



ANÁLISE DE INSTALAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS POR CONEXÃO VERTICAL DIRETA

Rubia Ferreira Dias Thorley

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador(es): Breno Pinheiro Jacob
Fabrício Nogueira Corrêa

Rio de Janeiro
Setembro de 2015

ANÁLISE DE INSTALAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS POR CONEXÃO
VERTICAL DIRETA

Rubia Ferreira Dias Thorley

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Examinada por:

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

Prof. Fabrício Nogueira Corrêa, D.Sc.

Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2015

Thorley, Rubia Ferreira Dias

Análise de instalação de dutos flexíveis por conexão vertical direta / Rubia Ferreira Dias Thorley – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XXVI, 110 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Breno Pinheiro Jacob

Fabício Nogueira Corrêa

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 96-97.

1. Rigidez em Dutos Flexíveis. 2. Instalação *Offshore*.
3. Dutos Submarinos. I. Jacob, Breno Pinheiro *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

A todos que me apoiaram nessa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que acreditavam em mim quando me faltavam forças para seguir em frente, cuja principal percursora foi minha mãe, presente em todos os momentos. Para aqueles que me fizeram enxergar que a vida, mesmo com suas intempéries, é capaz de trazer muita alegria.

Em especial, agradeço ao LAMCSO por ter me acolhido e me fornecido o suporte necessário. Ao carinho de todos que sempre me receberam com um sorriso no rosto e dispostos em ajudar, mesmo aquele podendo ser um dia complicado. Ao meu orientador Fabrício Corrêa, que além de ser uma pessoa altruísta, detém um conhecimento como poucos, capaz de passar para seus discípulos de forma leve e precisa o seu saber, sempre me ajudando e apoiando nos momentos mais difíceis. Ao meu orientador Breno Jacob, pela sua dedicação para com os alunos e por mostrar que somos capazes de ir além do que imaginamos ser o nosso limite.

Agradeço ao companheiro de trabalho Martin, o qual sempre estive disposto em ajudar. Possui uma bondade sem igual e acredita no melhor de cada um de nós como seres humanos, cuja capacidade de trabalho ultrapassa todos os limites de compreensão. Convicta de que fez a melhor escolha, seu mestrado na Europa trará frutos imensuráveis. Obrigada mais uma vez.

À empresa em que trabalho, por ter concedido o tempo necessário para a realização deste mestrado.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

Àquele que creio por me fazer forte a cada dia, Deus.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE DE INSTALAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS POR CONEXÃO VERTICAL DIRETA

Rubia Ferreira Dias Thorley

Setembro/2015

Orientadores: Breno Pinheiro Jacob

Fabício Nogueira Corrêa

Programa: Engenharia Civil

O constante avanço da exploração em águas profundas e ultraprofundas vem ocasionando pesquisa e desenvolvimento de ponta em empresas de projeto e fabricação de dutos e equipamentos submarinos de forma a se superarem cada vez mais nesse cenário desafiador. Os dutos flexíveis são largamente adotados em diversas lâminas d'água devido a sua velocidade de instalação e sua adequação em grande parte das Unidades Marítimas e em navios de lançamento. A tecnologia do duto flexível e os métodos de instalações estão presentes neste estudo. O duto flexível é uma estrutura composta por camadas, capazes de deslizar em relação à outra e o trabalho mecânico perdido entre essas camadas, devido ao atrito interno, pode gerar efeito de histerese. De acordo com o momento de flexão cíclico, a histerese será gerada ao longo da curvatura do duto flexível. O comportamento da histerese de dutos flexíveis tipo *unbonded* será investigado.

Esta dissertação tem como principal objetivo analisar as variáveis relevantes limitantes em um cenário de instalação por conexão vertical exposta a carregamentos extremos e aleatórios, avaliando os riscos e possíveis mitigações. O programa de elementos finitos ORCAFLEX foi utilizado para desempenhar todos os casos estudados.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

INSTALLATION ANALYSIS OF FLEXIBLE PIPELINES BY DIRECT VERTICAL CONNECTION

Rubia Ferreira Dias Thorley

September/2015

Advisors: Breno Pinheiro Jacob

Fabrício Nogueira Corrêa

Department: Civil Engineering

The daily progress in deep and ultra-deep water exploitation have been caused a ripple effect in design and manufacturing companies of pipelines and subsea equipment in order to surpass even more in this challenging environment. Flexible pipes are widely used for a range of water depths due to its fast overboarding installation and capability of being suitable for almost Marine Units and Pipeline Laying Vessels. Flexible pipe technology and installations methods are present in the study. Flexible pipe is a layered structure that could slide relative to each other and the irrecoverable mechanical work due to internal frictional can generate hysteresis effect. Under cyclic bending moment, a hysteresis will be formed in the flexible pipe curvature. Hysteresis behavior of unbonded flexible pipes will be investigated.

The main focus of this dissertation is analyzing relevant limited variables in an installation environment by vertical connection in extreme loads, evaluation of risks and feasible mitigations. These analyzes consider random loads from sea waves. Finite Elements software ORCAFLEX was used to perform all case studies.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	XII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XVIII
NOMENCLATURA.....	XXI
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO.....	3
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2 SISTEMA DE PRODUÇÃO OFFSHORE.....	5
2.1 INTRODUÇÃO.....	5
2.2 EQUIPAMENTOS OFFSHORE.....	5
2.3 NAVIOS DE LANÇAMENTO	9
2.3.1 CARACTERÍSTICAS PARA NAVIOS DE LANÇAMENTO EM ÁGUAS PROFUNDAS	9
2.3.2 INSTALAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS	10
2.4 TECNOLOGIA DOS DUTOS FLEXÍVEIS	14
2.4.1 DEFINIÇÕES.....	14
2.4.2 NORMAS APLICÁVEIS.....	15
2.4.3 ESTRUTURA DO DUTO FLEXÍVEL.....	16
2.4.4 ESFORÇOS EM UM DUTO FLEXÍVEL.....	19
2.4.5 PROJETO ESTRUTURAL DE UM DUTO FLEXÍVEL	22
2.4.6 RIGIDEZ À FLEXÃO DE DUTOS SUBMARINOS	23
3 INSTALAÇÃO DO MÓDULO DE CONEXÃO VERTICAL E LANÇAMENTO DE LINHAS FLEXÍVEIS	26
3.1 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PELA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE PRIMEIRA EXTREMIDADE.....	26

3.1.1	Conexão Vertical Direta de Primeira Extremidade - Lançamento	26
3.1.2	Conexão Vertical Direta de Primeira Extremidade - Instalação	27
3.2	CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PELA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE SEGUNDA EXTREMIDADE	28
4	ANÁLISES PRELIMINARES.....	30
4.1	INTRODUÇÃO.....	30
4.2	LANÇAMENTO DE EQUIPAMENTOS DE GRANDE PORTE	30
4.3	CONFIGURAÇÃO DE LANÇAMENTO	31
4.4	TIPOS DE MAR	32
4.5	AVALIAÇÃO ANALÍTICA DO PERÍODO DE RESSONÂNCIA	32
4.6	AVALIAÇÃO DO PERÍODO NATURAL ATRAVÉS DO MODELO NUMÉRICO	34
4.7	SIMULAÇÕES DINÂMICAS NA REGIÃO DE RESSONÂNCIA PARA MANIFOLDS	35
4.7.1	Cargas Dinâmicas	36
4.8	AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO PERÍODO NATURAL DO SISTEMA DE LANÇAMENTO DE DUTOS FLEXÍVEIS.....	37
4.8.1	Características do módulo de conexão vertical.....	38
4.8.2	Características dos dutos flexíveis.....	38
4.8.3	Avaliação dos dutos submarinos	39
4.9	CONCLUSÕES DO ESTUDO PRELIMINAR	42
5	ESTUDO DE CASOS.....	43
5.1	INTRODUÇÃO.....	43
5.2	DESCRIÇÃO DOS MODELOS.....	43
5.2.1	Análise Global	44
5.2.2	Descrição das Análises Estáticas	44
5.2.3	Descrição das Análises Dinâmicas	45
5.3	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO	47
5.4	CÁLCULO TEÓRICO.....	48
5.4.1	Carga Estimada de Lançamento (ELT - <i>Estimated Laying Tension</i>)	48

5.4.2	Carga de Lançamento (DLT).....	48
5.5	EQUIPAMENTO DE INDUÇÃO PARA CONEXÃO DE LINHAS FLEXÍVEIS.....	49
5.5.1	Características do equipamento e do duto flexível	49
5.5.2	Propriedades do Cabo de lançamento	49
5.6	CARREGAMENTOS AMBIENTAIS	49
5.6.1	Carregamentos durante a instalação	50
5.6.2	Diagrama Operacional	50
5.6.3	Modelo de Corrente Marinha.....	51
5.6.4	Modelo de Onda	52
5.7	ANÁLISES PARAMÉTRICAS.....	54
5.7.1	Introdução.....	54
5.7.2	Discretização do modelo.....	54
5.7.3	Modelo do duto flexível.....	56
5.7.4	Avaliação da Rigidez de curvatura	59
5.7.5	Influência da corrente	61
5.7.6	Posicionamento dos dispositivos de lançamento	62
5.7.7	Pontos críticos.....	65
6	RESULTADOS.....	67
6.1	INTRODUÇÃO.....	67
6.2	CARGAS NA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE PRIMEIRA EXTREMIDADE – MOVIMENTO LIVRE	68
6.2.1	Resultados na Extremidade do Duto Flexível – Movimento livre.....	69
6.2.2	Resultados no Cabo – Movimento livre	71
6.2.3	Resultados no Restritor de Curvatura – Movimento livre	72
6.3	CARGAS NA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE PRIMEIRA EXTREMIDADE – MOVIMENTO RESTRITO.....	73
6.3.1	Resultados na Extremidade do Duto Flexível – Movimento restrito.....	73
6.3.2	Resultados no Restritor de Curvatura – Movimento restrito	75
6.4	CARGAS NA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE PRIMEIRA EXTREMIDADE – PROCEDIMENTO DE DESCIDA	76
6.4.1	Procedimento de descida – Parâmetros da Análise	77

6.4.2	Resultados na Extremidade do Duto Flexível (End B) – Procedimento de Descida em Movimento Livre.....	77
6.4.3	Resultados no Cabo – Procedimento de Descida em Movimento Livre	79
6.4.4	Resultados no Restritor de Curvatura – Procedimento de Descida em Movimento Livre	79
6.5	CARGAS NO MOMENTO DA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE SEGUNDA EXTREMIDADE – TOPO.....	81
6.5.1	Resultados no Duto Flexível - Segunda extremidade (topo)	81
6.5.2	Resultados no Pescoço de ganso - Segunda extremidade (topo)	83
6.5.3	Comparativo entre cargas de instalação (ELT e DLT)	84
6.6	CARGAS NO MOMENTO DA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE SEGUNDA EXTREMIDADE – FUNDO	85
6.6.1	Posicionamento das lingadas de instalação	85
6.7	ANÁLISE LIMITE DA TRAÇÃO DE TOPO.....	89
6.8	ANÁLISE LIMITE DA COMPRESSÃO NO FUNDO.....	89
6.9	CONDIÇÕES CRÍTICAS DE INSTALAÇÃO	90
6.10	TRATAMENTO DE DADOS POR WEIBULL	91
7	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	93
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
9	ANEXO 1 - RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR	98
10	ANEXO 2 – FREQUÊNCIA NATURAL EM EQUIPAMENTOS SUBMARINOS	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Arranjo do leito submarino [1].	1
Figura 2.1 – Representação de uma Árvore de Natal Molhada (FMC Technologies).	6
Figura 2.2 – Representação do PLEM (FMC) e do PLET (Marinewell), respectivamente.	6
Figura 2.3 – Representação de um <i>manifold</i> (FMC).	7
Figura 2.4 – Instalação vertical de um <i>manifold</i> no campo de Alcoforado por meio de guindaste.	7
Figura 2.5 – Ilustração da instalação pendular de um <i>manifold</i> [4].	8
Figura 2.6 – Ilustração do método <i>S-Lay</i> [6].	10
Figura 2.7 – Ilustração do método <i>J-Lay</i> [6].	11
Figura 2.8 – Análise por elementos finitos para as deformações ocorridas para duas descontinuidades de espessura [7].	12
Figura 2.9 – North Ocean 102 (McDermott) – Método <i>Reel-Lay</i> com carretel horizontal.	12
Figura 2.10 – Esquemático da instalação por <i>Reel-Lay</i> [7] – Carretel vertical.	13
Figura 2.11 – PLSV Deep Blue (Technip) – Método vertical <i>Reel-Lay</i> com <i>moonpool</i>	13
Figura 2.12 – Visualização estrutural de uma seção de um duto flexível do tipo <i>unbonded</i> [1].	14
Figura 2.13 – Representação de um restritor de curvatura para os dutos flexíveis [9].	15
Figura 2.14- Representação típica das camadas de um duto flexível [10].	16
Figura 2.15 – Seções típicas utilizadas na armadura de pressão [10].	17
Figura 2.16 - Aspecto dos arames da armadura de tração de uma linha flexível com falha “gaiola de passarinho” [10].	18

Figura 2.17 - Aplicação das camadas de fitas no duto flexível [4].....	18
Figura 2.18 – Ilustração da pressão atuando na linha [4].	19
Figura 2.19 – Tensões devido à pressão interna em dutos de pequena espessura, sendo σ_L a tensão devido ao efeito do <i>endcap</i> e σ_h a tensão de <i>hoop</i> [6].	21
Figura 2.20 – Relação entre momento e curvatura [12].....	24
Figura 2.21 – Curva de Histerese [12].	25
Figura 3.1 – Configuração de descida do módulo de conexão vertical conectado ao duto flexível [4].....	27
Figura 3.2 – Ilustração do ângulo do pescoço de ganso [4].....	28
Figura 3.3 – Configuração de instalação do módulo de conexão vertical conectado ao duto flexível pela conexão vertical de segunda extremidade [4].	28
Figura 3.4 – Posicionamento dos estropos [4].	29
Figura 4.1 – Configuração do sistema de instalação [4].....	30
Figura 4.2 – Condição inicial (a) e resposta do sistema do <i>manifold</i> (b). ..	34
Figura 4.3 – Resposta do sistema do PLEM A. e PLEM B, respectivamente.	35
Figura 4.4 – Casos analisados.	35
Figura 4.5 – Relação carga máxima-comprimento de cabo do PLSV para cada caso analisado ($H_m=3,72m$, $T=8,6m$ para determinístico e $H_s=2m$, $T_p=8,6m$ para aleatório).	37
Figura 4.6 – Frequência Natural do sistema pela profundidade da água...	41
Figura 4.7 – Influência do duto flexível no sistema.....	41
Figura 5.1 – Vista geral do modelo - ORCAFLEX.	46
Figura 5.2 – Detalhes de topo para a conexão vertical de primeira extremidade - ORCAFLEX.....	46
Figura 5.3 – Primeiro modelo (conexão vertical de primeira extremidade em movimento livre - fundo) - ORCAFLEX.....	46

Figura 5.4 – Detalhes de topo para a conexão vertical de primeira extremidade em movimento restrito - ORCAFLEX.....	47
Figura 5.5 – Segundo modelo (conexão vertical de primeira extremidade em movimento restrito - fundo) - ORCAFLEX.....	47
Figura 5.6 – Quarto modelo (conexão vertical de segunda extremidade) - ORCAFLEX.....	47
Figura 5.7 – Forças atuantes durante a instalação do duto flexível.	50
Figura 5.8 – Perfil da Corrente de proa (vermelho) e de través (azul).	52
Figura 5.9 – Espectro de JONSWAP comparado com o espectro de Pierson-Moskowitz.....	53
Figura 5.10 – Esquemático para lançamento em primeira extremidade.....	55
Figura 5.11 – Esquemático para lançamento em segunda extremidade	56
Figura 5.12 – Momento fletor para a configuração em catenária livre – Rigidez Linear.....	57
Figura 5.13 – Momento fletor para a configuração em catenária livre – Rigidez Histerética.	58
Figura 5.14 – Momento fletor para a configuração em catenária livre – Rigidez Histerética.	58
Figura 5.15 – Configuração de Equilíbrio - Linear, não linear e curva de histerese, respectivamente – Oscilação livre.....	60
Figura 5.16 – Configuração de Equilíbrio - Linear, não linear e curva de histerese, respectivamente – Oscilação restrita.....	61
Figura 5.17 – Influência da corrente de 2500 m no deslocamento do equipamento submarino.	62
Figura 5.18 – Ilustração do posicionamento do duto flexível e do cabo de aço para lançamento em uma embarcação.....	63
Figura 5.19 – Diferença percentual entre esforços devido à configuração de lançamento.....	64
Figura 5.20 – Momento fletor ao longo do duto flexível.....	65

Figura 5.21 – Tração efetiva ao longo do cabo.....	65
Figura 5.22 – Tração efetiva ao longo do duto flexível.....	66
Figura 6.1 – Conexão restritor de curvatura e conector – Conjunto em movimento livre.	68
Figura 6.2 – Extremidade do Cabo e Duto (topo) – Conjunto em Movimento Livre.....	68
Figura 6.3 – Momento Fletor vs Altura significativa (a) e Momento Fletor vs Período de Pico (b) para sistema com movimento livre – Corrente de Proa.....	70
Figura 6.4 – Tração Efetiva vs Altura significativa (a) e Tração Efetiva vs Período de Pico (b) para sistema com movimento livre – Corrente de Proa.	71
Figura 6.5 – Tração Efetiva vs Altura significativa (a) e Tração Efetiva vs Período de Pico (b) para sistema com movimento livre – Corrente de Proa.	72
Figura 6.6 – Raio de Curvatura vs Altura significativa (a) e Raio de Curvatura vs Período de Pico (b) para sistema com movimento livre – Corrente de Proa.....	73
Figura 6.7 – Conexão restritor de curvatura e conector – Conjunto em movimento restrito.	73
Figura 6.8 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível - Corrente / Onda De Proa – Movimento restrito.....	75
Figura 6.9 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível - Corrente De Través e Onda De Proa – Movimento restrito.....	75
Figura 6.10 – Arranjo FSRH – Campo de Girassol e ilustração da conexão do MCV [5]	76
Figura 6.11 – Arranjo BSR (Subsea 7).	77
Figura 6.12 – Momento Fletor na extremidade do Duto Flexível (End B) – Procedimento de <i>Offloading</i>	78

Figura 6.13 – Tração Efetiva na extremidade do Duto Flexível (Topo – End A) – Procedimento de <i>Offloading</i>	78
Figura 6.14 – Tração Efetiva na extremidade do Cabo (Topo – End A) - Corrente De Través e Onda De Proa (IW e RW) – Procedimento de <i>Offloading</i>	79
Figura 6.15 – Tração efetiva vs Comprimento do duto flexível em um sistema com movimento livre – Corrente de Través – Mar irregular.	80
Figura 6.16 – Tração efetiva vs Comprimento do duto flexível em um sistema com movimento livre – Corrente de Través – Mar regular.	80
Figura 6.17 – Momento fletor máximo vs Altura significativa (a) e Momento fletor máximo vs Período de Pico (b) para sistema de segunda extremidade – Corrente de Proa.....	82
Figura 6.18 – Raio mínimo de curvatura vs Altura significativa (a) e Raio mínimo de curvatura vs Período de Pico (b) para sistema de segunda extremidade – Corrente Proa.....	83
Figura 6.19 – Tração efetiva vs Altura significativa (a) e Tração efetiva vs Período de Pico (b) para sistema de segunda extremidade – Corrente Proa.	84
Figura 6.20 – Lingada com posicionamento 7 m e 12 m do módulo de conexão.....	86
Figura 6.21 – Lingada com posicionamento 12 m e 17 m do módulo de conexão.....	86
Figura 6.22 – Lingada com posicionamento 17 m e 22 m do módulo de conexão.....	86
Figura 6.23 – Lingada com posicionamento 22 m e 27 m do módulo de conexão.....	87
Figura 6.24 – Resultados do Raio de Curvatura – Lingadas (análises dinâmicas).	87
Figura 6.25 – Resultados do Momento Fletor – Lingadas.....	88

Figura 6.26 – Resultados do Raio de Curvatura da lingada 8 m e 11 m do conector (análise dinâmica).....	88
Figura 6.27 – Tratamento de dados por Weibull – Sistema conexão vertical direta de primeira extremidade.....	92
Figura 9.1 – Graus de liberdade do movimento de um navio.....	98
Figura 9.2 – RAOs <i>Heave</i> para ângulos de incidência de (a) 0 grau, (b) 45 graus, (c) 90 graus, (d) 135 graus e (e) 180 graus.....	100
Figura 9.3 – RAO <i>Pitch</i> e <i>Surge</i> para os ângulos de incidência de 0, 45, 90, 135 e 180 graus, respectivamente.	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1 – Configuração de Lançamento dos equipamentos submarinos para águas ultraprofundas.....	31
Tabela 4.2 – Parâmetros hidrodinâmicos.....	36
Tabela 4.3 – Principais características do cabo de aço selecionado.	36
Tabela 4.4 – Propriedades do módulo de conexão vertical.	38
Tabela 4.5 – Propriedades dos dutos flexíveis.....	38
Tabela 5.1 – Diagrama Operacional – Período de Pico e Altura Significativa de Onda.....	51
Tabela 5.2 – Perfil Vertical de Corrente de través e de proa no período 1 ano.	51
Tabela 5.3 –Parâmetros adotados nas simulações dinâmicas	54
Tabela 5.4 – Definição do comprimento e discretização do modelo – Primeira extremidade.	55
Tabela 5.5 – Definição do comprimento e discretização do modelo – Segunda extremidade.	55
Tabela 5.6 - Resultados do momento fletor na extremidade do duto flexível para as configurações de equilíbrio e dinâmica – Oscilação livre.....	60
Tabela 5.7 - Resultados do momento fletor na extremidade do duto flexível para as configurações de equilíbrio e dinâmica – Oscilação restrita.	61
Tabela 5.8 – Configurações para lançamento de um duto flexível.....	62
Tabela 6.1 – Momento Fletor na extremidade do Duto Flexível (End B) – Corrente / Onda Proa.....	69
Tabela 6.2 – Momento Fletor na extremidade do Duto Flexível (End B) – Corrente Través e Onda Proa.	69
Tabela 6.3 – Tração Efetiva na extremidade do Duto (Topo) – Corrente / Onda Proa.....	70

