conexão Vertical Direta. Além disso, serão apresentados o modelo numérico utilizado no trabalho e a função externa implementada com objetivo de representar a rigidez do equipamento submarino no instante de conexão do duto flexível.

O Capítulo 5 resume os resultados obtidos no estudo utilizando a metodologia proposta. Inicialmente, um caso típico é estudado considerando os valores de coeficientes hidrodinâmicos encontrados na literatura. Em seguida, criam-se curvas de tendências variando os coeficientes hidrodinâmicos em torno do caso típico. Por fim, será estudado um caso simplificado no qual a velocidade de lançamento do cabo de instalação é variada com objetivo de estudar a influência da variação da velocidade de lançamento do MCV.

Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do estudo com base nos resultados mostrados, bem como as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é dividido em três seções. Primeiramente, são apresentados o histórico do desenvolvimento da Conexão Vertical Direta no Brasil e a sua influência no avanço para explorações em águas profundas e ultra profundas. A segunda seção resume as técnicas de modelagem numérica utilizadas em análises de instalação e operação de dutos flexíveis em ambientes *offshore*. Por fim, é apresentado um breve resumo da literatura disponível sobre simulações numéricas de instalação de dutos flexíveis por meio da Conexão Vertical Direta.

2.1 Conexão de dutos flexíveis em equipamentos submarinos

As descobertas de campos de produção de hidrocarbonetos em ambiente marítimo nas últimas décadas levam a desafios tecnológicos relacionados ao desenvolvimento de sistemas de produção marítimos. No Brasil, grande parte das reservas estão localizadas em águas profundas, onde os equipamentos submarinos devem ser operados sem a assistência de um mergulhador. Conforme descreve Moreira et al. (1996), uma operação considerada crítica para o cronograma de desenvolvimento do campo é a conexão do duto flexível com o equipamento submarino.

Dutos flexíveis são aplicados em campos *offshore* com dois principais objetivos: transportar fluidos e estabelecer conexões entre equipamentos submarinos e sistemas de produção. Sua fabricação é caracterizada por uma série de camadas poliméricas intercaladas com camadas de material metálico, o que promove baixa rigidez à flexão em relação à rigidez axial do duto. Johnston (1992) conclui que tais características são relevantes para aplicação em equipamentos submarinos. Dutos destinados ao transporte de fluidos em ambiente *offshore* que estão assentados no fundo do mar são definidos como *flowlines*, enquanto aqueles que estão suspensos entre o leito do solo marinho e a unidade flutuante são denominados *risers*. No presente trabalho, tanto *risers* flexíveis quanto *flowlines* serão tratados como dutos flexíveis.

Desde o início da exploração de hidrocarbonetos no mar, a profundidade de operação dos equipamentos submarinos tem aumentado gradativamente ao longo do tempo. Para aplicações em águas rasas (profundidade menor que 300m), o duto flexível pode ser conectado ao equipamento submarino com auxílio de um mergulhador (*Pull-in convencional*).

Porém, à medida que campos *offshore* são explorados em maior profundidade, a conexão do duto flexível ao equipamento submarino torna-se uma atividade complexa.

Durante a exploração dos primeiros campos em águas profundas, o duto flexível era conectado à Árvore de Natal Molhada (ANM) quando o equipamento ainda se encontrava no *moon pool* da plataforma. Esse método, conhecido como *lay away* descrito por Freet et al. (1992), exige a operação simultânea de uma sonda de completação e um navio de instalação de duto flexível. O método é considerado confiável, uma vez que os testes de funções e estanqueidade da ANM podem ser realizados com o equipamento ainda embarcado. Entretanto, existe a possibilidade de uma embarcação ter que esperar pela outra, causando atrasos no cronograma de desenvolvimento do campo.

Com o objetivo de evitar a operação simultânea de duas embarcações de alto custo, Brandão e Couto (1992) apresentaram o conceito de um Sistema de Conexão Vertical sem cabo guia e sem auxílio do mergulhador para conectar um duto flexível a um *manifold* submarino. O sistema é apresentado como uma alternativa aos sistemas existentes que utilizam conexão horizontal e sistemas *pull-in* submarino guiados por mergulhador. Inicialmente o projeto baseou-se na experiência obtida em sistemas de completação e perfuração de poços *offshore* sem cabo guia em águas profundas no Brasil.

Para executar a conexão do duto flexível com o equipamento submarino, o MCV é idealizado inicialmente como um conector mecânico, atuado hidraulicamente pela ferramenta de instalação, na qual todas as interfaces por onde passam fluidos de produção e injeção contém uma vedação do tipo metal-metal. O equipamento submarino apresenta um sistema de guia e orientação para receber o MCV durante sua instalação. O sistema possui um conjunto de receptáculos em formato de funil guia e pinos para o assentamento na posição correta.

O desenvolvimento de um MCV teve como premissa três objetivos. Primeiramente, obter uma solução para a conexão do duto flexível com um *Manifold* instalado em águas profundas. Tal funcionalidade só foi possível por meio de um projeto no qual o equipamento é preparado para receber os módulos de conexão. O segundo objetivo é evitar a operação simultânea de uma sonda e um navio de instalação de duto flexível. O terceiro objetivo é possibilitar que qualquer embarcação com posicionamento dinâmico faça a conexão do duto flexível ao equipamento submarino. Evitar a necessidade do uso de uma sonda em conjunto com o navio de instalação de duto flexível introduz flexibilidade ao cronograma de desenvolvimento do campo.

Em suma, a intenção de projetar equipamentos submarinos fundamentados na conexão vertical tem em vista o menor custo da operação e a simplicidade do projeto. O sistema

é planejado para utilizar uma única ferramenta de instalação com as funções de posicionamento, assentamento e posterior travamento do conector do MCV no mandril do equipamento submarino. A princípio, o sistema hidráulico de travamento do conector é fabricado em conjunto com a ferramenta de instalação, evitando assim a necessidade de sistemas de atuação no equipamento submarino. Essa medida garante que o sistema de conexão possa ser recuperado para manutenção ou substituição de componentes quando necessário.

Inicialmente, o método de conexão vertical é executado em duas fases. Na primeira fase, a ANM e o MCV são instalados simultaneamente e conectados por meio de um pequeno trecho de duto flexível (*Jumper*). Enquanto a ANM é instalada no sistema de cabeça de poço, o MCV é assentado no leito marinho por meio de uma base de abandono temporária. O abandono do sistema de conexão pode ser feito por qualquer embarcação com posicionamento dinâmico. A fase seguinte é a recuperação do MCV e a posterior conexão ao *Manifold* submarino, como ilustrado na Figura 2.1.

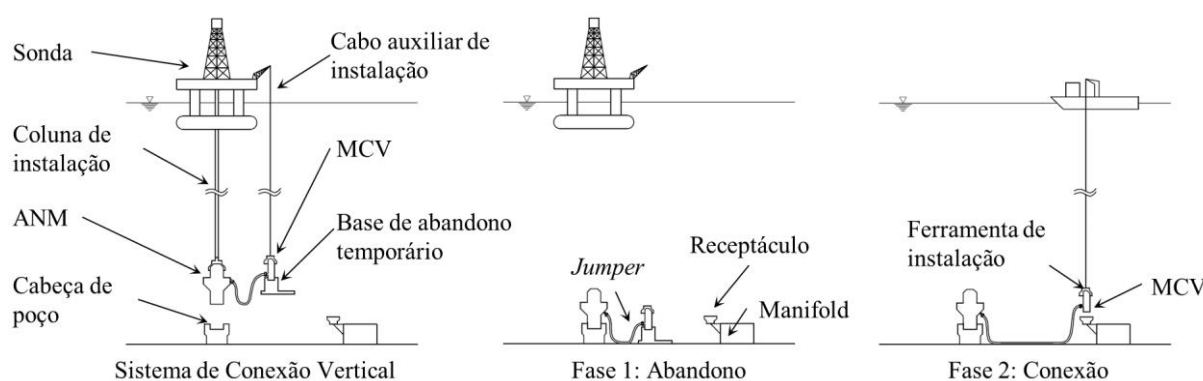


Figura 2.1 – Conexão vertical utilizando base de abandono temporário

Nagle et al. (1993) descreveram os primeiros testes realizados com o MCV no Brasil para uso em equipamentos submarinos. A conexão vertical descrita ocorre em campos de águas profundas, onde o uso de navio com posicionamento dinâmico é mandatório. Para essa avaliação, um protótipo fabricado conforme o conceito apresentado por Brandão e Couto (1992) é considerado. Os testes executados têm como principal objetivo fornecer um equipamento de conexão de dutos flexíveis que seja simples em sua concepção e que simplifique a estrutura do equipamento submarino. As operações de conexão foram realizadas no campo de Bijupirá a 500m de profundidade. O tempo de recuperação do MCV da base de abandono, movimentação, posicionamento no alvo, lançamento e desconexão da ferramenta durou aproximadamente 3,5 horas.

Moreira et al. (1996) apresentam um estudo comparativo entre os três principais métodos utilizados no Brasil para instalação de dutos flexíveis em equipamentos submarinos que operam em águas profundas. São eles: *Lay away*, conexão vertical convencional e Conexão Vertical Direta. Conforme definição, a Conexão Vertical Direta não necessita o uso da Base Temporária de Abandono e permite que as duas extremidades do duto sejam conectadas por um navio de instalação de duto flexível, eliminando completamente a necessidade de uma sonda com posicionamento dinâmico.

A Conexão Vertical Direta não é uma ideia inteiramente original. Um conceito similar foi apresentado para as linhas de fluxo da ANM de Montanazzo. Embora a ANM tenha sido projetada e fabricada pela Hughes, o equipamento nunca foi utilizado pois o campo foi considerado não comercial antes de sua instalação. Um sistema similar também foi utilizado no campo de Popeye no Golfo do México em setembro de 1995.

Durante a Conexão Vertical Direta, o Mandril das linhas de fluxo é conectado diretamente a um berço no equipamento submarino. O próprio duto flexível ou um cabo auxiliar podem ser utilizados para o correto posicionamento. Portanto, a habilidade de posicionamento dinâmico da embarcação de instalação tem uma função fundamental, pois a influência do movimento da embarcação é sempre motivo de preocupação durante a instalação.

Moreira et al. (1996) descreveram uma licitação em que 59 ANMs são distribuídas entre os quatro maiores fabricantes para serem instaladas nos campos de Marlim, Albacora e Barracuda. A concorrência já se baseia na nova especificação técnica na qual existe a requisição de que os equipamentos submarinos sejam projetados conforme as especificações dos métodos de instalação *Lay away* e Conexão Vertical Direta. Como consequência do estudo apresentado, o planejamento de curto prazo incluiu o extensivo uso da tecnologia de Conexão Vertical Direta para o desenvolvimento de campos em águas profundas no Brasil. A partir dessa data, a Conexão Vertical é considerada o método padrão de conexão para equipamentos submarinos instalados no Brasil pela Petrobras.

Silva et al. (1999) elucidaram o conceito da Base Adaptadora de Produção (BAP), que foi utilizado pela primeira vez como uma solução circunstancial para permitir a completação em poços que apresentaram dano na região de vedação metal-metal do sistema de cabeça de poço. O uso da BAP foi fundamental para a Conexão Vertical Direta, uma vez que o equipamento apresenta um berço para conexão do Mandril das Linhas de Fluxo, o que permite a recuperação da ANM sem a necessidade de desconectar o duto flexível. Para essa funcionalidade, existem válvulas de fechamento do poço *Downhole safety valve* (DHSV), válvulas de controle instaladas na própria BAP e nos MCVs.

Inicialmente, a ANM instalada sem auxílio de cabo foi projetada e fabricada para o método de instalação *Lay Away*. Entretanto, ao longo de sua existência incorporaram-se diversas melhorias em suas gerações com o objetivo de superar os desafios de instalação e reduzir o tempo de sonda. A conexão do duto flexível em equipamentos submarinos é considerada o principal desafio para o avanço das explorações em águas profundas, como descrevem Silva et al. (1999). A evolução dos sistemas de conexão em ANMs pode ser classificada em quatro gerações:

- Primeira geração – Sistema *lay away*: Promove conexão e testes entre o equipamento e o duto flexível com o equipamento residente ainda embarcado na sonda. Linhas de produção, anular, funções elétricas e hidráulicas são instaladas usando o mesmo conector hidráulico.
- Segunda geração – Sistema de Conexão Vertical: Utilizado pela primeira vez em 1994, o sistema de conexão vertical é primeiramente instalado em uma Base de Abandono temporária que se localiza próxima ao equipamento residente. Em uma operação seguinte, o Módulo de Conexão é recuperado e instalado em sua posição final.
- Terceira geração – Conexão Vertical direta: Nesse método de instalação, o uso da Base Temporária de Abandono é eliminado e o Mandril das Linhas de Fluxo é instalado diretamente na Base Adaptadora de Produção.
- Quarta geração – Conexão Vertical Direta independente: Permite que a operação de instalação do duto flexível seja executada em apenas um passo, podendo ser realizada em qualquer momento após a instalação da BAP.

A completa independência da instalação do duto flexível foi obtida adicionando uma segunda interface ao Sistema de Árvore Submarina, na qual a conexão se realiza diretamente na BAP por meio do receptáculo. Após a quarta geração, a operação de completação também se tornou independente da instalação do duto flexível, resultando em maior flexibilidade no cronograma de instalação do campo. A Figura 2.2 mostra de forma esquemática a montagem do conjunto BAP e ANM no sistema de cabeça de poço.

Porciuncula et al. (1999) apontam a necessidade de um equipamento para fazer interface entre dutos flexíveis e dutos rígidos fabricados em aço. Essa demanda gerou o

desenvolvimento de um equipamento chamado *Pipeline End Terminal* (PLET) em parceria com fornecedores de equipamentos submarinos.

O conceito do equipamento considera que um duto rígido é instalado por meio de um dispositivo equipado com um receptáculo para uma posterior conexão de um MCV acoplado a um duto flexível. Com objetivo de eliminar esforços torcionais induzidos pelo duto rígido, o PLET considera o uso de um *swivel* para eliminar a restrição do duto devido à rotação durante sua instalação.

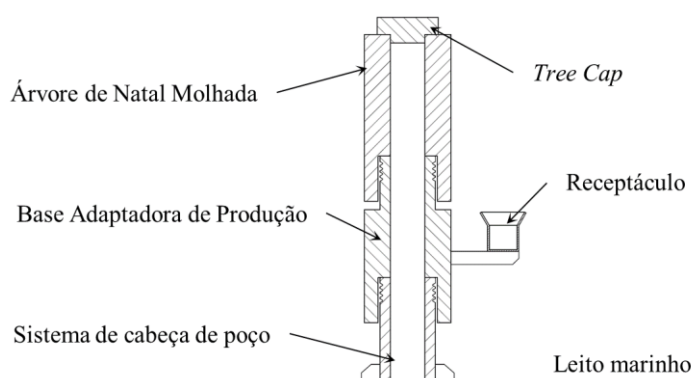


Figura 2.2 – Conjunto Base Adaptadora de Produção e Árvore de Natal Molhada

O uso de dutos flexíveis e umbilicais de controle em profundidade de até 1000 m foi considerado consolidado no Campo de Marlim. As operações de conexão de maior relevância até então foram dominadas e consideradas maduras: Conceitos estruturais de dutos, Conexão Vertical sem auxílio de mergulhador, dutos flexíveis, o uso de *Manifolds* submarinos, *risers* fabricados em aço instalados em catenária e conectados às unidades de produção flutuantes.

Um dos fatores apresentados como contribuição positiva para o intenso uso de dutos flexíveis na Bacia de Campos é a possibilidade de instalar as três linhas (produção, serviço e umbilical) simultaneamente, por meio de um Módulo conhecido como *bundle*, que comporta flanges individuais para cada duto.

Moraes et al. (2001) descrevem a instalação dos dutos flexíveis no campo de Roncador por meio do MCV na plataforma P-36. O conceito de projeto inicial para o campo considerou a instalação simultânea de duas linhas flexíveis e um umbilical de controle por meio de um único *Bundle*. Entretanto, para projetos em águas ultra profundas, é necessária a instalação das linhas separadamente. O *Bundle* convencional não foi considerado adequado devido à diferença de rigidez entre os três dutos, o que dificulta sua movimentação quando submerso e também à redução capacidade de manobra do equipamento quando embarcado.

Adicionalmente, são verificados altos esforços de tração induzidos pelos três dutos flexíveis durante a operação de instalação.

Com objetivo de resolver os problemas de manobra do MCV, a estrutura da BAP teve que ser modificada. O novo projeto possui três receptáculos para o assentamento de três MCVs com diferentes funções. Sendo o primeiro módulo para conectar a linha de produção, o segundo para linha de acesso ao anular do poço e o terceiro para o umbilical de controle do equipamento submarino.

Nessa fase, a Conexão vertical é amplamente utilizada. Os Módulos de Conexão Vertical são projetados com o peso de aproximadamente 3500kg, fabricados com flanges API nas extremidades e um duto rígido curvado (*Gooseneck*) fabricado em aço carbono. A Figura 2.3 ilustra o Módulo de Conexão Vertical.

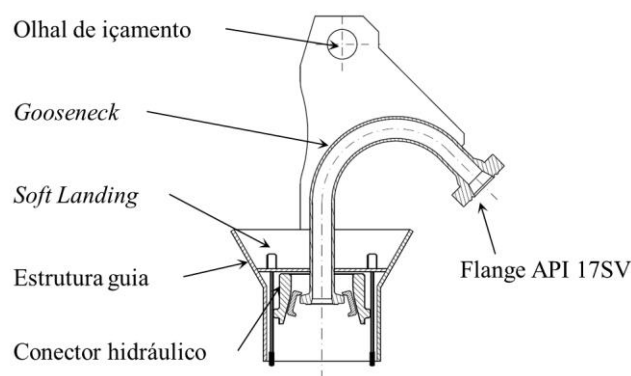


Figura 2.3 – Módulo de Conexão Vertical. Adaptado de Moraes et al. (2001)

Os MCVs utilizados no campo de Roncador também foram instalados em PLETs. Durante as instalações, é comum o aparecimento de esforços devido à torção do duto, induzindo movimentos no MCV. A torção é atribuída à forma como o duto flexível é armazenado, transportado e acomodado em carretéis. À medida que é lançado ao mar, o duto apresenta torção induzida na extremidade, a qual transmite o esforço ao MCV.

Para evitar o esforço de torção induzido pelo duto flexível, um *Swivel* é projetado com objetivo de liberar o grau de liberdade de rotação do MCV. Dessa forma, é possível reduzir a torção no equipamento durante sua instalação. Essa medida foi importante para melhorar o posicionamento vertical do MCV enquanto a manobra de aproximação do equipamento submarino era executada.

Ribeiro et al. (2003) descrevem a evolução dos métodos de conexão em equipamentos submarinos no Brasil. As lições aprendidas na primeira operação sem auxílio de mergulhador em 1982 mostraram que o sistema convencional *pull-in* apresentou diversas

falhas, motivo pelo qual praticamente todos os casos precisaram de auxílio do mergulhador. Apenas uma das 29 ANMs foi instalada sem nenhuma assistência do mergulhador. Felizmente, nessa época os poços submarinos não eram localizados em profundidades maiores que o alcance do limite imposto ao mergulhador. Sendo assim, o problema foi resolvido apenas substituindo as ANMs por equipamentos assistidos por mergulhador.

Posteriormente, o método *Lay away* foi adotado como uma medida paliativa para resolver as falhas existentes no método *pull-in*. Entretanto, o conceito também apresentava falhas no que diz respeito ao cronograma de desenvolvimento do campo e à complexidade da operação, estimulando assim o estudo e desenvolvimento do Método de Conexão Vertical.

Na Bacia de Campos, a comparação entre o comprimento total de dutos flexíveis (aproximadamente 2280 km) contra o correspondente comprimento de dutos rígidos fabricados em aço (aproximadamente 1580 km) mostra a relevância da aplicação de dutos flexíveis na produção de hidrocarbonetos no mar. Uma das grandes vantagens do uso de dutos flexíveis é a facilidade de recuperação e posterior instalação em outras localidades quando necessário.

Estudos no início do ano 2000 já direcionavam a exploração de hidrocarbonetos para reservatórios em profundidade de aproximadamente 3000m. Para viabilizar esse desafio, os esforços concentram-se na área da tecnologia de *risers* de produção. Aspectos como vida em fadiga, colapso das tubulações e altos esforços de conexão nas plataformas eram estudados e considerados no desenvolvimento de sistemas de produção. O objetivo era reduzir o movimento inferido por carregamentos ambientais sob o arranjo dos dutos flexíveis submersos. Um segundo ponto a ser trabalhado foi o estudo das diferentes configurações de *risers* com objetivo de minimizar a ação de movimentos da Unidade de Produção.

Para a conexão de dutos flexíveis sem o auxílio de mergulhador, a tecnologia desenvolvida da Conexão Vertical Direta já é considerada adequada para qualquer profundidade de instalação. Um novo sistema de conexão horizontal estaria sendo desenvolvido com objetivo de evitar o uso do *Gooseneck*, que é uma preocupação para conexão de dutos fabricados em aço e também um possível ponto para formação de hidrato.

Mastrangelo et al. (2003) expõem as soluções tecnológicas que viabilizaram a exploração de hidrocarboneto em águas ultra profundas. O sistema de Conexão Vertical Direta é apresentado como um método flexível por possibilitar o lançamento de dutos e posterior conexão em qualquer momento após a instalação da BAP. O método de instalação de dutos flexíveis é apresentado com impactos não apenas na viabilidade técnica de operação, mas também é destacado pelo resultado positivo na viabilidade Econômica do projeto.

Com relação à instalação do duto flexível na Unidade de Produção, existe a possibilidade de realizar a conexão da primeira extremidade do duto na plataforma e prosseguir com o lançamento do duto no leito marinho. Dessa forma é possível reduzir os esforços induzidos no flange de conexão do topo. Para unidades que operam em águas ultra profundas, essa vantagem torna-se relevante, principalmente para dutos de grande diâmetro.

Herdeiro et al. (2005) apresentam o plano de desenvolvimento para o campo de Barracuda e Caratinga, onde a estratégia é desenvolver o campo primeiramente em uma fase piloto e posteriormente viabilizar a fase de operação do sistema definitivo. A fase piloto do campo tem como objetivo a antecipação da produção, aumentando o fluxo de caixa e o Valor Presente Líquido (VPL) do investimento. Por meio do projeto piloto, também existe a possibilidade de se obter informações técnicas sobre os poços e a produção.

O método de Conexão Vertical Direta é escolhido para instalação dos dutos flexíveis por apresentar a possibilidade de recuperação dos dutos da fase piloto e subsequente instalação na localidade definitiva. Essa facilidade de realocação trouxe para o projeto a possibilidade de reaproveitar dutos já em operação, processo pelo qual se utiliza apenas adaptações para o reposicionamento das rotas dos dutos. O escopo de fornecimento de dutos flexíveis para o projeto foi de 400km de linhas de produção e anular e 233km de umbilicais. A conexão dos dutos flexíveis com a Unidade de Produção é feita no bordo do navio. Dessa forma, não é necessário o uso de *turret*.

Longo et al. (2006) descrevem o plano de desenvolvimento do campo de Albacora Leste, em que o uso de *riser* em catenária livre é considerado. A configuração dos dutos flexíveis é adotada devido à profundidade de instalação (800m a 2000m) e devido ao diâmetro dos dutos flexíveis variando de 4 a 9 polegadas.

Para evitar que as rotas de instalação tivessem que ser refeitas após a chegada da unidade de produção, o planejamento da operação de conexão teve um papel fundamental no procedimento de lançamento dos dutos flexíveis. Nesse caso, o MCV possibilita a flexibilidade necessária no cronograma de instalação do campo. Os dutos flexíveis são ancorados com estaca torpedo no fundo do mar a fim de evitar a transmissão de esforços longitudinais que possam modificar a configuração das linhas de fluxo após sua instalação.

Roveri et al. (2008) apresentam o conceito de *riser* híbrido instalado no campo de Roncador. O projeto é fundamentado em uma tubulação vertical fabricada em aço e conectada a um sistema de fundação ancorado no leito marinho. O *riser* vertical é tracionado por meio de uma boia conectada mecanicamente ao topo da tubulação, a qual mantém o trecho alinhado

verticalmente. Um Módulo de Conexão utilizando o conceito do *Gooseneck* é assentado no topo do trecho vertical, conectando um *Jumper* flexível até a Unidade de Produção.

O Módulo de Conexão consiste primariamente de um *Gooseneck* e um conector hidráulico atuado via ferramenta do Veículo Operado Remotamente (ROV), o qual permite que o *jumper* e a seção vertical do *riser* sejam instalados em fases distintas. O uso de sistemas híbridos introduz desafios técnicos devido à dinâmica do sistema.

Cezar et al. (2015) expõem as tecnologias utilizadas para o desenvolvimento dos campos da Bacia de Santos, localizada no pré-sal brasileiro. A Conexão Vertical Direta é o método utilizado para conectar dutos flexíveis aos equipamentos submarinos. Nesse método, a unidade hidráulica do ROV é utilizada para atuar o mecanismo de travamento do MCV via *hot stab* e executar o teste de vedação do selo metal-metal. O MCV é projetado com um *Gooseneck* com raio de curvatura de 3 vezes o diâmetro interno do duto flexível, o que permite a operação de dispositivos de limpeza da linha.

Os dutos flexíveis instalados no pré-sal têm maior rigidez quando comparados aos tradicionalmente utilizados na Bacia de Campos. Os principais motivos são as necessidades de: resistência ao colapso do duto, isolamento térmico e adequação dos materiais para suportar contaminantes nos fluidos produzidos (H_2S e CO_2).

Dessa forma, o projeto do MCV é considerado uma parte crítica do arranjo do sistema submarino. Métodos de avaliação estrutural e procedimentos de instalação são elaborados com o objetivo de mitigar os riscos da conexão dos dutos flexíveis. O sistema de conexão fabricado para operar em campos do pré-sal inclui uma válvula atuada mecanicamente instalada no MCV com objetivo de promover a flexibilidade na decisão de instalar os dutos flexíveis vazios ou cheios de água do mar.

Diversas soluções de arranjo submarino são adotadas para o desenvolvimento de campos na Bacia de Santos. No campo de Lula piloto, dutos flexíveis são utilizados para todas as funções. No campo Sapinhoá piloto, é aplicada uma Boia de Sustentação de Risers (BSR) com *Jumper* flexível para produção e injeção de fluidos no poço. Conforme apresentam Cezar et al. (2015), para o campo de Sapinhoá Norte, é considerado o *Steel Lazy Wave Risers* (SLWR) para produção e *gas lift* e dutos flexíveis para injeção de água.

Santos et al. (2015) propõem a divisão da operação de Conexão Vertical Direta em três fases distintas. A ordem com que as fases acontecem determina se o procedimento é nomeado “Conexão Vertical Direta de primeira extremidade” ou “Conexão Vertical Direta de segunda extremidade”.

No procedimento de Conexão Vertical Direta de primeira extremidade, a conexão do duto flexível com o equipamento submarino é feita primeiro, seguida do lançamento do duto no leito submarino e posterior conexão com a unidade de produção. São as etapas:

1. Conexão da extremidade do duto com o equipamento submarino
2. Lançamento do duto no leito submarino
3. Conexão da extremidade do duto com a unidade de produção

No procedimento de Conexão Vertical Direta de segunda extremidade, primeiramente a conexão do duto flexível com a Unidade de Produção é executada, seguida pelo lançamento do duto no leito submarino e posterior conexão com o equipamento submarino. Nesse procedimento, a configuração geométrica do duto flexível deve ser ajustada na fase de aproximação do MCV por meio do uso de flutuadores ou suspensão por cabos conectados a guindastes no navio de instalação de dutos flexíveis.

Desde o início do uso de dutos flexíveis na Bacia de Campos, a conexão entre o duto e o equipamento submarino foi modificada devido ao acréscimo da profundidade de instalação. A Conexão Vertical Direta de dutos flexíveis em equipamentos submarinos é o método mais aplicado no Brasil desde 1995, como apresentam Santos et al. (2015). A Figura 2.4 detalha a instalação de Primeira e Segunda extremidade.

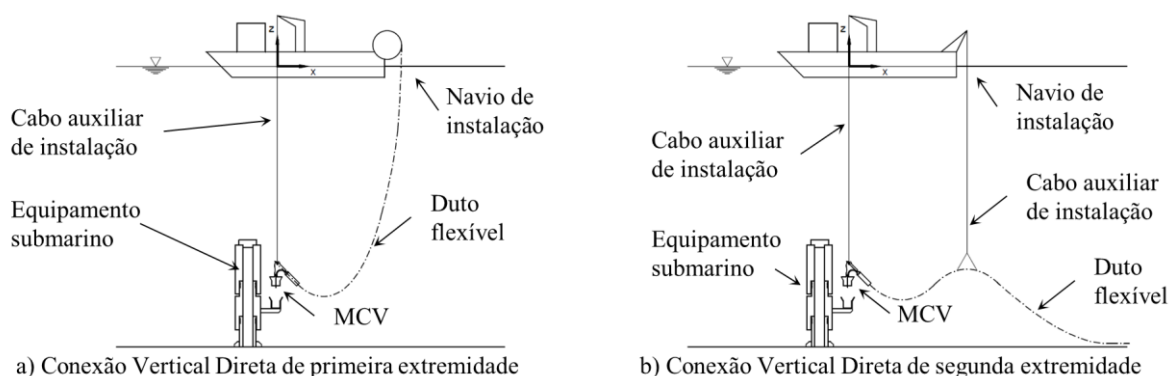


Figura 2.4 – Conexão Vertical Direta de (a) Primeira (b) Segunda extremidades

A Conexão Vertical Direta é executada utilizando um MCV, o qual é projetado com um *Gooseneck* e um flange API soldado com um ângulo de saída de 45 a 60 graus em relação ao eixo vertical. O duto flexível é conectado a uma das extremidades do *Gooseneck* por meio de uma junta flangeada, enquanto na extremidade oposta existe um conector hidráulico para

conexão com o equipamento submarino. A conexão do duto flexível com o MCV é feita no convés do navio de instalação.