Tabela 6.4 – Tração Efetiva na extremidade do Duto (Topo) – Corrente Través e Onda Proa.	70
Tabela 6.5 – Tração Efetiva na extremidade do Cabo (Topo) – Corrente / Onda Proa.....	71
Tabela 6.6 – Tração Efetiva na extremidade do Cabo (Topo) – Corrente Través e Onda Proa.	71
Tabela 6.7 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível – Corrente / Onda Proa.....	72
Tabela 6.8 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível – Corrente Través e Onda Proa.	72
Tabela 6.9 – Momento Fletor na extremidade do Duto Flexível (End B) – Corrente / Onda Proa – Movimento restrito.....	74
Tabela 6.10 – Momento Fletor na extremidade do Duto Flexível (End B) – Corrente Través e Onda Proa – Movimento restrito.....	74
Tabela 6.11 – Tração Efetiva na extremidade do Duto (Topo) – Corrente / Onda Proa – Movimento restrito.....	74
Tabela 6.12 – Tração Efetiva na extremidade do Duto (Topo) – Corrente Través e Onda Proa – Movimento restrito.	75
Tabela 6.13 – Parâmetros utilizados para as análises durante o procedimento de <i>offloading</i>	77
Tabela 6.14 – Tração Efetiva na extremidade do Duto Flexível (Topo – End A) – Procedimento de <i>Offloading</i>	78
Tabela 6.15 – Tração Efetiva na extremidade do Cabo (Topo – End A) – Procedimento de <i>Offloading</i>	79
Tabela 6.16 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível – Procedimento de <i>Offloading</i>	80
Tabela 6.17 – Parâmetros utilizados para as análises de conexão de Segunda Extremidade.....	81

Tabela 6.18 – Momento Fletor ao longo do Duto Flexível – Corrente / Onda Proa (IW) – Segunda Extremidade.....	81
Tabela 6.19 – Momento Fletor ao longo do Duto Flexível – Corrente Través e Onda Proa (IW) – Segunda Extremidade.....	81
Tabela 6.20 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível – Corrente / Onda Proa (IW) – Segunda Extremidade.....	82
Tabela 6.21 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível – Corrente Través e Onda Proa (IW) – Segunda Extremidade.....	82
Tabela 6.22 – Tração Efetiva na extremidade do Duto Flexível (Topo – Pescoço de ganso) – Corrente / Onda Proa (IW) – Segunda Extremidade.	83
Tabela 6.23 – Tração Efetiva na extremidade do Duto Flexível (Topo – Pescoço de ganso) – Corrente Través e Onda Proa (IW) – Segunda Extremidade.....	83
Tabela 6.24 – Cargas de Lançamento	84
Tabela 6.25 – Arranjo das lingadas.....	85
Tabela 6.26 – Janela Operacional – Período de Pico e Altura Significativa de Onda.....	90
Tabela 6.27 – Momento no duto flexível (End B – conector).	91
Tabela 6.28 – Tração Efetiva no duto flexível (End A – topo).....	91
Tabela 6.29 – Tração Efetiva no cabo de aço (topo).	91
Tabela 6.30 – Mínimo raio de curvatura no duto flexível (restritor de curvatura).....	91
Tabela 9.1– Parâmetros da embarcação de lançamento.....	99

NOMENCLATURA

ABREVIACÕES

API – *American Petroleum Institute*

BAP – Base adaptadora de produção

DNV – *Det Norske Veritas*

DOF – Graus de Liberdade (*Degree of Freedom*)

EA – Rigidez Axial

EI – Rigidez Flexional

FE – Elementos Finitos (*Finite Element*)

GI – Rigidez Torcional

JONSWAP – *Joint Operation North Sea Wave Project*

LDA – Lâmina D'água

MBR – Raio de Curvatura Mínimo (*Minimum Bending Radius*)

PLSV – *Pipe Laying Support Vessel*

RAO – *Response Amplitude Operator*

RP – *Recommended Practice*

TDP – *Touchdown point*

SMYS – Tensão de escoamento mínima especificada

SMTS – Tensão última mínima especificada

UM – Unidade Marítima

SÍMBOLOS

C_a – Coeficiente de massa adicionada

C_D – Coeficiente de Arraste ou *Drag*

OD – Diâmetro externo nominal

ID – Diâmetro Interno
 t – Espessura do duto flexível
 E – Módulo de Young
 T_p – Período de Pico
 H_s – Altura significativa da onda
 $H_{m\acute{a}x}$ – Altura máxima
 M – Momento Fletor
 P_i – Pressão Interna
 I – Momento de Inércia
 p_c – Pressão de contato
 k_2 – Curvatura na direção y
 Q_1 – Força axial no fio
 R – Raio
 α – Ângulo de lançamento
 N_a – Número de camadas
 n_j – Número de fios na camada j
 A_j – Área da seção transversal
 T_e – Tração efetiva
 T_w – Tração verdadeira na parede
 σ_{11j} – Tensão axial na camada j
 σ_t – Tensão na armadura de tração
 n – Número total de camadas
 A_t – Área da seção transversal
 L – Comprimento do cabo de aço
 W_p – Massa do equipamento no ar
 M_a – Massa adicionada

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E MOTIVAÇÃO

O cenário atual do óleo e gás no mundo sofre constantes mudanças, assim como o seu valor no mercado internacional. Os produtores do Oriente Médio, por deter uma fonte expressiva do petróleo, vem caracterizando uma descendente no preço do barril, preocupando as empresas brasileiras extratoras desse combustível em áreas do Pré-Sal. Estima-se que, para a produção do petróleo se fazer valer, contando com a contínua desvalorização em virtude da alta produção no Oriente Médio e, por consequência, caracterizando um preço cada vez mais baixo, deva ser primordial a diminuição dos custos para a produção nos campos do Pré-Sal. A amortização destes custos pode ser atrelada às diversas análises hoje realizadas na área de Óleo e Gás, expondo possíveis mudanças nas instalações de dutos como de equipamentos submarinos, assegurando que demandam análises de otimização, aperfeiçoamento e economia do tempo dos serviços a serem realizados. A Figura 1.1 ilustra um tipo de arranjo do leito marinho na exploração de petróleo.

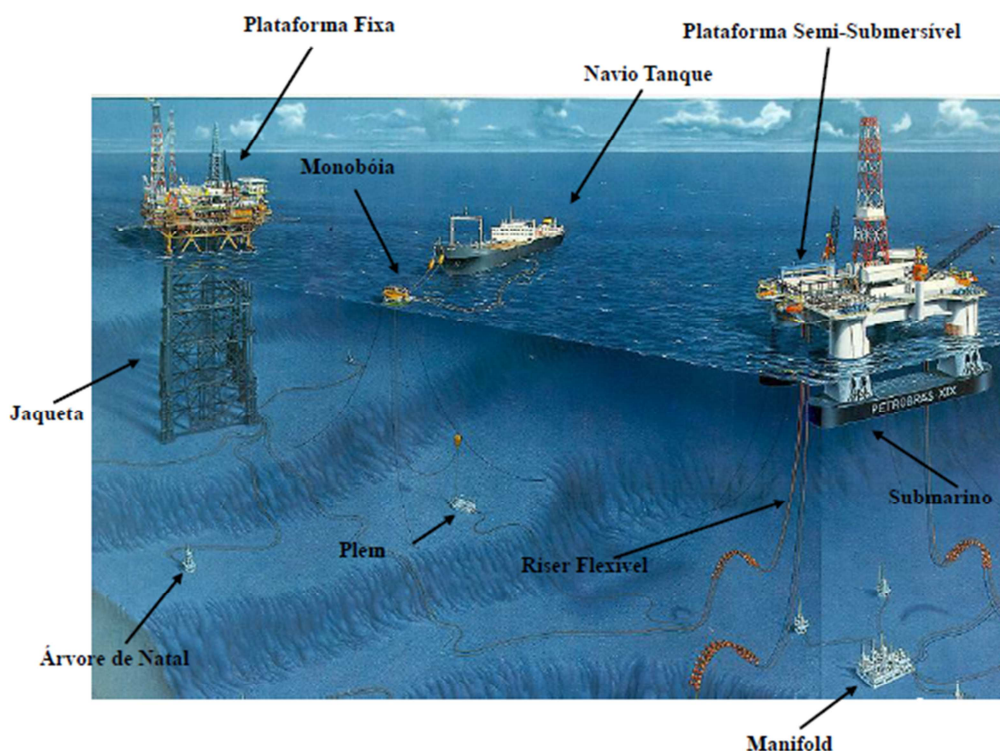


Figura 1.1 – Arranjo do leito submarino [1].

Os desafios encontrados hoje são referentes às águas ultraprofundas, com lâminas d'água em torno de 3000 m. Esses desafios estão envoltos nos processos de perfuração de poços, escoamento de produção, controle dos equipamentos submarinos, ancoragem das Unidades Marítimas, desenvolvimento de equipamentos submarinos para tais operações, entre outros.

Frente às dificuldades de instalação de linhas flexíveis, tal como a elevação das cargas envolvidas, parâmetros importantes devem ser controlados durante seu lançamento, sendo alguns deles:

- Raio de curvatura da linha flexível;
- Resistência ao Colapso;
- Isolamento Térmico;
- Efeito *EndCap*¹.

Os *risers*² e *flowlines*³ devem ser capazes de resistir às cargas elevadas devido às altas profundidades da LDA e às grandes variações de carregamento ambiental, tais como pressão e temperatura.

¹ Força causada pela pressão interna de um fluido agindo na parte “fechada” do duto, como por exemplo, em uma curva.

² Parte do duto flexível que permanece suspenso, influenciado por forças dinâmicas.

³ Parte do duto flexível estática, permanecendo em contato com o leito marinho. Influenciado por forças relacionadas à operação e testes.

1.2 OBJETIVO

Esta dissertação tem como objetivo realizar estudos sobre instalação de um módulo de conexão vertical acoplado à extremidade de uma linha flexível para avaliar as dificuldades envolvidas em lançamentos em LDAs profundas.

Primeiramente, visando assegurar comparações deste tipo de instalação com outros que envolvam equipamentos mais pesados, foram realizados estudos preliminares englobando análises analíticas e numéricas para avaliar os períodos naturais e modos ressonantes, decorrentes da descida vertical de equipamentos de grande porte. Em sequência, foi estudada a instalação de um módulo de conexão vertical acoplado à extremidade de uma linha flexível. Análises paramétricas, que incluem o comportamento e o tipo de representação da rigidez flexional do duto flexível, fazem parte do estudo que compõe esta segunda parte das simulações.

Utilizou-se o programa comercial ORCAFLEX, extensivamente utilizado pelas empresas *offshore*, em todas as etapas numéricas das análises e, em paralelo, fez-se uso do programa comercial MATHCAD para os cálculos analíticos alusivos às análises descritas acima. Os critérios de aceitação para a integridade estrutural do duto flexível serão de acordo com a API SPEC 17J. Os resultados das análises serão apresentados nos itens 4, 5 e 6 ao longo desta dissertação.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O texto deste trabalho foi estruturado como descrito a seguir:

O Capítulo 1 faz menção ao contexto atual e objetivo da dissertação, enquanto o Capítulo 2 descreve a tecnologia e características envolvidas por trás dos dutos flexíveis, assim como os equipamentos utilizados na área *offshore*.

Completando as descrições envolvidas na dissertação, o Capítulo 3 detalha os procedimentos de descida de um equipamento submarino.

Os principais desenvolvimentos desta dissertação estão apresentados nos Capítulos 4 e 5.

O Capítulo 4 envolve as análises preliminares, abordando os problemas referentes aos efeitos de ressonância que podem ser encontrados durante o procedimento de instalação vertical de equipamentos submarinos.

O Capítulo 5 apresenta estudos particulares sobre instalação de um módulo de conexão vertical. Nesta seção, serão apresentados os passos para a concepção da análise global de lançamento vertical, envolvendo uma metodologia para a determinação da janela operacional para o lançamento do sistema. A definição dos parâmetros que afetam as análises durante a instalação do módulo de conexão vertical, incluindo as condições ambientais, carregamentos hidrodinâmicos, forças externas entre outros fatores são expostos nesse capítulo.

Os resultados das análises são avaliados no Capítulo 6.

Finalmente, no Capítulo 7, são apresentados os comentários finais e as propostas para trabalhos futuros.

2 SISTEMA DE PRODUÇÃO OFFSHORE

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada uma breve descrição, no contexto de sistemas de produção *offshore*, das características e tecnologias dos dutos flexíveis, dos equipamentos submarinos envolvidos no processo e do procedimento de instalação dos mesmos.

2.2 EQUIPAMENTOS OFFSHORE

Em campos petrolíferos brasileiros, dutos flexíveis vêm sendo amplamente adotados. Os dutos flexíveis são largamente utilizados em unidades de produção do tipo FPSOs por serem complacentes aos movimentos relativos da UM.

Com o passar dos anos e a busca por novas áreas de petróleo, as necessidades de se trabalhar em águas ultraprofundas se tornaram reais e as empresas tiveram que se reajustar, criando novas tecnologias nos equipamentos já conhecidos como *manifolds*, árvores de natal molhadas, PLEMs, PLETs, entre outros. Por se tratar de lâminas d'água ultraprofundas, os mergulhadores não poderiam exercer suas funções, logo as conexões foram pensadas para serem feitas como *diverless*⁴. Esses equipamentos são a base para as conexões futuras com os dutos submarinos através da conexão vertical de primeira (antes do lançamento do duto no leito marino) ou segunda extremidade (após o lançamento do duto no leito marinho).

A árvore de natal molhada é um equipamento instalado no fundo do mar constituído por um conjunto de válvulas e linhas de fluxo. Os parâmetros de projeto para a ANM utiliza a norma API Spec 17D (*Specification for Subsea Wellhead and Christmas Tree Equipment*).

O lançamento deste equipamento normalmente faz uso de navios sonda, sem o uso de cabos guia. Utiliza-se uma BAP que suporta as linhas de produção, serviço e controle da ANM. A instalação de linhas é realizada usando o conceito de módulo de conexão vertical onde as linhas de produção, serviço e controle são conectados diretamente na BAP através de operações submarinas.

⁴ Termo *offshore* utilizados quando não existe o uso de um mergulhador nas operações submarinas.

Atualmente, com o intuito de reduzir custos de instalação, uma nova técnica tem sido utilizada, cuja principal mudança é o emprego do chamado navio de apoio a equipamentos submarinos em substituição aos navios sonda [2]. O emprego desta técnica consiste em descer e instalar a árvore de natal na cabeça do poço através de um cabo controlado da superfície. O tempo de descida foi reduzido em 10 vezes o tempo realizado por um navio sonda devido à velocidade de lançamento e de recolhimento do cabo. Estas operações estão sendo feitas até 2300 m de LDA. Adaptações em navio do tipo SESV estão sendo feitas para maiores profundidades e deverão entrar em operação em 2016 [3].

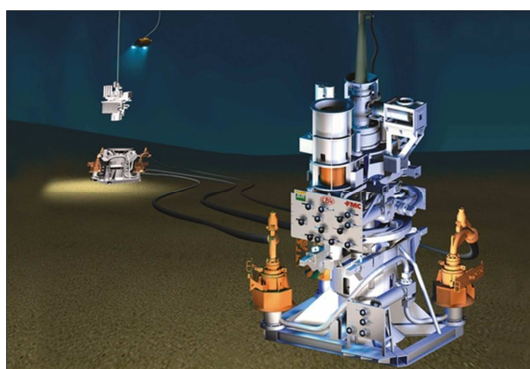


Figura 2.1 – Representação de uma Árvore de Natal Molhada (FMC Technologies).

O PLEM (*Pipeline End Manifold*) é uma versão mais simples de um *manifold*. Geralmente são projetados para fluidos com apenas uma ou duas árvores de natal. Possui uma estrutura metálica composta de tubulações, capaz de receber dutos de gás ou petróleo de diferentes poços e conectar-se a outros dutos.

O PLET, por sua vez, é uma estrutura metálica composta de tubulações, a qual recebe dutos de gás ou petróleo e conecta-se a dutos, sendo estes rígidos ou flexíveis, fazendo a ligação entre o PLET e a Unidade Marítima.



Figura 2.2 – Representação do PLEM (FMC) e do PLET (Marinewell), respectivamente.

Correspondente aos *manifolds*, estes são receptores de diversas linhas de produção ou injeção e as direciona em uma única linha, de acordo com o fluido. O fluido pode ser enviado em uma única linha para uma plataforma de produção ou ser redirecionado para abastecer poços. Este equipamento é capaz de controlar a vazão dos fluidos que entram e que saem através de uma válvula denominada *choke*. A norma utilizada para projetos de *manifolds* é a API Spec 17P (*Templates and Manifolds*).

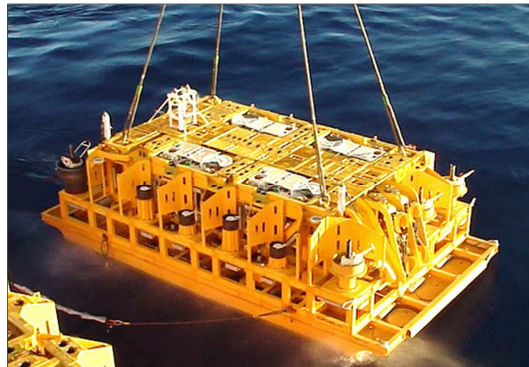


Figura 2.3 – Representação de um *manifold* (FMC).

O método de instalação de um *manifold* varia de acordo com a lâmina d'água. Em casos onde a LDA for menor que 300 m, sua instalação pode ser feita por um navio com sistema de posicionamento dinâmico (DP) e suas conexões são realizadas por mergulhadores. Em LDAs maiores normalmente são lançados por navios sondas devido às suas dimensões robustas. Contudo, devido ao valor elevado dessas embarcações, as instalações também são realizadas através de navios de lançamento com guindastes de alto desempenho (Figura 2.4).

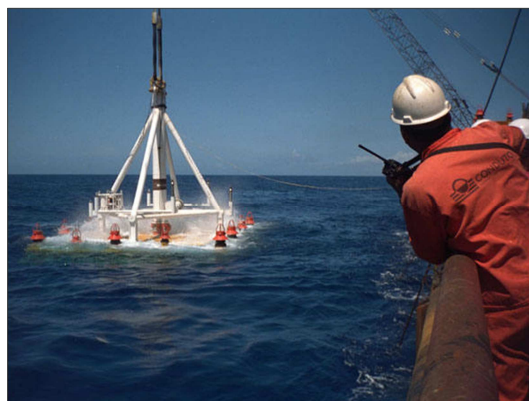


Figura 2.4 – Instalação vertical de um *manifold* no campo de Alcoforado por meio de guindaste.

A instalação deste equipamento submarino pode ser realizada via cabo, balsa guindaste com eslinga, *riser* de perfuração, roldana ou pendular.

Método de instalação via cabo é limitado ao equipamento submarino e aos efeitos de ressonância. Problemas como a ressonância ocorrem quando o período natural na direção vertical do sistema equipamento e cabo de aço coincide com o período das ondas, provocando amplificação dinâmica das forças atuantes no cabo e pode levar à ruptura do mesmo.

A instalação por roldana é realizada por três embarcações utilizando uma roldana para descer o manifold. A terceira embarcação serve para prevenir a rotação do sistema. A sua configuração em “V” reduz pela metade a carga atuante no cabo, reduzindo o risco de ressonância durante a instalação. Contudo, possui um alto custo, com risco de ocorrência de ressonância existente e janelas de operação restritas para realização da operação.

As limitações dos sistemas de instalação em águas profundas geraram uma solução conhecida como método pendular. Utiliza a fibra sintética como substituto do cabo de aço, com uma alta susceptibilidade à abrasão. Este método trás diversos benefícios como:

- Ocorrência de ressonância;
- Baixo custo de instalação e facilidade de mobilização e desmobilização de embarcações;
- Maior janela de operação;
- Viabiliza instalação além de 3000 m.

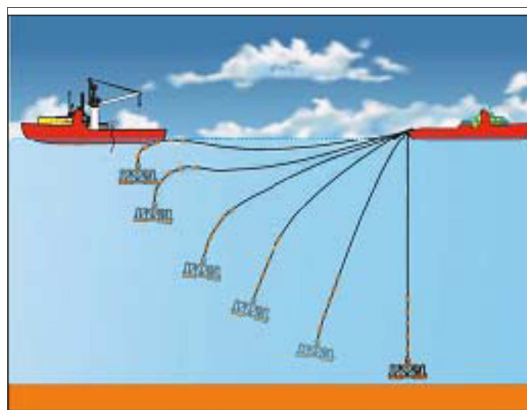


Figura 2.5 – Ilustração da instalação pendular de um *manifold* [4].

Ribeiro [5], através de ensaios e análises numéricas, testou a viabilidade deste método, assim como meios complementares a este, como a utilização de um contrapeso

para minimizar a velocidade de queda livre do *manifold* e sua rotação. A redução da oscilação é em virtude do estabilizador flexível lançar o *vortex* para longe do sistema.

2.3 NAVIOS DE LANÇAMENTO

Quaisquer operações *offshore* demandam o uso de embarcações específicas para o tipo de trabalho a ser realizado. Uma gama de opções cerca este meio e algumas delas, especificamente as embarcações para lançamento de dutos e equipamentos submarinos, serão abordadas a seguir. Intervenções muitas vezes se tornam necessárias para tornar viável a utilização de certas embarcações para instalação em águas ultraprofundas.

2.3.1 CARACTERÍSTICAS PARA NAVIOS DE LANÇAMENTO EM ÁGUAS PROFUNDAS

Os navios de lançamento em águas profundas possuem características distintas dos demais navios por sofrerem cargas altas de tração no topo. Quanto maior é a carga a ser lançada, por metro, maior é complexidade do problema.

As torções induzidas nos dutos flexíveis durante o lançamento aumentam à medida que as variáveis pressão e temperatura baixam, aumentando a rigidez do duto e, conseqüentemente, aumentam as dificuldades ao realizar a operação. As conexões verticais de segunda extremidade são um exemplo deste contexto. As conexões verticais de primeira extremidade são mais indicadas durante um lançamento. Contudo, devido a uma ocupação da região onde ocorreria essa conexão, por exemplo, ocupados por navios sonda, muitas vezes a conexão de segunda é inevitável.

Devido às cargas elevadas, alguns equipamentos do navio são projetados para se adequarem às necessidades produzidas. O seu armazenamento deve ser feito de tal forma que preserve a integridade dos dutos. Os guinchos, utilizados em operação de recolhimento e abandono, devem possuir capacidade de carga suficiente para viabilizar as operações em águas profundas, assim como o guindaste deve possuir tal capacidade para manobras *offshore*. Já os tracionadores possuem diversas configurações no uso de sapatas, a qual faz contato com a superfície externa do duto, habilitando altos valores de sustentação de carga. Outros equipamentos, de acordo com a configuração de lançamento, podem também possuir variações em sua configuração, possibilitando o seu uso em águas ultraprofundas.

2.3.2 INSTALAÇÃO DE DUTOS FLEXÍVEIS

Os métodos existentes para instalação de dutos submarinos em águas rasas, médias e profundas são descritas brevemente neste item de forma a entender os suas características e limitações envolvidas.