A literatura revisada mostra que o desenvolvimento do método de conexão vertical no Brasil foi um passo importante para o avanço da exploração de campos em maiores profundidades.

A Tabela 2.1 resume a evolução das técnicas de instalação do duto flexível ao longo do tempo em relação à lâmina d'água (LDA) de operação dos equipamentos submarinos.

Tabela 2.1 – Evolução dos métodos de instalação de dutos flexíveis no Brasil

Ano	LDA (m)	Campo	Obs.
1978	160	Namorado	Árvore de Natal Convencional instalada em câmaras de uma atmosfera. Aplicação de dutos flexíveis ⁽⁴⁾
1979	189	Enchova Leste	Primeira ANM instalada ⁽²⁾
1984	307	Piraúna	Primeira ANM abaixo do limite do mergulhador ⁽²⁾
1987	411	Marimbá	Primeira ANM instalada com auxílio de cabos, sem auxílio do mergulhador, método <i>Lay away</i> ⁽⁴⁾
1991	721	Marlim	Primeira ANM instalada com sonda de posicionamento dinâmico sem auxílio de cabos, sem mergulhador ⁽⁴⁾
1992	500	Bijupirá	Desenvolvimento da primeira versão do Método de Conexão Vertical com protótipo testado ⁽¹⁾
1994	670 - 980	Marlim	Introdução do Sistema de Conexão Vertical, com uso da Base de Abandono Temporária ⁽²⁾
1996	620	Albacora	Primeira Conexão Vertical Direta sem uso de Base de Abandono Temporária ⁽⁴⁾
1997	880	-	Terceira geração de ANM, Conexão Vertical Direta por meio de Mandril das Linhas de Fluxo ⁽²⁾
2001	1867	Roncador	Instalação de dutos flexíveis em águas profundas utilizando Módulo de Conexão Vertical ⁽³⁾
2005	600 - 1350	Barracuda e Caratinga	Conexão Vertical Direta por meio de <i>Bundle</i> , uso de dutos da fase piloto na fase definitiva ⁽⁵⁾
2006	800 - 2000	Albacora Leste	Conexão Vertical utilizada por meio de abandono do <i>Bundle</i> antes da instalação da Unidade de Produção ⁽⁶⁾

⁽¹⁾ Nagle et al. (1993); ⁽²⁾ Silva et al. (1999); ⁽³⁾ Moraes et al. (2001); ⁽⁴⁾ Ribeiro et al. (2003); ⁽⁵⁾ Herdeiro et al. (2005); ⁽⁶⁾ Longo et al. (2006)

2.2 Métodos de simulação

Modelos numéricos são amplamente utilizados para avaliar os esforços induzidos por dutos flexíveis que operam no mar. A modelagem de dutos flexíveis em catenária livre tem como objetivo a avaliação estrutural dos esforços atuantes em um duto suspenso por suas duas extremidades. Tipicamente, os esforços que atuam em dutos submarinos são: o seu peso próprio, carregamentos do ambiente e movimentos prescritos em seus extremos. O comportamento estrutural de um duto flexível está relacionado principalmente à geometria do tubo, às propriedades mecânicas e às condições de contorno do problema.

Chakrabarti e Framptom (1982) apresentam uma revisão das técnicas de modelagem utilizadas em análises de *risers* verticais. O trabalho mostra a evolução desde os problemas estáticos até as avançadas análises dinâmicas possíveis a partir do advento do computador. As equações de governo do movimento de um *riser* vertical são demonstradas para grandes e pequenos deslocamentos e rotações. A dedução das equações de governo do movimento parte das equações de equilíbrio de um segmento de duto flexionado nas extremidades em um plano de duas dimensões. As equações de equilíbrio dos esforços verticais, horizontais e momento são combinadas em uma única equação. São consideradas pressão interna e externa, peso do fluido interno e externo e o peso submerso do duto. A solução estática da equação diferencial de governo do movimento do *riser* tem como objetivo obter a configuração deformada da estrutura para um dado carregamento que não varia ao longo do tempo.

A solução analítica das equações de governo também pode representar uma primeira aproximação para o problema de *risers* em catenária livre. As técnicas disponíveis na literatura para solução estática ou dinâmica são inúmeras, mas podem ser classificadas em duas grandes categorias: métodos analíticos e métodos numéricos.

Os métodos analíticos apresentam limitação quanto à geometria do duto, a qual deve ter seção transversal uniforme ao longo de seu comprimento e carregamentos simples. Os métodos numéricos podem resolver casos mais gerais, nos quais existe a possibilidade de mudança na seção transversal do duto e inclusão de flutuadores. Dois exemplos de métodos de solução numérica são: o Método das Diferenças Finitas e o Método dos Elementos Finitos (MEF).

O método numérico das diferenças finitas é apresentado por Sparks (2007) para solução da equação de governo de *riser* em catenária livre com seção transversal constante. O

modelo é idealizado para grandes deslocamentos e grandes rotações com o objetivo de avaliar a influência do termo de rigidez à flexão na configuração em catenária livre de um duto. Para um caso no qual o *riser* é dividido em nós igualmente espaçados, a equação de governo para grandes deslocamentos e grandes rotações pode ser expressa em termos do ângulo em relação à horizontal obtido em cada nó. A avaliação soluciona um caso estático, sem a influência da corrente marítima, na qual o *riser* é suspenso por dois pontos.

O parâmetro da rigidez à flexão é estudado com objetivo de verificar sua influência na configuração geométrica da catenária. Para dutos flexíveis com grandes raios de curvatura, a rigidez à flexão se torna um parâmetro que influencia principalmente a configuração das extremidades do *riser*. Ao longo de seu comprimento livre, o parâmetro exerce pequena influência, uma vez que as parcelas da tração e do peso do segmento têm maior influência na equação de governo. O método das diferenças finitas é uma solução aproximada da equação de governo de um *riser*. O estudo também conclui que a formulação para grandes deslocamentos é apropriada para a solução de problemas nos quais o *riser* tem inclinações maiores do que 10 graus. No geral, tal abordagem é adequada para a avaliação de configurações em catenária livre.

O Método dos Elementos Finitos é uma abordagem versátil e amplamente utilizada atualmente para obter a solução dos problemas de dutos submersos. Tal método é utilizado por Ferrari (1998) especificamente para solução da equação de governo para pequenos deslocamentos e pequenas rotações de um *riser* vertical. O modelo estrutural utiliza elementos de pórtico plano idealizado por meio da formulação de Euler-Bernoulli. O elemento apresenta dois nós e três graus de liberdade por nó. O objetivo é obter a configuração deformada do duto para um carregamento de corrente marítima variável ao longo da profundidade. O modelo de viga de Euler-Bernoulli é uma aproximação que fornece meios de calcular a deflexão de uma viga sob carregamentos estáticos e dinâmicos por meio de uma equação diferencial de quarta ordem.

A análise é executada em duas dimensões, o método de Galerkin é utilizado para a solução da equação de governo dos movimentos do *riser*. Resultados estáticos e dinâmicos são apresentados pelo autor. Para validação da simulação por meio do Método dos Elementos Finitos, uma comparação é feita com a solução analítica da equação de governo para um *riser* vertical de seção constante ao longo de seu comprimento para o caso estático. O esforço hidrodinâmico utilizado é obtido por meio da fórmula de velocidade relativa de Morison. Os movimentos do sistema flutuante são considerados na condição de contorno no topo do *riser*. A solução para um *riser* vertical é de natureza não-linear, na qual a matriz de rigidez geométrica é função dos deslocamentos em cada nó. Logo, a tração atuante em cada nó depende da

deformação em cada elemento. É adotado um processo iterativo incremental para obter a configuração deformada do *riser*. O principal efeito dos grandes deslocamentos é que as mudanças na geometria devido aos deslocamentos não serão negligenciadas a fim de se obter uma solução mais acurada. De forma geral, para águas rasas, a matriz de rigidez geométrica terá pequena influência na matriz global de rigidez. Porém, para águas profundas, a nova geometria do *riser* e a tração interna ao elemento devem ser estimadas ao fim de cada iteração. Atualmente, o método dos elementos finitos também é utilizado em simulações de *risers* verticais rígidos para avaliação e predição da geração de vórtices por meio de métodos semi-empíricos, como apresentam Teixeira e Morooka (2017).

McNamara et al. (1988) propõem uma formulação híbrida para análises estáticas e dinâmicas em duas dimensões de dutos flexíveis em ambiente *offshore*. São considerados carregamentos ambientais e esforços resultantes do movimento de navios e plataformas. O trabalho explica o problema de equacionamento mal condicionado para problemas que envolvem baixa rigidez à flexão comparada à alta rigidez axial. O método descrito pode ser aplicado em casos desde linhas de ancoragem, nas quais a rigidez à flexão tende a zero, até *risers* rígidos com elevada rigidez à flexão, sem gerar instabilidades numéricas. O trabalho é tido como referência para comparação de resultados nos trabalhos seguintes. Ademais, a formulação proposta é utilizada no programa comercial FLEXCOM 3D™.

Ghadimi (1988) apresenta um modelo matemático para estudo de dutos flexíveis em três dimensões utilizando o método de parâmetros concentrados. A estrutura em catenária livre suspensa por dois pontos é discretizada por meio de um número finito de sistemas massa mola longitudinais, que tem o objetivo de representar a rigidez axial do duto flexível. A massa de cada elemento é dividida e concentrada nos nós de sua extremidade. Cada nó recebe o equivalente à metade da massa do segmento. A rigidez à flexão é adicionada ao modelo de forma aproximada, em que o momento fletor é considerado diretamente proporcional à curvatura determinada por três nós do segmento, já que são necessários três pontos para determinar a curvatura da configuração geométrica. Os esforços de cisalhamento em cada ponto do *riser* podem ser obtidos por meio da variação do momento fletor em cada ponto. Os resultados são comparados com o trabalho de McNamara et al. (1988), com soluções analíticas e com os dados obtidos em testes físicos. Os resultados mostram uma boa concordância quando comparados com a literatura disponível na época.

Larsen (1992) resume a comparação de resultados de 11 diferentes programas computacionais com objetivo de verificar a convergência dos resultados entre eles e estudar as incertezas envolvidas em análises de dutos flexíveis. São definidos dois casos padrões para

serem analisados de forma estática e dinâmica no domínio do tempo. O estudo conclui que a análise estática para dutos flexíveis está em um nível adequado de aceitação entre as diferentes instituições e os diferentes métodos de solução. Dois maiores fatores foram identificados como incertezas: a interação ponto de contato do *riser* com o leito do mar e a modelagem do arrasto tangencial, especialmente em seções com boias. As análises dinâmicas apresentam maior divergência na solução do problema. Sobre a tração calculada, é esperada uma variação da ordem de 10 a 15% entre os resultados obtidos. Adicionalmente, o estudo recomenda: a utilização de um caso padrão para comparações futuras entre os programas computacionais, a utilização de ensaios em escala para obter resultados empíricos e uma regulamentação para validação dos códigos.

Patel e Seyed (1995) apresentam uma revisão das técnicas de modelagem de dutos flexíveis por meio de métodos numéricos. O estágio inicial de uma análise de duto flexível suspenso é a computação de seu perfil sob um conjunto de forças estáticas. As equações clássicas da catenária fornecem uma boa aproximação inicial para o problema. Porém, em sua forma original considera apenas carregamentos devido ao peso próprio e assume um duto com rigidez nula à flexão. Uma análise estática adequada de dutos flexíveis requer uma solução de grandes deslocamentos e comportamento não linear com inclusão da rigidez à flexão. Em maior parte das contribuições desse estudo são empregadas combinações de técnicas numéricas e uso da equação clássica da catenária. Com o crescente interesse nas aplicações de dutos flexíveis e o advento de configurações geométricas de instalações, a determinação da forma da catenária tem solicitado aos pesquisadores a utilização de procedimentos numéricos cada vez mais complexos.

No que tange a discretização do problema, a análise não linear por elementos finitos fornece a mais precisa abordagem do comportamento de dutos flexíveis em relação ao momento fletor e torção em sua seção. Conforme descrito por Low e Langley (2006), a precisão não pode ser o único critério de escolha para representação do problema, uma vez que os esquemas numéricos conhecidos convergem para a solução exata quando o tamanho do elemento tende a zero.

O método de parâmetros concentrados é apresentado como uma alternativa atrativa devido a sua eficiência e simplicidade numérica. O momento fletor pode ser aproximado por molas flexionais uma vez que sua formulação tem se demonstrado viável para estruturas nas quais a rigidez à flexão não é dominante: dutos flexíveis e cabos. O duto é modelado por meio de um número finito de nós e segmentos. Cada elemento é representado por uma mola linear que se deforma longitudinalmente, enquanto a massa equivalente a um segmento é dividida

igualmente e concentrada de forma discreta em iguais metades nos nós adjacentes. Inicialmente o problema estático é resolvido com objetivo de obter a geometria inicial para a análise dinâmica. Em seguida, a solução dinâmica é executada. O código implementado pelo autor pode resolver a análise dinâmica no domínio do tempo e da frequência.

2.3 Simulações numéricas da Conexão Vertical Direta

A complexidade da operação de instalação de dutos flexíveis por meio da Conexão Vertical Direta é motivo de estudo durante o desenvolvimento de campos *offshore* em diversas disciplinas. Simulações de comportamento global são necessárias com objetivo de obter uma estimativa do comportamento estrutural de sistemas de instalação. As análises incluem solicitações mecânica e hidrodinâmica dos componentes que compõe a operação de instalação. A presente seção resume trabalhos que estudam a Conexão Vertical Direta com objetivo de verificar os esforços que o duto flexível exerce durante o acoplamento.

Lopes (2005) apresenta um estudo sobre a influência de elevadas pressões hidrostáticas e baixas temperaturas sob dutos flexíveis durante sua operação de instalação. O método de instalação investigado utiliza um MCV para conexão do duto flexível ao equipamento submarino. O programa comercial OrcaFlex é utilizado para simulações numéricas da conexão vertical, em que a rigidez à flexão antes e depois do início do escorregamento entre as camadas metálicas do duto são estimadas de forma analítica.

Adicionalmente, variações geométricas do MCV são estudadas considerando diferentes pontos de içamento. As camadas poliméricas do duto flexível sofrem modificações em seu módulo de rigidez devido à mudança de temperatura, o que modifica as propriedades mecânicas do duto flexível. Por esse motivo os parâmetros de rigidez devem ser estudados em condições de baixa temperaturas e alta pressão, que são típicas da operação de instalação de dutos flexíveis em águas profundas. A depender da geometria e profundidade de instalação, os dutos podem ser instalados alagados com água do mar ou vazios. A decisão de qual tipo de instalação será realizada depende de parâmetros do duto a ser lançado, como por exemplo: resistência ao colapso, peso submerso, e variação de rigidez na condição alagado e vazio.

Pontos relevantes sobre instalação de dutos flexíveis em profundidades de até 3000m são discutidos por Xavier (2006). O estudo apresenta resultados para diferentes propriedades mecânicas de dutos flexíveis, em que uma nova tecnologia de materiais é proposta para operação em águas ultra profundas. O comportamento dinâmico do sistema é avaliado por

meio de modelos numéricos durante a fase de instalação do duto flexível. Carregamentos ambientais e movimentos do navio de instalação de dutos são avaliados em análises no domínio do tempo. São executadas análises globais e locais do duto por meio do Método dos Elementos Finitos. Com objetivo de discutir as diferenças entre os materiais, a análise da instalação compara dutos flexíveis e rígidos listando suas vantagens e desvantagens.

Bicudo (2009) detalha os equipamentos necessários para operar em navios de instalação de duto flexível que utilizam o método de instalação da Conexão Vertical Direta. Um estudo de viabilidade de instalação de um duto de 6 polegadas é apresentado, no qual são avaliados esforços atuantes na unidade flutuante durante o lançamento do duto. Adicionalmente, uma análise local fundamentada no Método dos Elementos Finitos é apresentada com objetivo de avaliar os esforços exercidos pelos tracionadores que atuam no duto. Os resultados são apresentados em função do esmagamento das sapatas que sustentam o duto flexível durante o processo de instalação.

O desalinhamento entre o eixo vertical do receptáculo e o MCV pode induzir esforços durante a Conexão Vertical Direta. Custódio e Pimentel (2012) estudam o movimento de rotação do MCV durante a manobra de conexão em casos nos quais existe um desalinhamento do MCV em relação ao receptáculo. Simulações quase estáticas são realizadas por meio do método dos elementos finitos e os resultados são mostrados em termos de momento fletor, esforço cortante e tração no duto flexível. Os resultados mostrados podem ser utilizados com objetivo de estudar e planejar a operação de instalação de dutos flexíveis.

Danos severos podem ocorrer ao *Gooseneck* do MCV durante a Conexão Vertical Direta como mostram Santos et al. (2015). Para evitar danos ao duto flexível, um restritor de curvatura é utilizado com objetivo de evitar que o duto atinja seu raio mínimo de curvatura. Entretanto, esforços excessivos ocorrem quando o restritor de curvatura atinge seu limite e trava as vértebras para proteger o duto flexível. Dessa forma, procura-se prever as condições em que o restritor de curvatura pode atingir seu limite e transmitir esforços para o MCV a fim de evitar a falha do componente. O trabalho descreve uma metodologia para estimar a curvatura de dutos flexíveis em tempo real durante a operação de conexão do MCV. O procedimento utiliza o sistema de câmeras do ROV para capturar pontos de referência que são instalados no duto flexível durante a conexão do MCV. Por meio dos pontos monitorados, é possível reconstruir a geometria e estimar a curvatura do duto flexível.

Em um trabalho recente, Freitas et al. (2017) avaliam a influência da posição do ponto de içamento de um MCV na operação de verticalização do equipamento. Para que o MCV seja assentado no receptáculo do equipamento submarino, é necessário seu alinhamento com o

eixo vertical. Uma tolerância de ± 3 graus com relação ao eixo vertical é considerada para sucesso da operação. O desalinhamento do MCV pode ocorrer devido aos carregamentos ambientais, movimentos da embarcação e controle do lançamento do cabo de instalação. Caso o MCV seja lançado com desalinhamento vertical maior que a tolerância, o *Gooseneck* pode sofrer sobrecarga resultante do esforço que o duto flexível exerce sobre o MCV durante o acoplamento. Conforme o sistema de instalação escolhido, pode existir a necessidade de instalação de boias no duto ou de escavação do leito marinho para evitar contato do duto em catenária com o fundo do mar. Esse tipo de operação pode onerar a instalação de forma desnecessária. Portanto estudos de verticalização do MCV podem ser feitos em sua fase de projeto com objetivo de avaliar o alinhamento do módulo na operação.

Este capítulo teve como objetivo descrever a revisão bibliográfica do presente trabalho. A seção seguinte introduzirá a fundamentação teórica necessária para executar a simulação de instalação de dutos flexíveis em equipamentos submarinos. Posteriormente, será apresentada a metodologia do trabalho, na qual será feita a descrição do método de Conexão Vertical Direta de dutos flexíveis.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Após apresentar a revisão bibliográfica do trabalho, o presente capítulo descreve os fundamentos teóricos necessários para abordar o estudo do comportamento dinâmico de dutos flexíveis que são instalados no mar por meio da Conexão Vertical Direta. Inicialmente, serão apresentados os carregamentos ambientais que atuam em estruturas *offshore*, bem como a teoria de ondas adotada no presente estudo. Em seguida será descrita a modelagem dos movimentos inferidos pela embarcação de instalação de dutos flexíveis e, por fim, será exposto o modelo de interação hidrodinâmica utilizado no presente trabalho.

3.1 Carregamentos Ambientais

Durante a operação de instalação, o duto flexível é submetido a diversos esforços, tais como: peso próprio, interação hidrodinâmica com ondas superficiais oceânicas, correntes marítimas, flutuação e movimentos inferidos pelo navio de instalação. Nesse contexto, o objetivo desta seção é apresentar a modelagem matemática utilizada para representar ondas superficiais oceânicas no estudo proposto.

Carregamentos ambientais podem ser caracterizados por ventos, corrente marítima e ondas superficiais oceânicas. Tipicamente, a Conexão Vertical Direta ocorre apenas em condições ambientais moderadas. Por esse motivo no presente trabalho serão consideradas as modelagens de ondas superficiais e correntes marítimas. Os carregamentos ambientais têm o objetivo de induzir movimentos em unidades flutuantes e representar velocidades e acelerações do fluido que será utilizado para modelagem da interação entre o fluido e as estruturas submersas.

Ondas superficiais podem ser criadas por meio de fenômenos da natureza como: vento, terremotos, condições atmosféricas, campo gravitacional do planeta, entre outros. A literatura apresenta diversas teorias que buscam representar matematicamente a elevação do mar e obter suas componentes de velocidade, aceleração, entre outros. Existem desde teorias relativamente simples, como a teoria linear de Airy, até teorias mais complexas nas quais há possibilidade da modelagem do mar por meio de ondas irregulares. Para a representação matemática da elevação do mar, a teoria linear de ondas progressivas, ou teoria de Airy, é uma abordagem tipicamente utilizada para avaliação de estruturas marítimas.

No presente trabalho a representação matemática de ondas oceânicas, será aproximada por meio da teoria linear de ondas progressivas, também conhecida como teoria de Airy. Apesar de ser uma abordagem simplificada dado o aspecto randômico do mar, o tratamento será utilizado por uma questão de controle do instante de lançamento do MCV em relação ao instante de incidência da maior altura de onda sobre o navio de instalação. Dessa forma, é possível estudar diferentes combinações em relação à altura de onda linear e ao instante de lançamento.

Nessa aproximação admite-se que as ondas são periódicas e uniformes ao longo do tempo, tal que um período T_o e uma altura de onda H_w caracterizam o problema. O período de uma onda é definido como o tempo necessário para a crista da onda viajar a distância de um comprimento de onda, enquanto a altura de onda é definida como a distância vertical entre a crista e o vale adjacente da onda. A Figura 3.1 apresenta os parâmetros utilizados para descrever uma onda progressiva bidimensional de forma esquemática.

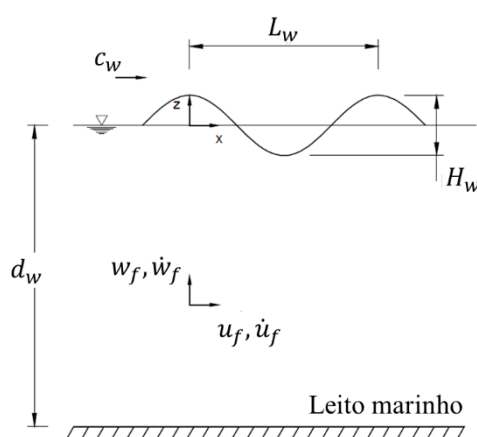


Figura 3.1 – Onda regular progressiva adaptado de Chakrabarti (1987)

O sistema de coordenadas OXZ é posicionado na superfície do mar sem ondas, a onda se propaga no sentido positivo do eixo x, e z representa o eixo vertical. Na Figura 3.1, c_w é a velocidade de propagação da onda, L_w é o comprimento de onda, d_w é a profundidade da superfície até o leito marinho, u_f e w_f são as velocidades da partícula de fluido no eixo horizontal e vertical respectivamente.

Para obter a formulação apropriada da teoria linear de onda, um problema de valor de contorno é resolvido de forma analítica, em que as devidas simplificações e condições de contorno são consideradas nos extremos do problema. De forma a simplificar a abordagem, a hipótese adotada considera que o fluxo é bidimensional, o fluido é ideal, o escoamento é irrotacional e a equação da continuidade impõe que a massa de fluido é conservada.

Com objetivo de obter uma solução para o problema, a altura de onda H_w é considerada pequena quando comparada à profundidade d_w ou ao comprimento de onda L_w . Essa hipótese é aceita para problemas que consideram águas profundas. Adicionalmente, admite-se a existência de um potencial de velocidades Φ para um fluxo bidimensional.

O escoamento potencial é uma classe de escoamentos em que o campo de velocidades é determinado pelo gradiente da função potencial. Nesse contexto, a conhecida equação de Laplace pode ser expressa conforme a Equação (3.1).

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0 \quad (3.1)$$

em que, Φ é a função potencial de velocidade, x é a coordenada horizontal da partícula de fluido, e z é a coordenada vertical da partícula de fluido.

A teoria linear de ondas considera apenas os termos de primeira ordem das condições de contorno. Dessa forma, o comportamento do extremo inferior do problema ilustrado na Figura 3.1 é governado pela condição de contorno definida pela equação (3.2), na qual o leito marinho é considerado plano e rígido e a profundidade d_w não varia ao longo do eixo x .

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{z=-d_w} = 0 \quad (3.2)$$

A superfície livre da onda é governada pelas condições de contorno conforme as Equações (3.3) e (3.4).

$$\left(\frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) \Big|_{z=0} = 0 \quad (3.3)$$

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + g\eta \right) \Big|_{z=0} = 0 \quad (3.4)$$

em que, g representa a aceleração da gravidade, t é a variável temporal do problema, e η é a elevação da superfície do mar.

As condições de contorno propostas até este momento não consideram estruturas submersas no fluxo que está sendo analisado. Dessa forma, a presente abordagem supõe que o

escoamento ocorre de forma livre ao longo do sentido de propagação da onda, no qual não existe obstrução por nenhum corpo submerso. O modelo matemático que representa a interação entre ondas, correntes marítimas e a estrutura submersa será demonstrado no texto mais adiante.

A função potencial de velocidades Φ deve satisfazer a equação (3.1), além das três condições de contorno listadas acima. O problema de valor de contorno pode ser resolvido por meio da técnica de separação de variáveis. Dessa forma, o potencial de velocidades que corresponde à solução do problema de valor de contorno é apresentado na equação (3.5), conforme detalhado por Chakrabarti (1987).

$$\Phi = \frac{\pi H_w}{k T_o} \frac{\cosh k(z + d_w)}{\sinh k d_w} \sin(kx - \omega t) \quad (3.5)$$

em que, $k (=2\pi/L_w)$ é o número de onda, $\omega (= 2\pi/T_o)$ é a frequência angular da onda e x é a coordenada horizontal da partícula de fluido.

Para problemas modelados em águas profundas, o valor do número de onda pode ser aproximado para $k = \omega^2/g$. Substituindo a equação (3.5) em (3.3), pode-se obter a elevação do mar η ao longo do eixo x para cada instante de tempo t .

$$\eta = \frac{H_w}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (3.6)$$

A partir da função potencial de velocidade é possível obter a velocidade da partícula de fluido em cada um dos eixos. De particular interesse para a modelagem matemática da interação hidrodinâmica entre o fluido e o duto flexível, a velocidade da partícula de fluido no eixo horizontal pode ser calculada por meio da equação (3.7).

$$u_f = \frac{\partial \Phi}{\partial x} = \frac{\pi H_w}{T_o} \frac{\cosh k(z + d_w)}{\sinh k d_w} \cos(kx - \omega t) \quad (3.7)$$

A aceleração da partícula de fluido pode ser obtida por meio da primeira derivada da equação (3.7). Velocidades e acelerações da corrente marítima na região de interação com os corpos submersos são variáveis de interesse para o cálculo de esforços hidrodinâmicos atuantes na estrutura que será analisada. De forma similar, a modelagem descrita nessa seção

será utilizada para representação do movimento inferido ao navio de instalação de dutos flexíveis, que será demonstrado a seguir.

3.2 Navio de instalação de dutos flexíveis

Após apresentar a teoria utilizada para modelar os carregamentos ambientais, esta seção tem como objetivo detalhar o tipo de navio utilizado para realizar a operação de Conexão Vertical Direta e apresentar o modelo matemático que descreve o movimento do navio de instalação de duto flexível.

A operação de lançamento de dutos flexíveis em ambiente *offshore* é feita por meio de navios conhecidos como *Pipe Laying Reel Ship*, onde o tubo é armazenado em bobinas e lançado ao mar à medida que o navio percorre a rota de lançamento do duto. Bai e Bai, (2014) discutem as vantagens e desvantagens do uso desse tipo de navio e concluem que esse método de instalação apresenta benefícios em relação ao custo da operação quando comparados aos métodos em que um duto fabricado em aço é soldado durante a operação de instalação.

A operação de Conexão Vertical Direta é realizada por meio de um navio específico conhecido como *Pipe Laying Support Vessel* (PLSV). Essa embarcação possui os equipamentos que são necessários para a realização da operação, como por exemplo os sistemas de guindastes, guinchos, armazenamento de dutos, sistema de posicionamento dinâmico da embarcação, entre outros. Dutos flexíveis são fabricados de forma contínua em fábricas localizadas próximas à costa do mar e podem ser armazenados em bobinas ou cestas a depender de sua geometria e de seus acessórios, como descreve Bicudo (2009).

O PLSV possui um sistema de tracionadores que tem por objetivo sustentar o peso do duto flexível e operar de maneira controlada o lançamento do duto. Um nível elevado de carregamentos aplicados ao duto é esperado durante instalações realizadas em grandes profundidades. Por esse motivo, De Sousa et al. (2001) propõem o estudo dos esforços induzidos pelos tracionadores no duto flexível. Por muitas vezes, a limitação mecânica do próprio tubo impõe restrições na operação. Os tracionadores possuem sapatas montadas em esteiras conhecidas como lagartas, as quais sustentam o tubo por meio de uma estrutura de lançamento embarcada.

O guindaste do PLSV é utilizado com principal objetivo de instalar e recuperar equipamentos submarinos. Para o caso particular da Conexão Vertical Direta, o guindaste principal do navio é utilizado para realizar a manobra de aproximação e instalação do MCV.

De forma secundária, o guindaste também exerce a função de movimentação de cargas no convés do navio e de posicionamento dos equipamentos para posterior instalação.

De particular interesse para este trabalho, o PLSV será modelado com objetivo de sustentar o MCV por meio do cabo de instalação e suportar o duto flexível. No presente trabalho, o duto flexível é considerado armazenado em bobinas localizadas na popa do navio. Os movimentos do navio são transmitidos para ambos componentes em diferentes fases da simulação. Dessa forma, a Figura 3.2 mostra as direções de incidência de onda e os movimentos de corpo rígido dos seis graus de liberdade do PLSV. São eles: três translações e três rotações em relação aos seus três eixos.

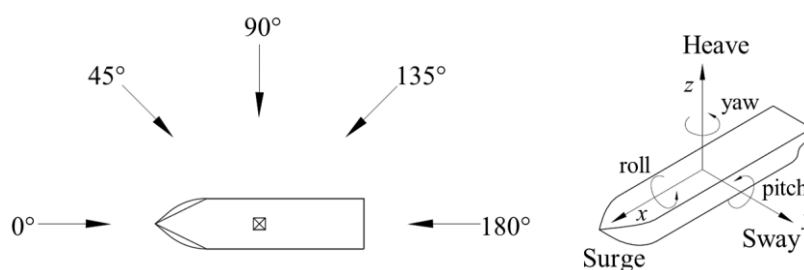


Figura 3.2 – Movimento de corpo rígido de um navio

- *Surge* – Avanço – Movimento de translação na direção do eixo x.
- *Sway* – Deriva – Movimento de translação na direção do eixo y.
- *Heave* – Afundamento – Movimento de translação na direção do eixo z.
- *Roll* – Jogo – Movimento de rotação em torno do eixo x.
- *Pitch* – Arfagem – Movimento de rotação em torno do eixo y.
- *Yaw* – Guinada – Movimento de rotação em torno do eixo z.

Historicamente, os primeiros PLSV utilizados em operações de Conexão Vertical Direta não eram equipados com um sistema de compensação de *Heave*. O compensador de *Heave* tem por objetivo reduzir os movimentos verticais que a embarcação infere ao sistema que está sendo suspenso. Uma vez que o MCV é suportado pelo guindaste do navio, o principal objetivo é minimizar seu movimento vertical durante a aproximação com o equipamento submarino. Os navios mais modernos possuem o dispositivo de compensação de movimento instalado no guindaste principal. Entretanto, de forma conservadora o estudo proposto neste trabalho não considera compensação de movimento vertical da embarcação.

A frequência de encontro e altura de onda pode excitar os movimentos de uma embarcação em diferentes direções. Cabe ressaltar que um navio apresenta diferentes comportamentos para os diversos ângulos de incidência possíveis de uma onda. Dos diversos sentidos de incidência de onda listados na Figura 3.2, apenas a incidência de ondas em 0 grau é considerada no presente estudo.

Com objetivo de investigar o comportamento do navio de instalação de dutos flexíveis em diferentes estados de mar, a função de transferência conhecida como Operador de Amplitude de Resposta (RAO) é utilizada. O RAO é usualmente estudado na fase de projeto da embarcação e pode ser obtido por meio de experimentos de modelo de escala reduzida ou de simulações numéricas. O RAO estabelece uma relação entre os movimentos do mar e da unidade flutuante. Conforme apresentado por Orcina (2018), o movimento de um navio é descrito pela equação (3.8).

$$X = R_{RAO} A_w \cos(\omega t + \phi_{RAO}) \quad (3.8)$$

em que, X é o movimento do navio em cada um dos graus de liberdade, R_{RAO} é o Operador de Amplitude de Resposta, A_w é a amplitude de onda, e ϕ_{RAO} é a fase entre a onda incidente e o movimento do navio.

A Tabela 3.1 resume as principais dimensões do PLSV típico que será utilizado nos estudos de Conexão Vertical Direta apresentados nesta dissertação.

Tabela 3.1 – Principais dimensões do navio PLSV típico

Descrição	Dimensão (m)
Comprimento total	129,9
Boca	27,8
Calado	6,7

No presente estudo, o movimento do navio de instalação de duto flexível é representado pelo RAO de um PLSV utilizado no trabalho de Bicudo (2009). Para as diversas direções de incidência de onda possíveis, no presente trabalho será estudada a incidência de onda de zero grau por ser o dado disponível para um PLSV típico de instalação de dutos

flexíveis. Dessa forma, a Figura 3.3 apresenta o RAO de amplitude e a fase dos movimentos do navio para um ângulo de incidência de onda de zero grau.

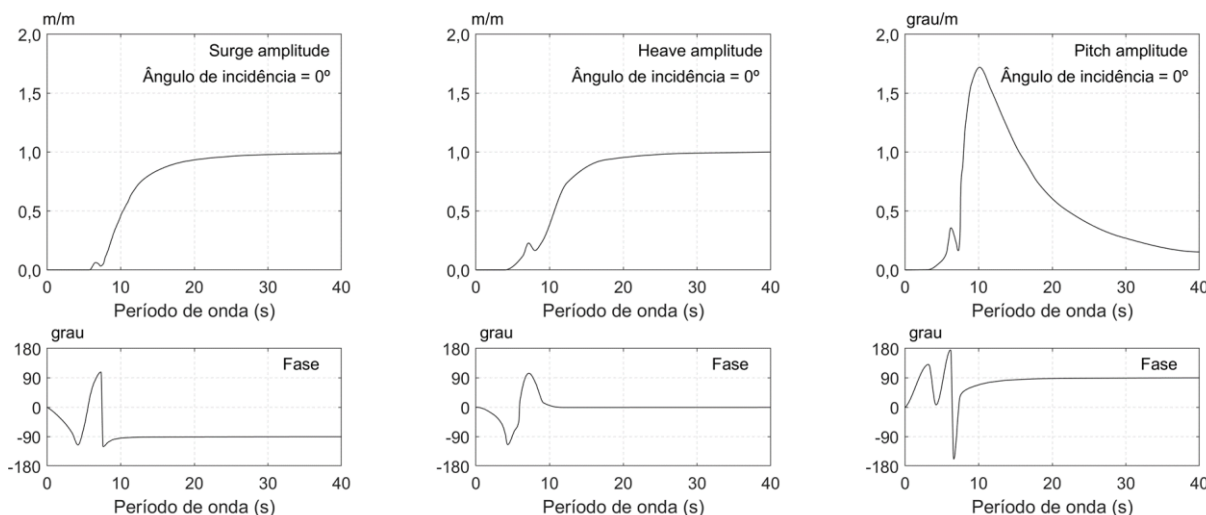


Figura 3.3 – Operador de Amplitude de Resposta do PLSV adaptado de Bicudo (2009)

O RAO fornece o movimento da embarcação em um ponto específico do corpo rígido, o qual, é considerado no centro de gravidade da embarcação no presente trabalho. O RAO do PLSV é utilizado nas simulações numéricas com objetivo de representar o movimento da embarcação durante a operação de Conexão Vertical Direta.

3.3 Forças hidrodinâmicas

As seções anteriores apresentaram a modelagem matemática do movimento de ondas superficiais oceânicas e de um navio do tipo PLSV. Posteriormente, este capítulo resume o modelo matemático utilizado para representar as forças de interação entre o fluido e uma estrutura submersa.

Durante a operação de Conexão Vertical Direta, os equipamentos que operam submersos estão submetidos aos efeitos de interação entre o fluido e a estrutura. Conforme descrito por Chakrabarti (1987), as forças hidrodinâmicas em problemas *offshore* podem ser representadas de acordo com três abordagens: teoria de difração, teoria de Froude – Krylov, e equação de Morison.

A teoria de difração é considerada quando o tamanho característico da estrutura é grande o suficiente para modificar as características do campo da onda nas redondezas do corpo

submerso. O número de Keulegan-Carpenter (KC) determina a importância do efeito da difração no problema. Esse método é utilizado principalmente quando o tamanho característico da estrutura submersa é da mesma magnitude ou maior que o comprimento de onda estudada. A solução analítica desse método é possível apenas para os casos mais simples. No geral, a solução da equação de Laplace com as condições de contorno apropriadas utiliza técnicas numéricas de aproximação.

Nos casos em que o tamanho da estrutura é relativamente pequeno quando comparado com o comprimento de onda, a força induzida pelo fluido na estrutura pode ser representada pela soma de um primeiro termo proporcional à inércia da estrutura e um segundo termo proporcional à força de arrasto do corpo. Nesse contexto, a teoria de Froude Krylov pode ser aplicada para o caso em que a parcela inercial é predominante em relação ao arrasto. A vantagem desse método é que para corpos simétricos a solução pode ser obtida de forma analítica e os coeficientes, no geral, podem ser facilmente determinados.

De forma similar, a equação proposta por Morison et al. (1950), é aplicável ao caso em que a força de arrasto predomina quando comparada ao componente inercial. No presente estudo, a abordagem da equação modificada de Morison é utilizada para representar a interação entre o fluido e a estrutura dos equipamentos que estão submersos. A equação é descrita por meio de uma parcela que depende da inércia do corpo, representada por um coeficiente inercial C_M e uma parcela devido ao arrasto hidrodinâmico C_D , em que a força gerada depende do coeficiente de arrasto hidrodinâmico, da velocidade do fluido e da geometria do corpo submerso. Ambos coeficientes são determinados de forma empírica. A parcela inercial e a força de arrasto são combinadas. A equação (3.9) mostra a forma mais simples da equação originalmente proposta por Morison.

$$f = C_M \rho_w A \dot{u}_f + \frac{1}{2} C_D \rho_w D_o |u_f| u_f \quad (3.9)$$

em que, f representa a força por unidade de comprimento no sentido normal do duto flexível, ρ_w é a massa por unidade de volume do fluido, C_M é o coeficiente de inércia, C_D é o coeficiente de arrasto hidrodinâmico, u_f é a velocidade local da partícula de fluido na linha de centro do duto e A é a área da seção transversal do diâmetro externo ($= \pi D_o^2/4$).

Na equação (3.9), a parcela inercial é definida com os termos que são multiplicados pelo coeficiente inercial C_M . O princípio do componente inercial é que a partícula de fluido que está presente próxima ao corpo submerso também possui inércia. Uma vez que o corpo

submerso se movimenta, ele também deve movimentar parte dessa massa de fluido que está ao seu redor. Dessa forma, é observado um aumento no trabalho necessário para realizar um movimento em corpos submersos. O coeficiente inercial é o nome dado ao coeficiente que multiplica a parcela da inércia adicional necessária para o corpo realizar o movimento.

A segunda parcela da equação (3.9) compõe os termos que são multiplicados pelo coeficiente de arrasto hidrodinâmico C_D . O conceito relacionado ao arrasto hidrodinâmico prevê a existência de um diferencial de pressão entre a montante e a jusante do escoamento quando o fluido passa pelo corpo. O coeficiente hidrodinâmico é o nome dado ao coeficiente que multiplica a parcela de arrasto hidrodinâmico da equação de Morison.

O caráter empírico da equação de Morison coloca em discussão sua aplicação para casos mais complexos do que o problema inicialmente proposto. Entretanto, diversos estudos foram realizados com objetivo de obter uma forma analítica para descrever a interação entre a estrutura *offshore* e o fluido presente no ambiente marinho, como apresenta Sarpkaya (2010). Até a presente data, a teoria proposta pela equação de Morison ainda é considerada a mais apropriada para abordar tais problemas e se demonstra robusta quando comparada aos diversos testes em escala que estão disponíveis na literatura.

A equação de Morison foi inicialmente descrita para estudar a interação hidrodinâmica entre ondas que se propagam no sentido horizontal com um tubo vertical que se estende do fundo do mar até a superfície livre. A literatura apresenta uma vasta quantidade de publicações em que a equação de Morison foi modificada com objetivo de representar casos diferentes daquele que foi inicialmente proposto.

Para um cilindro rígido que é livre para se movimentar em presença de ondas, a equação de Morison pode ser escrita por meio do modelo de velocidade relativa, que é extensamente utilizado no projeto de plataformas *offshore*. O coeficiente inercial C_M é obtido por meio da conhecida relação $C_M = (1 + C_a)$. A equação modificada de Morison utilizada no presente trabalho é descrita por Orcina (2018).

$$f = \rho_w A \ddot{u}_f + \rho_w C_a A (\dot{u}_f - \ddot{d}) + \frac{1}{2} C_D \rho_w D_o |u_f - \dot{d}| (u_f - \dot{d}) \quad (3.10)$$

em que, C_a representa o coeficiente de massa adicional e d é o deslocamento de cada nó da estrutura do duto flexível.

A primeira parcela da equação (3.10) corresponde ao componente de aceleração do fluido, conhecido como componente de Froude– Krylov. A segunda parcela corresponde ao

componente de massa adicional, sendo esta proporcional à aceleração relativa entre o corpo submerso e o fluido. A terceira parcela representa o arrasto hidrodinâmico, conforme descrito anteriormente.

Os coeficientes hidrodinâmicos C_M , C_a , e C_D dependem de propriedades físicas do corpo submerso e parâmetros do escoamento do fluido. Como exemplo lista-se: geometria do corpo, rugosidade superficial do material, número de Reynolds, velocidade reduzida, entre outros. Os coeficientes hidrodinâmicos são dados obtidos de forma empírica e apresentam uma grande variação de resultados para diferentes metodologias e aparatos experimentais. Ademais, uma extensa literatura apresenta uma discussão da dependência de coeficientes hidrodinâmicos em diversos desses parâmetros aqui listados.

No modelo proposto pelo presente trabalho, a parcela de força de arrasto aplicada ao nó do modelo de duto flexível é calculada utilizando o princípio *cross-flow*. Ou seja, a velocidade relativa entre o fluido e o duto é dividida em componentes normal e paralela ao eixo do duto flexível. O modelo utiliza a componente normal do esforço combinada com a área apropriada do duto flexível para calcular o esforço de arrasto hidrodinâmico.

Conforme apresentado na seção anterior, as propriedades cinemáticas da equação de Morison, velocidade e aceleração da partícula de fluido, são obtidas por meio da teoria linear de ondas. Dessa forma, o presente trabalho utiliza a teoria apresentada até este ponto para modelar os esforços externos atuantes em dutos flexíveis durante a operação de Conexão Vertical Direta.

A presente seção teve como objetivo descrever a fundamentação teórica do trabalho para posteriormente descrever as simulações numéricas que serão executadas para avaliar os esforços atuantes durante a Conexão Vertical Direta de um duto flexível. Os modelos matemáticos propostos serão elaborados de acordo com a literatura disponível para simulações globais de dutos flexíveis em ambiente marítimo. O capítulo seguinte descreverá a metodologia adotada para execução de tais simulações.

4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia adotada no presente trabalho. Conforme apresentado nas seções anteriores, o objetivo é estudar os esforços induzidos pelo duto flexível durante a Conexão Vertical Direta. Para essa finalidade, simulações numéricas são executadas com objetivo de avaliar a operação e estudar os esforços atuantes na conexão entre o MCV e o duto flexível.

Um modelo numérico é desenvolvido por meio do programa comercial OrcaFlex, em que os carregamentos ambientais, o movimento do navio e a força hidrodinâmica atuante nos corpos são modelados internamente na rotina do programa. A rigidez do equipamento residente é representada por meio de uma função externa definida pelo usuário, conforme ilustrado na Figura 4.1.

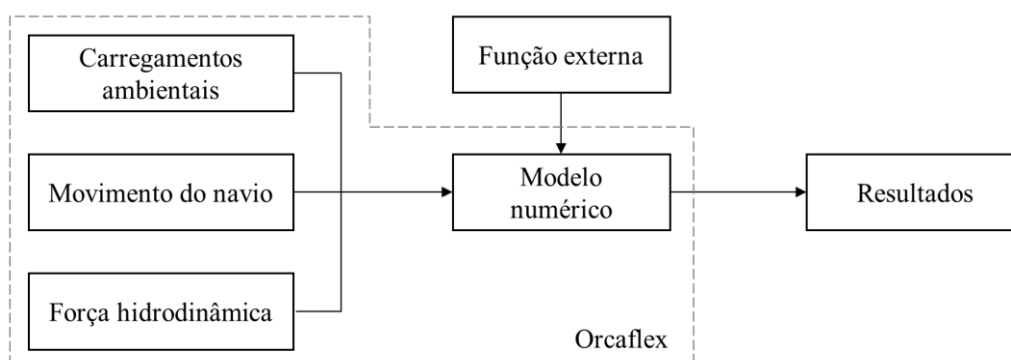


Figura 4.1 – Fluxograma das etapas necessárias para metodologia do estudo

Para avaliação dos esforços atuantes durante a operação, um estudo de sensibilidade é proposto onde os coeficientes hidrodinâmicos são variados em relação a um caso típico adotado. Adicionalmente, será estudada a influência da velocidade de lançamento do cabo de instalação na operação de conexão. O objetivo é obter os esforços induzidos pelo duto flexível no MCV durante sua operação de conexão e estudar a influência de tais parâmetros.

Inicialmente, este capítulo descreve os detalhes da operação de Conexão Vertical Direta em primeira extremidade. Em seguida são apresentados os modelos matemáticos necessários para representar a operação. Posteriormente é demonstrada a função externa utilizada nas simulações numéricas e a metodologia para representação da rigidez do equipamento submarino. Por fim, os detalhes do modelo matemático e da operação são abordados em conjunto com os fundamentos teóricos apresentados no capítulo anterior.

4.1 Conexão Vertical Direta

O método de Conexão Vertical Direta de dutos flexíveis foi inicialmente apresentado como uma alternativa aos métodos de conexões existentes no início da exploração de águas profundas no Brasil, conforme detalha Brandão e Couto (1992). A operação consiste em executar a conexão de dutos flexíveis em equipamentos submarinos por meio de um módulo de conexão conhecido como MCV. Tal equipamento tem o objetivo de conectar o duto flexível no sentido vertical, utilizando o peso próprio do MCV em conjunto com a ação da gravidade para posicionar o duto no sentido do equipamento submarino.

Conforme visto nos capítulos anteriores, a Conexão Vertical Direta pode ser classificada em conexão de primeira extremidade ou de segunda extremidade. No contexto do presente trabalho, será abordada a Conexão Vertical Direta de primeira extremidade, em que a extremidade inferior do duto se encontra com o MCV posicionado para executar a instalação e a extremidade superior está sendo suspensa pelo navio de instalação. Tal caso será estudado por se tratar de um método em que o duto flexível está sob maior influência dos movimentos do navio de instalação e dos carregamentos ambientais.

Koto (2017) descreve os passos necessários para instalar um duto flexível por meio da Conexão Vertical Direta. A Figura 4.2 apresenta o estágio inicial da instalação em que o MCV é conectado ao duto flexível e lançado ao mar por meio de um cabo de instalação.

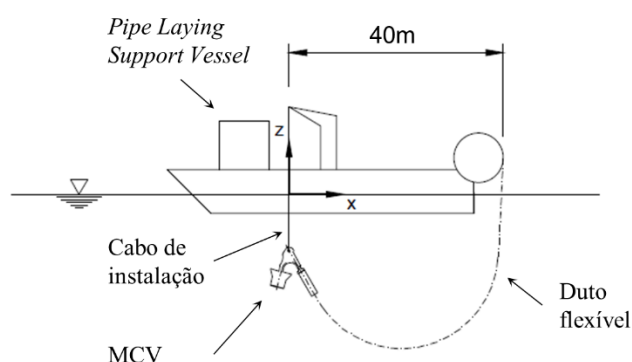


Figura 4.2 – Estágio inicial da Conexão Vertical Direta

Inicialmente, ainda no convés do navio, o MCV é conectado ao duto flexível por meio de parafusos em uma junta flangeada. Posteriormente, o equipamento é lançado ao mar com o auxílio de um cabo de instalação. O guindaste do navio controla a velocidade de

lançamento do cabo de instalação, de forma que o comprimento de cabo lançado durante a instalação deve ser compensado com o lançamento do duto flexível. Dessa forma, objetiva-se verticalizar o sistema tanto quanto possível.

Nessa operação, o duto flexível é solidário ao MCV, o que pode desalinhar o sistema e induzir esforços nos componentes. O MCV é suspenso por meio de um olhal de içamento, o que permite o grau de liberdade para que o equipamento possa rotacionar. Por esse motivo, a transferência de esforços do duto flexível para o flange de conexão do MCV não exerce maior influência nos estágios iniciais.

Durante a operação de descida do MCV, o equipamento é verticalizado com objetivo de obter o alinhamento vertical com o receptáculo do equipamento submarino. A operação é necessária para que exista o mínimo possível de desalinhamento entre os equipamentos. Conforme descrito por Custódio e Pimentel (2012), o desalinhamento nessa fase pode exercer influência negativa no acoplamento do equipamento. A Figura 4.3 mostra, respectivamente, o procedimento de verticalização e o posicionamento do sistema próximo ao equipamento submarino.

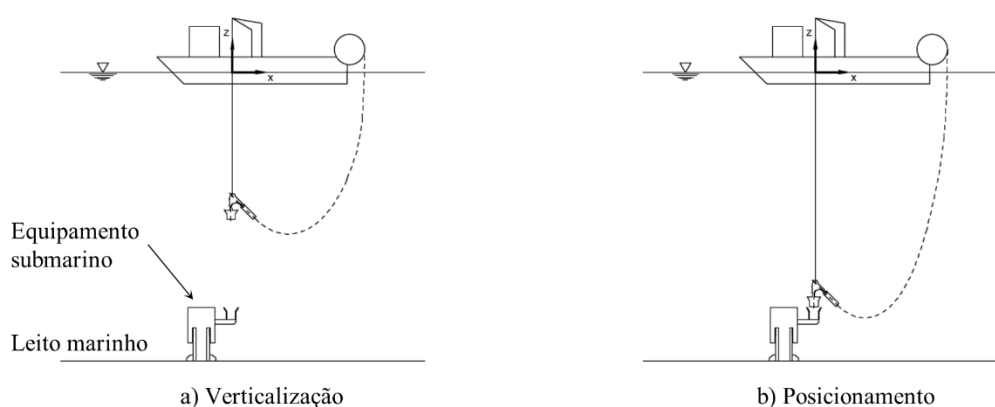


Figura 4.3 – Aproximação do sistema de Conexão Vertical Direta

Após a operação de verticalização do MCV e posterior posicionamento do equipamento próximo ao receptáculo do equipamento submarino, a próxima etapa é realizar a Conexão Vertical Direta. Nessa etapa, o equipamento será lançado em direção ao receptáculo do equipamento submarino e o movimento vertical do sistema será avaliado com objetivo de estudar os esforços induzidos pelo duto flexível.

Cabe ressaltar que o sistema de controle e posicionamento do navio de instalação PLSV desempenha uma função importante no posicionamento e, conseqüentemente, na instalação do duto flexível no equipamento submarino. Entretanto, o referido sistema trabalha

sob limites operacionais, o que torna a operação totalmente dependente das condições ambientais que atuam no instante da conexão. Frequentemente, existe a necessidade de a operação ser abortada para aguardar condições ambientais adequadas para realizar a conexão.

De particular interesse para o presente trabalho, a Figura 4.4 ilustra as duas fases da operação de Conexão Vertical Direta de primeira extremidade que serão estudadas.

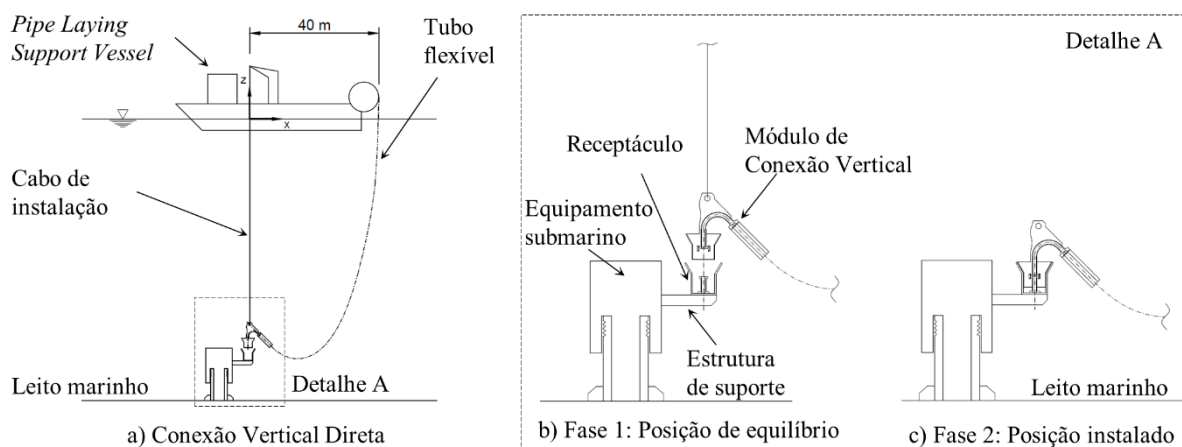


Figura 4.4 - Representação esquemática da operação de Conexão Vertical Direta

A operação final de Conexão Vertical Direta é descrita em duas fases. Na primeira fase, o MCV é posicionado próximo ao receptáculo do equipamento submarino com auxílio de um cabo de instalação. Em seguida, o MCV é lançado na direção do receptáculo para realizar a conexão (Fase 2). Em navios de instalações modernos, pode-se utilizar o compensador de *heave* no cabo de instalação com objetivo de minimizar o movimento vertical transmitido para o MCV. Dessa forma, a velocidade de lançamento do cabo é controlada no guincho que está instalado no guindaste do navio de instalação.

O presente trabalho estuda os esforços induzidos pelo duto flexível durante as duas fases descritas na Figura 4.4. A partir do instante em que o MCV está conectado ao equipamento submarino, a extremidade superior do duto flexível ainda permanece sob dois efeitos: o movimento prescrito pelo navio de instalação e carregamentos ambientais. Por esse motivo, esforços excessivos podem ocorrer durante esta etapa da instalação. Esforços excessivos podem ser originados, principalmente, devido à perda de posição do navio de instalação.

O duto flexível é utilizado para auxiliar na verticalização do MCV, uma vez que é possível controlar o comprimento lançado pelo navio de instalação. O sistema de lançamento do duto flexível, que está instalado no navio, possui um sistema de esteiras que se acopla à

camada externa do duto por meio de sapatas e promove o controle da velocidade de lançamento vertical do duto.

Além de executar a conexão do duto flexível com o equipamento submarino, o MCV também atua como um fusível mecânico do sistema. Caso existam esforços excessivos durante a instalação, o *Gooseneck* deve romper. O objetivo é manter a integridade estrutural do equipamento submarino, uma vez que um carregamento imprevisto durante a operação de instalação pode danificar o sistema de controle do poço.

Dessa forma, o MCV deve apresentar resistência mecânica suficiente para resistir aos esforços de instalação do duto. Porém deve ser o ponto mais fraco quando instalado no equipamento submarino para manter sua característica de fusível mecânico. Uma vez que os esforços induzidos por carregamentos ambientais são relevantes para tal operação, ambas características impõem desafios no projeto do equipamento e do sistema de instalação.

A Figura 4.5 mostra uma representação esquemática dos componentes que operam durante a instalação do duto flexível por meio da Conexão Vertical Direta conforme descrito por Santos et al. (2015).

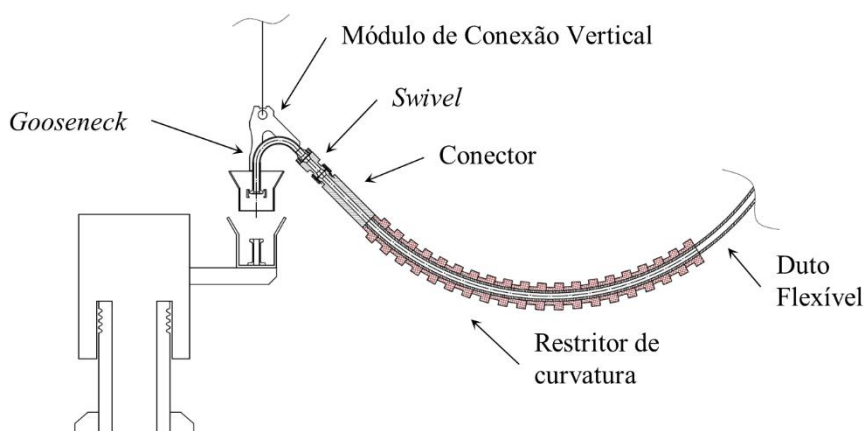


Figura 4.5 – Componentes do sistema de instalação do duto flexível

O *swivel* utilizado na montagem do sistema de instalação tem por objetivo eliminar a torção induzida pelo duto flexível durante a instalação. Tal equipamento possui um sistema de mancais internos que permite a rotação no flange de conexão em relação ao MCV. Uma vedação metal-metal é utilizada para manter estanque o diâmetro interno do duto.

O conector do duto flexível geralmente é fabricado em aço forjado e representa a terminação das camadas entrelaçadas em material metálico combinado com as camadas poliméricas do duto flexível. Quando comparado ao duto flexível, o conector apresenta alta rigidez e peso por comprimento.

O restritor de curvatura é fabricado utilizando diversas vértebras conectadas entre si que limitam a curvatura do duto flexível e tem o objetivo de evitar danos às diversas camadas do duto. Tipicamente, o restritor é um equipamento fabricado em materiais poliméricos em conjunto com metálicos para fornecer baixa rigidez para grandes raios de curvatura e alta rigidez quando o raio de curvatura excede o limite de projeto.

Durante a instalação do duto flexível, o sistema de instalação fica submetido aos movimentos do navio de instalação e aos carregamentos ambientais. Entretanto, durante a operação, esforços excessivos podem ocorrer no sistema, o que pode levar a falha de componentes. Com objetivo de evitar falhas nos equipamentos, a operação é continuamente analisada enquanto está ocorrendo no campo. A equipe embarcada no navio de instalação utiliza um ROV para capturar imagens da operação. De forma simultânea, as imagens são enviadas para uma equipe em terra, que, por sua vez avalia os esforços induzidos pelo duto flexível. A Figura 4.6 mostra o instante em que o MCV está acoplado ao equipamento submarino, porém, a extremidade superior do duto flexível ainda está sob efeito da excitação das ondas do mar.