2.3.2.1 Método *S-Lay*

O método *S-Lay* é um método tradicional de instalação de dutos *offshore* em profundidades rasas. Possui uma rampa de lançamento até o leito marinho, observando-se a forma de um “S”. Utiliza uma estrutura treliçada e contendo roletes, o *stinger*, localizado ao final da embarcação, próximo ao ponto de entrada do duto na água. Esse controle da curvatura faz com que as tensões axiais se sobreponham às tensões de flexão, pois as deformações devido à curvatura são suavizadas e controladas pelo *stinger*. Em profundidades maiores, o ângulo de saída do *stinger* se torna inviável, adicionando aos dutos grandes plastificações durante o lançamento. A alternativa empregada para o uso deste método em águas profundas é a adoção do posicionamento dinâmico e a permissão de elevada plastificação no duto por meio de um *stinger* de grande curvatura, com ângulo próximo ao vertical de saída do duto. Como a sustentação do duto é feita por tracionadores, o qual aplicam cargas radiais na parede do duto, grandes cargas podem induzir o colapso no duto flexível.

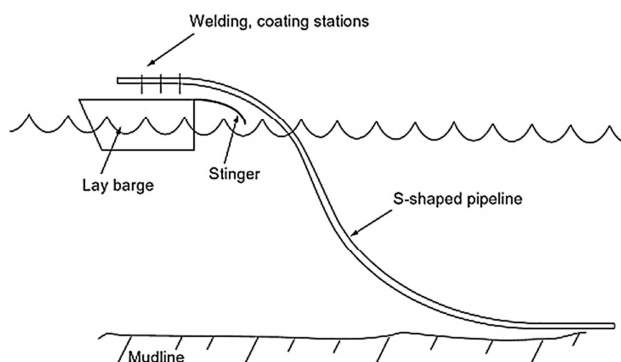


Figura 2.6 – Ilustração do método *S-Lay* [6].

2.3.2.2 Método *J-Lay*

Este método caracteriza-se pelo pequeno ângulo de saída do duto com a vertical, possibilitando a redução da carga de tração de topo. No método *J-Lay*, o duto assume uma configuração em “J” e, durante a soldagem de cada novo tramo de duto, é

progressivamente baixado ao leito marinho. Os problemas apresentados neste método estão na carga de tracionamento. Desta forma, no lugar de tracionadores, normalmente utiliza-se um anel, possibilitando a fixação do duto em uma mesa apropriada, enquanto um novo tramo é soldado em sequência. Este anel é o *Jay-Lay Collar* e constitui mais um item, que será lançado junto com o duto.

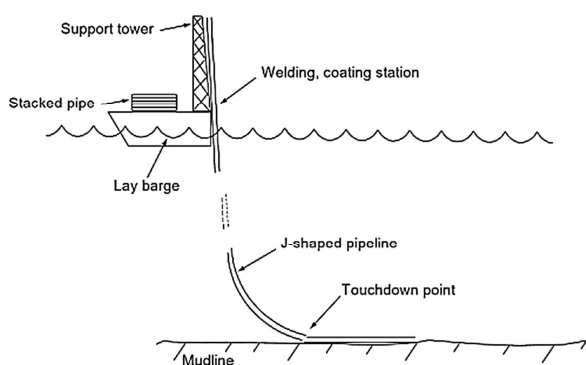


Figura 2.7 – Ilustração do método *J-Lay* [6].

2.3.2.3 Método Reel-Lay

O *Reel-Lay* é um método de instalação que faz uso do carretel de armazenamento de dutos para seu lançamento. Sua principal vantagem é a velocidade de lançamento, reduzindo as horas do uso da embarcação. As embarcações *J-Lay* ou *S-Lay* podem demandar um dia para o mesmo comprimento lançado pelo método *Reel-Lay*.

Uma das desvantagens deste método é a necessidade de se manter a tração no duto para reduzir a curvatura na região de TDP, pois uma maior curvatura poderia levar a um colapso localizado e também a possibilidade de ocorrer uma ovalização da seção transversal, em decorrência da plastificação, levando a uma redução da resistência do duto ao colapso hidrostático.

De acordo com Liu [7], as descontinuidades geradas durante o processo de fabricação induzem distúrbios que afetam a sessão do duto flexível, podendo ocasionar colapso ou ruptura local durante o processo de bobinamento pelo método de *Reel-Lay*. Os critérios de aceitação são definidos pela norma DNV-OS-F101.

Através da Figura 2.8, é possível avaliar a diferença entre dois tipos de descontinuidades ligadas à espessura do duto flexível. Quanto maior a discrepância ao longo da linha, maior será seu efeito no processo de lançamento.

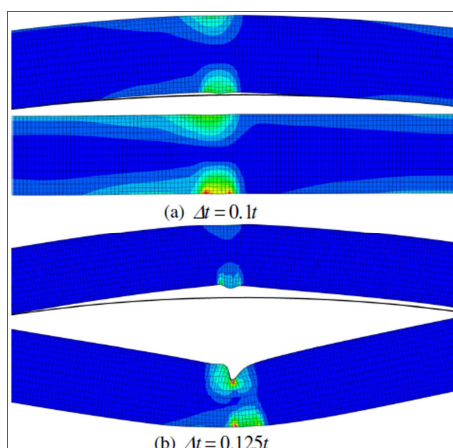


Figura 2.8 – Análise por elementos finitos para as deformações ocorridas para duas descontinuidades de espessura [7].

Detalhamentos das características causadoras de danos durante o processo de curvatura foram explanados por Dawood [8], evidenciando, através da técnica por elementos finitos, a importância em se usar materiais de mesma classificação, uma vez que o uso de diferentes tipos ocasiona um aumento nas forças ao longo da estrutura do duto.

Os métodos de *Reel-lay* são divididos em Carretel Vertical e Carretel Horizontal.

O carretel horizontal possui o eixo do carretel verticalizado em relação ao deck da embarcação, sendo necessário controlar as deformações durante a operação de lançamento (uso de *stinger*), vide Figura 2.9. Em águas mais profundas, a deformação sofrida pelo duto no *stinger* seria somada a deformação causada pelo enrolamento, causando um dano grande a linha.



Figura 2.9 – North Ocean 102 (McDermott) – Método *Reel-Lay* com carretel horizontal.

Por outro lado, o carretel vertical é capaz de realizar instalações de pequenas a grandes profundidades, a sua instalação faz uso de um carretel com plano de enrolamento paralelo ao plano de catenária formada pelo duto durante o seu lançamento, reduzindo a necessidade do *stinger* para certa faixa de ângulos de saída do duto na rampa de lançamento. Outra variação é a utilização do *moonpool*, diminuindo a transmissão de movimentos ao duto, apresentada na Figura 2.11.

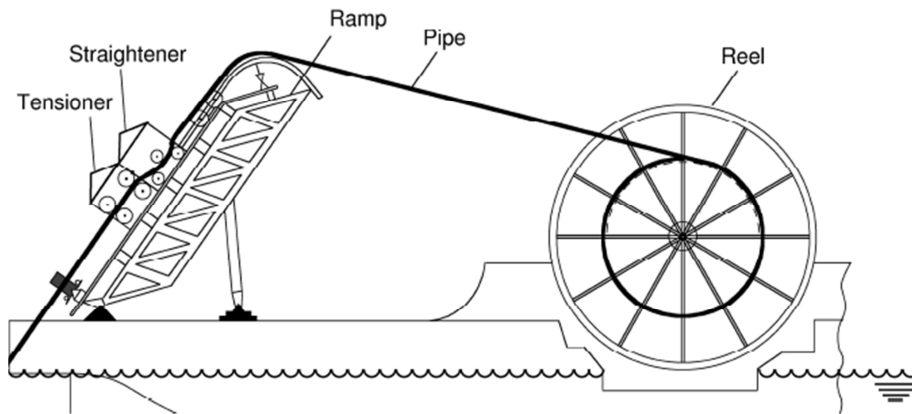


Figura 2.10 – Esquemático da instalação por *Reel-Lay* [7] – Carretel vertical.



Figura 2.11 – PLSV Deep Blue (Technip) – Método vertical *Reel-Lay* com *moonpool*.

2.4 TECNOLOGIA DOS DUTOS FLEXÍVEIS

2.4.1 DEFINIÇÕES

Os dutos flexíveis são componentes importantes para a evolução da exploração no cenário submarino, pois fornecem os meios de transferir fluidos ou energia entre as unidades submarinas e estruturas flutuantes. Estes dutos podem acomodar grandes movimentos, resistindo a cargas hidrodinâmicas, tais como ondas e correntes. Possuem baixa rigidez à flexão e alta rigidez à deformação axial. Devido a essa baixa rigidez à flexão, grandes deformações podem ser geradas por movimentos provenientes de estruturas flutuantes, como ondas e correntes.

Os dutos flexíveis são definidos em *flowlines*, *risers* e *jumpers* utilizados no transporte de fluidos para produção, injeção de gás, injeção de água e gás *lift*. Eles podem ser classificados em tipo *bonded*, com diferentes camadas ligadas em conjunto através de um processo de vulcanização, geralmente utilizados em seções curtas e tipo *unbonded*, caracterizado por múltiplas camadas que podem deslizar entre si [6]. A Figura 2.12 apresenta o duto flexível do tipo *unbonded*.



Figura 2.12 – Visualização estrutural de uma seção de um duto flexível do tipo *unbonded* [1].

A composição dos dutos flexíveis do tipo *unbounded* (não aderente) pode ser definida de acordo com a aplicação específica.

Os restritores de curvatura (Figura 2.13) são projetados para evitar curvaturas acentuadas no duto próximo ao conector. Esses limitadores possuem uma curvatura mínima definida em projeto (MBR). Durante as instalações dos módulos de conexão

verticais não é aceitável o travamento do restritor, pois quando ocorre o travamento a sua rigidez aumenta vertiginosamente, induzindo um momento fletor alto no conector, este localizado na extremidade da linha com ligação à terminação do restritor de curvatura.

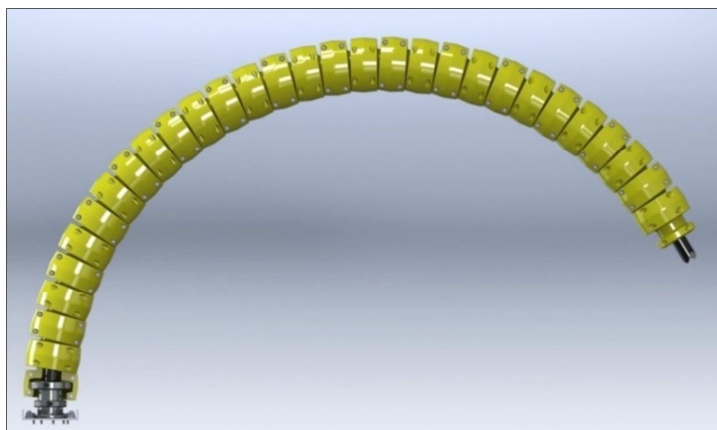


Figura 2.13 – Representação de um restritor de curvatura para os dutos flexíveis [9].

Durante as etapas submarinas mais importantes, que correspondem à instalação de estruturas e equipamentos submarinos, dutos flexíveis são sujeitos a carregamentos variados. As operações de instalação induzem esforços consideráveis tanto nos dutos flexíveis quanto em equipamentos submarinos, os quais devem ser considerados durante o projeto de instalação. Estes movimentos e cargas complexas devem ser considerados nesses projetos de dutos flexíveis, prevendo as atuações das cargas hidrodinâmicas entre outras condições de contorno.

A carga de flexão atribuída ao duto pode acarretar em danos na sua integridade estrutural, ocasionando perdas de produção ou até prejuízos ao meio ambiente. Entender o comportamento estrutural destes dutos em águas profundas sobre efeito de cargas de flexão se tornou de grande relevância.

2.4.2 NORMAS APLICÁVEIS

Os dutos flexíveis são expostos continuamente a cargas, tanto em sua fabricação, armazenamento, transporte, instalação e operação. Os danos de fadiga causados pelos movimentos cíclicos sofridos por um duto flexível são os amplamente estudados no meio acadêmico. De acordo com essas cargas a qual o duto é submetido, algumas normas são utilizadas para o projeto de dutos de forma a manter a integridade dos mesmos. Os códigos usualmente utilizados são:

- API Spec 17J - *Non-bonded flexible pipe*;
- API RP 17B - *Recommended practice for flexible pipe*;
- DNV-RP-F204 - *Recommended practice for riser damage*;
- DNV-RP-D101 - *Recommended practice for structural analysis of piping systems*.

2.4.3 ESTRUTURA DO DUTO FLEXÍVEL

O duto flexível tipo *unbounded* (não aderentes) é formado por camadas independentes de metal e material polímero termoplástico, justapostas umas às outras, conferindo à linha flexível a capacidade de resistir a diversos tipos de carregamento ao longo da sua vida útil. A seção transversal típica (Figura 2.14) utilizada em um duto flexível será descrita nos itens a seguir.

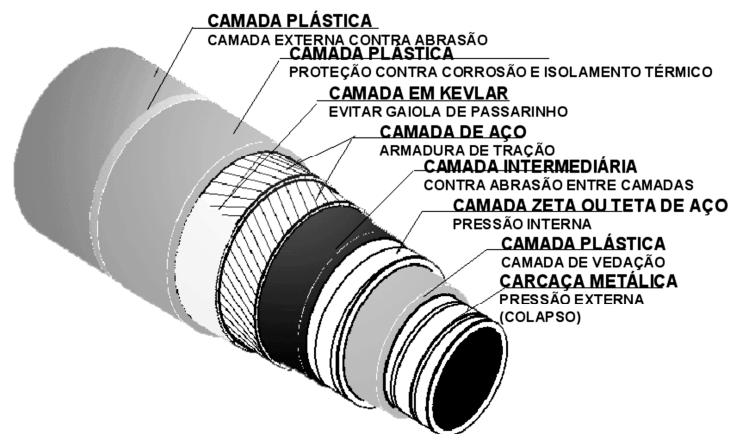


Figura 2.14- Representação típica das camadas de um duto flexível [10].

2.4.3.1 Carcaça intertravada

A carcaça é constituída por uma camada metálica com intertravamentos, oferecendo resistência ao colapso devido à pressão. Produzida com aço inoxidável através da conformação das fitas metálicas em forma helicoidal, possui pequena folga. O seu intertravamento permite uma resistência significativa ao colapso e uma alta rigidez axial do duto flexível, implicando numa maior capacidade de compressão radial. Os materiais utilizados em geral utilizam materiais de acordo com a norma API RP 17B.

2.4.3.2 Camada polimérica interna

A fabricação desta camada é obtida através do extrusamento de um polímero, em geral a poliamida, cuja principal função é atuar como barreira de contenção do fluido interno, garantindo a estanqueidade para as camadas superiores.

2.4.3.3 Armadura de pressão

Constituída por aço carbono cujo perfil pode ser T, Z ou C (vide Figura 2.15), a armadura pressão é formada por uma camada com intertravamentos, oferecendo resistência à pressão interna e institui a estrutura um aumento na rigidez radial.

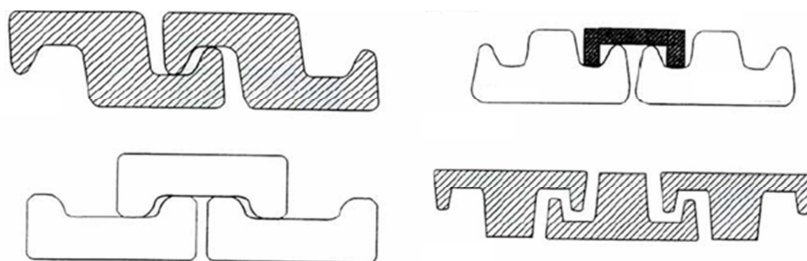


Figura 2.15 – Seções típicas utilizadas na armadura de pressão [10].

2.4.3.4 Armadura de tração

A armadura de tração é uma camada helicoidal metálica provida da função de resistir à tração (rigidez axial) e a torção. Possui um ângulo em torno de 45 graus, permitindo o deslizamento dos arames quando estes submetidos a esforços de flexão. O ângulo de assentamento da camada determina o balanço entre a rigidez axial e a rigidez radial. Em umbilicais normalmente são utilizados perfis cilíndricos, enquanto em linhas flexíveis normalmente faz uso da seção retangular, permitindo uma melhor compactação das camadas e a otimização em relação à espessura da camada com sua área de resistência.

2.4.3.5 Camada polimérica externa

Assim como a camada polimérica interna, esta camada serve como proteção do duto flexível, impedindo a invasão de agentes externos (água do mar). O material utilizado para a confecção desta camada em geral é o polietileno de alta densidade. Este material possui elevada rigidez específica, isto é, elevada relação entre o módulo de elasticidade e o peso específico.

Além da função de estanqueidade, possui a função de manter as camadas de tração na posição correta e ajudar no isolamento térmico da linha. O uso desse material permite um melhor assentamento das camadas plásticas sobre as armaduras metálicas, reduzindo o desgaste e a possível extrusão destas camadas poliméricas nas camadas metálicas, prevenindo contra o fenômeno de “gaiola de passarinho”. Este fenômeno pode ser observado na Figura 2.16.



Figura 2.16 - Aspecto dos arames da armadura de tração de uma linha flexível com falha “gaiola de passarinho” [10].

2.4.3.6 Fitas poliméricas e camadas anti-atrito

As fitas poliméricas não influenciam na resistência do duto flexível e são fabricadas normalmente por fibras de aramida (kevlar), representadas na Figura 2.17. Elas são posicionadas sobre as camadas de tração atuando como um restritor da expansão desta armadura decorrente de uma expansão súbita do duto flexível. Sua localização ajuda a diminuir o atrito entre a armadura de tração e a camada externa, reduzindo o desgaste das mesmas devido aos movimentos relativos entre as camadas.



Figura 2.17 - Aplicação das camadas de fitas no duto flexível [4].

Com o aumento da lâmina d'água, torna-se importante a busca do entendimento do comportamento estrutural destes dutos sobre cargas de flexão. Eles serão solicitados tanto na instalação quanto no armazenamento e operação. Esta carga imposta ao duto flexível pode tornar crítica sua integridade estrutural, podendo provocar perda de produção e possíveis danos ao meio em que estará operando.

2.4.4 ESFORÇOS EM UM DUTO FLEXÍVEL

Os arames são fabricados em uma configuração helicoidal, a qual se introduz uma torção e curvatura iniciais. Amortecimento, fadiga, cargas axi-simétricas e de flexão compõem os esforços no duto flexível abordados nos itens subsequentes.

2.4.4.1 Carregamento axi-simétrico

No carregamento axi-simétrico, a tensão axial ao longo dos fios será a tensão dominante, uma vez que os fios encontram-se em forma de hélice. Os componentes de tensão local flexional e tensão local torcional podem ser desprezados.

A análise dos arames é baseada na teoria de curvatura da viga. Para a carga axi-simétrica, a força de cisalhamento e momento de flexão no fio podem ser negligenciados. A forma cilíndrica é mantida durante a deformação. O modelo ilustrativo pode ser observado na Figura 2.18.

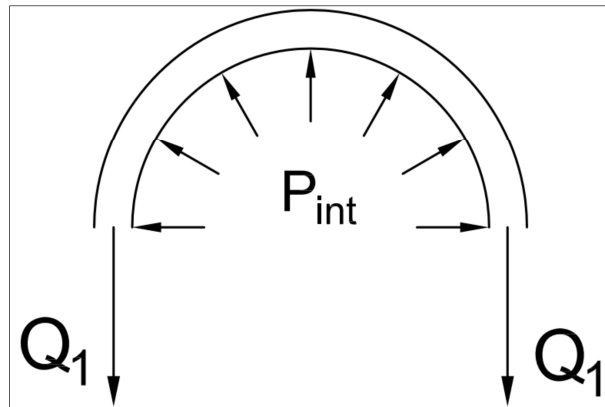


Figura 2.18 – Ilustração da pressão atuando na linha [4].

Esta pressão de contato pode ser calculada como:

$$p_c = k_2 \cdot Q_1 = \frac{\sin^2 \alpha}{R} Q_1 \quad [1]$$

Onde k_2 é a curvatura na direção y, Q_1 é a força axial no fio, R o raio e α é o ângulo de lançamento.

Para atingir o equilíbrio, a força interna deve equilibrar a força da parede, como descrito na equação abaixo:

$$\sum_{j=1}^{N_a} n_j \cdot \sigma_{11j} \cdot A_j \cdot \cos \alpha_j = T_w = T_e + \pi \cdot p_{int} \cdot R_{int}^2 - \pi \cdot p_{ext} \cdot R_{ext}^2 \quad [2]$$

Onde N_a é o número de camadas, n_j é o número de fios na camada j, A_j é a área da seção transversal, T_e é a tração efetiva, T_w a tração verdadeira na parede e σ_{11j} é a tensão axial na camada j. A tensão na armadura de tração (σ_t) é estimada pela força de tração dividida pela área efetiva, como exposto na equação a seguir.

$$\sigma_t = \frac{T_w}{n \cdot A_t \cdot \cos \alpha} \quad [3]$$

Onde A_t é a área da seção transversal do fio e n o número total de fios.

A rigidez axial é dominada pelas camadas da armadura de tração. Identifica-se que a força radial na estrutura helicoidal reduz a rigidez no duto.

A torção durante a instalação do duto flexível pode causar a falha conhecida como “gaiola de passarinho”. O momento torcional pode ser balanceado pelo momento interno, devido à força axial da camada de tração.

Ao desconsiderar a tensão global e os efeitos do movimento radial na força axial, considerando apenas a torção geral, a rigidez torcional (GI_t) ser avaliada como:

$$GI_t = n \cdot A_t \cdot E \cdot R^2 \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha \quad [4]$$

As pressões internas, quando muito altas, podem contribuir para a falha de ruptura no duto flexível. A pressão referida é transmitida, em sua maior parte, pela armadura de tração e pressão. A pressão de ruptura pode ser determinada pela força de reação devido a pressão interna no duto (*hoop stress*) e pela força de *EndCap* [4]. A Figura 2.19 ilustra a força de reação exercida pela pressão interna.

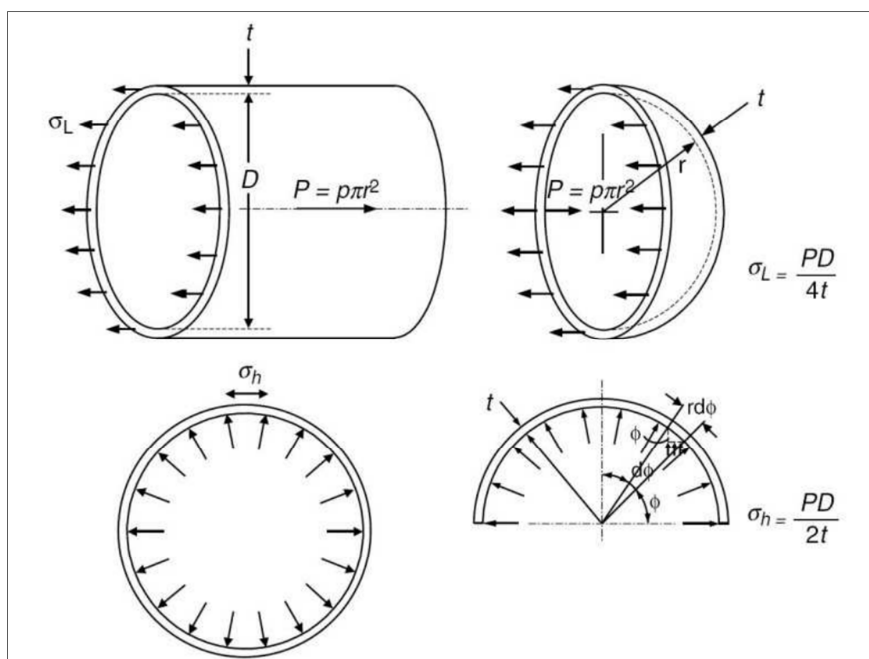


Figura 2.19 – Tensões devido à pressão interna em dutos de pequena espessura, sendo σ_L a tensão devido ao efeito do *endcap* e σ_h a tensão de *hoop* [6].