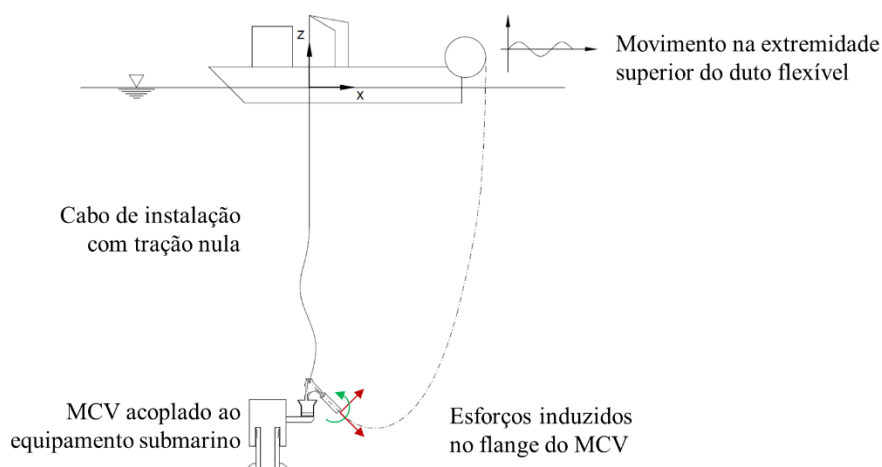


Figura 4.6 – Conexão Vertical Direta – MCV acoplado ao equipamento submarino

O MCV possui uma estrutura de orientação em sua base, que tem como objetivo realizar o acoplamento com o receptáculo do equipamento submarino. A estrutura conhecida como funil de orientação é fabricada em chapas de aço e fabricada por meio de componentes calandrados e de pinos de orientação para assentar o MCV na posição correta. Como o funil tem a função de orientar o equipamento, por vezes essa é a região que mais sofre danos durante a instalação.

Acoplado ao funil de orientação, existe um conjunto de pistões conhecido como *soft landing*, que tem por objetivo suavizar o assentamento final do MCV no receptáculo do

equipamento submarino. Esse componente foi introduzido no sistema com objetivo de evitar danos à sede de vedação metal-metal entre o MCV e o mandril de assentamento do equipamento submarino. Danos em tal área de vedação poderiam gerar a necessidade de recuperar o equipamento submarino, o que causaria atrasos no cronograma de desenvolvimento do campo, além de elevados custos financeiros.

A presente seção teve como objetivo descrever a operação de instalação de dutos flexíveis em equipamentos submarinos estudados neste trabalho. Os componentes que atuam durante a Conexão Vertical Direta foram detalhados e suas funções durante a operação foram caracterizadas.

4.2 Modelo Numérico

Após detalhar o método de instalação utilizando a Conexão Vertical Direta, esta seção introduz o modelo numérico utilizado no presente trabalho. Conforme descrito na Figura 4.1, inicialmente a seção descreve o modelo utilizado pelo programa computacional OrcaFlex. Em seguida, identifica a teoria necessária para estudar os esforços induzidos pelo duto flexível durante a operação de acoplamento do MCV com o equipamento submarino.

4.2.1 Modelo de parâmetros concentrados

Com objetivo de representar o duto flexível nas simulações, o modelo de parâmetros concentrados proposto por Orcina (2018) é utilizado no presente trabalho. Essa abordagem é apropriada para modelagem numérica de elementos estruturais que apresentam baixa rigidez à flexão quando comparado a rigidez axial. Como exemplos de tais estruturas, listam-se: cabos, mangueiras, correntes, dutos flexíveis, entre outros.

Inicialmente o duto flexível é dividido em uma série de seguimentos, unidos por meio de nós. Cada segmento é representado por um sistema mola-amortecedor. A mola tem a função de representar a rigidez axial do duto, enquanto o amortecedor representa os mecanismos internos de dissipação de energia do material. Propriedades físicas do duto e forças externas (massa, peso, flutuação, força hidrodinâmica) são concentradas de forma discreta em

cada nó. A Figura 4.7 mostra a representação esquemática do modelo estrutural e sua aplicação no estudo proposto no presente trabalho.

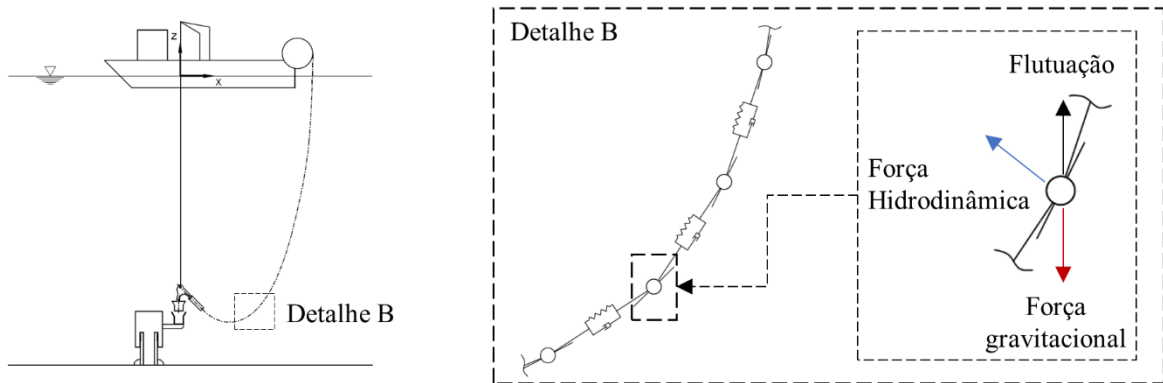


Figura 4.7 – Modelo de parâmetros concentrados

A rigidez axial do duto é representada no modelo matemático por meio de molas lineares, enquanto a rigidez à flexão é considerada por meio de molas flexionais. O modelo assume que seções transversais planas e ortogonais ao eixo do duto permanecem planas e ortogonais após a deformação. A equação do movimento que descreve o comportamento dinâmico de cada nó do sistema é dada pela equação (4.1).

$$[M]\{\ddot{d}\} + [C]\{\dot{d}\} + [K]\{d\} = \{f\} \quad (4.1)$$

em que, $[M]$ é a matriz diagonal de massa concentrada, $[C]$ é a matriz de amortecimento estrutural conforme a teoria de Rayleigh, $[K]$ é a matriz de rigidez dos segmentos, $\{d\}$ é o vetor de deslocamento nodal e $\{f\}$ é o vetor de forças externas. A derivada temporal de uma quantidade é indicada utilizando-se a notação de Newton $\{\dot{}\}$.

A equação (4.1) é integrada de forma numérica implícita por meio do algoritmo Alpha Generalizado, conforme proposto por Chung e Hulbert (1993). A modelagem utiliza o modelo linear para rigidez axial dos segmentos. Dessa forma, a tração atuante em cada nó pode ser determinada por meio da equação (4.2), conforme detalhado por Sparks (2007).

$$T_w = EA \varepsilon - 2\nu(P_o A_o - P_i A_i) \quad (4.2)$$

em que, T_w é o esforço interno de tração no segmento tubular, EA é a rigidez axial do duto, ε é a deformação axial do segmento, ν é o coeficiente de Poisson, P_i é a pressão interna ao duto

flexível, P_o é a pressão externa, A_i é a área interna da seção transversal do duto e A_o é a área externa da seção transversal do duto.

O momento fletor é considerado por meio de um modelo linear isotrópico. Tal esforço é aproximado pela relação direta entre a rigidez à flexão do duto e a curvatura descrita por três nós em segmentos adjacentes. A magnitude do momento fletor atuante é mostrada na equação (4.3).

$$M_y = EI c \quad (4.3)$$

em que, M_y é o momento fletor, EI é a rigidez à flexão do duto flexível e c representa a curvatura do duto para um dado nó.

O esforço cortante é obtido pela interpolação linear do momento fletor em cada nó da extremidade de um segmento. É considerado que em cada segmento o momento fletor varia entre M_{y1} , em uma primeira extremidade, e M_{y2} na segunda extremidade. Dessa forma, o esforço cortante representa a taxa de variação do momento fletor ao longo do comprimento do segmento e sua magnitude é descrita pela equação (4.4).

$$V_s = \frac{1}{l} (M_{y1} - M_{y2}) \quad (4.4)$$

em que, V_s é o esforço cortante e l é o comprimento do segmento.

Os esforços internos atuantes no duto flexível são monitorados na conexão flangeada entre o MCV e o duto. A correta avaliação da magnitude dos esforços internos pode ajudar no dimensionamento dos equipamentos submarinos e no planejamento da operação de instalação.

4.3 Função externa

Uma vez que o modelo de ondas superficiais oceânicas, os movimentos do navio de instalação e a modelagem de esforços hidrodinâmicos foram definidos em seções anteriores, a presente seção tem como objetivo descrever a função externa utilizada neste trabalho. Para representar a reação que o equipamento submarino impõe ao MCV durante a operação, é proposta uma metodologia cuja rigidez elástica do equipamento submarino é representada por

meio uma viga Euler-Bernoulli com engaste em uma das extremidades e com carregamento pontual concentrado na extremidade livre. Uma rotina é implementada para ser utilizada durante as simulações, o que permite a avaliação das reações do equipamento submarino a cada intervalo de tempo.

O programa computacional OrcaFlex desenvolvido por Orcina (2018) permite que dados gerados por uma função externa definida pelo usuário possam ser utilizados durante as simulações. Nessa abordagem, uma rotina programada em Python é implementada com o objetivo de representar a rigidez do equipamento submarino (Apêndice A).

Para esse propósito, o comportamento do esforço quase-estático do equipamento submarino é substituído pela representação numérica de uma viga Euler-Bernoulli engastada. Dessa forma, é possível obter as reações quando o MCV toca o receptáculo durante a operação de conexão. A Figura 4.8 ilustra a representação esquemática e numérica do equipamento residente que é feita pela função externa.

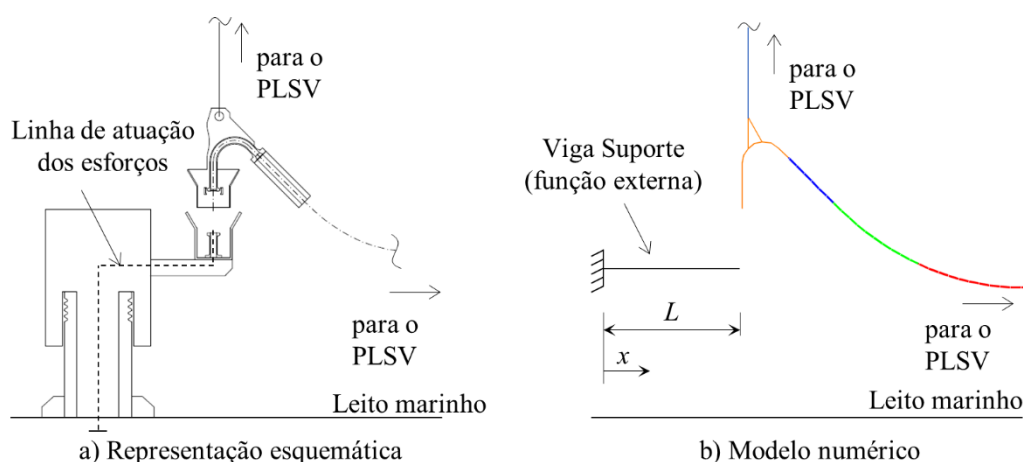


Figura 4.8 – Representação do modelo numérico da Conexão Vertical Direta

A Figura 4.8 apresenta o MCV no instante de sua aproximação com o equipamento submarino. A rigidez elástica da linha de atuação dos esforços entre o receptáculo e o leito marinho é substituída pela rigidez equivalente da viga suporte. No capítulo posterior, será demonstrada a metodologia para determinar a rigidez equivalente da viga suporte a partir de uma geometria existente de um equipamento submarino.

Para abordar o equacionamento matemático, são assumidas as seguintes hipóteses simplificadoras: apenas o deslocamento vertical é considerado, a viga suporte trabalha no regime linear do material, seções transversais planas e inicialmente ortogonais ao eixo da viga permanecem planas e ortogonais após a deformação, pequenos deslocamentos, rotações e deformações devido ao cisalhamento são consideradas desprezíveis. Dessa forma, objetiva-se

representar a rigidez vertical da linha de atuação dos esforços que está representada no equipamento submarino.

A equação diferencial parcial de quarta ordem que descreve o comportamento dinâmico de uma viga Euler-Bernoulli de comprimento L e seção transversal uniforme é representada por:

$$EI_b \frac{\partial^4 w}{\partial x^4}(x, t) + \rho_b A_b \frac{\partial w}{\partial t^2}(x, t) = q(x, t), \quad 0 < x < L \quad (4.5)$$

em que, I_b representa o momento de inércia de área plana da viga suporte, w é a deflexão vertical, ρ_b é a densidade do material da viga, A_b é a área da seção transversal e q representa a força externa por unidade de comprimento que atua na viga suporte.

A primeira parcela da equação (4.5) representa o esforço interno referente à rigidez elástica da viga Euler-Bernoulli, em que o módulo de Young corresponde à propriedade do material e o momento de inércia de área plana descreve a propriedade geométrica da seção transversal da viga suporte. A segunda parcela apresenta o esforço inercial interno necessário para impor aceleração à viga. As duas parcelas de esforços internos devem estar em equilíbrio com a terceira parcela, que representa a força externa por unidade de comprimento.

De forma a simplificar o problema, a parcela inercial da equação (4.5) será desprezada, já que o projeto detalhado do equipamento submarino está fora do escopo deste estudo, cuja finalidade é entender influência da rigidez elástica que o receptáculo impõe na operação. Para tanto, é considerado que o comportamento quase-estático do equipamento submarino é suficiente para representação das reações na linha de atuação dos esforços.

Com objetivo de obter solução da equação diferencial de quarta ordem que governa o comportamento estrutural de uma viga Euler-Bernoulli, visa-se obter uma função que relacione a força externa aplicada à viga suporte e o deslocamento nos infinitos pontos que compõe a viga. Para essa finalidade, são necessárias quatro condições de contorno. As condições de contorno que representam uma viga engastada consideram a deflexão e a inclinação da viga igual a zero em uma das extremidades e a segunda extremidade livre com uma força concentrada P .

As condições de contorno são substituídas na equação (4.5) e a parcela inercial é desconsiderada. Dessa forma, a relação entre o deslocamento vertical nos infinitos pontos de uma viga Euler-Bernoulli e a força externa concentrada P na direção vertical aplicada na extremidade livre da viga pode ser obtida da seguinte forma.

$$w(x) = -\frac{Px^2}{6EI_b}(3L - x) \quad (4.6)$$

A equação (4.6) fornece a configuração geométrica da linha elástica de uma viga Euler-Bernoulli engastada em uma primeira extremidade com uma força concentrada P na segunda extremidade. A inclinação dos diversos pontos da viga deformada pode ser obtida por meio da primeira derivada da equação (4.6). De particular interesse para este trabalho, a deflexão da extremidade livre de uma viga Euler-Bernoulli pode ser obtida substituindo $x = L$, conforme demonstrado a seguir.

$$w(L) = -\frac{PL^3}{3EI_b} \quad (4.7)$$

A equação (4.7) tem como objetivo relacionar o deslocamento vertical de uma viga a uma força externa aplicada em sua extremidade livre. Para cada instante de tempo da análise, o deslocamento da viga suporte é obtido por meio da simulação e a função externa tem o objetivo de retornar o valor de esforço vertical correspondente a tal deslocamento. No contexto do presente trabalho, a força concentrada P será aplicada ao elemento que representa o MCV no instante em que ocorre o toque no equipamento submarino.

A descrição do equacionamento discutido nessa seção teve como objetivo representar a rigidez à flexão do equipamento submarino por meio de uma viga engastada conforme a teoria de Euler-Bernoulli. Dado um equipamento submarino existente, a metodologia para obter o comportamento de rigidez a flexão, aqui representado pela variável EI_b , é abordada na seção a seguir.

4.3.1 Equipamento submarino

A seção anterior demonstrou a metodologia necessária para representar a rigidez da linha de atuação dos esforços de um equipamento submarino qualquer por meio da solução analítica da equação de uma viga Euler-Bernoulli engastada em uma das extremidades. De forma a complementar o estudo, a presente seção descreve o equipamento submarino específico

a ser estudado e apresenta a metodologia utilizada para obter a rigidez elástica da linha de atuação dos esforços.

Dutos flexíveis podem ser conectados aos diversos equipamentos que compõem o sistema marítimo de produção, por exemplo, *manifolds*, terminais, Árvore de Natal Molhada, sistemas híbridos de *risers*, entre outros. O equipamento submarino utilizado no presente estudo é uma BAP. Prado et al. (1999) descreve suas principais funções: fornecer um alojamento para o suspensor de coluna de produção, proporcionar uma estrutura de base para posterior instalação da ANM e sustentar os receptáculos para conexão das linhas de fluxo.

A estrutura primária da BAP (Figura 4.9) estudada neste trabalho é composta por três componentes estruturais. O primeiro componente é o receptáculo, com a forma de funil. Sua principal função é de suportar e orientar o MCV para conexão na posição correta. Tipicamente, cada BAP possui três receptáculos. Dessa forma, cada sistema ANM BAP deve assentar três MCVs. O primeiro receptáculo é utilizado para conexão do MCV da linha auxiliar de acesso ao anular do poço. Um segundo receptáculo tem a função de acoplar o MCV da linha de produção. O terceiro receptáculo é utilizado para a conexão da linha de umbilical de controle. Os receptáculos são componentes geralmente fabricados utilizando chapas aço por meio do processo de calandragem. Em cada receptáculo existe um mandril de conexão para acoplamento do MCV. Por meio de um conector de acionamento hidráulico ou mecânico, o MCV é acoplado ao mandril de forma a promover uma conexão mecânica e estanque.

O segundo componente estrutural é o bloco da BAP, fabricado em aço forjado. Um perfil interno usinado possibilita o assentamento do suspensor de coluna de produção, em que selos do tipo metal-metal são utilizados para vedar as interfaces. Na região inferior ao bloco existe uma estrutura em funil que auxilia a orientação e instalação da BAP no sistema de cabeça de poço. Para o controle de suas funções, atuadores são instalados no bloco da BAP por meio de juntas flangeadas. Usualmente, existe um conector hidráulico do tipo H4 instalado na extremidade inferior do bloco, cujo objetivo é estabelecer a conexão entre a BAP e o alojador de alta pressão que está instalado no sistema de cabeça de poço.

O terceiro componente é a estrutura de suporte da BAP. Sua principal função é ser responsável por suportar os receptáculos e transferir os esforços da instalação do MCV para o bloco da BAP. No geral, são fabricados em perfis laminados unidos por meio de soldas ou juntas parafusadas. A estrutura de suporte também tem função de sustentar as estruturas secundárias da BAP, como painéis do ROV ou escadas de acesso do operador. Com objetivo de simplificar a análise, a estrutura secundária será omitida na presente avaliação.

No presente trabalho, o sistema de cabeça de poço será representado por um padrão típico da indústria do petróleo que utiliza o perfil H4 para realizar a conexão com a BAP. O dimensionamento será feito utilizando um sistema de cabeça de poço padrão de 18 ¾". A Figura 4.9 mostra a representação esquemática do equipamento submarino utilizado.

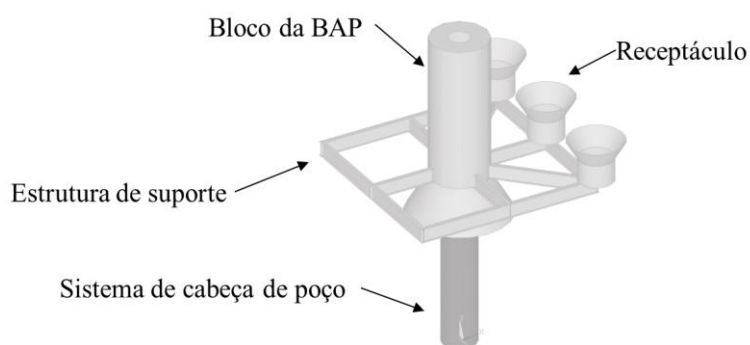


Figura 4.9 – Estrutura primária de uma Base Adaptadora de Produção

Após a instalação da BAP, o suspensor de coluna pode ser assentado internamente ao bloco. A ANM é montada logo acima em uma segunda conexão com perfil H4. Caso exista a necessidade de recuperar a ANM, não há obrigação de remover toda a coluna de produção do poço nem as linhas de fluxo que foram instaladas por meio do MCV. Esse tipo de conceito de projeto adiciona flexibilidade às operações.

Conforme apresentado por Zhao et al. (2015), um anel de vedação metal-metal do tipo VX é utilizado para fazer a vedação entre o sistema de cabeça de poço e o conector da BAP. O conector hidráulico tem a função de aplicar pré-carga na interface e de manter o anel VX em contato com suas sedes.

Durante a instalação do duto flexível, o ponto fraco de toda a linha de atuação dos esforços deve ser o MCV. Por esse motivo, o MCV é classificado como um fusível mecânico do sistema. Eventualmente, caso ocorra um esforço não previsto no duto flexível o *Gooseneck* deve romper. Dessa forma pode-se garantir a integridade estrutural do equipamento submarino, cujas funções de controle do poço encontram-se instaladas.

Com a finalidade de obter uma estimativa da rigidez à flexão do equipamento submarino durante a operação de Conexão Vertical Direta, um modelo de elementos finitos é elaborado no programa computacional comercial ANSYS. Apesar da simplicidade do modelo apresentado, o objetivo do presente trabalho não é projetar o equipamento submarino, mas sim obter a rigidez à flexão da linha de atuação dos esforços para representação do comportamento elástico do equipamento submarino. Para a definição geométrica, as dimensões são obtidas de

forma aproximada conforme o trabalho detalhado em Prado et al. (1999). A Figura 4.10 ilustra a estrutura primária de uma BAP conectada a um sistema de cabeça de poço e seu modelo de elementos finitos.

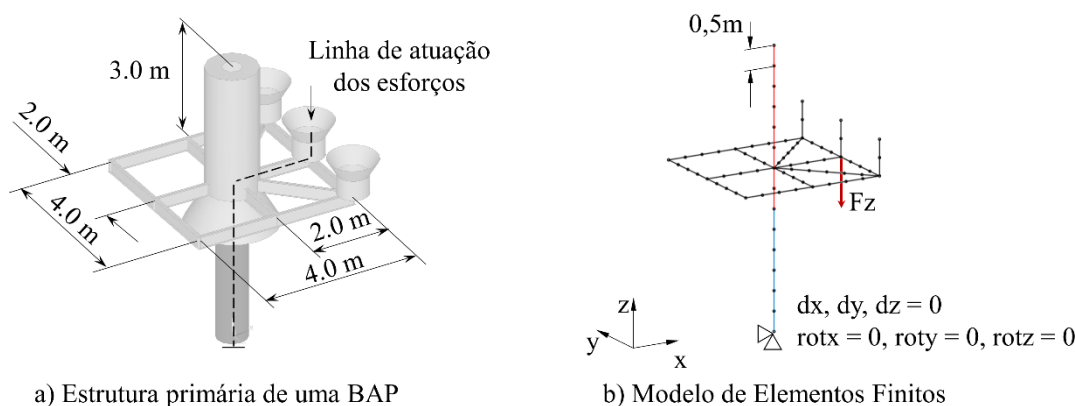


Figura 4.10 – Modelo estrutural da Base Adaptadora de Produção

O sistema de cabeça de poço é composto por um alojador de baixa pressão, que é instalado durante a perfuração do poço, e um alojador de alta pressão. Internamente a esse sistema existem os suspensores de coluna, que são instalados apoiados em ombros de carga. Para simplificar o problema, o sistema de cabeça de poço é modelado como um tubo com as medidas aproximadas do alojador de alta pressão. O solo em contato com a base do sistema de cabeça de poço é considerado infinitamente rígido, conforme ilustrado na Figura 4.10b. Tal hipótese é conservadora uma vez que adotar um modelo rigidez para o solo reduziria a rigidez equivalente do conjunto e consequentemente reduziria os esforços durante a operação.

Um elemento pórtico plano da biblioteca de elementos do ANSYS é considerado com objetivo de avaliar a rigidez à flexão da linha de atuação dos esforços do conjunto BAP e o sistema de cabeça de poço. O elemento tridimensional é definido por dois nós com seis graus de liberdade em cada nó: três deslocamentos em cada direção, e três rotações em torno de cada eixo. A formulação é capaz de representar a rigidez axial e flexional de uma viga. Na Figura 4.10b, os pontos representam os nós e as linhas contínuas representam a linha neutra de cada um dos elementos.

O modelo de material dos componentes estruturais é considerado linear elástico. A simulação é resolvida em passos de carregamento e para cada passo a informação de força e deslocamento são registrados. Na Tabela 4.1 são listadas as propriedades mecânicas e geométricas de cada um dos componentes estruturais da BAP. A estrutura suporte considera um perfil estrutural comercial W 360 x 32,9, o sistema de cabeça de poço utiliza as medidas

aproximadas do diâmetro interno e externo de um alojador de alta pressão típico de 18 ¾". As seções transversais e perfis estruturais do equipamento submarino foram obtidas de forma aproximada com base no trabalho de Prado et al. (1999).

Tabela 4.1 – Elementos estruturais do equipamento submarino

Propriedades	Bloco da BAP	Estrutura de suporte	Receptáculo	Cabeça de poço
Módulo de Young (MPa)	210000	210000	210000	210000
Momento de inércia de área plana (m ⁴)	0,125	$8,358 \times 10^{-5}$	$3,811 \times 10^{-3}$	0,014
Área da seção transversal (m ²)	1,088	$4,241 \times 10^{-3}$	$3,110 \times 10^{-2}$	0,278

Uma força vertical no sentido do vetor F_z , como indicado na Figura 4.10 b, é aplicada ao receptáculo central para obter a rigidez da linha de atuação dos esforços. O objetivo é obter a curva de deflexão da estrutura neste ponto. A Figura 4.11 apresenta o resultado obtido por meio do modelo de elementos finitos que representa a rigidez da linha de atuação dos esforços do conjunto BAP e sistema de cabeça de poço.

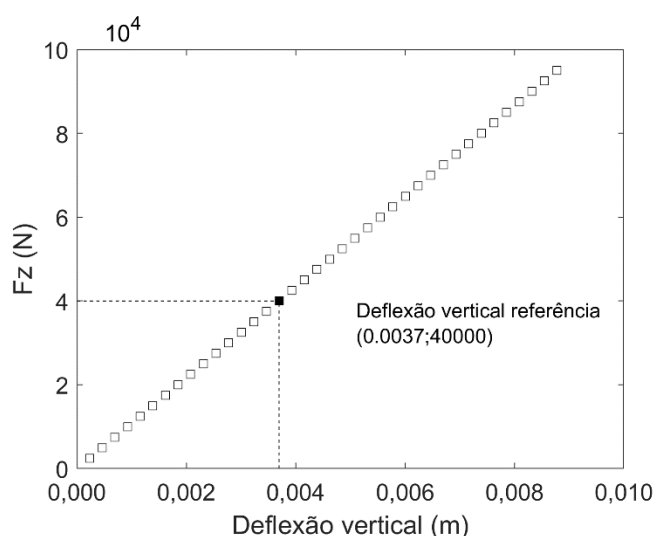


Figura 4.11 – Deflexão vertical do receptáculo da BAP

Na Figura 4.11 é considerada uma força vertical equivalente ao peso próprio do MCV para verificar a deflexão vertical de referência. A inclinação da curva em cada um dos pontos representa a rigidez da linha de atuação dos esforços. O presente trabalho considera apenas o comportamento linear da estrutura, ou seja, o trecho inicial da curva apresentada. Esse resultado é considerado em conjunto com a equação (4.7) para compor os dados necessários para a função externa.

4.3.2 Módulo de Conexão Vertical

As seções anteriores descreveram o comportamento do equipamento submarino e a metodologia para representação da rigidez da linha de atuação dos esforços na simulação da operação de Conexão Vertical Direta. A presente seção visa detalhar as particularidades da modelagem do MCV, bem como descrever o comportamento da função externa ao longo da análise no domínio do tempo.

Na simulação dinâmica da operação de Conexão Vertical Direta, o MCV é modelado como um elemento infinitamente rígido de apenas um grau de liberdade em um espaço bidimensional, sendo este o deslocamento vertical. O elemento permite aplicação de esforços hidrodinâmicos conforme descrito pela equação de Morison e de esforços externos adicionais por meio de uma função externa.

Com objetivo de verificar a posição do MCV (modelado no OrcaFlex) em relação à viga suporte (função externa), que representa o comportamento quase-estático do receptáculo da BAP, uma função *gap* é definida. A Figura 4.12 mostra a representação esquemática indicando a distância vertical, definida pela função *gap*, e o processo de conexão. A distância vertical inicial considerada nas simulações é igual a 1m. A viga suporte é expressa pela função externa definida pela equação (4.7). O MCV, duto flexível e o cabo auxiliar de instalação são modelados diretamente no OrcaFlex. Os dutos flexíveis são considerados inundados com água do mar. Três propriedades diferentes são consideradas conforme a Figura 4.12.

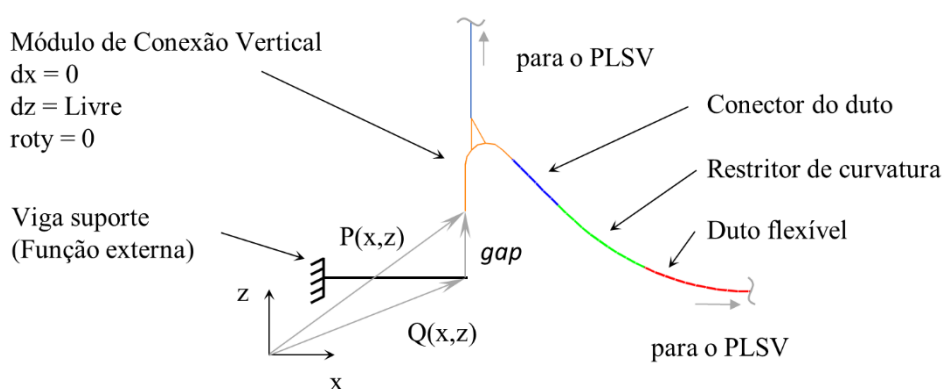


Figura 4.12 – Descrição do modelo numérico

Na Figura 4.12 os vetores $P(x,z)$ e $Q(x,z)$ são definidos como vetores posição do MCV e da viga suporte, respectivamente. O MCV é lançado no instante de 10 segundos de simulação. Os vetores posição monitoram a posição de ambos os corpos em cada passo de

tempo. Quando o *gap* é menor ou igual a zero, a função externa começa a atuar enviando informações dos valores de força para cada deflexão vertical da viga suporte. Uma vez que o *gap* está fechado, o contato entre os dois corpos se mantém fechado até o final da simulação.

As propriedades geométricas do MCV que será estudado no presente trabalho foram adaptadas de Lopes (2005). Tal componente será considerado instalado em uma linha típica de produção de 6 polegadas. A Figura 4.13 mostra as principais dimensões utilizadas para modelagem do MCV no presente trabalho.

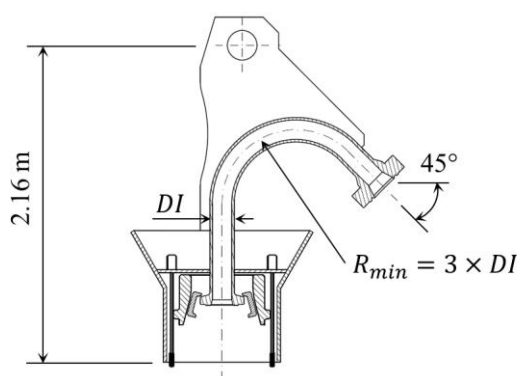


Figura 4.13 – Dimensões principais de um MCV

Por fim, conforme descrito por Lopes (2005), a massa do conjunto de um MCV para árvore de natal de produção é de 4000kg, a área normal à direção vertical será considerada de $1,3\text{m}^2$ e o volume do componente de $0,509\text{m}^3$ é calculado considerando a densidade do aço de 7858 kg/m^3 .

A simulação da Conexão Vertical Direta por meio do OrcaFlex é feita em diferentes estágios. Inicialmente, é executada a solução de uma análise estática, que tem como objetivo determinar as posições de equilíbrio em cada um dos elementos que estão presentes na simulação. A princípio, a posição dos elementos do duto flexível é aproximada por meio da solução analítica da catenária. Em seguida, um método iterativo é utilizado para obter o equilíbrio de cada elemento.

Posteriormente, dá-se início à simulação dinâmica, a qual é dividida em diferentes estágios. O primeiro estágio é o *build up*, ou estágio inicial do transiente, em que os carregamentos são aplicados em forma de rampa para evitar oscilações transitórias. De forma gradual, os esforços são interpolados até atingir os valores estabelecidos pelo usuário durante o tempo de pré-simulação. O tempo do estágio de construção considerado é de 40 segundos. Por conveniência, os resultados apresentados no presente trabalho não mostram o estágio de

construção. Dessa forma, no tempo inicial da simulação, zero segundos, os carregamentos ambientais encontram-se conforme o determinado no início da simulação.

O segundo estágio da análise dinâmica é representado pela Fase 1 (Figura 4.4), o qual descreve a manobra de aproximação e o posicionamento do MCV próximo ao receptáculo. Nesse estágio, o MCV está sendo suspenso pelo cabo auxiliar de instalação e o duto flexível está conectado à bobina instalada na popa do PLSV. Esse estágio ocorre enquanto o tempo de análise for menor do que o tempo de lançamento do MCV.

O estágio seguinte é o lançamento do MCV em direção ao receptáculo. Essa fase da simulação é caracterizada pelo movimento descendente do MCV em direção ao receptáculo. Nesse evento, o movimento vertical do MCV sofre influência do duto flexível. Os vetores posição monitoram a localização relativa entre o MCV e a viga suporte e a função *gap* retorna apenas valores positivos.

Quando a função *gap* se tornar menor ou igual a zero, a função externa começa a retornar valores de força para cada deslocamento prescrito à viga suporte. Uma vez que o contato entre os equipamentos se fecha, há uma restrição para que não se abra mais. Dessa forma, pode-se representar a rigidez do equipamento submarino conforme descrito anteriormente. A Figura 4.14. apresenta o esquema de ação da função externa.

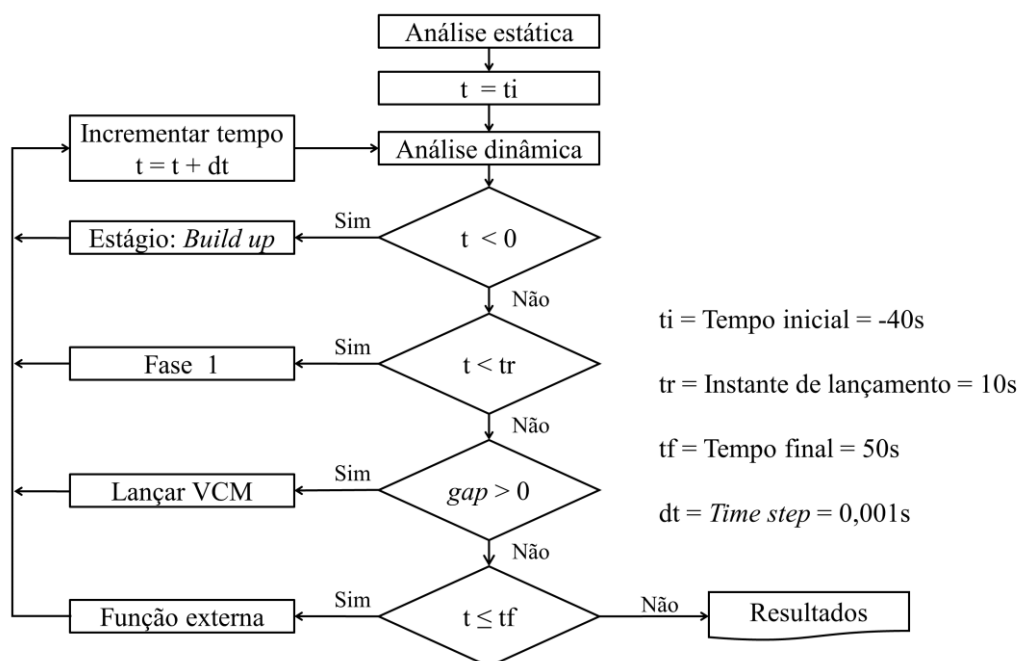


Figura 4.14 – Fluxograma da rotina implementada para a função externa

A metodologia apresentada no presente trabalho é implementada internamente ao programa computacional OrcaFlex, no qual uma análise no domínio do tempo é simulada. A função externa atua em cada passo de tempo e a função *gap* é avaliada conforme definido anteriormente. Esse procedimento é ilustrado na Figura 4.14.

Conforme apresentado no objetivo do trabalho, os esforços induzidos pelo duto flexível no MCV podem ser obtidos e estudados durante a operação de Conexão Vertical Direta de acordo com a metodologia apresentada. Para avaliar a influência dos fatores hidrodinâmicos na operação, uma sequência de casos é proposta. Inicialmente, um caso típico é simulado para o entendimento dos esforços atuantes na conexão do duto flexível com o MCV. Em seguida, propõe-se um estudo de sensibilidade para analisar a influência dos coeficientes hidrodinâmicos na operação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo visa apresentar os resultados obtidos por meio da simulação numérica da operação de acoplamento do duto flexível em um equipamento submarino utilizando a Conexão Vertical Direta conforme a metodologia apresentada na seção anterior.

Para estudar os esforços induzidos durante a instalação, é simulado o caso de Conexão Vertical Direta de primeira extremidade em uma profundidade de 500m com um PLSV operando por meio de posicionamento dinâmico sem o compensador de *heave*. As simulações são realizadas pelo programa computacional OrcaFlex, no qual o modelo de parâmetros concentrados é utilizado para solução de problemas não lineares de sistemas em ambiente *offshore*. Adicionalmente, será implementada uma função externa programada em *Python* para representar o equipamento submarino, em que a rigidez de tal equipamento foi obtida conforme apresentado na metodologia deste trabalho.

Por se tratar de uma operação que ocorre em ambiente marítimo, serão considerados casos em que ondas progressivas interagem com as estruturas que executam a operação. Nesse contexto, a teoria linear de Airy será adotada para representar a elevação do mar ao longo do problema. Para enriquecer a discussão, serão considerados estudos de velocidade de correnteza durante a operação de conexão do duto flexível. Os resultados serão apresentados em termos de esforços induzidos pelo duto flexível, deslocamentos do MCV e do navio de instalação PLSV.

As seções a seguir detalham os resultados das simulações estática, dinâmica do sistema, estudo de sensibilidade dos coeficientes hidrodinâmicos e o estudo da velocidade de lançamento do cabo de instalação. A discussão relativa a cada resultado é apresentada em suas respectivas seções.

5.1 Análise estática

Os principais objetivos da análise estática são de obter a posição de equilíbrio de cada elemento presente na simulação e de fornecer a configuração geométrica inicial dos elementos para a simulação dinâmica. Na análise estática são considerados os carregamentos externos que não variam com o tempo, como por exemplo o peso próprio do duto flexível, os esforços hidrodinâmicos devido às correntezas marítimas e a flutuação dos componentes.

O peso próprio do duto é utilizado para obter sua configuração geométrica de equilíbrio, uma vez que sua estrutura apresenta massa e está submetida a um campo gravitacional. Tipicamente, estruturas com baixa rigidez à flexão quando comparadas à rigidez axial, que estão submetidas ao peso próprio, apresentam a configuração de equilíbrio em catenária. Usualmente, tal esforço é considerado como um carregamento distribuído ao longo do comprimento do duto flexível.

Esforços hidrodinâmicos são obtidos conforme apresentado nas seções anteriores e no presente trabalho é representado pela equação de Morison. Essa natureza de esforço é predominantemente devido à interação entre a hidrodinâmica da estrutura submersa e o fluido do mar. Tal carregamento é diretamente dependente do quadrado da velocidade relativa entre a correnteza e a estrutura.

A flutuação de cada componente é obtida considerando o volume do equipamento que está submerso e a densidade da água do mar. A flutuação é considerada no sentido vertical com sentido oposto à força peso dos componentes.

A aproximação inicial para obter a configuração de equilíbrio considera o equacionamento analítico de uma catenária. A partir dessa configuração inicial, será utilizado um método iterativo para determinar a posição de equilíbrio de cada componente do sistema. A Figura 5.1 mostra a representação esquemática da simulação estática.

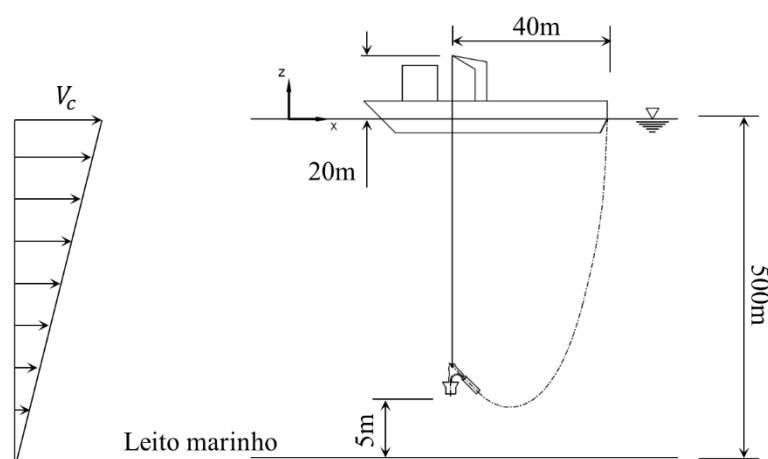


Figura 5.1 – Simulação estática

A simulação estática considera uma operação de Conexão Vertical Direta de primeira extremidade que ocorre a uma profundidade de 500m, na qual o MCV está posicionado 5m acima do leito marinho. Um perfil de corrente marítima linear é considerado conforme ilustrado na Figura 5.1, tal que a velocidade na superfície é V_c e a velocidade no fundo do mar

é zero. A configuração geométrica inicial da Conexão Vertical Direta considera um afastamento horizontal de 40m entre o cabo de instalação e a extremidade superior do duto flexível conforme ilustrado na Figura 5.1. Tipicamente, a instalação ocorre por meio do guindaste do PLSV, que controla a descida do MCV. Em conjunto com o sistema de lançamento, sapatas instaladas na embarcação controlam o movimento vertical do duto flexível.

Durante a análise estática, o MCV possui três graus de liberdades. São eles: translações no eixo x e z e rotação em torno do eixo y . Para obter o equilíbrio estático do conjunto, o comprimento do duto flexível é variado para manter o MCV alinhado com o eixo vertical e conservar os 5m de distância do leito marinho conforme a Figura 5.1. Dessa forma, os resultados serão obtidos por meio do equilíbrio dos esforços reativos atuantes no flange de conexão do duto, flexível conforme apresentado na Figura 5.2.

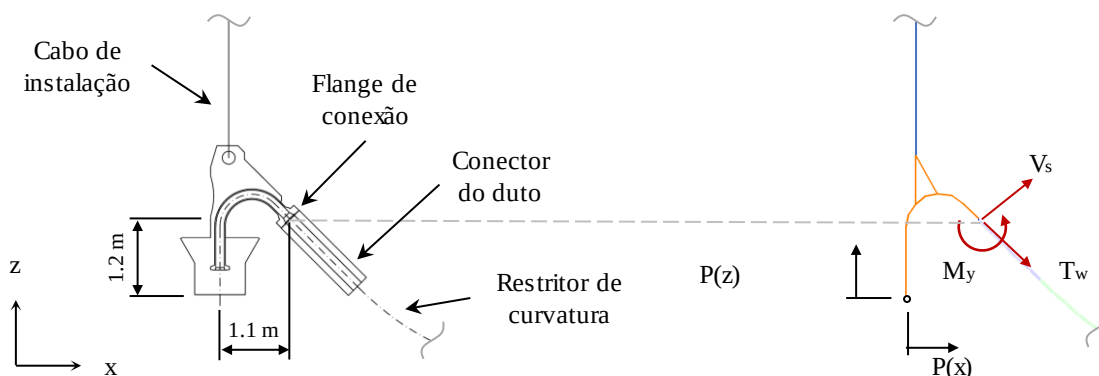


Figura 5.2 – Esforços e deslocamentos induzidos pelo duto flexível

O duto flexível é conectado ao MCV por meio de um flange API 17SV. Como o MCV é modelado por um elemento infinitamente rígido, os resultados obtidos na extremidade inferior do duto flexível são considerados como esforços reativos que atuam no flange de conexão. A Figura 5.2 ilustra de forma esquemática as direções em que os esforços reativos são analisados. Na Figura 5.2, T_w representa a tração atuante no duto, V_s é o esforço cortante, M_y é o momento fletor, $P(x)$ é o deslocamento horizontal e $P(z)$ é o deslocamento vertical.

Tipicamente, os coeficientes hidrodinâmicos utilizados na equação de Morison, equação (3.10), são governados por propriedades físicas do corpo submerso e por parâmetros do escoamento do fluido. Os coeficientes de inércia e de arrasto hidrodinâmico são dados obtidos de forma empírica e apresentam uma grande variação para diferentes metodologias experimentais disponíveis na literatura. Ademais, um extenso estudo proposto por Sarpkaya (2019) promove discussões sobre a dependência de tais parâmetros em relação aos coeficientes hidrodinâmicos.

Inicialmente, a simulação estática executada no presente trabalho considera os coeficientes hidrodinâmicos típicos utilizados para tubos que podem ser encontrados na literatura. São eles, $C_M = 2,0$ e $C_D = 1,2$. No presente trabalho, o caso simulado com esses coeficientes será chamado de caso típico. Um estudo sobre a variação de tais coeficientes e sua influência nos resultados será abordado posteriormente.

Para representar um duto flexível típico de produção, no presente trabalho são consideradas as propriedades geométricas e mecânicas utilizadas no trabalho de Lopes (2005). Para as propriedades mecânicas do conector do duto (Figura 5.2), são adotados os mesmos diâmetros interno e externo do duto flexível, porém a rigidez axial e à flexão serão calculadas considerando que tal componente é fabricado integralmente em aço carbono.

O restritor de curvatura utilizado nas simulações possui 8m de comprimento e adota as mesmas propriedades mecânicas do duto flexível, porém com a restrição de raio mínimo de curvatura de 3m. Ao atingir a limitação imposta à curvatura, a rigidez à flexão do restritor de curvatura se torna muito alta quando comparada ao duto flexível. A Tabela 5.1 resume as propriedades geométricas e mecânicas adotadas no duto flexível.

Tabela 5.1 – Propriedades geométricas e mecânicas do duto flexível

Propriedades	Conector do duto	Restritor de curvatura	Duto flexível
Diâmetro externo (m)	0,235	0,235	0,235
Diâmetro interno (m)	0,152	0,152	0,152
Massa linear (kg/m)	200	71	71
Rigidez axial (kN)	5298800	130000	130000
Rigidez à flexão ($\text{kN} \times \text{m}^2$)	25900	23,4	23,4
Raio mínimo de curvatura (m)	-	3,0	-

O cabo de instalação é modelado de forma simplificada como um sistema massa mola amortecedor. O objetivo é representar a rigidez elástica do sistema que está sendo sustentado pelo guindaste da embarcação de instalação. Tipicamente, os cabos de instalação são selecionados de acordo com suas propriedades geométricas e mecânicas. Aspectos inerentes ao sistema de instalação são relevantes para essa seleção. Como por exemplo: peso por unidade de comprimento, resistência mecânica e profundidade de instalação. Tais parâmetros podem tornar a conexão inviável.

Nessa abordagem, o conjunto do MCV acoplado ao duto flexível representa a massa do sistema e uma mola representa a rigidez axial do cabo de instalação. As propriedades mecânicas do cabo de instalação utilizado na simulação numérica são aproximadas em relação a um cabo de aço de aplicação em sistemas marítimos. Tais propriedades são obtidas por meio de um catálogo disponibilizado por fabricantes. A Tabela 5.2 resume as propriedades mecânicas do cabo de instalação que será utilizado no presente trabalho para simular a Conexão Vertical Direta em um equipamento submarino.

Tabela 5.2 – Propriedades mecânicas do cabo de instalação

Diâmetro (mm)	Massa linear (kg/m)	Rigidez axial (kN)	$F_{\min}$ (kN)	$A_{\sec}$ (mm ²)
18	1,36	15×10^3	275	158

Na Tabela 5.2, a variável $F_{\min}$ representa o carregamento mínimo para ruptura do cabo e $A_{\sec}$ é a área da seção transversal metálica do cabo. A massa linear do cabo é apresentada neste ponto apenas como referência, uma vez que o modelo de cabo de instalação utilizado no presente trabalho não considera a massa do cabo. Dessa forma, apenas a rigidez axial do cabo de instalação é representada na simulação numérica. A contribuição inercial do cabo pode ser relevante para instalações de equipamentos submarinos. Entretanto, esta simplificação é adotada nesta fase da pesquisa pois o objetivo é estudar a influência da rigidez do equipamento submarino no instante de conexão do duto flexível.

Durante a Conexão Vertical Direta, existe a necessidade do posicionar o MCV de forma que seu eixo vertical esteja alinhado com o eixo vertical do receptáculo instalado no equipamento submarino. Para instalações em ambiente marinho, admite-se um desalinhamento máximo de ± 3 graus do eixo do MCV em relação ao equipamento submarino. Essa condição é controlada por meio da variação do comprimento do duto flexível conectado ao flange do MCV e do lançamento do cabo de instalação, como descreve Freitas (2017). É comum a utilização de boias instaladas no duto flexível para obter a configuração desejada de equilíbrio do MCV durante o posicionamento do equipamento.

Variáveis de projeto que atuam em campo durante a instalação de dutos flexíveis tais como carregamentos ambientais, propriedades geométricas do MCV e propriedades mecânicas do duto flexível influenciam o posicionamento, o equilíbrio do MCV e seu alinhamento com o eixo vertical do receptáculo.

No modelo proposto pelo presente trabalho, o comprimento de duto flexível lançado na simulação estática será inferido no início da simulação. Utilizando o modelo numérico, busca-se obter o equilíbrio vertical do equipamento variando o comprimento de duto flexível lançado.

Dessa forma, utilizando a simulação estática, pode-se determinar o comprimento de cabo de instalação e o comprimento de duto flexível que deve ser lançado pelo navio PLSV para que o MCV esteja em equilíbrio e alinhado com o eixo vertical do receptáculo durante a operação de Conexão Vertical Direta. A Figura 5.3 mostra o diagrama de corpo livre no qual atuam os esforços estáticos no sistema de conexão vertical durante sua instalação.

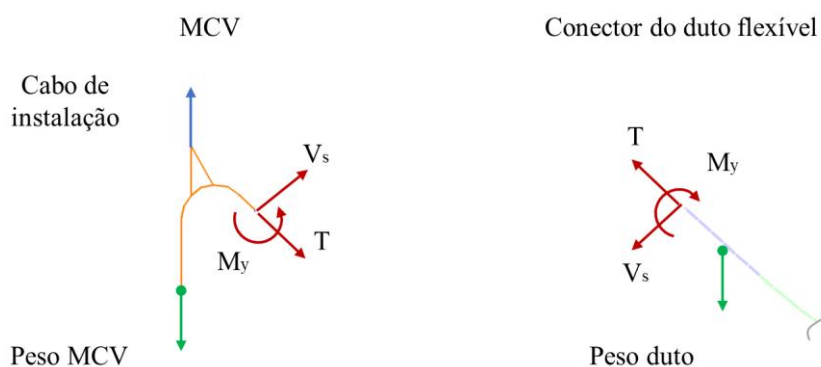


Figura 5.3 – Diagrama de corpo livre

A simulação estática busca encontrar o equilíbrio dos esforços descritos na Figura 5.3 de forma iterativa, em que a posição dos componentes são variadas com objetivo de obter a configuração de equilíbrio estático. Carregamentos de ordem estática tais como corrente marítima e peso próprio dos componentes são considerados nessa fase.

A Figura 5.4 mostra a configuração geométrica da Conexão Vertical Direta em primeira extremidade para sua posição inicial e a posição de equilíbrio estático após considerar uma velocidade de corrente no topo V_c de 0,7 m/s com perfil linear e velocidade zero no fundo do mar.

Para solução do equilíbrio estático do problema, obtém-se um deslocamento horizontal conforme ilustrado na Figura 5.4. Os esforços resultantes do duto flexível conectado ao MCV geram movimento de rotação no equipamento, o que faz com que o alinhamento vertical do MCV seja sensível à variação do comprimento do cabo de instalação e do duto flexível.

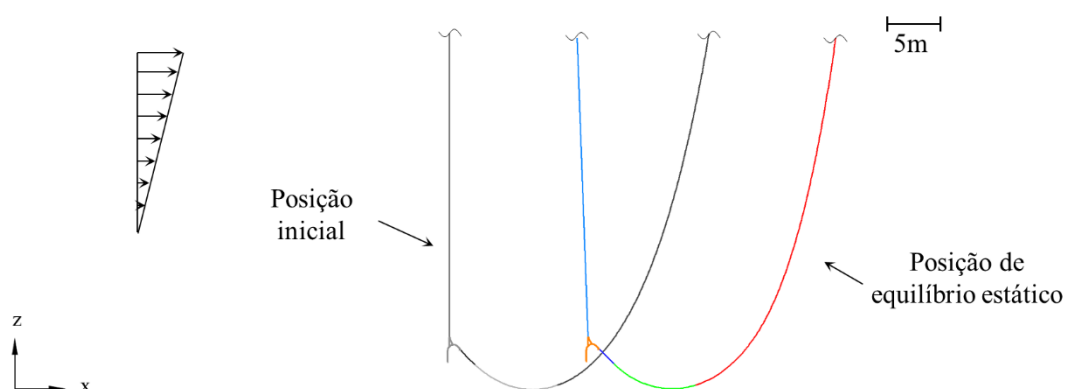


Figura 5.4 – Simulação estática

No presente trabalho, o comprimento de cabo de instalação e do duto flexível são calibrados para manter o alinhamento do MCV com o eixo vertical do equipamento submarino. Os esforços reativos atuantes no flange de conexão do MCV com o duto flexível obtidos na simulação estática são listados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Resultado análise estática

L_C (m)	L_D (m)	V_c (m/s)	M_y (kN×m)	T_w (kN)	V_s (kN)
511	505,8	0,7	3,1	-120,5	-2,2

Os resultados apresentados na Tabela 5.3 são obtidos de forma que o equilíbrio do MCV seja atingido para iniciar a conexão do duto flexível. No qual, L_D representa o comprimento de duto flexível lançado e L_C é o comprimento de cabo de instalação utilizado para obter a posição de equilíbrio dos componentes. O comprimento vertical do cabo de instalação, L_C , é maior que o comprimento do duto em catenária, L_D , pois o cabo de instalação é suspenso 20m acima do nível do mar conforme ilustrado na Figura 5.1.

Para as condições apresentadas na Tabela 5.3, considera-se que o eixo vertical do MCV está alinhado com o receptáculo para executar a operação de conexão do duto flexível.

O estudo da presente seção teve por objetivo obter a posição de equilíbrio dos componentes do sistema de Conexão Vertical Direta e os esforços atuantes nessa condição. Os resultados obtidos por meio da simulação estática serão utilizados posteriormente nas análises dinâmicas com principal objetivo de fornecer ao sistema um ponto de partida inicial para a simulação.

5.2 Estudo de resposta dinâmica do sistema

Após avaliar o comportamento estático do sistema durante a operação de Conexão Vertical Direta em primeira extremidade, esta seção tem o objetivo de estudar a resposta dinâmica do sistema para a configuração estática obtida na seção anterior. Nesse contexto, será avaliado o comportamento dinâmico do sistema quando a extremidade superior do cabo de instalação é submetida a uma excitação harmônica (W_v), conforme ilustrado na Figura 5.5.

O modelo de parâmetros concentrados é utilizado para solução do problema. O algoritmo implícito α -Generalizado é utilizado para a integração numérica da equação dinâmica de movimento do sistema conforme descrito por Chung e Hulbert (1993). A posição inicial e a orientação dos componentes da simulação são conhecidas por meio da simulação estática que foi executada anteriormente. Os esforços atuantes em cada elemento são então calculados e o algoritmo de integração temporal calcula a posição de cada componente ao fim do passo de tempo. Esquemas de integração implícitos são tipicamente estáveis para passos de tempo maiores quando comparados com esquemas explícitos.

No presente trabalho, a resposta dinâmica do sistema será estudada por meio da razão entre a amplitude da resposta do deslocamento do MCV, e da amplitude de excitação do sistema que está presente no topo do cabo de instalação. Para simplificar a avaliação, o navio PLSV será desconsiderado, a extremidade superior do cabo será excitada por um deslocamento prescrito e a extremidade superior do duto flexível será considerada engastada. Tal abordagem visa obter a resposta do sistema apenas para excitação do cabo de instalação. A Figura 5.5 mostra a representação esquemática da simulação para obter a resposta dinâmica do sistema.

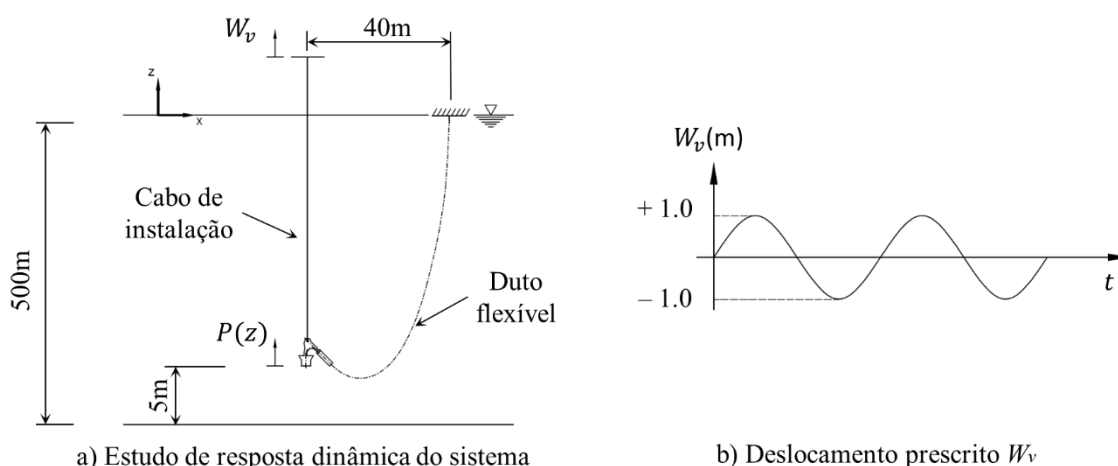


Figura 5.5 – Simulação dinâmica para estudo de resposta do sistema

Na Figura 5.5, W_v representa o deslocamento prescrito no topo do cabo de instalação, que será inferido ao sistema por meio de um deslocamento periódico descrito por um sinal senoidal de amplitude igual a 1m. A variável $P(z)$ representa o deslocamento do MCV que será a resposta do sistema ao carregamento dinâmico.