A pressão de ruptura de projeto deve ser menor do que pressão de *hoop* e pressão de *Endcap*.

Outro dano estrutural que ocorre quando o duto flexível é exposto a cargas cíclicas é o dano de fadiga. As ondas incidem movimentos que podem levar os *risers* ao dano, sendo eles movimentos de instalação e transporte, *vortex* induzido por vibração, resposta de primeira ordem das ondas e movimentos de segunda ordem da Unidade Marítima.

O cálculo do dano acumulado à fadiga pode ser obtido através da regra de Miner-Palmgren, o qual faz uso de todos os estados de mar.

A capacidade do duto à fadiga é dada pela curva S-N, a qual expressa o número de ciclos necessários para a falha. Esta curva é obtida após a realização de testes com amostras, testes estes certificados e aprovados por órgãos de qualificação.

2.4.4.2 Curvatura

Uma característica importante de um duto flexível é a capacidade das camadas deslizarem entre si. As camadas migram de uma situação estática para dinâmica, ocorrendo o escorregamento devido ao atrito interno. No capítulo da rigidez no duto flexível, será abordado de forma mais detalhada esta questão.

2.4.4.3 Amortecimento

Diversas causas podem acarretar o amortecimento em um duto flexível. Um dos pontos amplamente estudados é a influência da histerese no amortecimento da estrutura. O amortecimento histerético se deve ao atrito interno e ao deslizamento entre camadas. A perda de energia devido ao amortecimento da estrutura pode ser descrito no gráfico da curva de histerese, onde a energia é retratada como a área dentro da curva cíclica.

2.4.5 PROJETO ESTRUTURAL DE UM DUTO FLEXÍVEL

Em um projeto estrutural para dutos flexíveis, carregamentos ambientais como ondas, correntes marinhas e ventos devem ser considerados. Projetos de *flowlines* não levam em consideração esforços dinâmicos ao longo da vida útil do mesmo, apenas no momento da instalação. Por outro lado, *risers* submetidos a esses esforços continuamente se tornando altamente não lineares. Cada tramo do duto flexível deve ser fabricado para as fases de serviço e instalação. Os projetos são desenvolvidos em duas etapas, sendo elas análise global e análise local. Todos os equipamentos e acessórios que compõem o processo de instalação até a operação são analisados analiticamente, numericamente e por testes, quando estes se tornam necessários para obtenção de parâmetros, curvas e gráficos para o desenvolvimento do projeto.

2.4.5.1 Testes realizados

A relevância da realização de testes em amostras traz diversos benefícios para todos os processos *offshore*. Alguns testes possuem a característica de prevenção, utilizando como parâmetros os modos de falha entre outros necessários para a obtenção dos dados fundamentais para as análises numéricas advindas desses processos em questão.

Exemplificando um teste de caracterização, a rigidez do duto flexível é determinada pelos fabricantes do produto através de ensaios em amostras de teste. O ensaio de caracterização da rigidez axial é dividido em duas partes: teste estático e teste dinâmico. Aplicações de cargas são incorporadas às duas etapas do teste. Para a caracterização da rigidez flexional são aplicados à amostra incrementos de carga até o respectivo raio de curvatura ser atingido (MBR). O raio mínimo de curvatura é definido pelo fabricante. Através dos resultados obtidos nos testes de caracterização, os valores das rigidezes são calculados através de especificações técnicas.

2.4.5.2 Modo de falha

A ocorrência de falhas em um duto flexível varia de acordo com a sua origem. As falhas se iniciam através de uma trinca inicial que se propaga em um dos componentes das camadas do duto, gerando tantas outras mais. A norma API RP 17B descreve todas as falhas provenientes das situações estáticas e dinâmicas em dutos flexíveis tipo *unbounded* (não aderente).

2.4.6 RIGIDEZ À FLEXÃO DE DUTOS SUBMARINOS

2.4.6.1 Comportamento do duto sujeito a cargas de flexão

Os dutos flexíveis são estruturas constituídas de camadas metálicas dispostas de forma helicoidal e camadas poliméricas. O comportamento axial-torcional é complexo e depende do grau de interação entre as camadas que compõem o duto. Quando as camadas sofrem movimento relativo entre si, ocorre uma redução em sua rigidez à flexão.

Em águas ultraprofundas são encontradas temperaturas próximas a 5°C. Essa temperatura baixa age diretamente no módulo de elasticidade de polímeros tornando-os mais rígidos.

O efeito do aumento de pressão hidrostática no duto flexível, devido a maiores profundidades da LDA, resulta em um aumento da pressão de contato entre as suas camadas. Uma maior pressão nos contatos ocasiona a redução do raio crítico de escorregamento entre as camadas.

2.4.6.2 Influência da histerese na curvatura

Quando o duto está submetido a uma curvatura pequena, nenhum escorregamento ocorre entre as camadas, uma vez que a força cortante é menor do que a força de atrito interno [11]. O momento aumenta linearmente com a curva e a rigidez flexional, onde EI_s possui comportamento linear, conforme descrito na Figura 2.20.

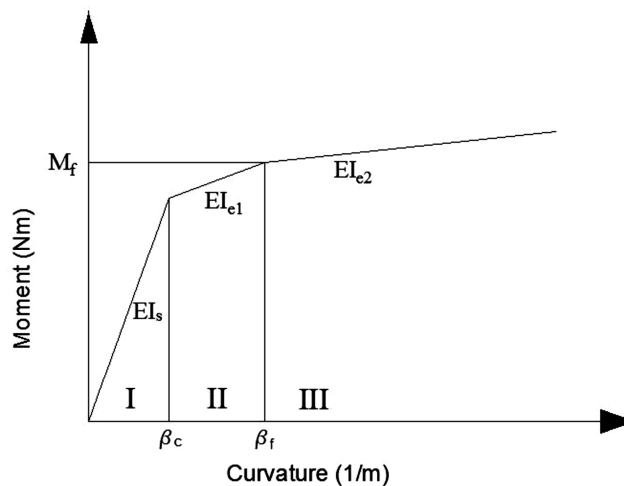


Figura 2.20 – Relação entre momento e curvatura [12].

Quando a curvatura excede o ponto β_c , a fricção interna de alguns fios é menor do que a força de cisalhamento resultante. Em seguida, o duto entra no regime estático para o dinâmico. Na secção transversal, os fios próximos ao eixo neutro começam a deslizar em relação ao outro, enquanto os demais fios estão no regime estático. A rigidez de flexão correspondente para esta fase, exposta na Figura 2.20, denomina-se EI_{e1} .

Quando todos os fios na secção transversal começarem a escorregar, o duto entra no regime total de deslizamento (região III). Cada fio é considerado como estrutura independente. O correspondente ao momento fletor total de deslizamento M_f depende da pressão de contato entre as camadas, sendo elas influenciadas pela pressão interna e externa do duto flexível e sua tração.

À medida que a curvatura muda sua direção, os fios retornam à configuração inicial, ou seja, as camadas helicoidais retornam ao seu regime estático induzindo uma força de atrito elevada. Quando o momento de flexão exceder o dobro do momento devido ao atrito, ocorre um novo deslizamento na direção contrária, gerando o ciclo da histerese (Figura 2.21).

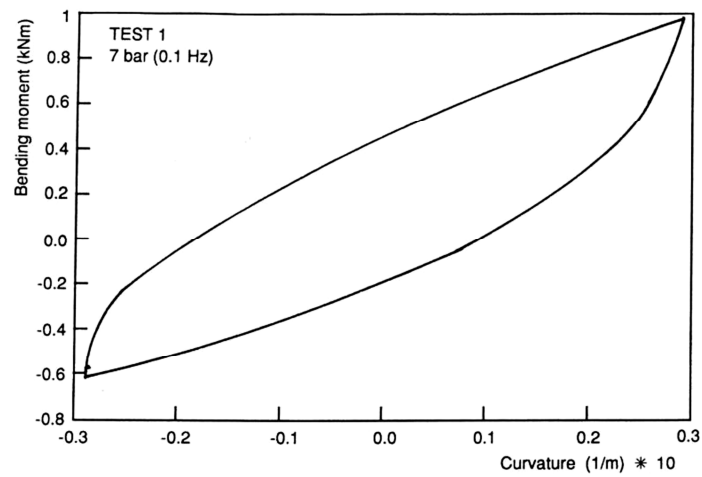


Figura 2.21 – Curva de Histerese [12].

O raio mínimo de curvatura é um valor crítico fornecido pelo fabricante da linha com a intenção de prevenir acidentes devido à flexão excessiva no duto, podendo esta conduzir a falhas de instabilidade local e forças altas em terminações ou conexões.

3 INSTALAÇÃO DO MÓDULO DE CONEXÃO VERTICAL E LANÇAMENTO DE LINHAS FLEXÍVEIS

Instalações realizadas por um navio PLSV requer uma sequência de etapas, desde o arranjo das linhas em seu interior, conexão dos equipamentos como o módulo de conexão vertical em sua extremidade, para casos de conexão vertical direta de primeira extremidade e por fim, após a instalação do módulo de conexão vertical, lançamento da linha no leito marinho, respeitando as limitações para evitar que o duto flexível se danifique.

Os tópicos a seguir descrevem os dois tipos de conexão vertical direta amplamente utilizados durante o processo de instalação de linhas flexíveis.

3.1 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PELA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE PRIMEIRA EXTREMIDADE

A conexão vertical direta é a interligação entre a linha flexível ou umbilical e o sistema submarino: poço, *manifold* ou PLET. A conexão citada é realizada a partir do próprio navio de instalação de dutos, sem auxílio de sonda.

Uma série de cuidados com o módulo de conexão vertical deve ser tomada antes do início das manobras. Ele deve ser recebido com antecedência e estivado a bordo. Seu flange deve ser limpo e inspecionado. O *hub*, seja do poço, seja do *manifold*, no qual o módulo de conexão vertical será conectado, deve ter o aproamento de entrada, coordenadas e altura conferidos. A capa de proteção contra corrosão deve ser removida e o hub deve ser limpo apropriadamente usando o ROV. Um *transponder* deve ser deixado no fundo, próximo ao *hub*, para redundância de posicionamento, quando o próprio ROV não estiver no fundo.

3.1.1 Conexão Vertical Direta de Primeira Extremidade - Lançamento

Na configuração de conexão vertical direta de primeira extremidade, o duto flexível é lançado cautelosamente de forma a manter a sua integridade estrutural, ou seja, obedecendo ao MBR estipulado nas propriedades do duto durante a sua descida e realizando a ligação do módulo de conexão vertical à interface submarina.

Esta configuração de descida faz parte dos estudos desta dissertação e deve ser analisada dinamicamente.

Ao longo da descida, deve-se conhecer o período natural da estrutura do módulo de conexão vertical na extremidade da linha. O esquema da Figura 3.1 ilustra a descida do módulo de conexão vertical conectado a extremidade do duto flexível.

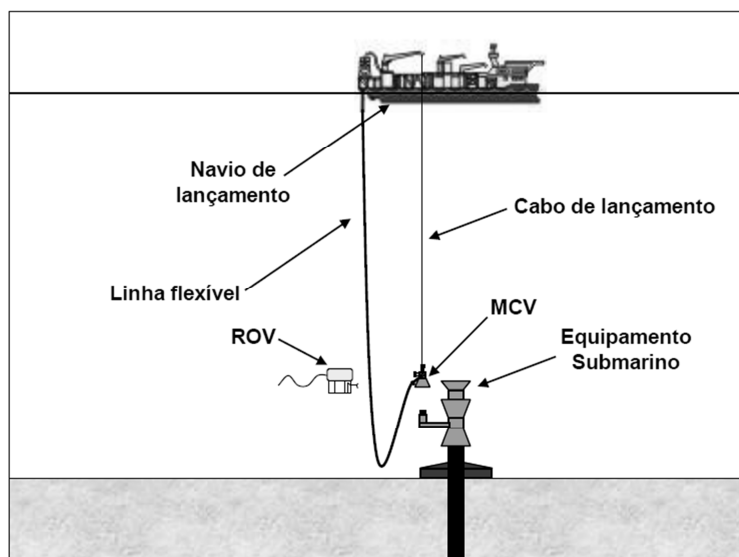


Figura 3.1 – Configuração de descida do módulo de conexão vertical conectado ao duto flexível [4].

3.1.2 Conexão Vertical Direta de Primeira Extremidade - Instalação

Após a descida do duto flexível com o do módulo de conexão vertical conectado a extremidade de sua linha, a configuração para a instalação deve ser atendida de forma a manter um alinhamento entre o ponto que ocorrerá a conexão na BAP e o módulo de conexão vertical. Este alinhamento deve ser tal que o ângulo de pescoço do módulo de conexão vertical chegue a 60° , valor ótimo observado em análises realizadas em outros trabalhos, com a tolerância de 1° (vide Figura 3.2).

Análises estáticas e dinâmicas serão realizadas para esta configuração que precede a instalação do módulo de conexão vertical, considerando um carregamento harmônico ao sistema e a variação dos parâmetros de frequência e velocidade de *heave*.

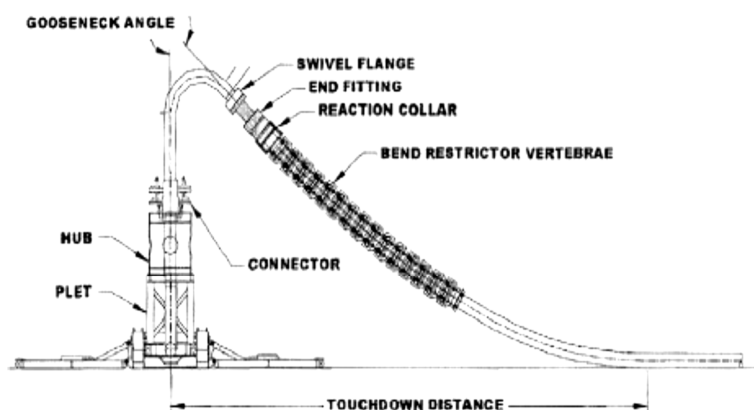


Figura 3.2 – Ilustração do ângulo do pescoço de ganso [4].

3.2 CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA PELA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE SEGUNDA EXTREMIDADE

Conexão vertical direta em segunda extremidade é aquela na qual a última extremidade da linha lançada é interligada ao sistema submarino, representado na Figura 3.3. A primeira extremidade do duto já se encontra interligada a unidade estacionária de produção (plataforma ou FPSO) ou equipamento submarino (PLET, *manifold* etc) e está instalada no trajeto de projeto ou ainda pode estar abandonada em solo marinho.

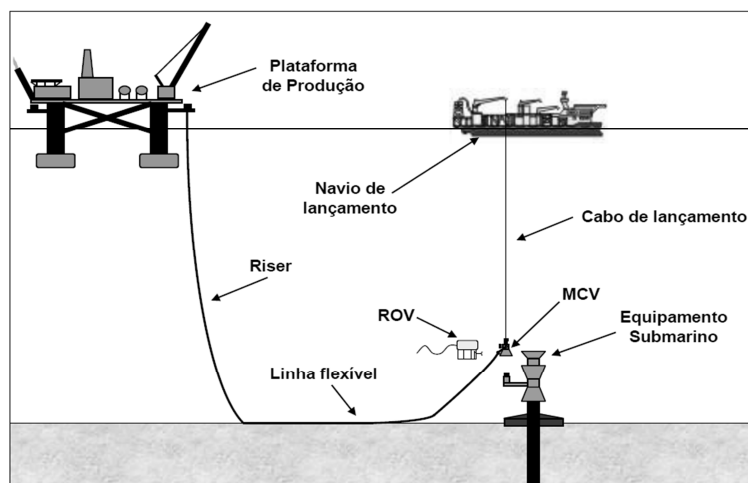


Figura 3.3 – Configuração de instalação do módulo de conexão vertical conectado ao duto flexível pela conexão vertical de segunda extremidade [4].

O módulo de conexão vertical a ser conectado na segunda extremidade do duto deve ser recebido no navio com antecedência. A bordo, os técnicos do módulo de conexão vertical são responsáveis pela manutenção e testes inerentes ao equipamento,

por informar suas pressões de trabalho e as ferramentas que serão utilizadas pelo ROV durante a conexão.

Um sistema redundante de posicionamento (*transponder*) deve ser posicionado no solo marinho, próximo ao sistema submarino onde o módulo de conexão vertical será instalado. Ele é utilizado caso o sinal de satélite falhe e o posicionamento do módulo, capturado pelo navio, fique comprometido.

O *hub* do poço, *manifold* ou PLET ao qual o módulo de conexão vertical será conectado deve ter o aproamento de conexão, coordenadas e altura conferidos pela equipe de lançamento do navio.

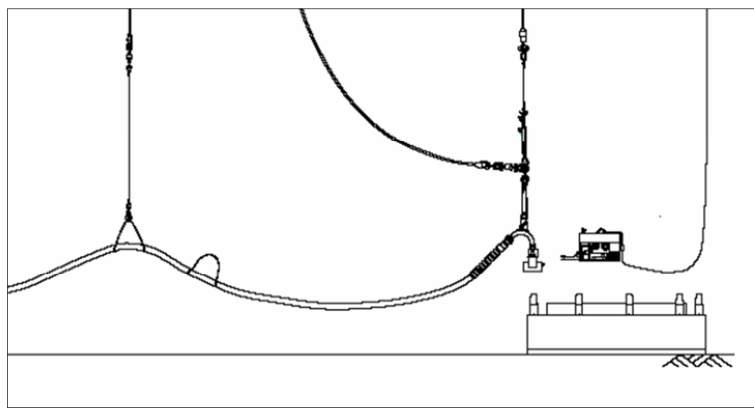


Figura 3.4 – Posicionamento dos estropos [4].

4 ANÁLISES PRELIMINARES

4.1 INTRODUÇÃO

A proposta de um estudo prévio entra como base para o entendimento do comportamento de um equipamento submarino durante sua instalação vertical. A massa e a geometria do equipamento são fatores fundamentais para a elaboração de um projeto de lançamento dos mesmos, limitando até mesmo o tipo de embarcação utilizada e os custos atrelados a ela, viabilizando ou não o lançamento.

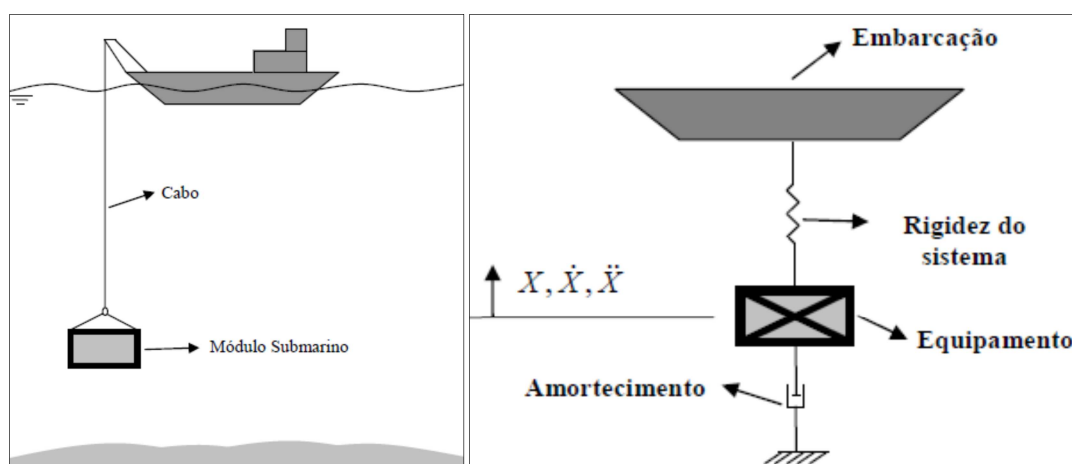


Figura 4.1 – Configuração do sistema de instalação [4].

4.2 LANÇAMENTO DE EQUIPAMENTOS DE GRANDE PORTE

Este estudo prévio tem como objetivo avaliar o comportamento de um *manifold* e dois PLEMs projetados para águas ultraprofundas através de um método de lançamento vertical direto.

Fez-se o uso do programa ORCAFLEX para a análise de uma instalação vertical através de uma embarcação de grande porte. As linhas foram modeladas por Elementos Finitos enquanto os equipamentos foram modelados como corpos rígidos, definidos no ORCAFLEX a partir de uma boia 6D. Os parâmetros físicos dos equipamentos utilizados nas simulações foram gerados a partir do programa MATHCAD.

As análises foram realizadas de forma que fosse possível calcular a influência de diversos parâmetros durante a instalação vertical desses equipamentos submarinos. O estudo é iniciado com um modelo onde os coeficientes de arrasto e massa adicional foram estimados. A partir das características da rigidez do cabo e da massa total

(estrutural + adicional) do equipamento, foi definido um comprimento de cabo que fizesse o período natural se igualar a um período de um mar regular pré-definido. O valor numérico do “comprimento de ressonância” do cabo foi comparado entre o modelo analítico e numérico (no qual a linha foi modelada por Elementos Finitos), de modo a observar a viabilidade do uso de uma formulação analítica para este fim.

Uma vez calculado esse comprimento de cabo e utilizando o mar regular pré-definido, verifica-se a influência do coeficiente de arrasto (C_d) e do coeficiente de massa adicionada (C_a) na resposta do sistema, variando seus valores para o equipamento de maior valor de massa (*manifold*).

Usualmente, lançamentos verticais exigem o uso de cabrestos que ligam o equipamento ao cabo vertical de lançamento. De forma a verificar se a modelagem do cabresto é importante na simulação do sistema, foram feitas análises por elementos finitos desse tipo de modelo tanto para mar irregular quanto para o mar regular. Variações na excentricidade do corpo também foram impostas, avaliando a sua influência na resposta dinâmica do corpo.

4.3 CONFIGURAÇÃO DE LANÇAMENTO

Simulou-se uma embarcação do tipo *Offshore Construction Vessel* (OCV) ou *Construction Support Vessel* (CSV), embarcação de grande porte que possui guindaste de 400 toneladas. Manteve-se a embarcação aproada no momento do lançamento com uma incidência de onda variando de 0° a 15° na embarcação. Conhecido o *overboarding* RAO da embarcação, através do cruzamento com o espectro ($S(\omega)$) de mar, determinou-se um harmônico equivalente. Os gráficos do RAO estão dispostos no ANEXO 1.