Durante o estágio inicial do transiente da simulação (*buildup step* - Figura 4.14), o deslocamento prescrito ao sistema é aplicado de forma progressiva desde o repouso até o valor estabelecido pelo usuário. Tipicamente, esse método fornece uma forma gradual de iniciar o modelo e de reduzir as respostas transientes que possam ocorrer devido às condições iniciais estacionárias do modelo.

Estudar o comportamento de resposta dinâmica do sistema tem como principal objetivo obter os fatores de amplificação ou de atenuação dinâmicos, que são características do sistema. A partir dessa informação, pode-se entender e planejar a faixa de operação do sistema considerando a excitação prescrita pelos diversos estados de mar que ocorrem tipicamente. Para isso, faz-se necessário uma simulação dinâmica no domínio do tempo. Diversos casos são analisados em que o período de excitação do sistema é variado entre 0,5s e 14s.

São consideradas as mesmas propriedades mecânicas dos componentes da simulação estática. Ademais, os coeficientes hidrodinâmicos são adotados conforme o caso típico ($C_M = 2,0$ e $C_D = 1,2$). As simulações são executadas considerando 100 segundos de estágio de construção e 200 segundos de tempo de simulação. Os resultados são obtidos em termos da razão entre o deslocamento do MCV, $P(z)$, e deslocamento prescrito do cabo de instalação W_v . A Figura 5.6 mostra os fatores de amplificação e de atenuação do movimento que foram obtidos para tais simulações. O eixo horizontal representa o período de excitação do sistema $T(s)$ e o eixo vertical mostra o fator de amplificação e de atenuação dinâmicos obtidos.

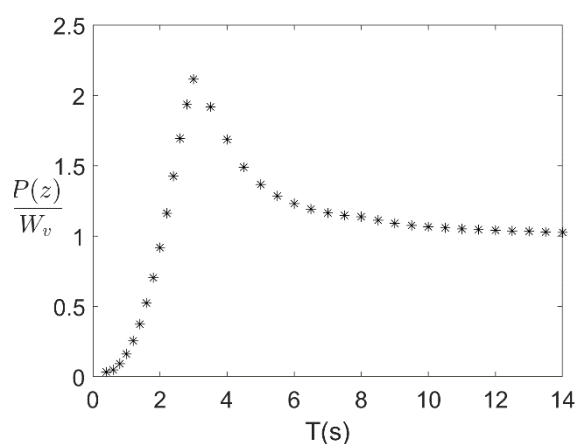


Figura 5.6 – Fator de amplificação do movimento dinâmico

A partir da Figura 5.6, pode-se observar que, entre 3 e 4 segundos de período de excitação do sistema, o deslocamento do MCV se torna consideravelmente maior que o deslocamento prescrito no topo do cabo de içamento. Esse efeito é devido à frequência natural do sistema de instalação e à massa de todos os equipamentos que estão suspensos. Pode-se observar também que, após o período de 4s, a amplitude da resposta do MCV reduz e tende a se igualar à amplitude da excitação no topo do cabo de instalação.

Durante operações de instalações no mar, as condições ambientais e excitações prescritas por ondas em unidades flutuantes apresentam comportamento irregular. Existem diversos modelos matemáticos para representar o aspecto randômico de ondas e de correntes marítimas. Entretanto, no presente trabalho, será adotada a teoria linear de ondas, uma vez que o objetivo é estudar o instante de lançamento do MCV para realizar a Conexão Vertical Direta.

Com objetivo de representar a elevação do mar e para evitar a excitar o sistema em frequências naturais, será estudado um caso típico de período de onda de 8s conforme a teoria linear de Airy. Tipicamente, operações em sistemas marítimos devem evitar excitações em períodos próximos ao período natural do sistema. Dessa forma evitam-se esforços atuantes excessivos durante a conexão. A Figura 5.7 mostra a resposta do sistema para tal período de excitação, no qual o movimento prescrito no topo do cabo de instalação é representado por W_v e o movimento vertical do MCV é $P(z)$.

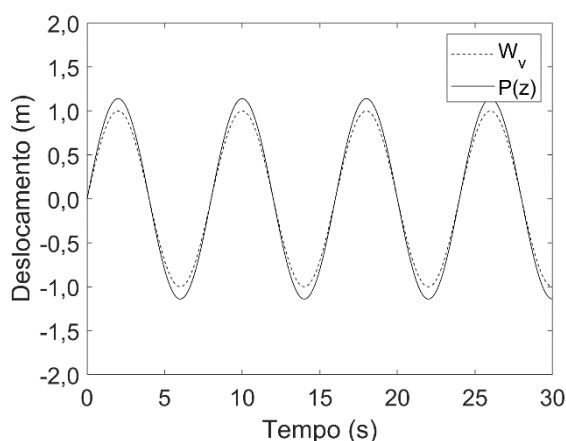


Figura 5.7 – Resposta dinâmica do sistema – Período de excitação 8s

O amortecimento estrutural do duto flexível é representado por meio da teoria de Rayleigh. Uma razão de amortecimento de 5% nos dois primeiros modos do duto flexível é considerada em todas as simulações

Por muitas vezes, durante o projeto de instalações submarinas, é necessário avaliar o comportamento amplificador ou atenuador do sistema dinâmico. O estudo mostrado nesta seção teve como objetivo estimar a amplitude do movimento do MCV em relação ao movimento inferido no topo do cabo de instalação. Tipicamente, tal movimento é induzido pelo movimento do navio de instalação que por sua vez, é movimentado pelo período de onda incidente.

5.3 Estudo hidrodinâmico

O estudo hidrodinâmico tem como objetivo avaliar a influência dos coeficientes hidrodinâmicos que compõem a equação de Morison, C_M e C_D , nos esforços induzidos pelo duto flexível durante a Conexão Vertical Direta. Inicialmente, é apresentado um caso típico em que tais coeficientes são aproximados baseados em dados da literatura. Posteriormente, é mostrado um estudo de sensibilidade em que os coeficientes são variados e os esforços reativos no flange de conexão do MCV serão avaliados.

Para representar a instalação, o receptáculo do equipamento submarino encontra-se localizado a 496m de profundidade e o *gap* inicial entre o equipamento submarino e o MCV é 1m. A Figura 5.8 ilustra a representação esquemática do estudo hidrodinâmico que é executado.

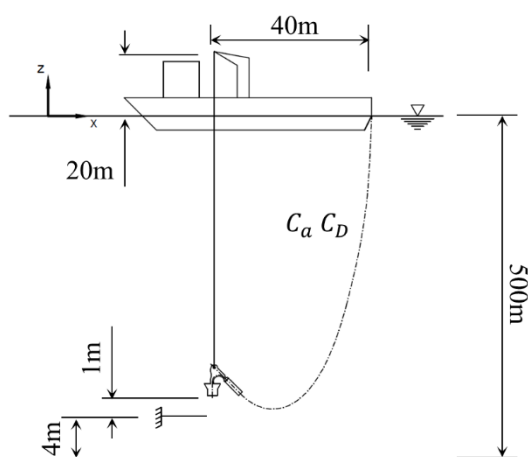


Figura 5.8 – Representação esquemática estudo hidrodinâmico

No presente trabalho, é utilizado o modelo de navio PLSV, duto flexível e MCV mencionados anteriormente. Os resultados são apresentados em termos de esforços reativos

atuantes no flange do MCV e de seu vetor posição. As seções seguintes descrevem o caso típico avaliado e, em seguida, o estudo hidrodinâmico.

5.3.1 O caso típico

Para estudar os esforços atuantes no duto flexível, a equação de Morison é utilizada para representar o modelo de interação hidrodinâmica. Para o uso da formulação, existe a necessidade de estimar o coeficiente inercial e o arrasto hidrodinâmico, conforme descrito anteriormente. A abordagem inicial do presente estudo será utilizar os coeficientes presentes na literatura para dutos de forma aproximada, $C_M = 2,0$ e $C_D = 1,2$ e, posteriormente, verificar o comportamento dinâmico do sistema por meio de uma análise sensibilidade de tais valores.

Devido à complexidade da operação, a Conexão Vertical Direta deve ocorrer apenas em condições de carregamentos ambientais moderadas. Essa abordagem visa evitar esforços excessivos no cabo auxiliar de instalação, no duto flexível e no MCV. As simulações são realizadas utilizando a teoria linear de ondas, em que são consideradas incidência de ondas na direção 0° conforme apresentado no capítulo anterior. Para representar o estado de mar, os parâmetros de onda adotados são altura de onda de 1.0 metro e período de onda de 8 segundos. A densidade da água do mar é 1025 kg/m^3 .

As simulações são executadas considerando 40 segundos de estágio de construção e 40 segundos de tempo de simulação. As propriedades mecânicas da viga suporte consideram uma viga Euler-Bernoulli de 3 metros de comprimento, em que o momento de inércia de área plana é obtido pelo trecho linear da rigidez do equipamento submarino detalhada na Figura 4.11. Tais propriedades são resumidas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Propriedades mecânicas da viga suporte

Propriedades	Viga suporte
Módulo de Young (MPa)	210000
Momento de inércia de área plana (m^4)	$4,641 \times 10^{-4}$
Comprimento (m)	3,0

Cabe ainda ressaltar que as propriedades mecânicas da viga suporte representam a rigidez da linha de atuação dos esforços do receptáculo até o solo marinho (Figura 4.10). Tal rigidez é uma composição de todos elementos estruturais listados na Tabela 4.1.

O histórico temporal da posição do MCV ao longo do tempo para o caso típico é mostrado na Figura 5.9. No início da simulação, entre 0 e 10 segundos, o MCV está conectado ao navio PLSV por meio do cabo de instalação. Nesse instante inicial da simulação, pode-se observar o não apenas o movimento do equipamento em torno de sua posição de equilíbrio e como também a variação do *gap* ao longo da simulação. Nesse caso, o equipamento submarino se encontra na posição vertical -496m conforme mencionado anteriormente.

Em seguida, o lançamento do MCV em direção ao equipamento submarino inicia-se em 10 segundos de simulação. Nessa fase, o cabo de instalação é removido da simulação e o equipamento realiza o movimento vertical livre em direção ao equipamento submarino. Após o primeiro instante de contato do MCV com o receptáculo, a viga suporte oscila até encontrar sua posição de equilíbrio ao fim da simulação.

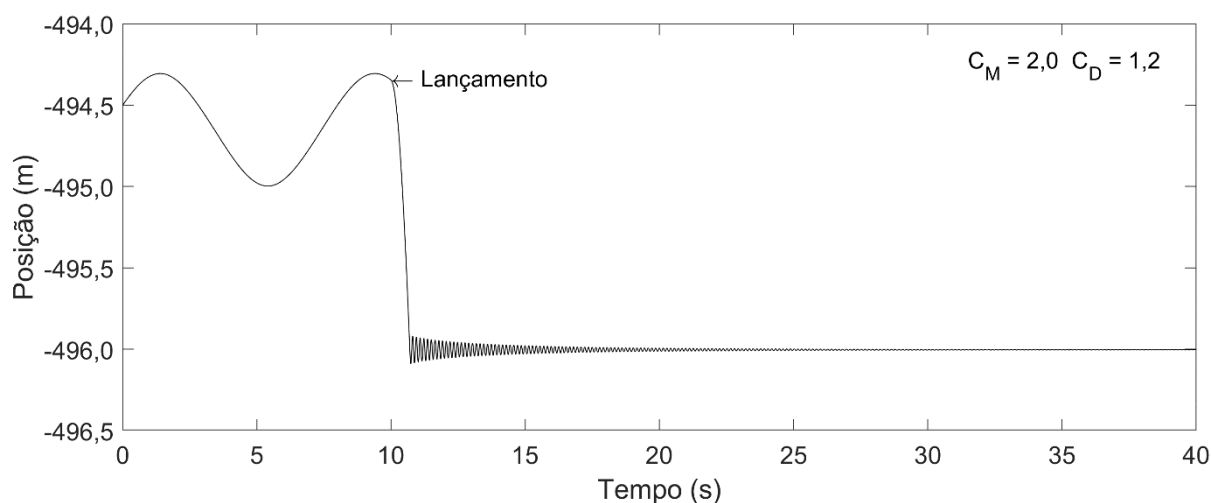


Figura 5.9 – Posição do MCV versus tempo

A partir do resultado mostrado na Figura 5.9 pode-se observar que após o instante de conexão do MCV com o equipamento submarino, o equipamento oscila em uma frequência e uma amplitude que são dissipados ao longo do tempo de simulação. Como no instante de conexão não existe mais o cabo auxiliar de instalação, o equipamento está sujeito à oscilação livre e amortecida pelos coeficientes hidrodinâmicos da equação de Morison. Cabe ressaltar que o modelo matemático proposto para representar o equipamento submarino não considera seu amortecimento estrutural.

De forma simplificada, pode-se entender que o movimento vertical do sistema não é forçado por mecanismos externos, exceto a velocidade no instante de acoplamento do sistema e o movimento próprio do duto flexível devido aos carregamentos ambientais. Ademais, pode-se concluir que a frequência de tal oscilação é muito próxima de uma das frequências naturais amortecidas do sistema de instalação.

Conforme o resultado apresentado, o MCV pode ser idealizado como um objeto que realiza o movimento vertical em queda livre e o mecanismo de dissipação de energia é a parcela de amortecimento viscoso da equação de Morison. A partir desta premissa, após o instante de conexão a resposta dinâmica do sistema se torna similar à oscilação livre de um sistema massa mola amortecedor.

Para a mesma sequência de eventos, a Figura 5.10 mostra o histórico de evolução temporal do esforço reativo momento fletor atuante no flange de conexão do MCV com o duto flexível. De forma similar ao histórico de posição, durante a fase inicial da simulação, entre 0 e 10 segundos, o MCV está conectado ao PLSV por meio do cabo de instalação. Após 10 segundos de simulação, o MCV é lançado em direção ao equipamento submarino, consequentemente, realiza a conexão vertical e, em seguida oscila até obter um novo equilíbrio em termos de esforços.

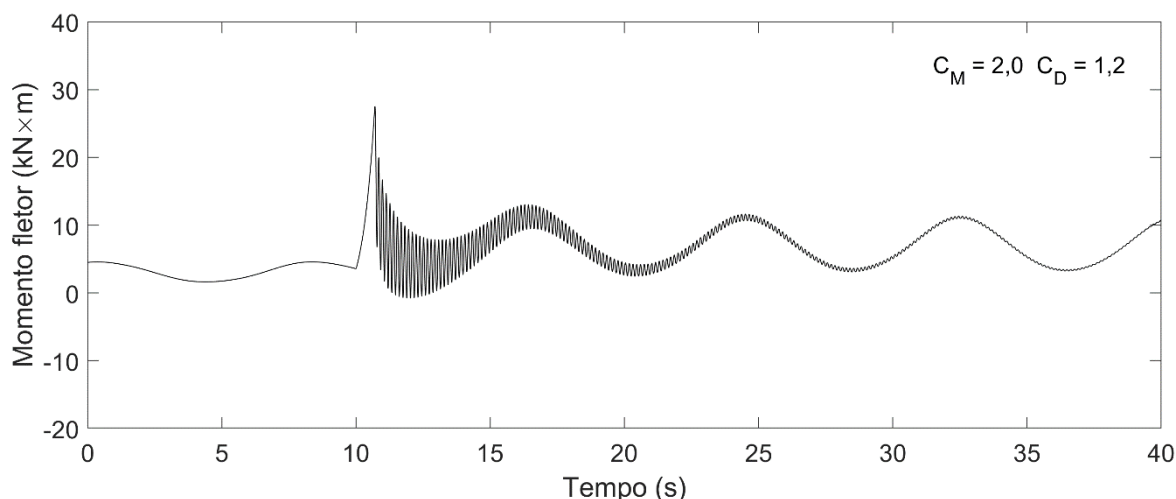


Figura 5.10 – Esforço reativo momento fletor (My)

Após o lançamento do MCV (Tempo > 10s), pode-se observar um pico na resposta durante o movimento vertical do equipamento. Tal comportamento do sistema ocorre no instante em que o MCV encosta no equipamento submarino e inicia-se o evento da conexão.

Esse extremo é consequência do movimento descendente vertical do MCV e da sua a velocidade no instante da conexão com o receptáculo.

Ademais, o resultado indica que a resposta obtida do momento fletor é uma combinação de dois movimentos. O primeiro movimento é do navio de instalação na extremidade superior do duto flexível, que é responsável pela excitação de menor frequência na resposta. Por outro lado, o movimento do MCV conectado à viga suporte é responsável pela excitação de maior frequência na resposta.

Pode-se observar que o valor máximo do momento fletor é amortecido ao longo da simulação. Esse comportamento sugere que o movimento amortecido do MCV (Figura 5.9), acoplado à rigidez do equipamento submarino, exerce influência nos esforços induzidos durante a Conexão Vertical Direta.

A dissipação de energia do sistema é obtida pela combinação de duas parcelas: o amortecimento viscoso, representado pela formulação de Morison, e o amortecimento estrutural do duto flexível, representado pela teoria de Rayleigh. Pode-se ressaltar que o carregamento de maior frequência que é induzido pelo movimento vertical do MCV é amortecido ao longo da simulação. De forma simultânea, o esforço induzido de menor frequência é contínuo até o final da simulação, pois o navio PLSV permanece com a extremidade superior do duto flexível suspensa e sendo excitado pelos carregamentos ambientais.

De forma similar, a Figura 5.11 apresenta o resultado do esforço cortante reativo no flange de conexão entre o MCV e o duto flexível ao longo do tempo.

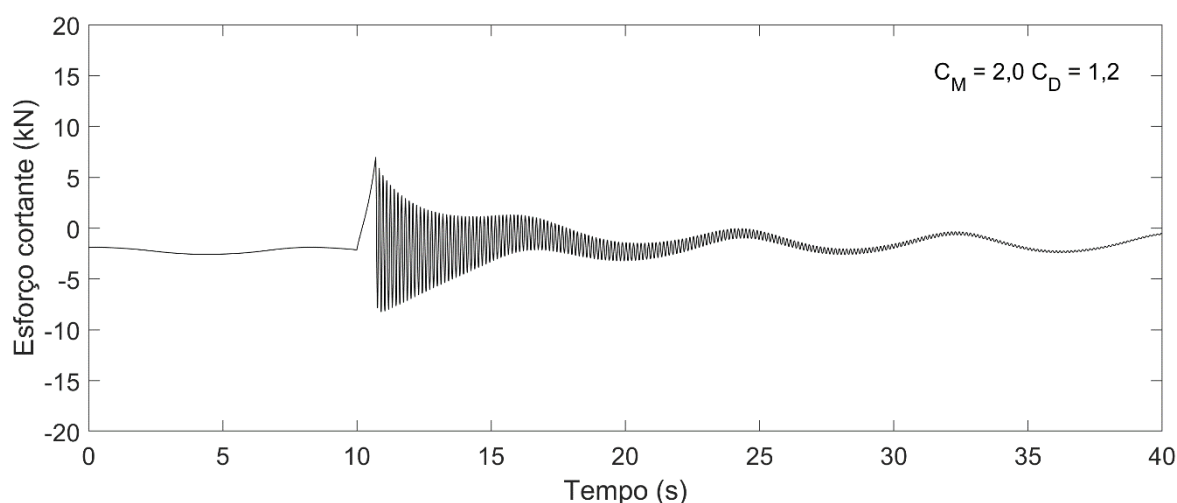


Figura 5.11 – Esforço reativo cortante (Vs)

Pode-se observar que no instante em que o MCV toca a viga suporte, também existe um pico na resposta do esforço cortante que amortece ao longo do tempo, assim como descrito no resultado anterior. A resposta obtida para o esforço cortante também é caracterizada pela combinação do movimento do MCV e do PLSV ao longo do tempo de simulação.

Conforme apresentado na equação (4.4), existe uma relação linear e direta entre a resposta do momento fletor e do esforço cortante que atuam no sistema. Por esse motivo, é esperado que o comportamento obtido na resposta de ambos esforços seja semelhante qualitativamente.

Dessa forma, pode-se observar que tanto o movimento do PLSV quanto a rigidez do equipamento submarino influenciam os esforços que atuam no MCV durante a conexão vertical. Em razão desse comportamento, o estudo da rigidez do equipamento submarino durante tal operação é relevante para avaliar a influência dos esforços induzidos pelo duto flexível no MCV.

De forma análoga à apresentada para os resultados anteriores, a Figura 5.12 mostra o resultado do esforço de tração no duto ao longo do tempo de simulação.

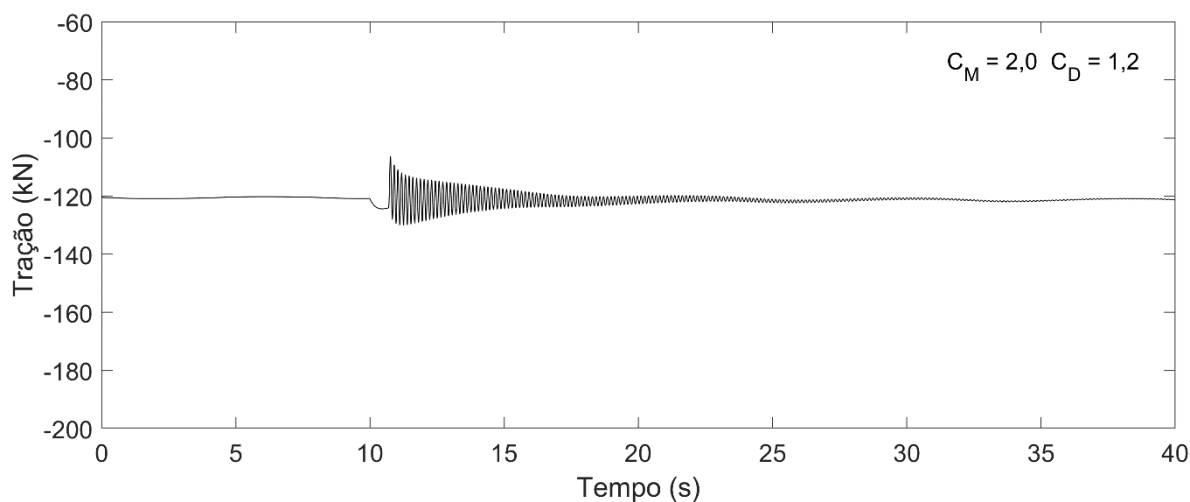


Figura 5.12 – Esforço relativo tração (T_w)

O comportamento obtido para tração no duto é muito semelhante aos esforços apresentados anteriormente. Porém, observa-se que tal esforço está menos suscetível ao movimento do navio quando comparado ao movimento do MCV conectado à viga suporte. Esse comportamento pode ser explicado pois movimento de *Heave* do navio é responsável por induzir movimento vertical na extremidade superior do duto. Devido à geometria em catenária, tal movimento se converte em esforço cortante e em momento fletor na extremidade inferior do

duto flexível. Por esse motivo, esses esforços reativos estão mais suscetíveis a variações durante o processo de conexão vertical.

O estudo do caso típico hidrodinâmico apresentado nesta seção teve como objetivo avaliar os esforços reativos no flange do MCV para um caso em que os coeficientes hidrodinâmicos são aproximados com base na literatura típica para tubos. Os resultados mostram que a rigidez do equipamento submarino exerce influência nos esforços induzidos pelo duto flexível durante a Conexão Vertical Direta. Essa hipótese é sustentada pela observação de picos nos esforços reativos durante o evento da Conexão. Tais picos podem levar à falha mecânica de componentes no sistema de conexão. Um estudo cuidadoso avaliando a rigidez da conexão do MCV com o equipamento submarino pode ser relevante para determinar tais esforços de forma acurada. Na seção seguinte, é apresentada uma análise de sensibilidade dos coeficientes hidrodinâmicos da equação de Morison com objetivo de avaliar a influência de tais coeficientes nos esforços reativos durante a instalação do duto flexível.

5.3.2 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade do conjunto de instalação do MCV tem por objetivo avaliar a influência dos coeficientes hidrodinâmicos nos esforços induzidos pelo duto flexível durante a operação de Conexão Vertical Direta. Tais coeficientes são tipicamente obtidos de forma empírica. Seus valores dependem de propriedades geométricas do corpo estudado, como: rugosidade superficial e parâmetros do escoamento do fluido. Uma vasta literatura está disponível promovendo discussões e metodologias para obter os coeficientes hidrodinâmicos para geometrias simples como tubos, placas e esferas. Entretanto, estudos que consideram geometrias complexas são raros e, à medida que os equipamentos submarinos operam em profundidades cada vez mais elevadas, a geometria do equipamento desempenha um papel relevante no processo de conexão do duto flexível.

Nesse cenário, a presente seção tem como objetivo estudar os coeficientes hidrodinâmicos da equação de Morison, C_M e C_D , durante a conexão para diferentes valores possíveis. Dessa forma, o objetivo é avaliar o comportamento do sistema e verificar se os coeficientes hidrodinâmicos influenciam os esforços reativos no flange do MCV durante a Conexão Vertical Direta. Essa abordagem é útil para estudar o comportamento do sistema quando existe a variação de um parâmetro e sua influência na resposta do modelo proposto.

Fixando os valores que representam os dados de entrada apresentados anteriormente, a análise de sensibilidade proposta avalia a resposta do sistema de conexão do modelo. As simulações são executadas considerando 100 segundos de estágio de construção e 40 segundos de tempo de simulação.

Para o estudo aqui proposto, serão considerados diferentes combinações de valores dos coeficientes hidrodinâmicos. O coeficiente de arrasto hidrodinâmico C_D é considerado de 0,4 até 2,6 em passos de 0,2. O coeficiente inercial C_M é adotado de 1,5 até 2,5 em passos de 0,25. Os coeficientes são combinados e vários casos são gerados no programa computacional OrcaFlex para essa avaliação. No total, 60 casos são executados e os esforços reativos são obtidos no flange do MCV para comparação em cada caso.

Serão consideradas as condições de contorno conforme representada na Figura 5.8, em que o MCV está posicionado 1m acima do equipamento submarino.

Dessa forma, a presente seção visa estudar as linhas de tendência do comportamento do sistema quando tais coeficientes variam. Para melhor entendimento dos resultados, será definido nesse ponto que a amplitude dos esforços é a diferença entre o máximo e o mínimo valor encontrado na simulação para cada esforço reativo. Dessa forma, será avaliada a influência que os coeficientes hidrodinâmicos exercem em cada esforço reativo conforme sua amplitude de valores.

A Figura 5.13 mostra o estudo hidrodinâmico para o esforço reativo de momento fletor no flange de conexão do MCV.

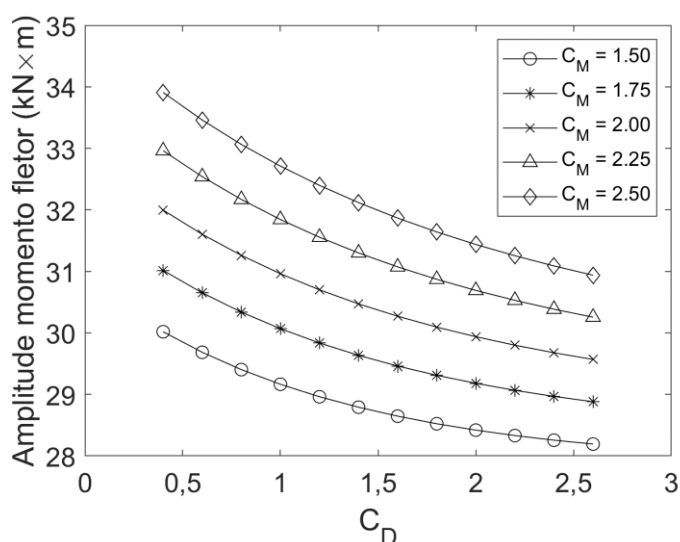


Figura 5.13 – Estudo hidrodinâmico – Amplitude Momento fletor

A Figura 5.13 mostra as linhas de tendência do sistema que determinam o comportamento do sistema de conexão para os diferentes coeficientes hidrodinâmicos. Por meio do resultado obtido pode-se observar que, quanto menor o coeficiente de arrasto hidrodinâmico C_D , maior será a amplitude de momento fletor atuante no flange de conexão do MCV. Esse comportamento é explicado pois o pico de esforço obtido em cada simulação ocorre quando o MCV toca a viga suporte, instante no qual a velocidade vertical no sentido descendente do equipamento é máxima. Quanto menor o coeficiente de arrasto hidrodinâmico, maior será a velocidade em que o MCV atinge a viga suporte. Dessa forma, espera-se que maiores esforços reativos ocorram nos casos de maiores velocidades de conexão.

Por outro lado, à medida que o coeficiente inercial C_M aumenta, a amplitude dos esforços reativos também aumenta. O termo de massa adicional da equação de Morison é responsável por aumentar a inércia do sistema. Dessa forma, espera-se que, para maiores coeficientes inerciais, o sistema necessite de maior força para acelerar e desacelerar os componentes nas simulações. Esse comportamento pode ser explicado pela equação (3.9), na qual quanto maior o coeficiente inercial, maior a representação de massa de fluido que deve ser acelerada nas redondezas do equipamento. Por esse motivo, a amplitude dos esforços reativos aumenta em consequência de maiores coeficientes inerciais.

De forma análoga, a Figura 5.14 mostra a amplitude do esforço cortante em função dos coeficientes hidrodinâmicos.

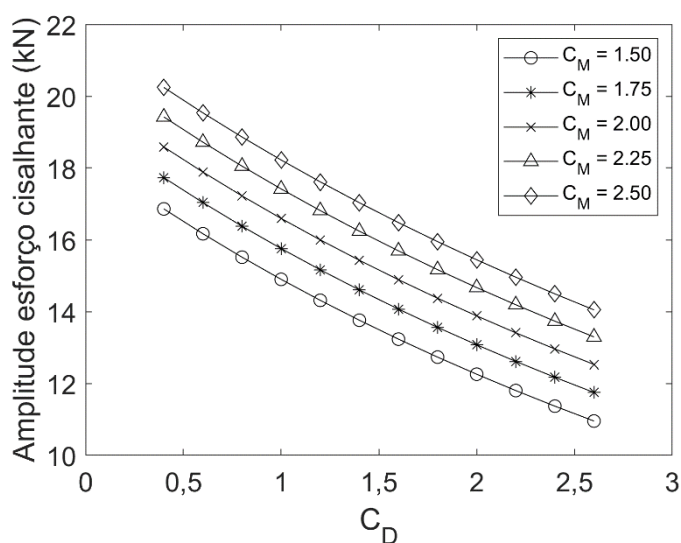


Figura 5.14 – Estudo hidrodinâmico – Amplitude Esforço cortante

Pode-se observar que a amplitude do esforço cortante apresenta o comportamento muito semelhante aos resultados obtidos para o momento fletor. O resultado é previsto pois, conforme mencionado anteriormente, o esforço cortante é proporcional ao momento fletor que atua no duto flexível. Quanto menor o coeficiente de arrasto hidrodinâmico C_D , maior o esforço cortante reativo. Por outro lado, quanto maior o coeficiente inercial C_M , maior esforço cortante.

No modelo proposto no presente trabalho, o esforço cortante atua no nó de cada elemento e no sentido tangencial à área da seção transversal do duto flexível. Tipicamente, o esforço cortante, em conjunto com o momento fletor e o esforço de tração, são utilizados para executar o dimensionamento dos componentes do sistema de instalação. A variação da amplitude desse esforço mostra que tanto a rigidez do equipamento submarino quanto os coeficientes hidrodinâmicos são relevantes para o dimensionamento de tal sistema.

De forma similar ao resultado mostrado até este ponto, a Figura 5.15 ilustra a amplitude do esforço de tração atuante no flange de conexão do MCV em função dos coeficientes hidrodinâmicos.

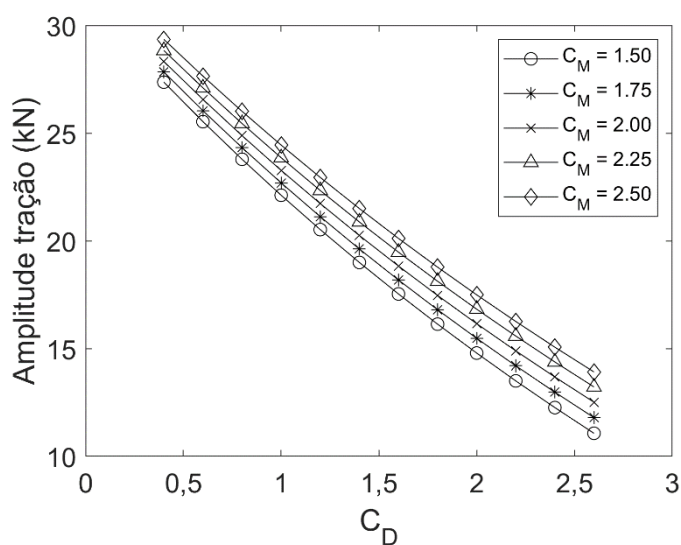


Figura 5.15 – Estudo hidrodinâmico – Amplitude Tração

Um comportamento semelhante é verificado para a amplitude dos esforços de tração obtidos no flange de conexão. Da mesma forma, o comportamento pode ser explicado pois o movimento vertical do MCV e do PLSV durante a instalação é responsável por impor esforços relativos ao momento fletor e ao esforço cortante, o que confirma a hipótese levantada no caso típico.

É interessante ressaltar que, em operações de instalação no mar, o MCV estará sujeito a carregamentos de ordem randômica. Por este motivo, casos não tão comportados como o apresentado no presente estudo são comuns. A intenção da presente seção foi de inicialmente estudar um caso típico e, posteriormente, fixar todos os parâmetros e variar apenas os coeficientes hidrodinâmicos para avaliar sua influência no sistema de instalação.

Por meio do resultado obtido, pode-se observar que tais coeficientes influenciam nos esforços reativos que atuam no flange de conexão do MCV. Combinando os resultados do caso típico com o estudo de sensibilidade, conclui-se que a rigidez do equipamento submarino e os coeficientes hidrodinâmico são relevantes para a simulação do processo de conexão de um duto flexível em um equipamento submarino. Um estudo detalhado sobre os coeficientes hidrodinâmicos pode ser executado ainda na fase de projeto do sistema com objetivo de avaliar o caso de forma mais acurada. Assim, pode-se prever eventuais falhas e evitar perdas durante a fase de desenvolvimento de um campo.

5.4 Estudo de lançamento do cabo de instalação

Com objetivo de enriquecer o estudo, após estudar o comportamento hidrodinâmico dos componentes durante a Conexão Vertical direta, esta seção tem por objetivo avaliar a velocidade de lançamento do cabo de instalação (V_L) e a sua influência nos esforços induzidos pelo duto flexível utilizando a metodologia proposta. O presente estudo consiste em analisar a resposta do sistema de instalação vertical quando submetido a diferentes velocidades de lançamento do cabo de instalação, combinado com a excitação dos carregamentos ambientais e os movimentos do navio de instalação PLSV.

Tipicamente, a modelagem de operações de instalações de equipamentos em ambiente *offshore* é caracterizada pela norma “*Modelling and analysis of marine operations*” (DNV-RP-N103). Tais representações matemáticas geralmente avaliam os esforços atuantes nos componentes de instalação e a sua influência conforme as seguintes características: propriedades mecânicas do elemento de içamento, condições ambientais, movimento da unidade flutuante de instalação e as características geométricas do objeto a ser instalado.

De particular interesse para o presente trabalho, será utilizado o método de instalação de equipamentos submarinos por meio de um cabo de instalação, o qual será representado no modelo de parâmetros concentrados conforme descrito anteriormente. A seção da norma supracitada que detalha a instalação de equipamentos submarinos em águas profundas

fornece um guia de boas práticas para modelagem e para simulações de operações em ambiente marinho. Tais operações são divididas em três fases, são elas: movimentação através da região de atuação das ondas, descida do equipamento ao longo da profundidade do mar e assentamento do equipamento no leito marinho.

O modelo de instalação utilizado no presente trabalho considera o instante de aproximação final do MCV em relação ao equipamento submarino, conforme descrito anteriormente. Por esse motivo, a modelagem inicia-se por meio de uma simulação estática com o MCV posicionado próximo ao equipamento submarino e pronto para o instante de instalação do duto flexível. A partir da posição estática obtida de cada componente, inicia-se a simulação dinâmica. As condições de contorno do problema são adotadas conforme ilustrado na Figura 5.8.

Um objeto que é suspenso por meio de um cabo de instalação em ambiente marinho estará exposto a diferentes carregamentos que atuam em sua estrutura. Dentre os principais, podemos citar o peso próprio do objeto, a flutuação, os esforços hidrodinâmicos, a excitação de correntes e ondas, a resposta dinâmica do esforço atuante no cabo de instalação, entre outros.

O esforço que atua no cabo de instalação durante a manobra pode ser representado pela soma de uma parcela estática de carregamento adicionada a uma parcela dinâmica devido ao movimento do guindaste de instalação. Essa excitação acontece por conta do estado de mar que movimenta o navio de instalação.

Além do peso estático do sistema, o esforço dinâmico médio no cabo de instalação é consequência de duas contribuições: a velocidade de lançamento do cabo de instalação e o movimento vertical prescrito pelo navio de instalação (DNV-RP-N103). No presente trabalho, o cabo de instalação será representado de forma simplificada por meio de um sistema mola amortecedor.

O cabo de instalação tem por objetivo representar a rigidez elástica de tal componente durante a operação. Sua velocidade de lançamento será controlada no topo do guindaste que está posicionado no navio de instalação PLSV, conforme mostrado na Figura 5.16.

Para representar os esforços hidrodinâmicos atuantes durante a operação de instalação, as simulações são executadas conforme o caso típico. Nessa abordagem o coeficiente inercial C_M é considerado igual a 2,0 e o coeficiente de arrasto hidrodinâmico C_D é adotado como 1,2.

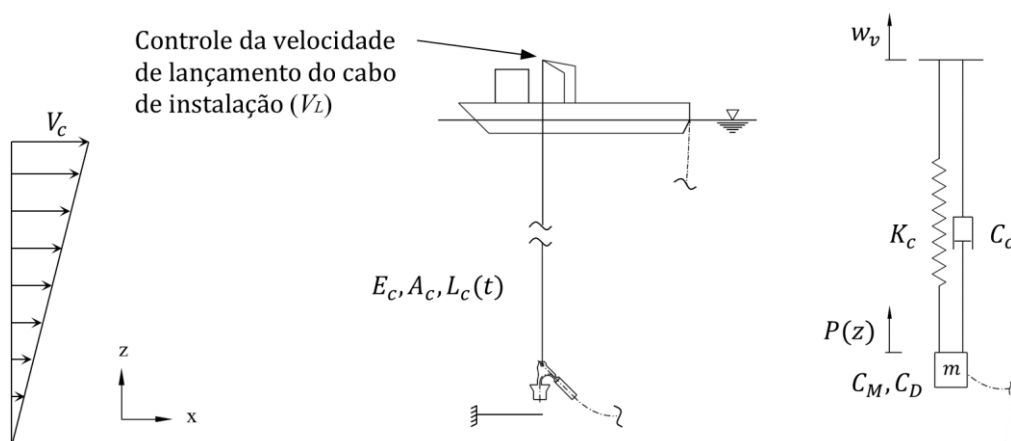


Figura 5.16 – Representação esquemática do lançamento do cabo de instalação

No modelo simplificado proposto, a mola representa a rigidez axial do cabo de instalação ($E_c A_c$) e o amortecedor representa o amortecimento estrutural do material de tal componente. Adicionalmente, as propriedades hidrodinâmicas e efeitos de compressão do cabo serão desconsiderados. Dessa forma, o cabo trabalha apenas em regime de tração no decorrer da simulação.

Durante a operação de conexão, o movimento vertical do MCV ($P(z)$) é uma combinação da velocidade de lançamento do cabo adicionado ao movimento de *heave* do navio PLSV (w_v) e à resposta dinâmica do cabo de instalação. De forma conservadora, o instante de lançamento do MCV é considerado na condição mais crítica de fase entre o movimento do navio e a velocidade de lançamento do cabo, no qual ambos componentes são somados. Nessa abordagem, a velocidade de lançamento do cabo de instalação será considerada constante durante a simulação.

Tipicamente, a velocidade de lançamento do cabo de instalação é de 0,5 m/s para a movimentação através da região de ondas (DNV-RP-N103). No presente trabalho, os esforços reativos induzidos pelo duto flexível serão estudados para velocidades de lançamento de 0,1 m/s e 1,0 m/s. O objetivo é avaliar o comportamento dinâmico do sistema e os esforços reativos no flange de conexão do MCV durante a conexão conforme a Figura 5.3.

Para representação dos carregamentos ambientais, considera-se uma onda incidente de altura de 1,0 metro e 8 segundos de período. O movimento do PLSV é governado pelo RAO conforme descrito na Figura 3.3. O perfil linear de correnteza apresentado na Figura 5.1 será adotado tal que a velocidade na superfície é de 0,7m/s. O MCV é lançado na direção do receptáculo com uma velocidade constante a partir do instante de tempo igual a 10s.

A Figura 5.17 mostra o resultado do estudo de lançamento do cabo de instalação para uma velocidade de lançamento $V_L = 0,1\text{m/s}$, no qual se monitora o deslocamento vertical do MCV ($P(z)$) e o movimento de *heave* do navio de instalação PLSV (W_v).

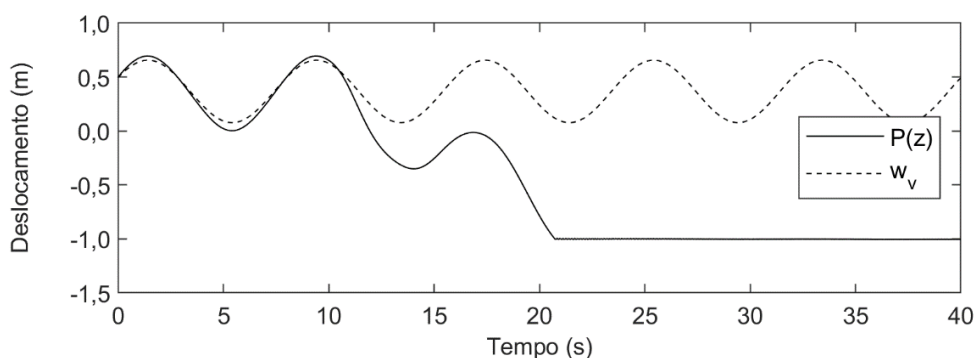


Figura 5.17 – Estudo de lançamento do cabo $V_L = 0,1\text{ m/s}$

A partir da análise dos resultados apresentados na Figura 5.17, pode-se observar que o movimento do MCV está acoplado ao movimento do navio PLSV por meio do cabo de instalação até o instante 10s. Nessa fase inicial, a influência da resposta do sistema dinâmico amplifica os movimentos inferidos pela embarcação ao sistema, como mostrado nas seções anteriores. Pode-se observar que o MCV ($P(z)$) oscila em torno da sua posição de equilíbrio devido à excitação prescrita no topo (W_v).

A partir do instante 10s, o MCV inicia o movimento vertical em direção ao equipamento submarino. Pode-se observar nesse instante que o deslocamento vertical do MCV é uma combinação do movimento do navio de instalação adicionado à velocidade de lançamento do cabo de instalação. O movimento vertical do componente também é influenciado pelo comportamento dinâmico do sistema, o qual está acoplado ao duto flexível e submetido aos carregamentos ambientais e aos movimentos do navio de instalação.

Próximo ao instante 20 segundos, o MCV encosta na viga suporte e seu deslocamento vertical é limitado pela rigidez do equipamento submarino, a qual é representada por meio da função externa. É interessante observar que o deslocamento final do MCV é de aproximadamente -1m, que representa o *gap* inicial inferido ao sistema no início da simulação conforme a Figura 5.8.

De forma a complementar o estudo, a Figura 5.18 mostra a tração atuante no cabo de instalação durante o mesmo instante de tempo.

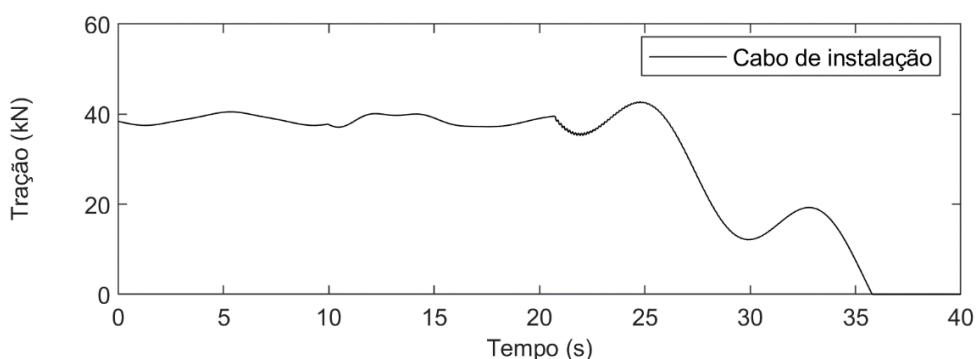


Figura 5.18 – Tração atuante no cabo de instalação $V_L = 0,1$ m/s

Após o lançamento do MCV, em 10s, a tração atuante no cabo de instalação apresenta uma variação devido ao início do movimento vertical descendente do MCV, o que pode ser observado no intervalo entre 10s e 20s. Após o MCV tocar o equipamento submarino, no instante de tempo próximo a 20s, a tração no topo do cabo de instalação começa a reduzir e a reação do conjunto começa a ser transferida para o equipamento submarino pela função externa.

É interessante notar que, próximo ao instante de tempo de 25s, existe uma elevação na tração do cabo de instalação. Tal comportamento deve-se ao movimento de *heave* do navio de instalação. Observa-se que, mesmo após a conexão inicial do MCV, o navio PLSV movimenta o cabo verticalmente no sentido ascendente e impõe um esforço maior no cabo de instalação. A partir desse resultado, pode-se inferir que a velocidade de lançamento $V_L = 0,1$ m/s pode ser baixa demais. Por esse motivo a manobra pode causar danos à estrutura do sistema, já que o peso do MCV não foi totalmente transferido para o equipamento submarino a tempo de não ser influenciado pelo movimento vertical no topo do cabo de instalação.

No instante de 35s, toda a reação gerada pelo conjunto do MCV foi transferida do cabo de instalação para a viga suporte (representação da Figura 4.6). Nessa fase o cabo de instalação não exerce mais função estrutural na simulação. O conjunto está instalado no equipamento submarino, porém ainda sob influência do movimento vertical do navio de instalação conectado à extremidade superior do duto flexível.

Da mesma forma que nas seções anteriores, os esforços atuantes no flange do MCV serão obtidos em função do momento fletor M_y , esforço cortante V_s e tração T_w . A Figura 5.19 mostra o resultado obtido para o momento fletor reativo no flange de conexão do MCV para a velocidade de lançamento $V_L = 0,1$ m/s.

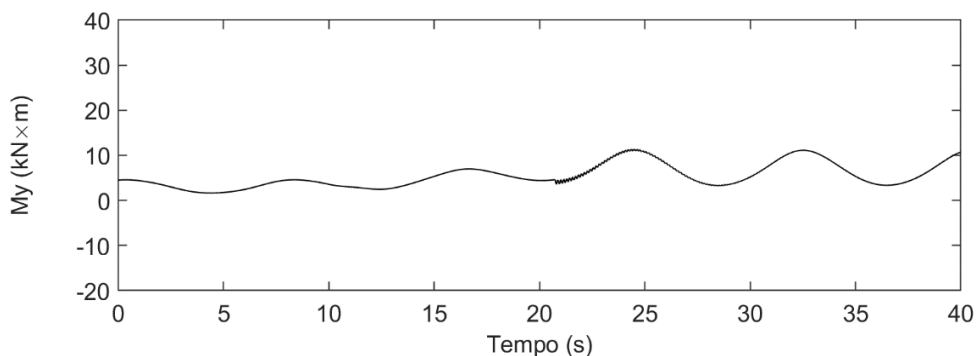


Figura 5.19 – Esforço reativo momento fletor (M_y) para $V_L = 0,1$ m/s

A partir do resultado apresentado, pode-se observar que a única variação nítida na resposta é no instante em que o MCV toca o receptáculo do equipamento residente. Verifica-se que, após o acoplamento o esforço reativo é devido à combinação dos movimentos do MCV e do navio de instalação PLSV. Entretanto, devido à baixa velocidade de lançamento do cabo de instalação, o esforço induzido pelo movimento do MCV é baixo quando comparado ao esforço induzido pelo navio PLSV.

De acordo com os resultados apresentados até este ponto, pode-se inferir duas afirmações. A primeira delas refere-se aos casos nos quais a velocidade de lançamento do cabo de instalação é baixa demais. Nesse evento, a conexão gera baixos esforços reativos no sistema de conexão, o que é benéfico para a integridade estrutural do conjunto. A segunda afirmação infere que tal velocidade não deve ser baixa o suficiente para que não ocorra o movimento vertical no topo do cabo após a conexão do MCV. Nesse caso o cabo de instalação manter-se-ia tracionado após a conexão e o movimento de *heave* do PLSV poderia suspender novamente o conjunto e assim gerar carregamentos excessivos na estrutura do equipamento submarino e do próprio MCV.

Por esse motivo, é razoável concluir que existe uma velocidade de lançamento na qual os esforços reativos não excedam a capacidade mecânica do conjunto de instalação. Porém, para essa mesma condição de lançamento, o equipamento não deve correr o risco de ser suspenso novamente pelo navio de instalação PLSV após o primeiro contato.

Para a mesma condição de velocidade de lançamento do cabo de instalação, a Figura 5.20 mostra o resultado do esforço cortante reativo obtido no flange do MCV.

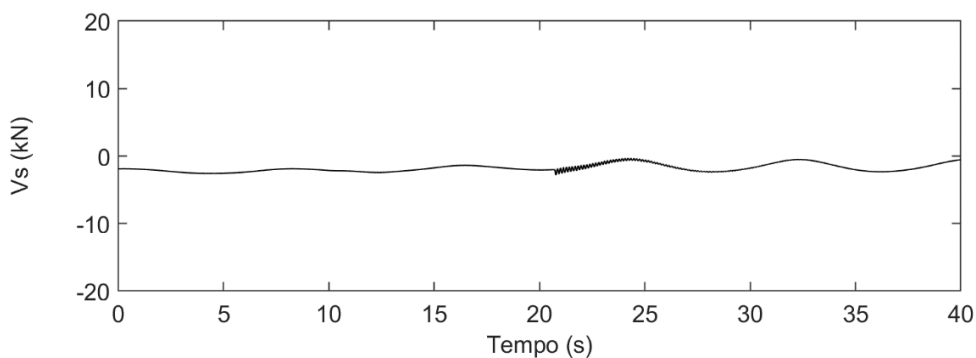


Figura 5.20 – Esforço reativo cortante (V_s) para $V_L = 0,1$ m/s

O esforço cortante apresenta uma característica muito similar ao momento fletor, cujos motivos foram abordados no capítulo anterior. Para o caso da instalação com velocidade controlada, apenas o instante de conexão causa uma pequena variação nos esforços obtidos. Tal variação é amortecida ao longo da simulação. Ademais, observa-se que o movimento do navio de instalação exerce maior influência no esforço reativo assim como apresentado anteriormente.

Convém ressaltar que a velocidade de lançamento do cabo de instalação relativamente baixa adotada nesse caso não induz esforços abruptos ou repentinos durante o movimento vertical do conjunto (Figura 5.18). Dessa forma, espera-se que os esforços reativos no flange do MCV sejam da mesma ordem de grandeza antes e após a conexão.

De forma similar, a Figura 5.21 mostra o resultado de tração obtido no flange de conexão do MCV.

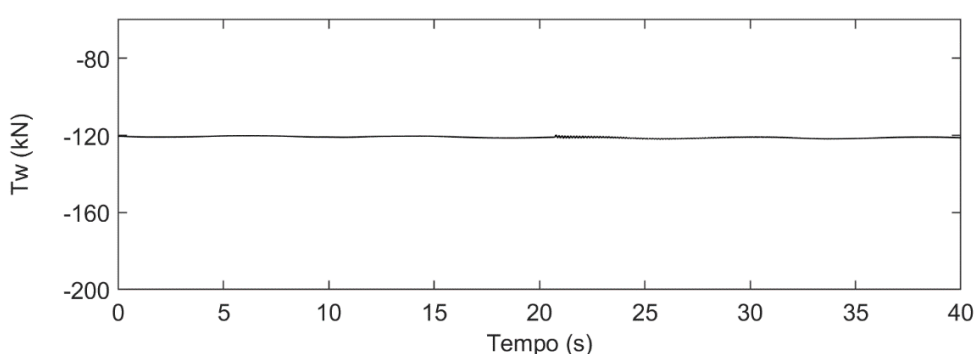


Figura 5.21 – Esforço reativo tração para $V_L = 0,1$ m/s

Assim como no estudo hidrodinâmico, o esforço reativo de tração apresenta pouca variação em relação aos instantes antes e depois da conexão. Como a velocidade do lançamento do cabo de instalação é relativamente baixa, o esforço de tração apresenta baixas oscilações ao longo do processo de conexão.

Observa-se que duas características também são recorrentes em todos os esforços reativos que foram mostrados ao longo da simulação: o movimento de maior frequência é amortecido devido aos mecanismos de dissipação existentes e o movimento de menor frequência se mantém de acordo com o movimento do navio PLSV. É importante destacar que tal comportamento também foi observado no estudo hidrodinâmico do sistema, no qual foram identificados os dois principais mecanismos de dissipação de energia que atuam na simulação: o amortecimento estrutural e viscoso.

Observa-se também que o esforço de tração é o componente menos influenciado pelo movimento vertical do sistema e também é o que menos sofre influência do movimento do navio durante o processo de conexão vertical. Esse comportamento pode ser observado pela baixa variação do esforço ao longo do processo de conexão, tanto no estudo de velocidade de lançamento do cabo de instalação, quanto no estudo hidrodinâmico apresentado anteriormente.

No geral, para a simulação de lançamento do cabo de instalação com velocidade de 0,1 m/s controlada no topo do guindaste, todos os esforços reativos verificados no flange do MCV apresentam baixas variações entre os instantes anterior e posterior à conexão do duto flexível. A resposta dinâmica do sistema ocorre de forma lenta pois a excitação dos componentes envolve baixas velocidades e baixas acelerações durante o movimento vertical descendente.

Para enriquecer o estudo, aumentando a abrangência discussão, serão mostrados os mesmos resultados para uma velocidade de lançamento de cabo $V_L = 1,0$ m/s. Dessa forma, a Figura 5.22 mostra o deslocamento do MCV e do ponto de içamento no PLSV ao longo da simulação.

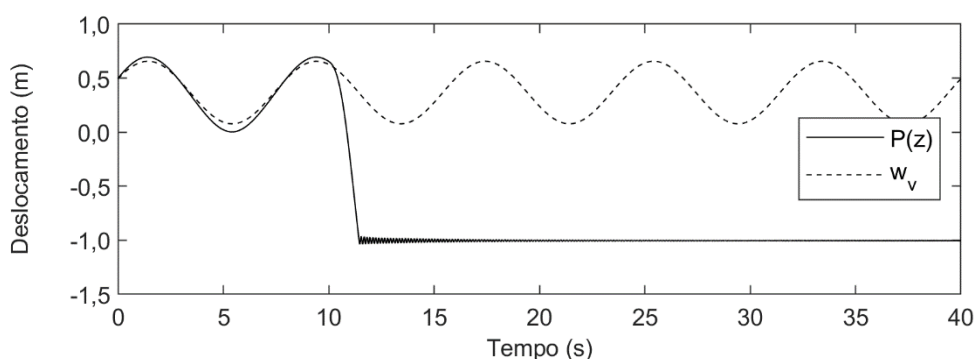


Figura 5.22 – Estudo de lançamento do cabo $V_L = 1,0$ m/s

O resultado ilustrado mostra que o movimento vertical do MCV está acoplado ao movimento do navio PLSV por meio do cabo de instalação até o instante 10s, no qual o

deslocamento do MCV ($P(z)$) oscila em torno da sua posição de equilíbrio devido à excitação prescrita no topo do cabo de instalação (W_v). A partir do instante 10s, o MCV inicia o movimento vertical descendente em direção ao equipamento submarino e, no instante de tempo de aproximadamente 11s, o MCV encosta na viga suporte. A partir desse evento, a rigidez do equipamento submarino limita o deslocamento do MCV induzindo um movimento oscilatório no componente. Esse movimento é dissipado até que a estrutura encontre seu equilíbrio estático na posição instalada no receptáculo do equipamento submarino.

Como é o esperado, o evento de conexão ocorre mais rápido quando comparado ao caso anterior. Esse comportamento é característico pois sistema responde mais rapidamente quando o cabo é lançado com maior velocidade. Durante o movimento vertical do sistema, a parcela da equação de Morison que representa o arrasto hidrodinâmico exerce maior influência na direção oposta ao movimento. Conforme apresentado na metodologia do trabalho, tal esforço é proporcional ao quadrado da velocidade do equipamento em cada instante de tempo.

Por esse motivo, pode-se assumir que, à medida que a velocidade lançamento aumenta, deve existir uma velocidade crítica na qual os componentes estarão limitados pela velocidade terminal do sistema. Tal parâmetro é influenciado pela geometria dos equipamentos, coeficientes de arrasto hidrodinâmico, elasticidade do cabo e dos componentes do conjunto de instalação. De forma similar ao caso anterior, a Figura 5.23 mostra a tração no cabo obtida ao longo da simulação do caso para uma velocidade de lançamento de cabo $V_L = 1,0$ m/s.

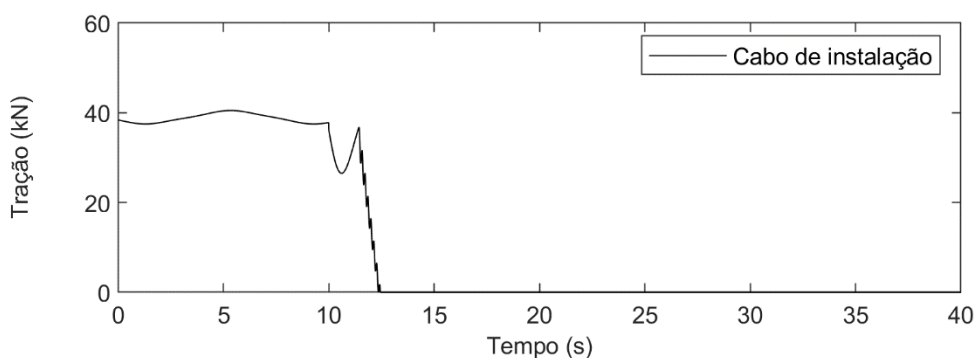


Figura 5.23 – Tração atuante no cabo de instalação $V_L = 1,0$ m/s

A elasticidade do cabo de instalação transfere a reação do conjunto mais rapidamente para o equipamento submarino quando comparado ao caso anterior ($V_L = 0,1$ m/s). O primeiro toque do MCV no equipamento submarino ocorre em 11s e a transferência total do carregamento finaliza em aproximadamente 12,5s. Pode-se observar um pico no carregamento no instante em que o MCV toca o receptáculo.

Um ponto importante para instalações submarinas é evitar que o cabo de instalação tenha tração nula enquanto o equipamento estiver suspenso. Tal característica ocorre quando os esforços hidrodinâmicos que se opõem ao movimento do objeto suspenso excedem o peso estático do conjunto e, conseqüentemente, o cabo acaba por induzir esforços excessivos no sistema de içamento (DNV-RP-N103). Tais esforços hidrodinâmicos estão associados à velocidade de lançamento do cabo, conforme apresentado na equação de Morison. Dessa forma, o estudo da velocidade de lançamento do cabo tem o principal objetivo de evitar esforços abruptos no cabo durante a instalação do equipamento.