As características iniciais utilizadas nessa simulação estão informadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Configuração de Lançamento dos equipamentos submarinos para águas ultraprofundas.

Parâmetros	Símbolos	<i>Manifold</i>	PLEM A	PLEM B
Coeficiente de Arrasto (C_d)	C_{dx}	0,80 ⁽¹⁾	- ⁽²⁾	- ⁽²⁾
	C_{dy}	0,95 ⁽¹⁾	- ⁽²⁾	- ⁽²⁾
	C_{dz}	1,10 ⁽¹⁾	- ⁽²⁾	- ⁽²⁾
Coeficiente de massa adicionada (C_a)	C_{ax}	0,32 ⁽¹⁾	0,30 ⁽¹⁾	0,54 ⁽¹⁾
	C_{ay}	0,66 ⁽¹⁾	0,15 ⁽¹⁾	0,23 ⁽¹⁾
	C_{az}	0,72 ⁽¹⁾	0,76 ⁽¹⁾	0,70 ⁽¹⁾
Centro de Gravidade	CG_x	0	0	0
	CG_y	0	0	0

Parâmetros	Símbolos	Manifold	PLEM A	PLEM B
	CG_z	3	2	2
Altura da Onda	H_s	2 m		
Período de Onda	T_p	8,6 s		
Massa do Equipamento no ar	W_p	300 tons	150 tons	100 tons
Dimensões do Equipamento	H (Altura)	5 m	4 m	3 m
	L (Comprimento)	15 m	14 m	13 m
	w (Largura)	9 m	8 m	7 m
JONSWAP	-	6,4 ⁽³⁾		
Fator de Amplificação Dinâmica	FAD	1,3		

(1) Valores de acordo com a norma DNV-RPC205 / RPH103 e usar na chapa (a e b), Apêndice A.

(2) Não considerado na análise.

(3) Calculado por norma.

4.4 TIPOS DE MAR

No início dos projetos, as ondas determinísticas (regulares) representavam um bom modelo para a caracterização do estado de mar. Entretanto, o estado de mar real apresenta características aleatórias de frequência, amplitude e fase. O que define o seu comportamento é um processo estocástico, que pode ser definido como a superposição linear de diferentes ondas senoidais com diferentes frequências, amplitudes e fases.

O mar é caracterizado por um espectro de onda que descreve a distribuição de energia em relação à sua frequência ou período. Já o mar regular é periódico e uniforme, com comprimento, período e altura definidos.

4.5 AVALIAÇÃO ANALÍTICA DO PERÍODO DE RESSONÂNCIA

Lançamento vertical é um tipo de instalação delicada, visto sua capacidade de ocasionar ressonância em algum momento durante a descida. De forma a validar o modelo numérico para mais adiante avaliar outros parâmetros, calculou-se o comprimento de cabo para que essa ressonância ocorra para o período de onda imposto. Não foi definida a profundidade de lançamento inicial.

Os coeficientes para análise de ressonância foram zerados de forma a obter resultados mais extremos mediante as configurações distintas utilizadas nas análises.

O cálculo da massa adicionada realizado pelo programa comercial MATHCAD

(versão 10) e o cálculo do comprimento do cabo também estimado pelo programa, encontram-se no ANEXO 2. Este anexo mostra os cálculos para encontrar esse comprimento onde o período natural se equivale ao período de pico do espectro $T_p = 8,6$ s.

De forma resumida tem-se que,

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad [5]$$

$$k = \frac{EA}{L} \quad [6]$$

$$L = \frac{E_c \cdot A}{\left(\frac{2\pi}{T_p}\right)^2 \cdot (W_p + M_{az})} \quad [7]$$

Onde,

$$T_p = 8,6 \text{ s}$$

$$E_c = 1,041 \times 10^{11}$$

$$A = 4,786 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$W_{p1} = 300 \text{ tons}$$

$$W_{p2} = 150 \text{ tons}$$

$$W_{p3} = 100 \text{ tons}$$

$$M_{az1} = 704,24 \text{ tons}$$

$$M_{az2} = 548,20 \text{ tons}$$

$$M_{az3} = 358,96 \text{ tons}$$

Sendo M_{az} a massa adicionada (cálculo contido no ANEXO 2), $E_c \cdot A$ a rigidez axial, W_p a massa no ar e T_p o período.

Portanto,

$$L_1 = 928,99 \text{ m}$$

$$L_2 = 1.336,00 \text{ m}$$

$$L_3 = 2.033,00 \text{ m}$$

L é o comprimento de cabo necessário para atingir a ressonância em um período de 8,6 s. Todos os cálculos estão expostos no ANEXO 2.

4.6 AVALIAÇÃO DO PERÍODO NATURAL ATRAVÉS DO MODELO NUMÉRICO

Uma vez conhecido o comprimento L analítico, este foi definido como o comprimento da malha de Elementos Finitos da linha de lançamento no modelo do ORCAFLEX.

Para cálculo do período natural para cada equipamento, optou-se em realizar um teste de decaimento, no qual uma perturbação do sistema foi imposta na forma de um deslocamento inicial, a partir da posição de equilíbrio do mesmo, como exibido na Figura 4.2 (a). Para o caso do *manifold* (Tabela 4.1), o deslocamento imposto gerou um período de resposta de 8,45 s. Este período apresenta um pequeno erro com relação ao período natural analítico, considerado satisfatório, de aproximadamente 1,7% do valor esperado, de 8,6 s. O gráfico da variação da amplitude atingida pode ser observado na Figura 4.2 (b).

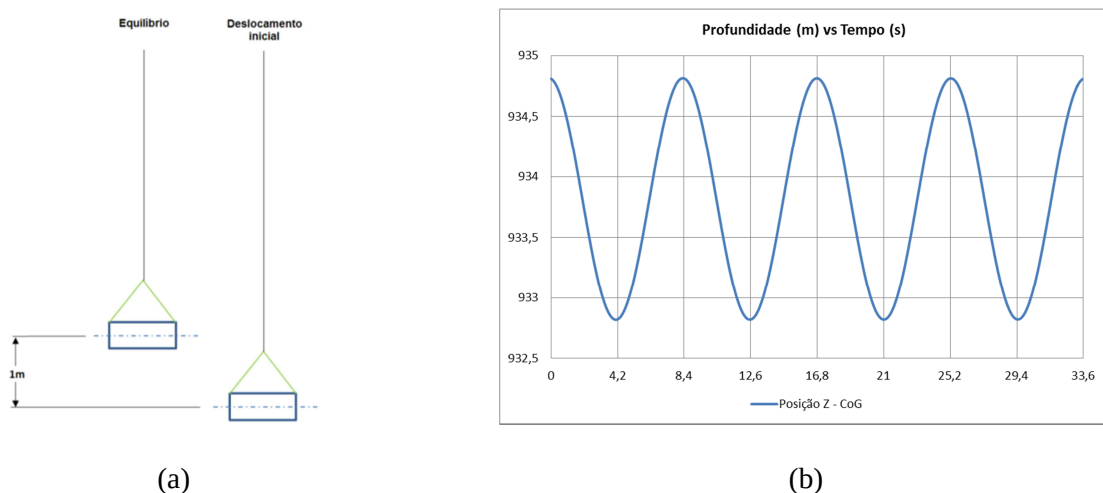


Figura 4.2 – Condição inicial (a) e resposta do sistema do *manifold* (b).

Para os casos do PLEM A e PLEM B (Tabela 4.1), o deslocamento imposto gerou períodos de resposta de 8,7 s e 8,8 s, respectivamente. Novamente, estes períodos apresentam um pequeno erro, considerados satisfatórios, de aproximadamente 1,2% e 2,3% do valor esperado de 8,6 s da formulação analítica. Os gráficos das variações das amplitudes atingidas são apresentados na Figura 4.3.

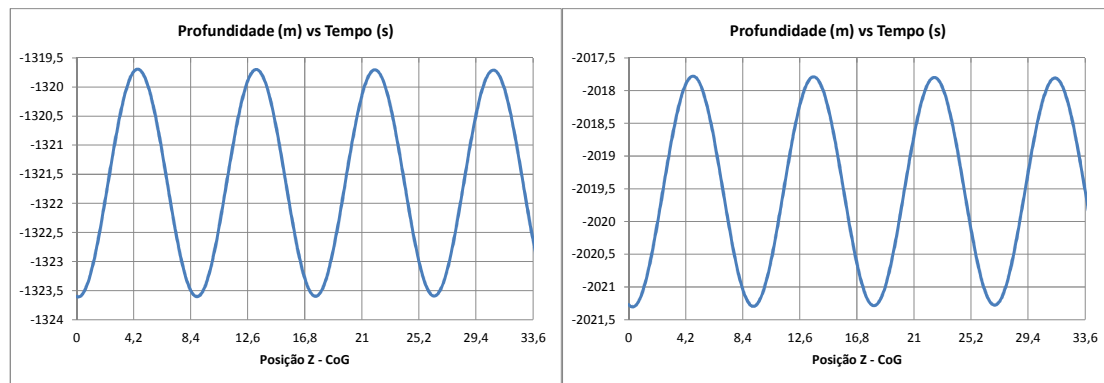


Figura 4.3 – Resposta do sistema do PLEM A. e PLEM B, respectivamente.

Os resultados demonstram coerência entre os modelos analítico e numérico, de modo que o modelo analítico pode ser utilizado para estimar o comprimento L crítico – capaz de gerar “efeitos de ressonância” – em lançamento vertical de equipamentos submarinos.

4.7 SIMULAÇÕES DINÂMICAS NA REGIÃO DE RESSONÂNCIA PARA *MANIFOLDS*

As simulações dinâmicas desta seção contemplam a consideração de 7 casos com uma variação de 30 m do cabo do guindaste do PLSV passando pela profundidade de ressonância - correspondente ao comprimento do cabo estimado analiticamente para o sistema *manifold* -, como pode ser observado no item 4.5. Os casos analisados podem ser observados na Figura 4.4.

Após a análise dos casos acima descritos e dos parâmetros da mesma, foram extrapolados para verificar a influência do peso do equipamento e da área exposta durante a descida.

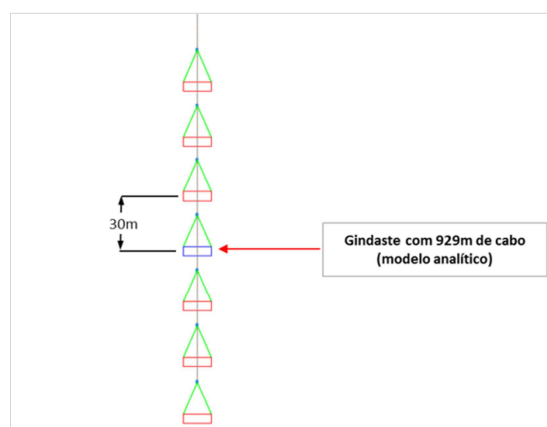


Figura 4.4 – Casos analisados.

Os resultados são apresentados para estados de mar regular (teoria linear de Airy), com ondas de 3,72 m de altura máxima ($1,86 \cdot H_s$) e período de 8,6 s, e irregular, onde um espectro de JONSWAP foi ajustado para uma altura significativa de onda H_s de 2 m e T_p de 8,6 s. Não foram considerados os efeitos de corrente.

Conforme já mencionado, o *manifold* é modelado a partir de uma boia 6D para a qual são feitas duas abordagens: uma sem amortecimento ($C_d = 0$), onde a massa adicionada é o único parâmetro hidrodinâmico considerado, e outra apresentando todos os parâmetros hidrodinâmicos. Estes parâmetros são calculados com base na norma DNV-RP H103 e podem ser observados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros hidrodinâmicos.

Arrasto					
x		y		z	
45,00		75,00		135,00	
Cd			Massa		
x	y	z	x	y	z
0,80	0,95	1,10	691,87	691,87	978,11
Ca			Cm		
x	y	z	x	y	z
0,32	0,66	0,72	1,32	1,66	1,72

O cabo de aço selecionado é fornecido pela empresa BLUE STRAND [13] e suas principais características são exibidas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Principais características do cabo de aço selecionado.

Classe	Massa [kg/m]		Rigidez	Área	Capacidade
	No ar	Na			
6 x 36	44	38,3	498	4786	6340

4.7.1 Cargas Dinâmicas

Os gráficos da Figura 4.5 apresentam as cargas dinâmicas para o caso não amortecido com mar regular, amortecido com mar regular, não amortecido com mar irregular e amortecido com mar irregular. Conforme esperado, a maior carga é exibida no modelo sem amortecimento e com onda irregular, excedendo a capacidade máxima de carga exposta na Tabela 4.3. A presença do amortecimento, como esperado, reduz significativamente os resultados de tração, pois controla a amplificação dinâmica, além

de ser responsável por aumentar um pouco o período natural do sistema.

Os resultados da Figura 4.5 mostram que o mar irregular pode gerar maiores trações, não apenas pelo fato do espectro do mar irregular possuir mais energia do que a gerada pela onda regular adotada neste estudo, mas também por ser capaz de excitar frequências naturais de um ou mais graus de liberdade da embarcação, além da frequência natural do equipamento submarino.

Em outras palavras, este estudo mostra que é imprescindível o uso de mares irregulares em projetos de lançamentos verticais de equipamentos submarinos, se adequando mais ao fenômeno real, seja pelo fato do mar irregular minimizar efeitos de amplificação dinâmica por ressonância, seja pelo fato dele ser capaz de excitar respostas de movimento mais significativas da embarcação.

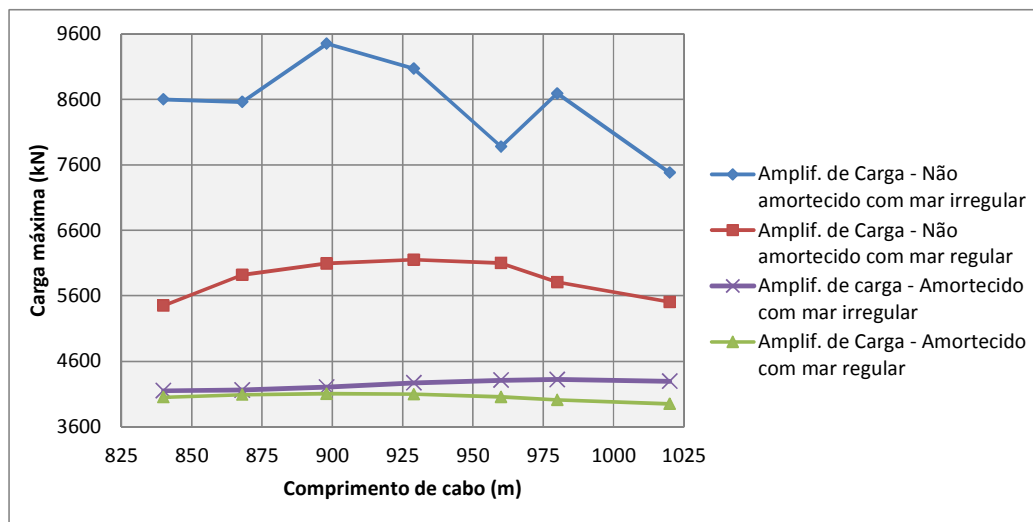


Figura 4.5 – Relação carga máxima-comprimento de cabo do PLSV para cada caso analisado ($H_m=3,72m$, $T=8,6m$ para determinístico e $H_s=2m$, $T_p=8,6m$ para aleatório).

4.8 AVALIAÇÃO NUMÉRICA DO PERÍODO NATURAL DO SISTEMA DE LANÇAMENTO DE DUTOS FLEXÍVEIS

Os dutos flexíveis utilizados no meio *offshore* podem alcançar uma gama bem elevada de diâmetros utilizados nas operações. Após as análises de equipamentos de grande porte, fez-se a análise do sistema para instalação de dutos flexíveis. O presente estudo visou dar enfoque aos diâmetros de dutos mais utilizados nos campos de petróleo na região sudeste do Brasil, nas instalações por conexão vertical direta de primeira extremidade através de navios de instalação.

4.8.1 Características do módulo de conexão vertical

O sistema analisado é composto por um duto flexível, um módulo de conexão vertical e um cabo de aço, todos lançados de uma única embarcação. A Tabela 4.4 apresenta as propriedades características do módulo de conexão. O mesmo cabo utilizado no item anterior será utilizado para este problema.

Tabela 4.4 – Propriedades do módulo de conexão vertical.

Parâmetros	Símbolos	Modulo de Conexão Vertical		
Coeficiente de massa adicionada (C_a)	C_{ax}	0,60 ⁽¹⁾		
	C_{ay}	0,72 ⁽¹⁾		
	C_{az}	0,72 ⁽¹⁾		
Coeficiente de arrasto (C_d)	C_{dx}	1,2		
	C_{dy}	1,2		
	C_{dz}	1,2		
Centro de Gravidade	CG_x	0		
	CG_y	0		
	CG_z	3		
Altura da Onda	H_s	2 m		
Período de Onda	T_p	6,0 s	7,0 s	8,6 s
Peso do Equipamento no ar	W_p	10,4 tons		
Dimensões do Equipamento	H (Altura)	4 m		
	L (Comprimento)	9 m		
	w (Largura)	3 m		
Fator de Amplificação Dinâmica	FAD	1,3 m		

(1) Valores de acordo com a norma DNV-RPC205 / RPH103 e usar na chapa (a e b), Apêndice A.

(2) Calculado por norma.

4.8.2 Características dos dutos flexíveis

Os parâmetros utilizados para os dutos flexíveis foram retirados da referência [6] e os demais interpolados. A Tabela 4.5 descreve as características utilizadas nas simulações realizadas a seguir.

Tabela 4.5 – Propriedades dos dutos flexíveis.

Duto	ID	Espessura	Peso	Rigidez [N]	Rigidez de
9"	228,6	86,2	190	3E9	8,8E6
8"	203,2		190	3E8	3,0E6
6"	152,4		190	3E6	5,0E5
4"	101,6		66	3E4	14E4

4.8.3 Avaliação dos dutos submarinos

De modo a conseguir atingir o efeito ressonante, todos os coeficientes de amortecimentos foram zerados.

O cálculo da massa adicionada e comprimento do cabo foram realizados no programa comercial MATHCAD, ANEXO 2, demonstrando a forma analítica para encontrar esse comprimento, em que o período natural se equivalha ao período de pico do espectro T_p de 8,6 s para o sistema sem a linha flexível. Este cálculo foi realizado com o intuito de identificar o período natural do módulo de conexão vertical.

De forma resumida, utilizando a equação [7], para o conjunto módulo de conexão vertical e o cabo de aço, temos que,

$$L = \frac{E_c \cdot A}{\left(\frac{2\pi}{T_p}\right)^2 \cdot (W_p + M_{az})}$$

Onde,

$$T_p = 8,6 \text{ s}$$

$$E_c = 1,041 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$A = 4,786 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$W_{p4} = 10,4 \text{ tons}$$

$$M_{az4} = 36,52 \text{ tons}$$

Sendo M_{az} a massa adicionada do módulo de conexão vertical (calculado contido no ANEXO 2), $E_c \cdot A$ a rigidez axial, W_p a massa no ar e T_p o período.

Portanto,

$$L_4 = 19.870,00 \text{ m } (T_p = 8,6 \text{ s})$$

Mesmo em períodos de pico menos, com uma probabilidade de ocorrência baixa, o comprimento do cabo lançado são bem maiores do que as alturas de lâminas d'água máximas de operação. Os comprimentos para estes períodos podem ser observados a seguir.

$$L_{4(1)} = 13.160,00 \text{ m (Tp = 7 s)}$$

$$L_{4(2)} = 9.672,00 \text{ m (Tp = 6 s)}$$

L é o comprimento de cabo necessário para atingir a ressonância em um período de 8,6 s. Nota-se que por se tratar de um equipamento com dimensões e peso menores, a frequência natural não é um problema observado mesmo para períodos de picos mais baixos.

Durante o processo de instalação, o cabo de aço é continuamente lançado até próximo ao leito marinho. Em algumas situações esse lançamento deve ser interrompido devido a diversas razões, como a proximidade da frequência natural do equipamento, desbalanceamento do equipamento ocasionando uma rotação indesejada, entre outros.

Uma vez observado que a forma analítica para investigação do comprimento L despreza a presença da linha flexível e os comprimentos calculados pela equação anterior indica que efeitos de ressonância apenas serão percebidos em LDAs muito mais profundas do que as dos cenários atuais, foi necessário mitigar estes períodos utilizando modelos numéricos completos, envolvendo além do módulo e da linha de lançamento, a presença da linha flexível.

Neste caso, conforme já mencionado, o procedimento de descida foi estudado para as linhas de 4", 6", 8" e 9". As frequências naturais dos modelos foram obtidas numericamente a partir de testes, conforme apresentado nas seções anteriores. O objetivo é verificar a influência do duto flexível no período natural do sistema. Para tal, os testes de decaimento foram realizados em diferentes modelos, variando, além dos diâmetros supracitados, a lâmina d'água de 300 m a 2500 m, com um incremento de 200 m. Todos os outros componentes do sistema mantiveram-se constantes.

Como pode ser observado na Figura 4.6, ao modificar o diâmetro do duto flexível no sistema de descida da linha, mantendo as configurações do sistema, a frequência natural não sofre alteração significativa. O período natural aumenta com a presença da linha flexível e ao mesmo tempo o sistema ganha mais amortecimento. Como era de se esperar, o duto de 4" possui uma parcela menor no amortecimento se comparado com os outros diâmetros.

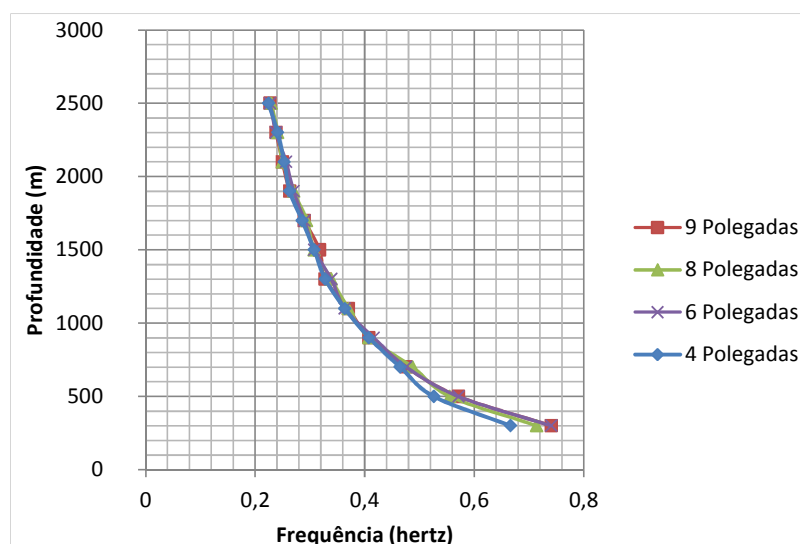


Figura 4.6 – Frequência Natural do sistema pela profundidade da água.

A Figura 4.7 demonstra a diferença do sistema com e sem a presença do duto flexível. Embora a configuração de conexão vertical sem o duto flexível seja incoerente, os resultados expostos na Figura 4.7 são apenas uma forma de demonstrar a influência da linha flexível no procedimento de descida do Módulo de Conexão Vertical (MCV).

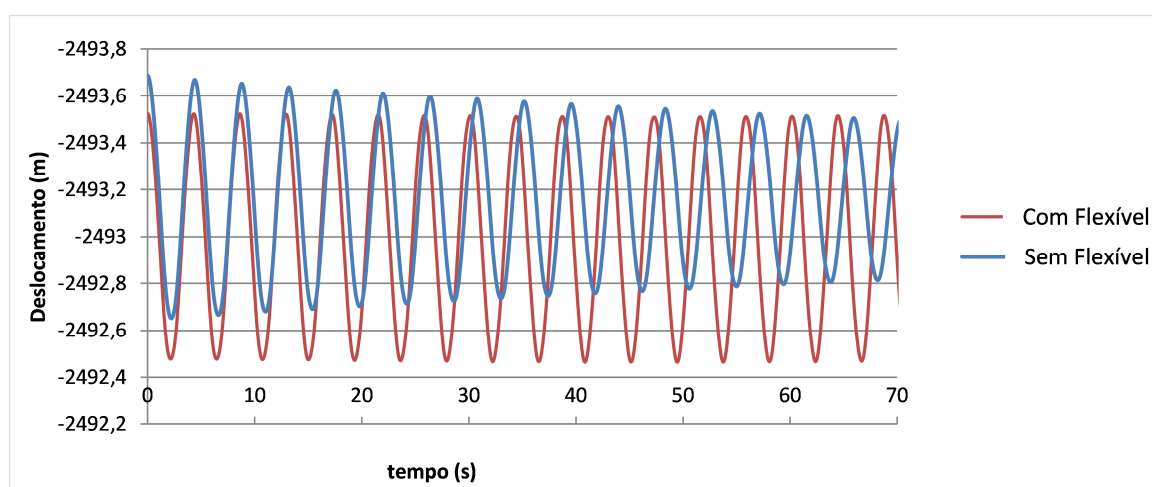


Figura 4.7 – Influência do duto flexível no sistema.

Os resultados expostos neste item demonstram que as variações entre os diâmetros dos dutos flexíveis não foram capazes de elevar o período natural a valores críticos – mais próximos aos períodos das ondas – considerando LDAs exploradas atualmente. Dentre os diâmetros estudados nesta seção, apenas o diâmetro de 9” foi adotado para prosseguir nas análises do estudo de casos descrito no próximo capítulo.

4.9 CONCLUSÕES DO ESTUDO PRELIMINAR

A influência das características hidrodinâmicas do equipamento bem como o peso submerso se mostraram relevantes na resposta de lançamentos verticais.

Durante o procedimento de descida, as profundidades críticas – com amplificações dinâmicas excessivas – devem ser sempre conhecidas. Com os estudos realizados, pode-se observar que equipamentos mais pesados como *Manifolds* e PLEM instalados em LDAs profundas ocasionam cargas máximas muito elevadas, que podem ultrapassar o limite máximo suportado por um guindaste. Neste caso, o método de lançamento vertical torna-se possível com o uso de sistemas de compensadores de *heave* passivos ou ativos. Neste último caso, envolvendo embarcações com alto custo diário de mobilização/desmobilização.

Uma segunda alternativa para escapar do período de ressonância, evitando as fortes trações no cabo de lançamento, seria fazer o uso de duas embarcações utilizando o método de lançamento pendular conforme apresentado na seção 2.2.

Com relação ao lançamento vertical do MCV, embora efeitos de ressonância não ocorram nos cenários atuais, as análises realizadas mostraram uma forte dependência da resposta de movimento do MCV com relação à presença do duto flexível, indicando um forte acoplamento entre estas partes. As conexões verticais diretas serão analisadas no capítulo a seguir.

5 ESTUDO DE CASOS

5.1 INTRODUÇÃO

Esta seção apresenta estudos mais específicos sobre instalação de um módulo de conexão vertical. A modelagem numérica do problema, realizada através do software ORCAFLEX, considera todos os aspectos inerentes às conexões verticais para lançamento de dutos flexíveis por navio de lançamento, tais como as propriedades da linha flexível e do cabo, propriedades do equipamento utilizado na conexão vertical, características da embarcação, aspectos ambientais, entre outros.

Para modelar a operação de instalação dos dutos flexíveis, posicionou-se um navio PLSV cujo *overloading* da linha é em forma de catenária livre e posicionado próximo a boreste do navio. O guincho do cabo está posicionado à popa, não sendo considerados compensadores de *heave* nas análises propostas neste trabalho.

Para calcular os esforços no duto flexível e seus componentes, assim como no cabo, adotaram-se malhas de elementos finitos, discretizando o comprimento contínuo do cabo e do duto, contendo um refinamento maior nos locais mais solicitados durante a simulação. A discretização espacial tornou o custo computacional mais elevado do que nos modelos estudados. O intervalo de tempo adotado também é um fator impactante no tempo de CPU. Análises paramétricas definiram a configuração final de malha e intervalo de integração para as simulações de instalação do duto flexível proposto.

5.2 DESCRIÇÃO DOS MODELOS

As análises foram divididas em estáticas e dinâmicas e tem por objetivo determinar as cargas induzidas no conector do módulo de conexão vertical do duto flexível durante as operações de instalação. As cargas extremas foram determinadas através da simulação de etapas consideradas críticas na operação de instalação, por meio do uso do *software* ORCAFLEX [14].

Foram realizados modelos numéricos para simular cinco etapas importantes do lançamento do MCV. O primeiro modelo tem como objetivo simular a condição de movimentação livre do MCV (em conexão por primeira extremidade), quando se encontra próximo ao momento de instalação na ANM.

O segundo modelo tem como objetivo determinar a maior carga de momento fletor induzido no conector através da simulação da conexão de primeira extremidade no momento em movimento restrito, onde o módulo de conexão vertical é considerado acoplado à ANM.

O terceiro modelo tem a finalidade de avaliar a instalação por conexão vertical direta de primeira extremidade com oscilação livre em diversas lâminas d'água, simulando a descida do conjunto.

O quarto modelo tem como objetivo determinar a maior carga de tração no “*pescoço de ganso*”, simulando a conexão de segunda extremidade com o módulo de conexão vertical no topo da catenária, com ângulo de lançamento menor que 3°.

O quinto modelo tem como objetivo avaliar o posicionamento das lingadas simulando a conexão de segunda extremidade com o módulo de conexão vertical no fundo.

5.2.1 Análise Global

A análise global de instalação de equipamentos submarinos requer uma compreensão detalhada da sua resposta para garantir que um projeto aceitável seja obtido. Uma forma de reduzir os custos do projeto de instalação pode ser através da otimização do posicionamento da lingada para conexão vertical de segunda extremidade, escolha de um duto flexível que minimize os riscos de perda da integridade estrutural, sem que para isso seja necessário um custo alto para sua produção e escolha do módulo de conexão vertical e restritor de curvatura, que influenciam na instalação e otimização do projeto. As respostas dessas análises podem trazer benefícios tais como a redução do tempo de uso das embarcações, manter a integridade do duto e não se fazer necessário a utilização de uma terceira embarcação para serviços mais especializados.

5.2.2 Descrição das Análises Estáticas

A análise estática é o primeiro passo da análise global, antecedendo a análise dinâmica. O objetivo da análise estática é estabelecer a configuração de equilíbrio devido à carga estática imposta aos dutos flexíveis.

5.2.3 Descrição das Análises Dinâmicas

Nas análises dinâmicas de um duto flexível (duto na vertical que sofre com os movimentos dinâmicos), deve ser considerada uma carga ambiental de baixa frequência (LF) combinado a uma frequência de onda aleatória (IW) para casos onde o duto flexível é influenciado por baixa frequência de excitação. Essa resposta pode ser obtida através da análise acoplada. Contudo, esse tipo de simulação demanda um esforço computacional maior, tornando o seu restrito. De forma a realizar uma simulação que consiga traduzir as mesmas respostas, é possível utilizar as análises desacopladas com um ganho computacional maior, onde as estruturas são analisadas separadamente.

A não linearidade devido à rigidez, cargas hidrodinâmicas, componentes como o restritor de curvatura, conector do duto flexível, entre outros foram considerados na análise dinâmica no domínio do tempo.

No presente estudo, foram avaliados os seguintes critérios:

- Tração efetiva no topo do Cabo de aço;
- Momentos Fletores no Restritor de Curvatura e no Conector;
- MBR no Restritor de Curvatura;
- Tração no topo do duto flexível;
- Tração no *pescoço de ganço*.

As análises dinâmicas fizeram uso da configuração de lançamento tipo *J-Lay* considerando as seguintes condições:

- Correntes: influencia no posicionamento final da configuração de lançamento da linha. Valores considerados altos podem causar instabilidade nas simulações.
- Ondas: para os estudos foi considerado o espectro de JONSWAP modificado e o RAO utilizado foi calculado pelo programa comercial HYDROSTAR. Os valores estão disposto no ANEXO 1.

A Figura 5.1 à Figura 5.6 apresentam detalhes de alguns modelos considerados.

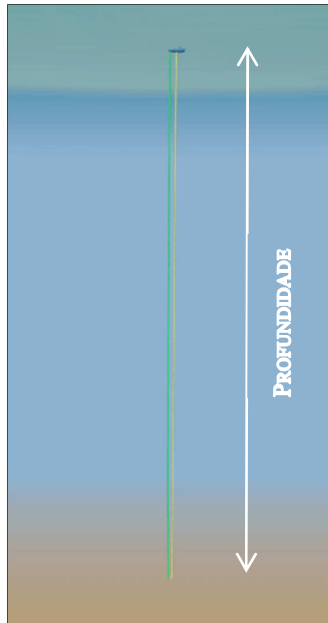


Figura 5.1 – Vista geral do modelo - ORCAFLEX.

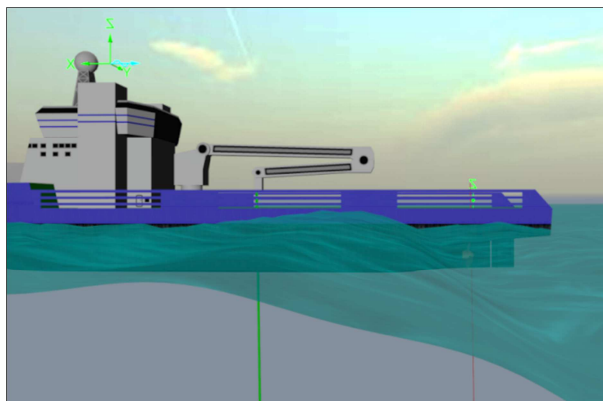


Figura 5.2 – Detalhes de topo para a conexão vertical de primeira extremidade - ORCAFLEX.

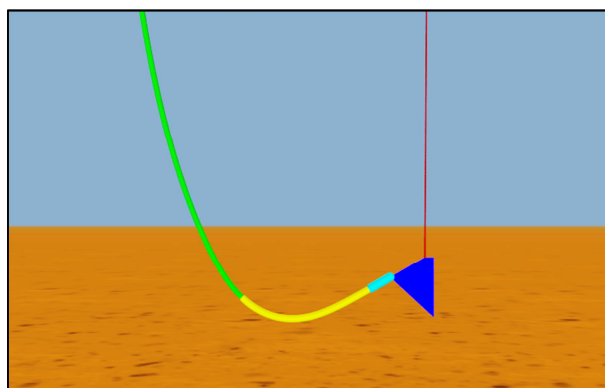


Figura 5.3 – Primeiro modelo (conexão vertical de primeira extremidade em movimento livre - fundo) - ORCAFLEX.

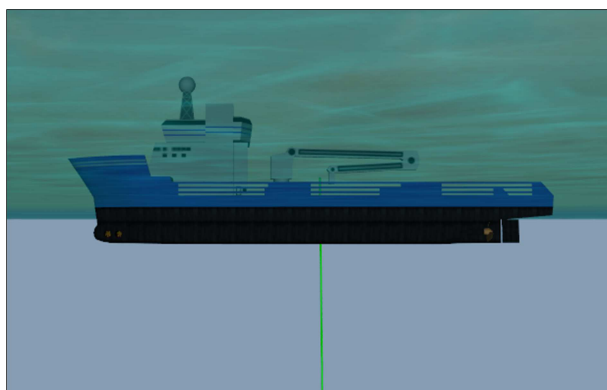


Figura 5.4 – Detalhes de topo para a conexão vertical de primeira extremidade em movimento restrito - ORCAFLEX.

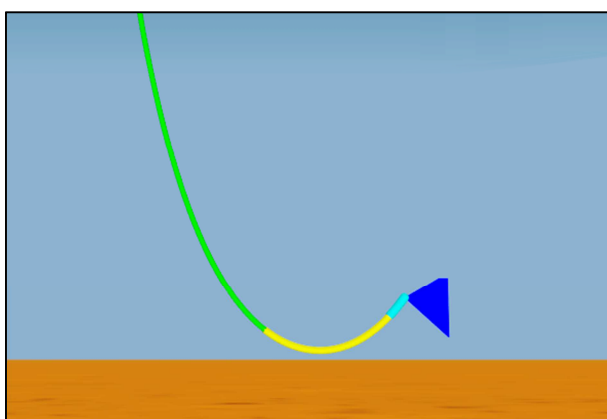


Figura 5.5 – Segundo modelo (conexão vertical de primeira extremidade em movimento restrito - fundo) - ORCAFLEX.

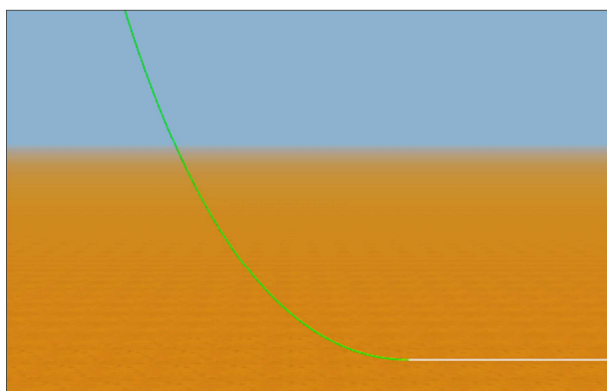


Figura 5.6 – Quarto modelo (conexão vertical de segunda extremidade) - ORCAFLEX.

5.3 CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO

O critério de aceitação utilizado levará em conta o raio mínimo de curvatura (*bend radius*) e o momento fletor máximo do restritor de curvatura (*bend moment*). Para

o cabo, os valores críticos estão relacionados à capacidade de carga dinâmica do guindaste.

O MBR utilizado foi de 2,45 m relacionado à vértebra referenciada em [9] e um fator de 1,5 foi incorporado a este valor de acordo com a referência API Spec 17J [15], totalizando 3,68 m de MBR para o critério de instalação. O momento fletor máximo aceitável será de 90 kN.m [9], também referente aos limites impostos pela vértebra.

5.4 CÁLCULO TEÓRICO

5.4.1 Carga Estimada de Lançamento (ELT - *Estimated Laying Tension*)

A carga calculada no topo da linha flexível pode ser estimada através da equação de carga de lançamento (ELT):

$$ELT = p \times (LDA+10) \times 1,06 \times 1,3 + A \quad [8]$$

Onde:

p = Peso por metro do duto flexível submerso (kgf/m);

LDA = Máxima lamina d'água [m];

1,06 = Fator de catenária;

1,3 = Fator de amplificação dinâmica para unidades flutuantes;

A = Peso dos acessórios do duto

Para a geração de um modelo mais conservador, foi estipulado um ângulo de topo de no máximo 3° para geração da catenária da segunda extremidade.

5.4.2 Carga de Lançamento (DLT)

O valor utilizado para as análises posteriores será o maior valor encontrado entre “Máxima Carga de Lançamento” das análises dinâmicas com o navio de instalação e a “Carga Estimada de Lançamento (ELT)”, o maior valor obtido é considerado a Carga de Lançamento (DLT). O maior valor obtido é denominado Carga de Lançamento (DLT). Esse comparativo será apresentado nos resultados das análises do estudo de caso.

5.5 EQUIPAMENTO DE INDUÇÃO PARA CONEXÃO DE LINHAS FLEXÍVEIS

Os módulos de conexão vertical surgiram a partir da necessidade de realizar a conexão *diverless* da linha com o equipamento submarino já em leito marinho. Além de promover essa conexão fazendo uso apenas de um monitoramento via ROV, o módulo de conexão vertical utiliza seu peso para ajudar no trajeto da linha até o ponto definido da conexão. Quando a conexão de primeira extremidade não pode ser realizada, a linha flexível é lançada sem o módulo de conexão. No entanto, um flange cego é colocado em seu lugar para uma futura conexão de segunda extremidade, onde ocorrerá o acoplamento no convés do navio do módulo com a extremidade do duto flexível.

5.5.1 Características do equipamento e do duto flexível

Definida a linha flexível de 9”, cujos dados estão expostos na Tabela 4.5, seção 4.8.2, deve-se definir o módulo de conexão e o peso da linha mais adequados para águas ultraprofundas. As propriedades utilizadas nas análises para o módulo de conexão vertical estão descritas na Tabela 4.4, item 4.8.1.

5.5.2 Propriedades do Cabo de lançamento

As propriedades referentes ao cabo de lançamento para as análises realizadas nessa seção estão representadas na Tabela 4.3.

5.6 CARREGAMENTOS AMBIENTAIS

As configurações dos dados ambientais estão descritos nos itens a seguir. Caso exista alguma configuração não descrita, considerar a configuração *default* utilizada no programa ORCAFLEX.

A terminologia utilizada para essa dissertação segue a norma DNV-RP-H103, onde:

- H_s – Altura de Onda significativa. Média da terceira parte das ondas com maior altura registrada durante o tempo considerado.
- T_p – Período de Pico. Período correspondente à frequência com maior densidade espectral (maior nível de energia).
- $H_{m\acute{a}x}$ – Altura de Onda Máxima. Normalmente utiliza-se para $H_{m\acute{a}x}$ o valor de

1,86 de H_s .

- $T_{m\acute{a}x}$ – Período associado à Altura de Onda Máxima. O período máximo é verificado através de uma média entre o período em que cada onda máxima ocorra em um mar irregular.

5.6.1 Carregamentos durante a instalação

O cenário de instalação é ilustrado na Figura 5.7. O módulo de conexão vertical é utilizado como uma ferramenta para a descida de um duto flexível ao longo da lâmina d'água e sua posterior conexão. Ele está conectado à extremidade desse duto flexível, adicionando peso ao conjunto (cabo + módulo de conexão + duto). Durante a instalação o conjunto sofre a ação de correntes e ondas propagadas ao longo da Lâmina D'água.

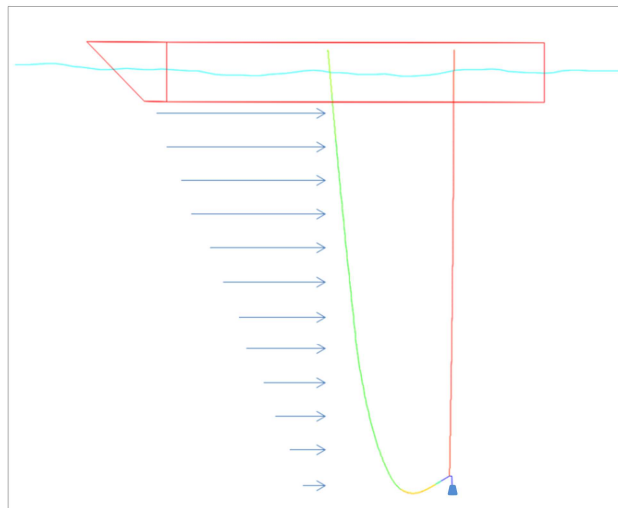


Figura 5.7 – Forças atuantes durante a instalação do duto flexível.

5.6.2 Diagrama Operacional

Ondas e correntes semelhantes àsquelas utilizadas nas regiões das bacias brasileiras foram consideradas para esta análise. Levando em consideração que a resposta do navio é proporcional à altura de onda, optou-se por cobrir o maior número de ondas significativas e períodos de pico possíveis, gerando uma gama de respostas para posterior interpretação. Valores de H_s de 1 m a 5m e T_p de 6 s a 12 s foram considerados, não levando em consideração a probabilidade de ocorrência no campo considerado. A Tabela 5.1 mostra a combinação de H_s e T_p durante a instalação, identificados pela cor verde. De todas as combinações $H_s \times T_p$ estudadas, o diagrama operacional será o mapeamento de todas as combinações cujos critérios de projeto

forem atendidos.

Tabela 5.1 – Diagrama Operacional – Período de Pico e Altura Significativa de Onda.

Diagrama Operacional								
1 m								
2 m								
3 m								
4 m								
5 m								
Hs / Tp	4 s	5 s	6 s	7 s	8 s	9 s	11 s	12 s

5.6.3 Modelo de Corrente Marinha

O valor da corrente utilizada na região analisada pode variar de acordo com a profundidade, gerando um perfil de corrente. Correntes típicas de 1 ano foram utilizadas nas análises: Corrente colinear (de proa) e transversal (de través) ao navio. A corrente de fundo foi considerada nula. Um estudo de sensibilidade (seção 5.7.5) foi realizado de forma a identificar a diferença entre valores obtidos para análises com e sem a atuação da corrente. A Tabela 5.2 define os perfis utilizados.

Tabela 5.2 – Perfil Vertical de Corrente de través e de proa no período 1 ano.

LDA	1 ano (de Través)	1 ano (de Proa)
0 m	0,7 m/s	0,9 m/s
100 m	0,6 m/s	0,8 m/s
350 m	0,6 m/s	0,8 m/s
500 m	0,7 m/s	0,6 m/s
1000 m	0,5 m/s	0,6 m/s
1250 m	0,4 m/s	0,4 m/s
1500 m	0,3 m/s	0,2 m/s
2000 m	0,2 m/s	0,2 m/s
2500 m	0,1 m/s	0,1 m/s

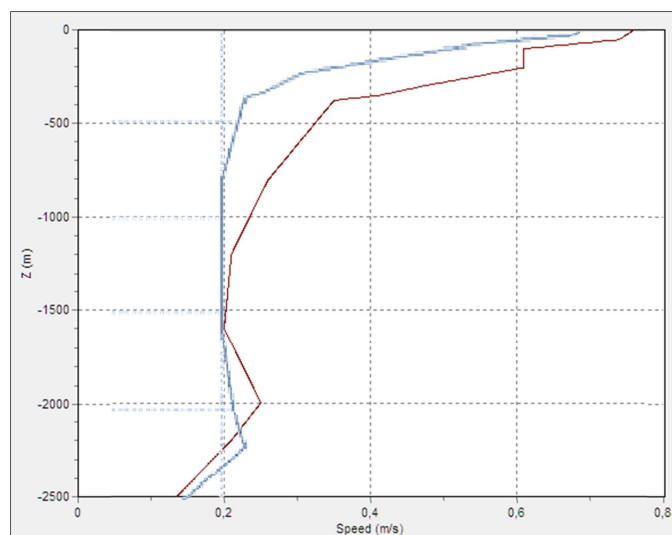


Figura 5.8 – Perfil da Corrente de proa (vermelho) e de través (azul).