Após o contato do MCV com o equipamento submarino, no instante 12,5s, o cabo de instalação apresenta oscilações devido ao movimento do MCV acoplado à viga suporte. Esse comportamento acontece devido ao tempo em que o esforço é transmitido do cabo de instalação para a viga suporte, conforme mostrado na Figura 5.22. Tal evento também ocorre no caso simulado anteriormente, no qual $V_L = 0,1\text{m/s}$ (Figura 5.18), porém em menor magnitude pois a velocidade de lançamento do cabo de instalação é menor.

De formar similar ao caso mostrado anteriormente, os esforços reativos no flange do MCV serão apresentados. O momento fletor M_y é mostrado na Figura 5.24.

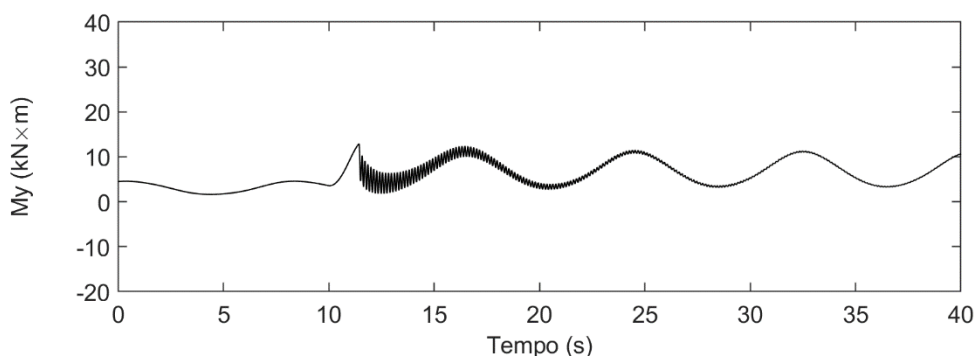


Figura 5.24 – Esforço reativo momento fletor (M_y) para $V_L = 1,0\text{ m/s}$

A partir do resultado obtido, pode-se observar que existe um pico no esforço quando o MCV toca o equipamento submarino. Quando se compara o esforço reativo obtido no caso de lançamento $V_L = 1,0\text{m/s}$ (Figura 5.24) com o caso $V_L = 0,1\text{m/s}$ (Figura 5.19), observa-se que o pico no esforço cresce à medida que a velocidade de lançamento do cabo de instalação aumenta. Dessa forma, os resultados mostram que conforme a velocidade de lançamento aumenta, começam a aparecer picos nos esforços reativos e para um dado valor crítico, esse extremo pode se tornar um esforço excessivo que pode levar à falha dos componentes mecânicos do sistema de conexão vertical.

Um comportamento típico importante da simulação apresentada é que o movimento do MCV acoplado ao duto flexível induz uma resposta de alta frequência no esforço reativo de momento fletor. Da mesma forma apresentada anteriormente, a resposta de alta frequência é amortecida ao longo do tempo pelos mecanismos de dissipação da simulação, enquanto a resposta de baixa frequência permanece excitada de forma contínua pelo movimento da extremidade superior do duto flexível que está conectada ao navio de instalação PLSV. Tal comportamento também foi observado no estudo hidrodinâmico executado na seção anterior e nos casos anteriores do estudo da velocidade de lançamento do cabo de instalação.

Sabe-se que a rigidez de cada componente presente na simulação determina o comportamento dinâmico da resposta do sistema. Por esse motivo, convém ressaltar que o resultado obtido será modificado caso a rigidez do cabo de instalação, do duto flexível ou do equipamento submarino sejam alteradas. Dessa forma, existe a necessidade de um estudo detalhado de tais parâmetros para cada operação de conexão que for executada, no qual se pode estudar as variáveis de rigidez do sistema para evitar picos e esforços excessivos nos componentes. Para o mesmo caso de lançamento do cabo de instalação, a Figura 5.25 mostra o resultado do esforço cortante reativo obtido nas simulações.

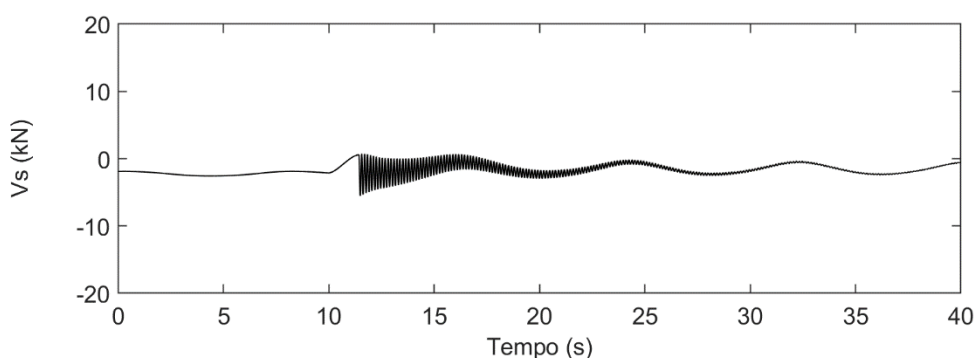


Figura 5.25 – Esforço reativo cortante (V_s) para $V_L = 1,0$ m/s

O esforço reativo cortante apresenta comportamento semelhante ao verificado no momento fletor. À medida que a velocidade de lançamento do cabo V_L aumenta, a amplitude do esforço também aumenta e começam a aparecer picos na resposta. De forma similar, a resposta de alta frequência é amortecida ao longo do tempo da simulação, enquanto a resposta de baixa frequência é constante. A Figura 5.26 mostra o resultado obtido para o esforço de tração no flange de conexão do MCV.

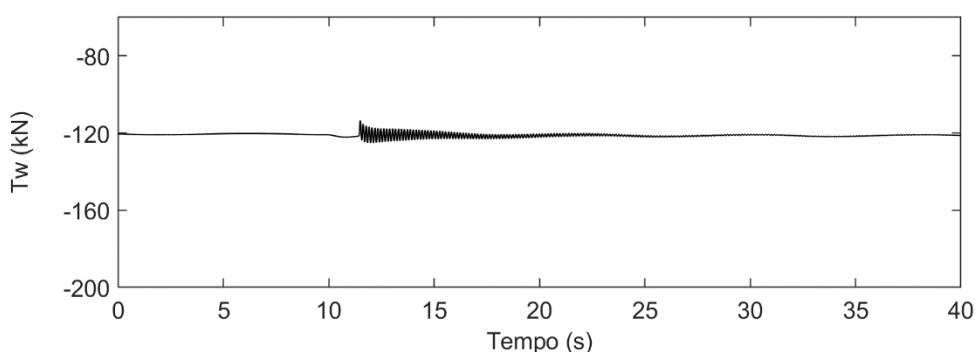


Figura 5.26 – Esforço reativo tração para $V_L = 1,0$ m/s

Assim como o comportamento obtido para os esforços descritos anteriormente, o esforço de tração também apresenta um pico que cresce à medida que a velocidade de lançamento do cabo de instalação aumenta. Ademais, também se observa que o esforço de tração é majoritariamente induzido pelo movimento vertical do MCV acoplado ao receptáculo do equipamento submarino. Porém, como mostrado nos resultados anteriores, o movimento do navio de instalação PLSV exerce pouca influência em tal esforço.

Nesse ponto, cabe ressaltar que existe uma relação entre a velocidade de lançamento do cabo de instalação e os picos e amplitudes dos esforços reativos obtidos nas respostas devido ao acoplamento do MCV com o equipamento submarino. Sabe-se que quanto maior a velocidade de lançamento do cabo de instalação, maior serão tais picos de resposta assim como a amplitude dos esforços reativos.

Entretanto, não se sabe até que ponto o aumento da velocidade exerce influência no sistema e se existe alguma limitação que relacione os esforços reativos e a velocidade de lançamento do cabo de instalação. Por esse motivo, faz-se necessário avaliar o sistema para diferentes magnitudes de velocidade de lançamento do cabo de instalação.

Com objetivo de investigar a influência da velocidade de lançamento do cabo de instalação nos esforços induzidos pelo duto flexível durante a Conexão Vertical Direta, diversas simulações são executadas no programa OrcaFlex utilizando a metodologia proposta no presente trabalho. Dessa forma, o estudo apresentado mais adiante avalia diversos valores de velocidade de lançamento do cabo de instalação. São executados 50 casos variando a velocidade de lançamento de 0,1m/s até 5,0 m/s em passos equivalentes a 0,1m/s. Sabe-se que alguns desses valores são tecnicamente inviáveis em uma operação em ambiente marinho. Entretanto, o estudo será executado para observar as linhas de tendência do sistema e seu comportamento para tal variação de parâmetro.

As condições de contorno são adotadas conforme o estudo anterior, no qual o equipamento submarino é posicionado 4m acima do leito marinho e a posição inicial do MCV está a 1m da viga suporte. A função externa modela o equipamento submarino e o acoplamento do sistema no instante da conexão.

Nessa abordagem, assim como no estudo hidrodinâmico, a amplitude dos esforços é definida como a diferença entre o máximo e o mínimo valor de esforço reativo encontrado em cada uma das simulações executadas. Os resultados serão mostrados em termos de amplitude dos esforços reativos no flange de conexão do MCV (Figura 5.3) em função da velocidade de lançamento do cabo de instalação.

Adicionalmente, os resultados aqui mostrados consideram um perfil de velocidade de corrente marítima conforme Figura 5.16 tal que a velocidade no topo V_C é adotada como 0,7m/s e, por meio de um perfil linear, a velocidade decresce até ser considerada nula na região do leito marinho.

Para as condições de contorno descritas, a Figura 5.27 mostra o resultado do estudo da velocidade de lançamento do cabo de instalação.

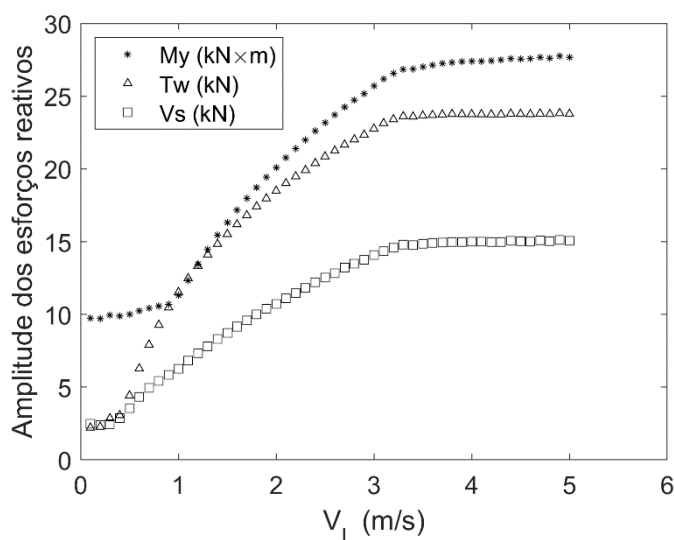


Figura 5.27 – Estudo de velocidade de lançamento do cabo de instalação

Monitorando a amplitude dos esforços reativos no flange de conexão do MCV, o comportamento dinâmico do sistema exibe um patamar à medida que a velocidade de lançamento do cabo de instalação aumenta. Para o modelo simplificado proposto, existe uma velocidade crítica tal que a amplitude dos esforços se torna estável e, acima dessa velocidade, a amplitude dos esforços não apresenta variações.

Conforme ilustrado na Figura 5.27, a partir de 3m/s de velocidade de lançamento do cabo de instalação, o sistema atinge a velocidade crítica na qual os esforços não aumentam para maiores velocidades. Essa velocidade ocorre no instante em que o conjunto de instalação atinge a velocidade terminal do sistema. Como a componente de força de arrasto presente na equação de Morison se opõe ao movimento, existe um instante em que essa componente é máxima e limita a velocidade de acoplamento do sistema.

Dessa forma, quando a velocidade de lançamento do cabo de instalação se torna maior que a velocidade terminal do sistema, os esforços reativos no flange de conexão do MCV atingem seus valores máximos para o sistema estudado. Vale ressaltar que a rigidez do cabo de instalação do equipamento submarino e do duto flexível influenciam diretamente a resposta do sistema. Por esse motivo, um estudo detalhado da rigidez de cada um desses componentes combinados com seu comportamento dinâmico submerso traz resultados relevantes para o dimensionamento dos componentes de tal operação.

Nesta seção, um modelo simplificado foi proposto para estudar a Conexão Vertical Direta de um duto flexível em um equipamento submarino. A modelagem proposta considerou o comportamento quase estático de um equipamento submarino, que foi aproximado por meio de uma viga Euler Bernoulli. A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que à medida que a velocidade de lançamento do cabo de instalação aumenta, os efeitos inerciais do equipamento submarino passam a exercer maior influência no comportamento do sistema. Sabe-se que efeitos como impacto e inércia da viga suporte podem alterar os resultados apresentados para altas velocidades de lançamento. Porém, esse fenômeno está fora da modelagem matemática descrita neste trabalho.

O estudo da transferência de esforços entre os componentes presentes na Conexão Vertical Direta pode ser executado para evitar esforços excessivos durante tal operação. Um detalhado estudo da influência de tais parâmetros no comportamento do sistema pode ser útil na fase de projeto dos equipamentos com objetivo de evitar esforços excessivos durante a Conexão Vertical Direta.

6 CONCLUSÕES

No presente trabalho, a operação de Conexão Vertical Direta foi descrita e um modelo foi desenvolvido para simulações numéricas no programa OrcaFlex. Com objetivo de representar uma operação de instalação de um duto flexível, os esforços externos devido às condições ambientais, peso próprio do duto, pressão hidrostática do mar e movimentos do navio de instalação foram considerados. A rigidez à flexão do receptáculo presente no equipamento submarino foi representada por uma função externa implementada no programa OrcaFlex, o qual considera um modelo matemático de uma viga Euler Bernoulli engastada equivalente.

Uma abordagem semi-empírica foi utilizada para representar a força hidrodinâmica atuante no duto flexível. Um estudo de sensibilidade foi proposto com objetivo de investigar a influência dos coeficientes hidrodinâmicos no comportamento dinâmico do sistema durante a operação de Conexão Vertical Direta. Diversos coeficientes de arrasto hidrodinâmico e inercial foram considerados em simulações a fim de obter uma variedade de resultados e estudar suas associações. Adicionalmente, foi executado um estudo da velocidade de lançamento do cabo de instalação, no qual diversas velocidades de lançamento do sistema foram avaliadas e seus resultados comparados.

O estudo de sensibilidade mostra que os coeficientes hidrodinâmicos exercem influência nas reações obtidas no Módulo de Conexão Vertical durante a etapa de instalação do duto flexível. O momento fletor reativo obtido para os diferentes coeficientes de arrasto hidrodinâmico e inercial mostram que a maior amplitude de esforços ocorre para o maior coeficiente inercial e menor coeficiente de arrasto hidrodinâmico. O mesmo padrão é observado nas respostas obtidas para o esforço cortante e para tração no duto.

Os esforços dissipativos observados nas simulações são o resultado da combinação de duas parcelas de amortecimento, uma estrutural e uma hidrodinâmica. Por meio da amplitude dos esforços, observa-se que o sistema dissipa mais energia para maiores valores de coeficiente de arrasto hidrodinâmico, o que confirma a hipótese do modelo de amortecimento viscoso que no presente trabalho é modelado por meio da equação de Morison.

Por meio dos resultados obtidos, pode-se observar que a rigidez do equipamento submarino exerce influência nos esforços induzidos pelo duto flexível no flange de conexão do Módulo de Conexão Vertical durante a instalação. Verifica-se que existe um pico nos esforços quando o MCV toca a viga suporte que representa o equipamento submarino. Dessa forma, uma

criteriosa avaliação da rigidez do equipamento submarino é necessária para uma modelagem precisa da operação.

De modo geral, durante a fase de projeto dos equipamentos submarinos, um estudo detalhado dos coeficientes hidrodinâmicos envolvidos na Conexão Vertical Direta pode ser realizado com objetivo de obter uma geometria que permita minimizar as reações na conexão do duto flexível com o MCV.

O estudo do lançamento do cabo de instalação teve por objetivo avaliar a velocidade de lançamento do cabo de instalação e a sua influência nos esforços induzidos no flange de conexão do MCV durante a Conexão Vertical Direta. A velocidade de lançamento do cabo de instalação foi controlada no topo do guindaste de instalação do navio PLSV e o compensador de movimentos foi desconsiderado nas simulações.

O estudo proposto mostrou que, para baixas velocidades de lançamento do cabo de instalação, os esforços reativos no flange do MCV são pouco influenciados pelo movimento descendente inferido pelo sistema de conexão vertical. Entretanto, existe o risco de o movimento vertical do navio de instalação PLSV elevar novamente o MCV mesmo após a conexão. Esse movimento pode gerar falha estrutural nos componentes uma vez que, após a conexão, o MCV está rigidamente acoplado ao equipamento submarino.

Ademais, pode-se concluir que à medida que a velocidade de lançamento do cabo de instalação aumenta, ocorre o aumento de picos nos esforços reativos, o que sugere a existência de uma relação entre a velocidade de lançamento do cabo de instalação e os esforços reativos no flange do MCV. Entretanto, existe uma velocidade de lançamento do cabo na qual o sistema atinge sua velocidade terminal. Para essa condição, a força de arrasto aplicada no sentido oposto ao movimento dos componentes atinge seu valor máximo e se iguala ao peso estático do sistema. Dessa forma, a força de resistência devido à componente de arrasto da equação de Morison é responsável pela dissipação de energia no sistema.

Por esse motivo, no modelo proposto, existe uma velocidade crítica na qual os esforços reativos atingem seus valores máximos e estabilizam. O estudo da velocidade de lançamento do cabo de instalação é importante para evitar picos excessivos nos esforços reativos no flange de conexão do MCV e para estudar os instantes em que a tração no cabo de instalação é nula.

Por fim, verificou-se que tanto o movimento vertical do navio PLSV quanto a rigidez do equipamento submarino são elementos relevantes em simulações dinâmicas de instalação por induzirem esforços no MCV durante a etapa de conexão dos dutos flexíveis. Tanto a embarcação quanto o tipo de equipamento submarino podem ser estudados com o

objetivo de se obter uma melhor compreensão do comportamento dinâmico do sistema em tal operação.

Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se avaliar a operação de Conexão Vertical Direta considerando os seis graus de liberdade do Módulo de Conexão Vertical. Nessa hipótese, pode-se avaliar os movimentos nas demais direções e observar se os esforços induzidos pelo duto flexível são modificados. Além disso, o autor sugere a representação do equipamento submarino e do cabo de instalação por meio de um método que possa contabilizar sua massa e propriedades hidrodinâmicas.

REFERÊNCIAS

BAI, Q.; BAI, Y. **Subsea Pipeline Design, Analysis, and Installation**. 1. ed. Oxford: Elsevier, 2014. 809p.

BICUDO, R. G. P. **Análise de instalação de linhas flexíveis**. 2009. 97p. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

BRANDAO, M.; COUTO, P. A Vertical Connection System To Attach Flexible Pipeline to a Subsea Manifold. In: ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 1992, Houston. **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 1992. p.29-34.

CEZAR, A. S. P.; PEREIRA, A. R.; DANIEL, L. L.; OAZEN, E. V.; TROVOADO, L. C.; DE ALMEIDA, M. C. Subsea Solutions in the Pre-Salt Development Projects. In: ANNUAL OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Houston. **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 2015. p.1-20

CHAKRABARTI, S. K. **Hydrodynamics of Offshore Structures**. Berlin: Springer - Verlag, 1987. 434p.

CHAKRABARTI, S. K.; FRAMPTON, R. E. Review of riser analysis techniques. **Applied Ocean Research**, v. 4, n. 2, p. 73–90, 1982.

CHUNG, J.; HULBERT, G. M. A Time Integration Algorithm for Structural Dynamics With Improved Numerical Dissipation: The Generalized- α Method. **Journal of Applied Mechanics**, v. 60, n. 2, p. 371, 1993.

CUSTÓDIO, A. B.; PIMENTEL, W. S. **Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis**. v. 7, n. 2, p. 1-15, 2012.

DE SOUSA, J. R. M.; LIMA, E. C. P.; ELLWANGER, G. B.; PAPALEO, A. Local mechanical behaviour of flexible pipes subjected to installation loads. In: PROCEEDINGS OF THE 20TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING - OMAE 2001, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ASME, 2001. p.219-227

DNV-RP-N103. **Modelling and analysis of marine operations**. Det Norske Veritas, Recommended Practice, 2017.

FERRARI, J. A. **Hydrodynamic Loading and Response of Offshore Risers**. 1998. 502 p. PhD Tesis – Departament of Aeronautics, University of London, London, 1998.

FREET, T. G.; FITZGERALD, C. W.; REBELLO, A. Fast-Track Flexible Flowline Installation In Mississippi Canyon. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 1994, Houston **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 1994. p.835-846

FREITAS, A. E. de S.; RODRIGUEZ, W. S. M.; MONTEIRO, B. da F.; DE LIMA JUNIOR, M. H. A.; CORREIA, F. N.; JACOB, B. P. Estudo da influência da posição do olhal na verticalização de equipamentos MCV. In: XXXVIII IBERO-LATIN AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING – CILAMCE, 2017, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: CILANCE, 2017. p.1-20

GHADIMI, R. A simple and efficient algorithm for the static and dynamic analysis of flexible marine risers. **Computers and Structures**, v. 29, n. 4, p. 541–555, 1988.

HERDEIRO, M. A. N.; DA CUNHA, C. H. G.; MOTTA, B. R. F. Development Of The Barracuda And Caratinga Subsea Production System - An Overview. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Houston. **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 2005. p.1-12

JASWAR KOTO. **Subsea Connection and Jumper**. Indonesia: Ocean & Aerospace Research Institute, 2017. 54p.

JOHNSTON, D. R. A. Flexible riser installation. **Marine Structures**, v. 5, n. 2–3, p. 151–164, 1992.

LARSEN, C. M. Flexible riser analysis — comparison of results from computer programs. **Marine Structures**, v. 5, n. 2–3, p. 103–119, 1992.

LONGO, C. E. C. V.; NETO, S. J.; PAULA, M. T. R.; LOPES, F. M.; GODINHO, C. A. F. Albacora Leste Field-Subsea Production System Development. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Houston. **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 2006. p. 1-15

LOPES, V. S. **Influência da rigidez à flexão de duto flexível na instalação de módulos de conexão vertical em águas profundas**. 2005. 107p. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

LOW, Y. M.; LANGLEY, R. S. Dynamic analysis of a flexible hanging riser in the time and frequency domain. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARCTIC ENGINEERING, Hamburg. **Anais...** Hamburg: ASME, 2006. p. 1-10.

MASTRANGELO, C. F.; BARUSCO, P. J.; FORMIGLI, J. M.; DIAS, R. From Early Production Systems to the Development of Ultra Deepwater Fields - Experience and Critical Issues of Floating Production Units. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Houston. **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 2003. P. 1-14.

MCNAMARA, J. F.; O'BRIEN, P. J.; GILROY, S. G. Nonlinear Analysis of Flexible Risers Using Hybrid Finite Elements. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, v. 110, n. 3, p. 197, 1988.

MORAIS, M.; AZEVEDO, F.; KVELLO, O.; TANSCHKEIT, P. Deepwater Achievements and Challenges on the Extra Roncador Pipeline Installation Project. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Houston. **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 2001. p. 1-10.

MOREIRA, J. R.; CERQUEIRA, M. B.; SILVA, G. R.; NAGLE, F. J. Further Advances In Deepwater Flowline Connection Technology. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Houston. **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 1996. p.785-797.

MORISON, J. R.; JOHNSON, J. W.; SCHAAF, S. A. The Force Exerted by Surface Waves on Piles. **Journal of Petroleum Technology**, 1950.

NAGLE, F. J. M.; MENDONÇA DA SILVA, J. E.; COSTA, L. A. G.; CAPLLONCH, R. W. Vertical Connection System for Flexible Pipes: Offshore Tests and Pioneer Installation. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Houston. **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 1993. p.503-514.

ORCINA. OrcaFlex user manual version 10.2. Disponível em: <<https://www.orcina.com/>>.

PATEL, M. H.; SEYED, F. B. Review of flexible riser modelling and analysis techniques. **Engineering Structures**, v. 17, n. 4, p. 293-304, 1995.

PORCIUNCULA, S. L.; RIBEIRO, J. E. D.; GONCALVES, R. C. F. Marlim Field: Risers, Flowlines and Umbilicals Developed. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Houston. **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 1999. p.1-17

PRADO, L. A. R.; SANCHES, E. M.; OLIJNIK, L. A. Spool-Tree Development for 2500-m Water Depth. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Houston. **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 1999. p. 1-8.

RIBEIRO, L. P.; PAULO, C. A. S.; NETO, E. A. Campos Basin - Subsea Equipment: Evolution and Next Steps. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Houston. **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 2003. p.1-10.

ROVERI, F. E.; VELTEN FILHO, A. G.; MELLO, V. C.; MARQUES, L. F. The Roncador P52 Oil Export System - Hybrid Riser at a 1800m Water Depth. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Houston. **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 8 abr. 2008. p.1-15.

SANTOS, I. H. F.; VARDARO, E.; GOES, E.; LOPES, V. S.; VAILLANT, A.; PALMEIRO, A.; KELNER, J.; CESAR, V. M.; PESSOA, S.; REIS, B. Real Time Radius of Curvature Measurement During DVC Operations Based on Flexible Pipe 3D Reconstruction. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Offshore Technology Conference, 2015. p.1-18.

SARPKAYA, T. **Wave Forces on Offshore Structures**. New York: Cambridge university press, 2010. 338p.

SILVA, C. H.; JUINITI, R.; PUPPIM, L. A.; NEUMANN, L. F. Marlim Field: The Evolution of Subsea Techniques and Hardware. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, Houston. **Anais...** Houston: Offshore Technology Conference, 1999. p.1-11.

SPARKS, C. P. **Fundamentals of Marine Riser Mechanics - Basic Principles and Simplified Analysis**. 1. ed. Oklahoma: PennWell Corporation, 2007. 370 p.

TEIXEIRA, D. C.; MOROOKA, C. K. A time domain procedure to predict vortex-induced vibration response of marine risers. **Ocean Engineering**, v. 142, p. 419–432, 2017.

XAVIER, M. L. **Instalação de Dutos Flexíveis em Águas Ultraprofundas**. 2006. 82p. Dissertação (Mestrado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

ZHAO, H.; CHEN, R.; LUO, X.; DUAN, M.; LU, Y.; FU, G.; TIAN, H.; YE, D. Metal sealing performance of subsea X-tree wellhead connector sealer. **Chinese Journal of Mechanical Engineering**, v. 28, n. 3, p. 649–656, 2015.

APÊNDICE A – FUNÇÃO EXTERNA

Como visto na seção 4.3, a função externa tem por objetivo modelar a rigidez da linha de atuação dos esforços no equipamento submarino. A função externa é implementada no programa computacional OrcaFlex versão 10.3 e programada em Python versão 3.6. O código utilizado no presente trabalho é transcrito abaixo:

```

1 class Inival(object):
2     def __init__(self):
3         self.valid = False
4         self.chk = 0
5         self.zpos = 0
6
7     def getStateAttributes(self):
8         return {
9             'valid': self.valid,
10            'chk': self.chk,
11            'zpos': self.zpos,
12        }
13
14    def setStateAttributes(self, attributes):
15        self.valid = attributes['valid']
16        self.chk = attributes['chk']
17        self.zpos = attributes['zpos']
18
19 class Force_based_Z(object):
20     def Initialise(self, info):
21
22         self.periodNow = OrcFxAPI.Period(OrcFxAPI.pnInstantaneousValue)
23
24         params = info.ObjectParameters
25
26     def GetParameter(paramName, default=None):
27         if paramName in params:
28             param = params[paramName]
29             if isinstance(default, float):
30                 param = float(param)
31             elif isinstance(default, int):
32                 param = int(param)
33             elif not default is None:
34                 param = default
35         else:

```

```

36         raise Exception('Parameter %s is required.' % paramName)
37     return param
38
39     self.Iviga = GetParameter('Iviga')
40
41     self.now = Inival()
42
43     if info.StateData:
44         import json
45         state = json.loads(info.StateData)
46         self.now.setStateAttributes(state['now'])
47
48     else:
49         self.now = Inival()
50
51
52 def Calculate(self, info):
53
54     hdrop = 1 # (m)
55
56     chk = self.now.chk
57
58     if self.now.valid is False:
59
60         zpos = info.ModelObject.TimeHistory('z', self.periodNow)[0]
61         self.now.zpos = zpos
62         print('Ini Pos Z: {}'.format(zpos))
63
64     else:
65
66         zpos = self.now.zpos
67
68     vpos = -496
69
70     if self.now.valid is False:
71
72         print('Posicao vertical da mola: {}'.format(vpos))
73
74     self.now.valid = True
75
76     zdof = info.ModelObject.TimeHistory('z', self.periodNow)[0]
77     vel = info.ModelObject.TimeHistory('GZ-Velocity', self.periodNow)[0]
78
79     L = 3.0
80     E = 210000000000
81     I1 = float(self.Iviga)

```

```
82
83     print(I1)
84
85     kz = (3 * E * I1) / (L**3)
86     amort = 0
87
88     gap = zdof - vpos
89
90     if info.SimulationTime <= 0.0:
91
92         info.Value = 0
93
94     else:
95
96         if gap > 0 and chk == 0:
97
98             info.Value = 0
99
100        else:
101
102            Fz = (kz*gap + amort * vel) / 1000
103            chk = 1
104            self.now.chk = chk
105            info.Value = -Fz
106
107    def StoreState(self, info):
108
109        import json
110        state = {'now': self.now.getStateAttributes()}
111        info.StateData = json.dumps(state)
112
113    #YCDS
```