Vale ressaltar que em lâminas d'água profundas o carregamento de corrente distribui-se de forma multidirecional ao longo da profundidade. Neste estudo de caso, o perfil é coplanar, de forma a simplificar o estudo. Além disso, e, por se tratar de dados utilizados para fins comparativos, seu uso não irá alterar as conclusões qualitativas da dissertação.

5.6.4 Modelo de Onda

Diversos espectros de onda podem ser utilizados nas simulações dinâmicas. Para o estudo de casos, conforme já mencionado, o espectro adotado foi o de JONSWAP modificado, por se adequar mais ao cenário brasileiro. O espectro típico do mar do norte é conhecido como espectro Pierson-Moskowitz, aplicado em regiões onde o comprimento buscado é grande de tal forma que as ondas podem ser desenvolvidas por completo. Enquanto JONSWAP possui um pico íngreme em sua densidade espectral, Pierson mantém uma amortização, conforme Figura 5.9.

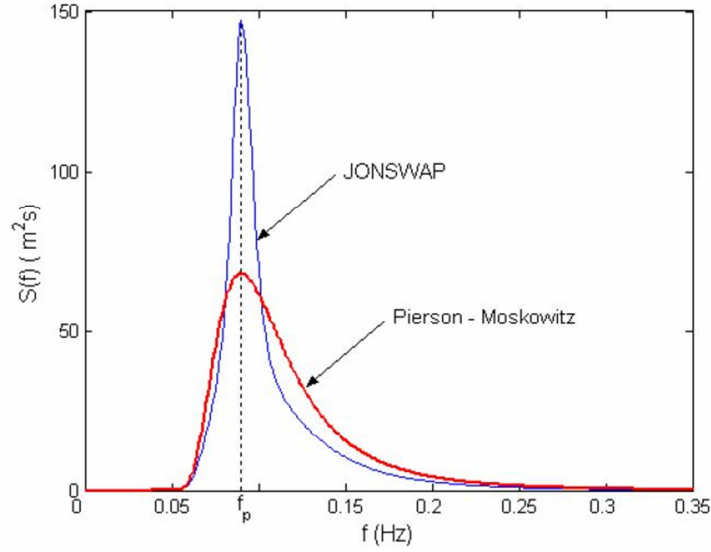


Figura 5.9 – Espectro de JONSWAP comparado com o espectro de Pierson-Moskowitz.

$$S(f) = \frac{5}{16} \cdot H_s^2 \cdot T_p \cdot \left(\frac{f_p}{f} \right)^5 \cdot (1 - 0.287 \cdot \ln \gamma) \cdot e^{-1.25 \left(\frac{f}{f_p} \right)^4} \cdot \gamma^{e^{\left[\frac{-(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2} \right]}} \quad [9]$$

A equação acima rege o gráfico de JONSWAP, onde H_s é a altura significativa de onda, T_p o período de pico, f_p a frequência de pico, γ o fator de intensificação do pico ajustado à Bacia de Campos e σ o parâmetro de forma. Alguns parâmetros são definidos por fórmula.

Onde,

$$f_p = \frac{1}{T_p} \quad [10]$$

$$\gamma = 6,4 * T_p^{-0,491} \quad [11]$$

$$\sigma_a = 0,07 \text{ para } f \leq f_p \quad [12]$$

$$\sigma_b = 0,09 \text{ para } f > f_p \quad [13]$$

Definido o espectro para a onda aleatória, os dados de entrada calculados pelas equações de JONSWAP modificado estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 –Parâmetros adotados nas simulações dinâmicas

H _s [m]	T _p [s]	γ	α	T _p [s]	γ	A
1	6	2,66	3,43E-03	10	2,07	4,60E-04
2			1,37E-02			1,84E-03
3			3,09E-02			4,14E-03
4			5,49E-02			7,37E-03
5			8,57E-02			1,15E-02
1	8	2,31	1,11E-03	11	1,97	3,16E-04
2			4,43E-03			1,27E-03
3			9,96E-03			2,85E-03
4			1,77E-02			5,06E-03
5			2,77E-02			7,91E-03
1	9	2,18	6,97E-04	12	1,89	2,25E-04
2			2,79E-03			8,99E-04
3			6,27E-03			2,02E-03
4			1,11E-02			3,60E-03
5			1,74E-02			5,62E-03

5.7 ANÁLISES PARAMÉTRICAS

5.7.1 Introdução

As análises paramétricas servem como meio comparativo entre modelos, baseando-se em certas variáveis chamadas de parâmetros comparativos. A descrição do modelo é realizada a seguir de forma a apresentar quais parâmetros foram estudados e, após avaliação dos resultados, quais serão empregados nas simulações futuras.

5.7.2 Discretização do modelo

Foram efetuadas algumas análises preliminares, com malhas sucessivamente mais refinadas, para identificar a gradação ideal da malha. O refinamento foi diferenciado ao longo da estrutura, fazendo uso de elementos menores nas regiões próximas às conexões. Optou-se por uma malha com elementos de 10 m na área intermediária da catenária, realizando a transição progressiva até os pontos críticos, sendo eles as extremidades do cabo e da linha e a área do restritor de curvatura até o início da catenária. Um refinamento de 0,1 m foi adotado nas proximidades dos pontos mais críticos.

O comprimento total e o número de segmentos das malhas testadas estão descritos na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Definição do comprimento e discretização do modelo – Primeira extremidade.

CVD 1ª extremidade	Comprimento Total [m]		Número de elementos finitos	
	Duto Flexível	Cabo	Duto Flexível	Cabo
Malha 1	2505,264	2497	1497	1801
Malha 2	2504,649	2496	452	406

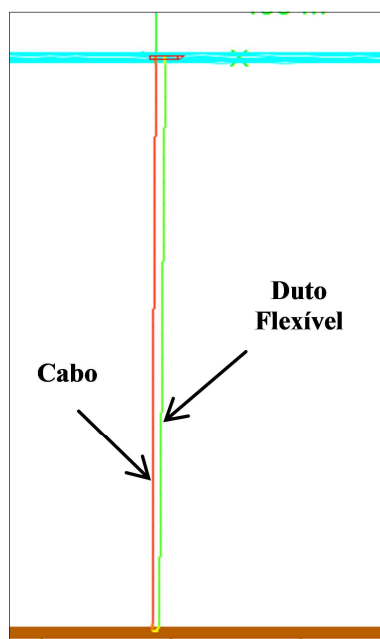


Figura 5.10 – Esquemático para lançamento em primeira extremidade

A Malha 2 foi utilizada nos modelos de instalação por conexão vertical direta de primeira extremidade, fazendo uso de um modelo desacoplado. Para o caso nas análises de instalação por conexão vertical direta de segunda extremidade, as malhas foram modificadas de forma a diminuir o tempo de processamento e focar nos novos pontos de interesse, como a região de TDP (*touchdown point*). A discretização para o caso de segunda extremidade seguiu o mesmo padrão das análises de CVD de primeira extremidade (Malha 2). O seu comprimento e segmentação podem ser observados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Definição do comprimento e discretização do modelo – Segunda extremidade.

CVD 2ª extremidade	Comprimento Total [m]		Número de elementos finitos
	Duto Flexível		Duto Flexível
Malha 3	2854,65		1364

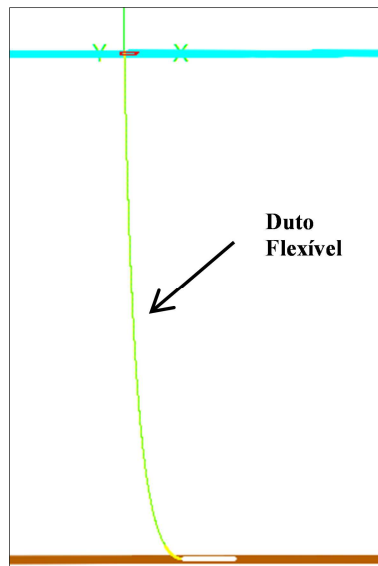


Figura 5.11 – Esquemático para lançamento em segunda extremidade

5.7.3 Modelo do duto flexível

Uma importante etapa que deve ser realizada antes das simulações é a definição dos segmentos para cada trecho de duto flexível da análise. Caso a discretização seja muito grosseira, as respostas do modelo estarão em desconformidade com a realidade. Para assegurar a qualidade dos resultados, a malha e as propriedades físicas devem ser representados da maneira mais conveniente para obtenção de efeitos mais globais. Um dos parâmetros analisados corresponde à representação da rigidez à flexão da linha.

As condições ambientais desse estudo levam em consideração a corrente de proa exposta na Tabela 5.2, mar irregular (JONSWAP) com $H_s = 3$ m e um período de pico de 9 s.

Para definição do modelo ideal para representar a linha flexível em catenária livre, foram realizados estudos paramétricos envolvendo três formas de representar seus segmentos:

- a) Segmento único, com Rigidez Linear em todo o comprimento do duto;
- b) Segmento único, com Histerese em todo o comprimento do duto;
- c) Segmento verticalizado (com baixa curvatura) com Rigidez Linear; e segmentos com alta curvatura representados com Histerese.

**a) Segmentos com Rigidez Linear em todo o comprimento do duto –
Catenária livre**

A configuração com rigidez linear ao longo da linha flexível resultou em um momento fletor máximo menor que 2 kN.m no restritor de curvatura. A rigidez linear utilizada foi de 96 kN.m². O resultado está descrito na Figura 5.12.

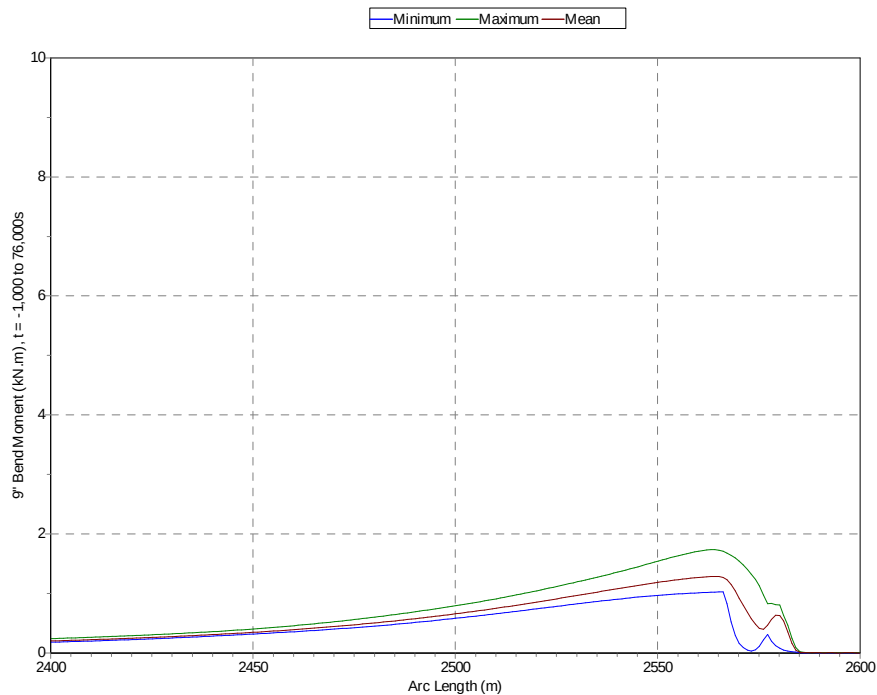


Figura 5.12 – Momento fletor para a configuração em catenária livre – Rigidez Linear.

**b) Segmentos com Rigidez Histerética em todo o comprimento do duto –
Catenária livre**

A configuração com curva de histerese ao longo da linha flexível resultou em um momento fletor máximo em torno de 70 kN.m no restritor de curvatura. O resultado está descrito na Figura 5.13.

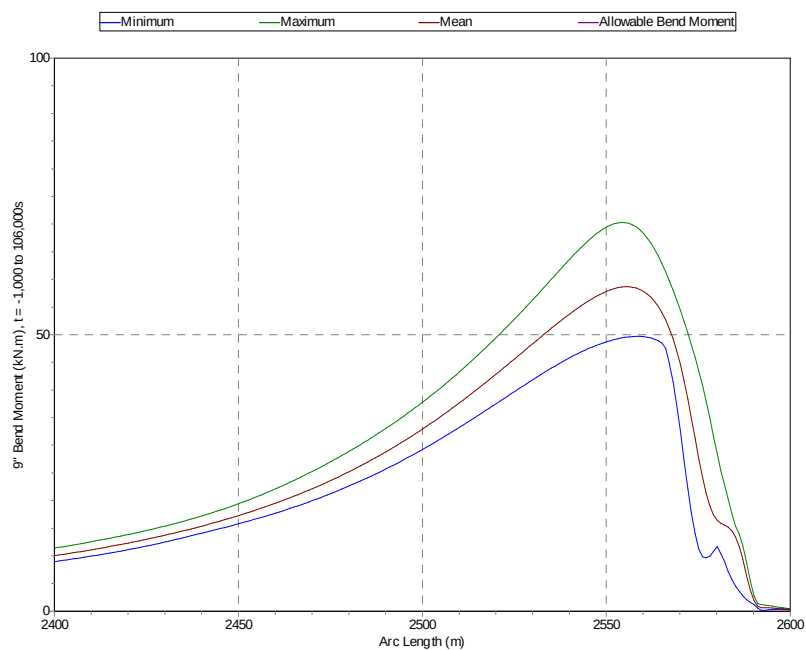


Figura 5.13 – Momento fletor para a configuração em catenária livre – Rigidez Histerética.

c) Segmentos verticalizados com Rigidez Linear e segmentos em curva com Rigidez Histerética – Catenária livre.

A configuração com rigidez linear no comprimento verticalizado e com curva de histerese nos segmentos onde ocorre curvatura da linha resultou em um momento fletor máximo em torno de 70 kN.m no restritor de curvatura. O resultado está descrito na Figura 5.14.

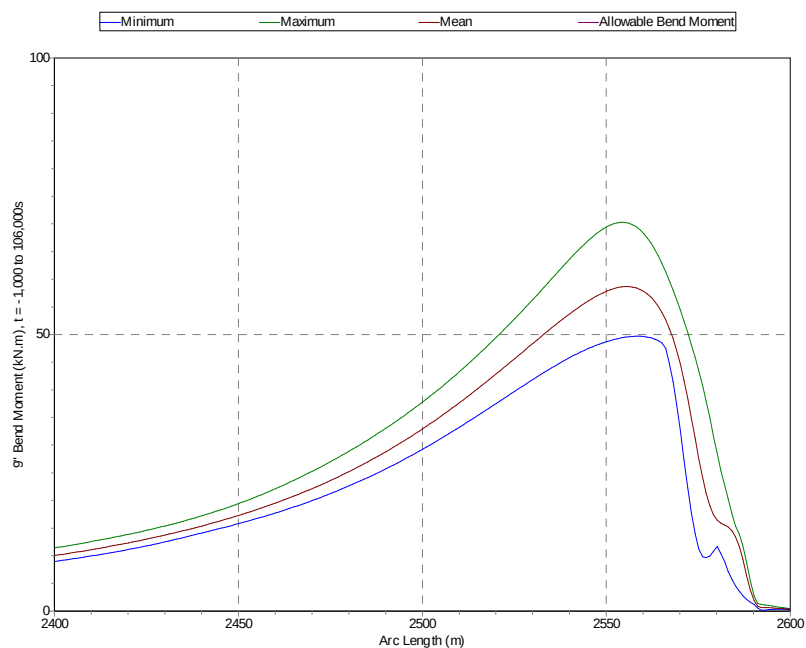


Figura 5.14 – Momento fletor para a configuração em catenária livre – Rigidez Histerética.

Os resultados evidenciam a necessidade da utilização da rigidez correta para os tramos em curva, além de demonstrar que não é necessário utilizar todo o comprimento de linha com um mesmo tipo de rigidez, uma vez que os tramos verticalizados não sofrem influência da rigidez à flexão, apenas rigidez axial do duto.

Após as análises realizadas com os três diferentes tipos de modelo mencionados anteriormente, optou-se por utilizar o modelo “c” com rigidez linear para elementos verticalizados e, para tramos que possam vir a sofrer curvatura mais acentuada, com uso da curva de histerese, conforme mencionado no item 5.7.4. As condições ambientais para esta definição envolveram um mar determinístico sem corrente incidente.

5.7.4 Avaliação da Rigidez de curvatura

Este item mostra a influência do comportamento do fenômeno de histerese e não linearidade de uma linha durante sua instalação utilizando a configuração de conexão vertical direta de primeira extremidade, através dos esforços no ponto de conexão entre a linha flexível e o módulo de conexão vertical. As simulações foram realizadas supondo inicialmente o sistema livre para oscilar e, dando prosseguimento ao processo de instalação, simula-se o módulo já conectado no equipamento submarino, localizado no leito marinho.

5.7.4.1 Oscilação livre – Primeira extremidade

A oscilação livre é a configuração em que o ângulo de inclinação do módulo de conexão vertical esteja verticalizado. O módulo de conexão é considerado verticalizado desde que possua um desalinhamento máximo de $\pm 1^\circ$, situação que possibilita o seu assentamento.

Esta análise teve o objetivo de verificar a influência da curva de rigidez não linear da linha e o comportamento de histerese na configuração de equilíbrio e dinâmica nos esforços produzidos na conexão da linha com o módulo de conexão vertical. Foram realizados três modelos: um considerando a rigidez do flexível constante, o segundo com rigidez não-linear e, por fim, o terceiro modelo considerando o comportamento histerético da linha. Os casos dinâmicos fizeram uso de uma onda irregular JONSWAP com o módulo de conexão vertical fixo em sua base de destino.

Tabela 5.6 - Resultados do momento fletor na extremidade do duto flexível para as configurações de equilíbrio e dinâmica – Oscilação livre.

Momento Fletor		Rigidez Constante	Não linearidade da linha	Histerese na linha
M [kN.m]	Equilíbrio	19,28	57,40	57,40
	Dinâmica	42,09	69,41	60,29

Os resultados da Tabela 5.6 mostram que o comportamento da histerese durante a etapa de equilíbrio e dinâmico influencia nos esforços da conexão do módulo de conexão vertical com o conector.

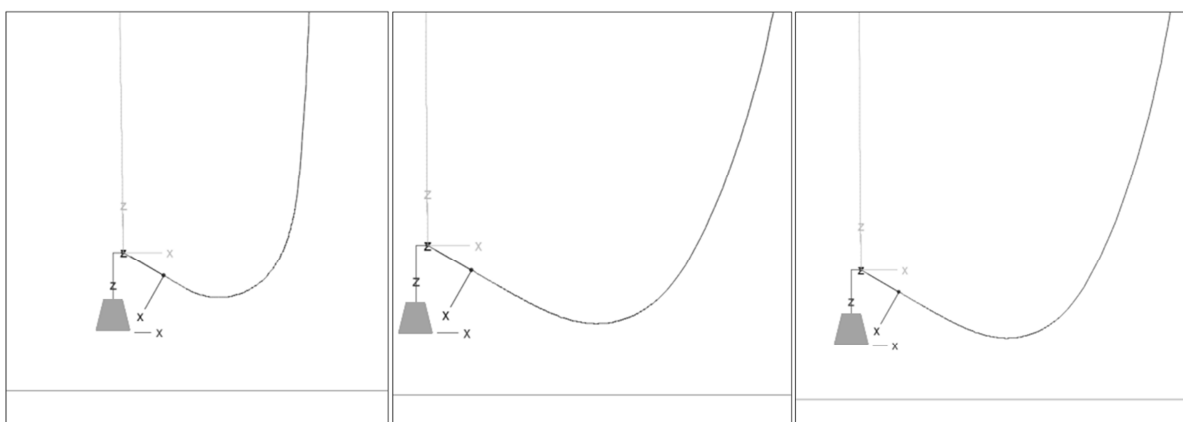


Figura 5.15 – Configuração de Equilíbrio - Linear, não linear e curva de histerese, respectivamente – Oscilação livre.

A Figura 5.15 demonstra a configuração de equilíbrio para os três modelos mencionados anteriormente.

Os esforços ao final da aplicação da onda aleatória apresentam a influência do comportamento da histerese na análise dinâmica. Por se tratar de uma etapa com o movimento em livre balanço não existe uma influência expressiva com relação aos esforços limites da conexão do módulo quando comparados com e sem a implementação da histerese no modelo.

5.7.4.2 Oscilação Restrita – Primeira extremidade

O propósito deste caso é simular o caso dinâmico com o módulo de conexão vertical instalado no AMN. Os resultados são mostrados na Tabela 5.7 e na Figura 5.16.

Tabela 5.7 - Resultados do momento fletor na extremidade do duto flexível para as configurações de equilíbrio e dinâmica – Oscilação restrita.

Momento Fletor		Rigidez Constante	Não linearidade da linha	Histerese na linha
M [kN.m]	Equilíbrio	142,98	57,40	57,40
	Dinâmica	1247,08	90,32	220,64

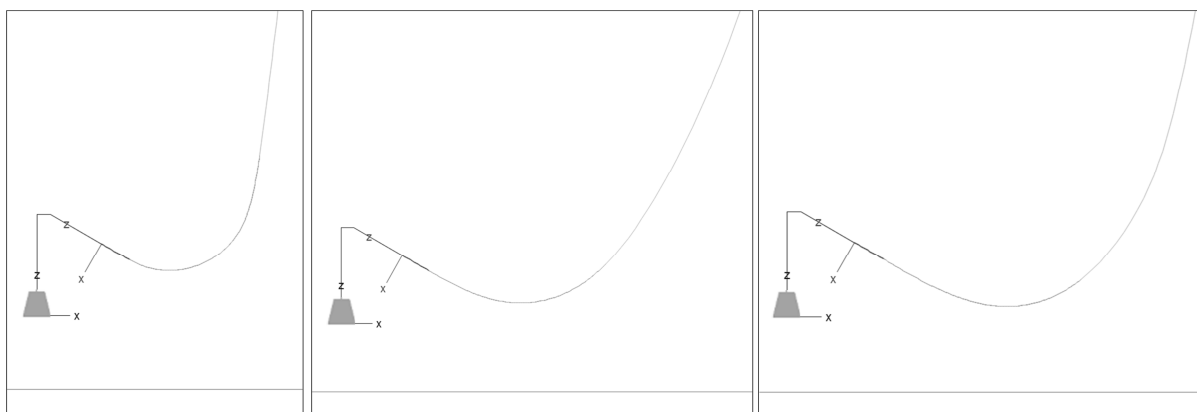


Figura 5.16 – Configuração de Equilíbrio - Linear, não linear e curva de histerese, respectivamente – Oscilação restrita.

A configuração de equilíbrio com a oscilação restrita apresenta um aumento significativo no momento fletor quando utiliza a rigidez linear, não retratando a realidade. A consideração da curva de rigidez não linear representa melhor o comportamento real da linha do que uma aproximação com a rigidez constante. A inclusão do comportamento da curva de histerese no modelo faz com que ele simule as interações de escorregamento e retorno das camadas, indicado sua importância na tabela acima.

5.7.5 Influência da corrente

O estudo da influência da correnteza utilizou como dados de entrada os valores expressos na Tabela 5.2. O deslocamento horizontal devido à ação da corrente durante a instalação para o cenário de uma profundidade de lâmina d'água de 2500 m em um tempo total de simulação de 1800 s, após a realização da simulação do mesmo modelo com e sem o uso da correnteza, está apresentado na Figura 5.17.

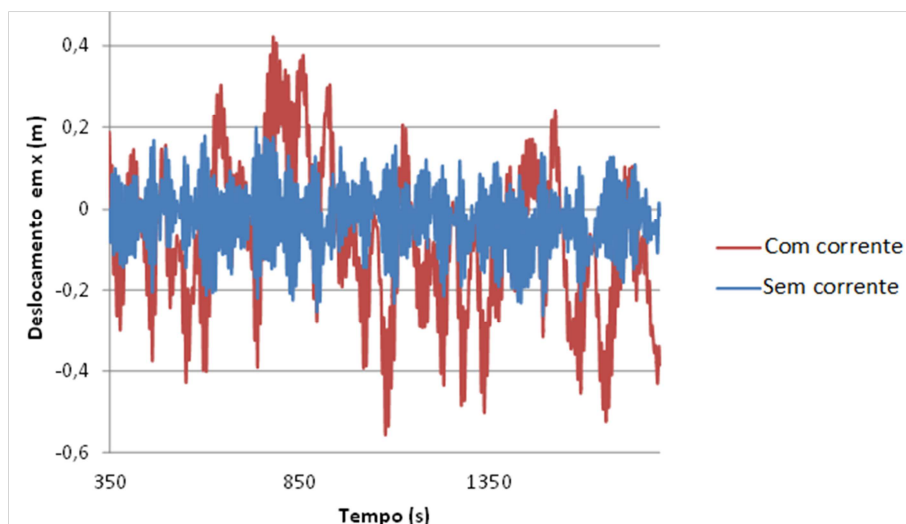


Figura 5.17 – Influência da corrente de 2500 m no deslocamento do equipamento submarino.

É possível observar pela Figura 5.17 que o deslocamento horizontal do equipamento submarino difere em 1 m devido à ação da força de arrasto incidente no sistema de lançamento (cabo, linha flexível e equipamento submarino).

5.7.6 Posicionamento dos dispositivos de lançamento

As coordenadas do cabo de lançamento e dos dutos flexíveis detêm uma variável extensa de configurações. A influência das diferentes posições nos resultados foi avaliada considerando como carregamento um mar determinístico e em águas ultraprofundas. Os posicionamentos estão ilustrados na Figura 5.18, onde o duto flexível é representado pela cor verde e o cabo de aço pela cor vermelha. A Tabela 5.8 descreve as configurações para cada posição.

Tabela 5.8 – Configurações para lançamento de um duto flexível.

Posição	Configuração [m]		Distância entre guindaste e tracionador [m]
	x cabo	x duto	
P01	-20,0	-50,0	30
P02	-10,0	-40,0	30
P03	-10,0	-50,0	40
P04	-30,0	0,0	30
P05	-40,0	0,0	40
P06	-40,0	-70,0	30
P07	-40,0	-1,0	40
P08	-40,0	-10,0	30

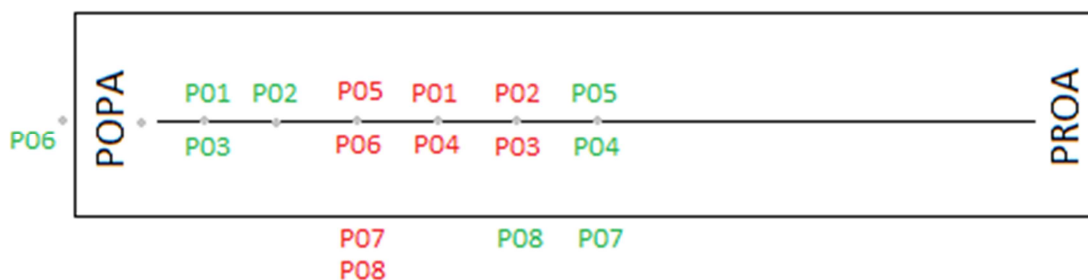


Figura 5.18 – Ilustração do posicionamento do duto flexível e do cabo de aço para lançamento em uma embarcação.

A escolha da embarcação para a realização de uma instalação de linhas flexíveis leva em consideração a capacidade de cargas dos tracionadores, dos guinchos e guindastes, assim como o custo efetivo, sua disponibilidade e capacidade de armazenamento das linhas a serem lançadas e sua configuração de lançamento. O RAO dessas embarcações deve ser conhecido para a elaboração de uma janela operacional específica para as instalações de linhas e/ou equipamentos submarino. Existe uma aproximação realizada pelas empresas de navios que fazem esse cálculo, porém com um conservadorismo alto, usualmente limitando as instalações não pelo movimento de resposta da embarcação, mas simplesmente pela presença de ondas maiores que uma estabelecida para a operação. Isto significa que muitas ocasiões onde as instalações poderiam ser realizadas acabam sendo impedidas devido a um ambiente “desfavorável”, mantendo-se na posição *hold*. O custo diário dessas embarcações é extremamente elevado. A combinação de janelas operacionais com os navios de instalação é uma medida capaz de reduzir os custos de instalação e aumentar a credibilidade da operação.

Com relação ao posicionamento das linhas, a diferença percentual entre as forças atuantes nas diferentes configurações de lançamento pode ser observada nos gráficos da Figura 5.19.

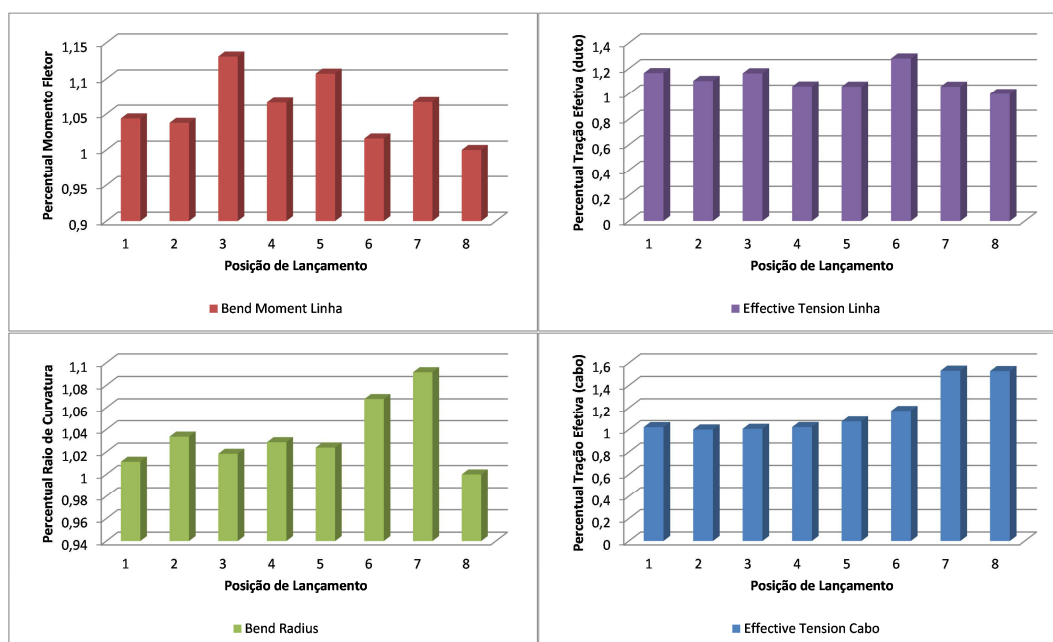


Figura 5.19 – Diferença percentual entre esforços devido à configuração de lançamento.

Considerando o menor valor como ponto de saída, as diferenças são evidenciadas acima. As posições P07 e P08 permitiram um aumento significativo maior que 50% em relação à força de tração na região da extremidade de topo do cabo de aço, expressando a importância do movimento de *pitch* de uma embarcação neste tipo de lançamento. O cabo de aço pode ser lançado pela popa, bombordo ou boreste, dependendo da configuração da embarcação.

Para momentos máximos na região do restritor de curvatura, um desvio padrão de 10% nas posições P03 e P05 foram obtidos. Apesar do raio mínimo de curvatura indicar 10% em sua variação, o mesmo não possui grande relevância por se tratar de valores pequenos.

Avaliando-se os esforços de tração na região do topo do duto flexível, pode-se verificar em relação ao menor valor apurado uma diferença percentual em torno de 20% na posição P06 e em torno de 15% para as posições P01 e P03.

Observando os desvios padrões das séries de esforços, os resultados mostraram ser mais conservadores para as posições P02 e P04, ambos com distância entre cabo de aço e duto flexível de 30 m e com saída pelo *moonpool* do navio de lançamento. Adotou-se a posição P04 para o estudo de caso de forma a incluir o conservadorismo nas análises, consequentemente aumentando a gama de possibilidades de operação em condições ambientais mais severas.

5.7.7 Pontos críticos

A Figura 5.20 mostra a distribuição do momento fletor ao longo do duto flexível de 9" para todas as alturas significativas e os períodos de pico do diagrama operacional em lançamento vertical direto de primeira extremidade. O valor máximo de momento fletor foi encontrado na área onde existe o restritor de curvatura, como esperado. Devido a isto, os valores observados foram o ponto entre o conector e o restritor de curvatura e a área que compreende esse restritor.

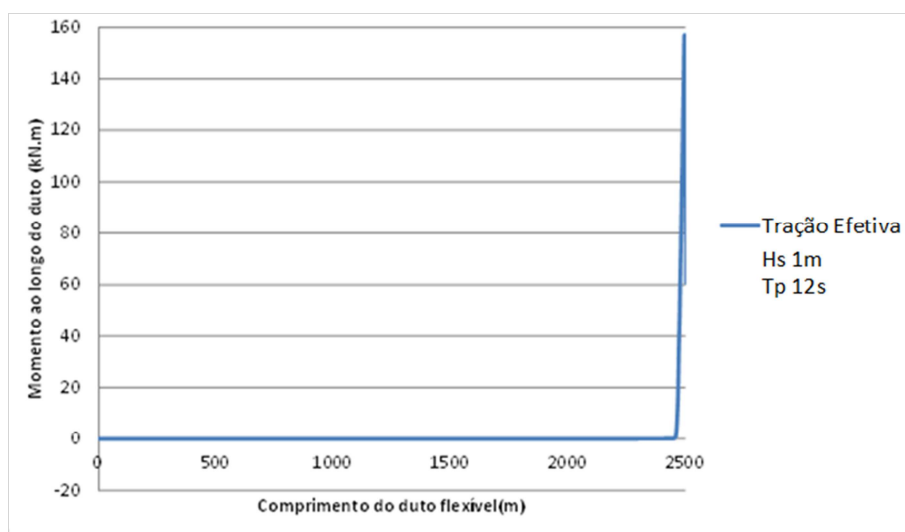


Figura 5.20 – Momento fletor ao longo do duto flexível.

Em relação à tração efetiva no cabo de aço e no duto flexível, os pontos mais solicitados durante as análises foram os topos, como pode ser observado na Figura 5.21 e na Figura 5.22. Seguindo o critério acima, esses pontos críticos foram monitorados durante as simulações.

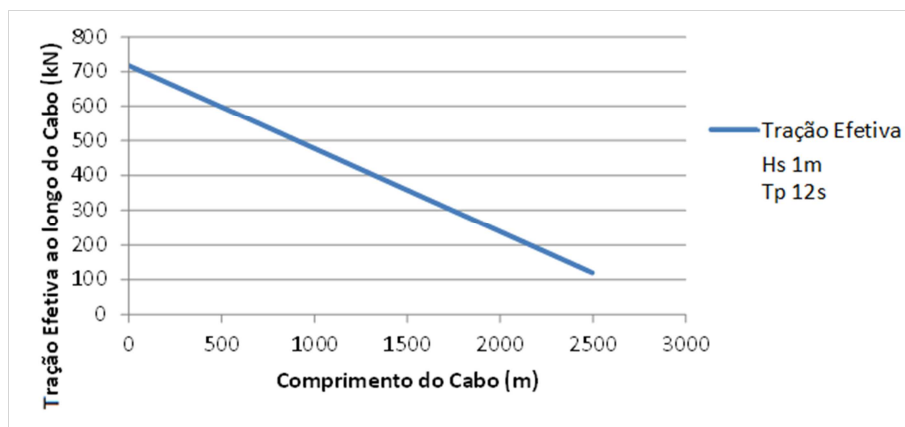


Figura 5.21 – Tração efetiva ao longo do cabo.

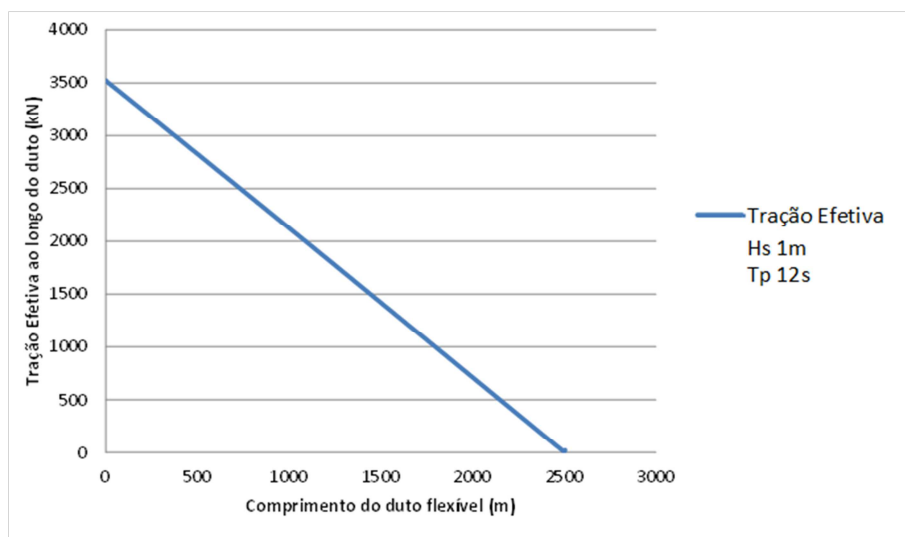


Figura 5.22 – Tração efetiva ao longo do duto flexível.

6 RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Nesta seção, serão apresentadas as janelas operacionais de instalação de MCV em LDAs profundas considerando diversas situações de instalação.

No item 6.2 serão apresentados os resultados do momento fletor no conector, tração no topo do duto flexível, momento de curvatura no restritor de curvatura (*bend radius*) e tração no topo do cabo de aço para a configuração movimento livre em conexão vertical direta de primeira extremidade. As análises foram realizadas em um mar aleatório.

No item 6.3 serão apresentados os resultados do momento fletor no conector, tração efetiva no topo do duto flexível, momento de curvatura no restritor de curvatura (*bend radius*) e tração efetiva no topo do cabo de aço para a configuração movimento restrito em conexão vertical direta de primeira extremidade. As análises foram realizadas em um mar aleatório.

Um comparativo entre diferentes lâminas d'água em uma instalação de um duto flexível por conexão vertical direta de primeira extremidade com movimento livre para oscilar é apresentado no item 6.4. Foram investigados os mesmos pontos de análise praticados no item 6.2.

O item 6.5 faz referência à instalação vertical de segunda extremidade, com o módulo de conexão vertical localizado próximo à mesa de trabalho, verticalizado pelo guindaste da embarcação de lançamento. Foram examinadas as respostas na região próxima ao TDP e o topo do duto flexível.

No item 6.6, um estudo do posicionamento das lingadas para uma conexão vertical direta de segunda extremidade foi realizado. Este estudo se justifica como forma de obter uma sensibilidade quanto à variação do posicionamento dos cabos de aço no duto flexível, criando uma corcova que deve respeitar os limites de MBR determinados pelo fabricante. Os valores de curvatura foram avaliados neste item.

Obtidas as respostas das análises de instalação por CVD, um tratamento de dados foi abordado como forma de avaliar os valores extremos encontrados para o tempo de simulação de 1 hora com os valores calculados por Weibull, introduzindo um tempo de simulação de 3 horas.

6.2 CARGAS NA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE PRIMEIRA EXTREMIDADE – MOVIMENTO LIVRE

Os resultados expostos a seguir são referentes às análises dinâmicas de lançamento vertical direto de primeira extremidade com movimento livre a 2500 m de lâmina d'água para um duto de 9", utilizando o diagrama operacional exposto na Tabela 5.1, seção 5.6. A Figura 6.1 e a Figura 6.2 ilustram a configuração dos pontos avaliados neste item.

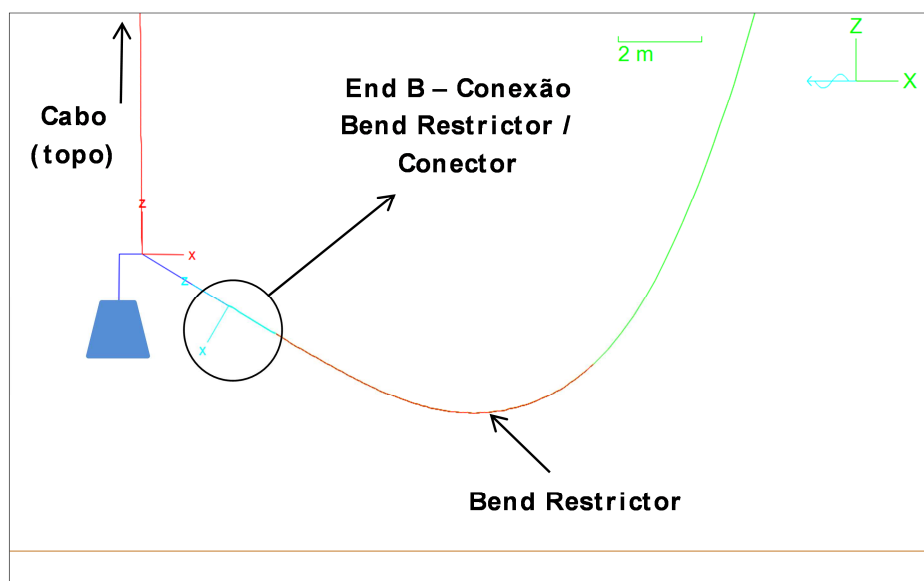


Figura 6.1 – Conexão restritor de curvatura e conector – Conjunto em movimento livre.

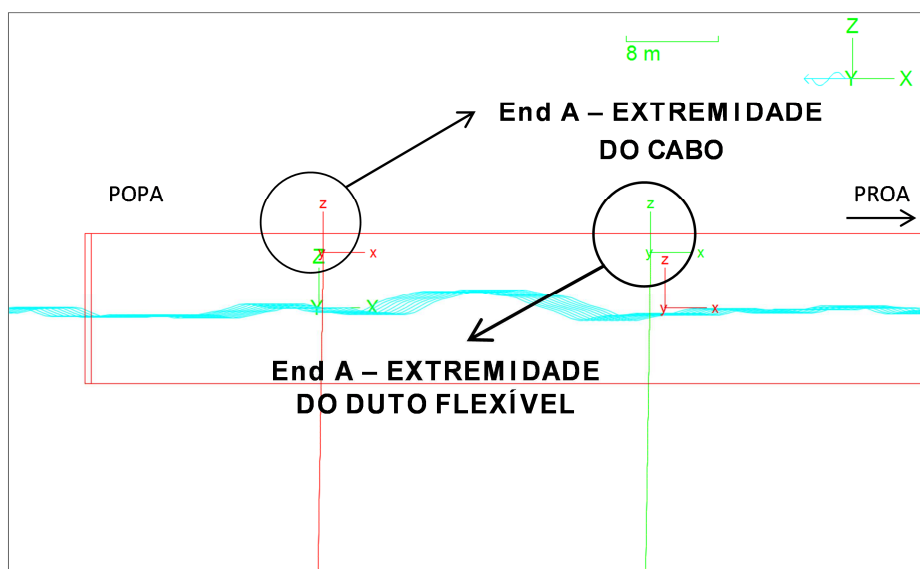


Figura 6.2 – Extremidade do Cabo e Duto (topo) – Conjunto em Movimento Livre.

Os resultados a seguir são apresentados de acordo com os critérios de aceitação, sendo eles:

- MBR = 3,68 m
- Momento = 90 kN.m
- MBS⁵ = 647 toneladas

Os valores serão expostos em cores graduais do verde, indicando estar de acordo com os critérios limitantes, ao vermelho, indicando que os limites foram excedidos.

6.2.1 Resultados na Extremidade do Duto Flexível – Movimento livre

Os valores encontrados de momento fletor na extremidade duto flexível, ou seja, na conexão entre conector e restritor de curvatura estão expostos na Tabela 6.1 e na Tabela 6.2.

Tabela 6.1 – Momento Fletor na extremidade do Duto Flexível (End B) – Corrente / Onda Proa.

My_Conector_Linha [kN.m] - End B_Corrente S							
1 m	57,88	58,47	59,17	59,79	60,90	61,03	60,70
2 m	58,94	61,53	77,79	61,75	66,08	66,61	66,07
3 m	59,05	62,43	66,47	72,25	62,83	70,86	71,72
4 m	59,82	66,67	76,53	87,50	85,98	97,70	88,96
5 m	59,42	72,31	126,94	105,64	102,22	465,86	96,98
H _s / T _p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Tabela 6.2 – Momento Fletor na extremidade do Duto Flexível (End B) – Corrente Través e Onda Proa.

My_Conector_Linha [kN.m] - End B_Corrente E							
1 m	57,87	59,33	59,57	59,92	61,15	61,10	60,66
2 m	58,81	62,13	63,59	63,25	66,76	67,09	66,14
3 m	60,78	64,80	66,68	73,46	77,96	71,55	71,78
4 m	60,51	67,81	77,37	88,57	86,42	98,36	90,51
5 m	63,76	73,05	246,05	265,58	101,68	1004,20	97,68
H _s / T _p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Os gráficos apresentados na Figura 6.3 descrevem a relação entre a altura significativa das ondas / período de pico com o Momento Fletor no conector do duto flexível.

⁵ Minimum Breaking Force - Força máxima permitida em um cabo de aço

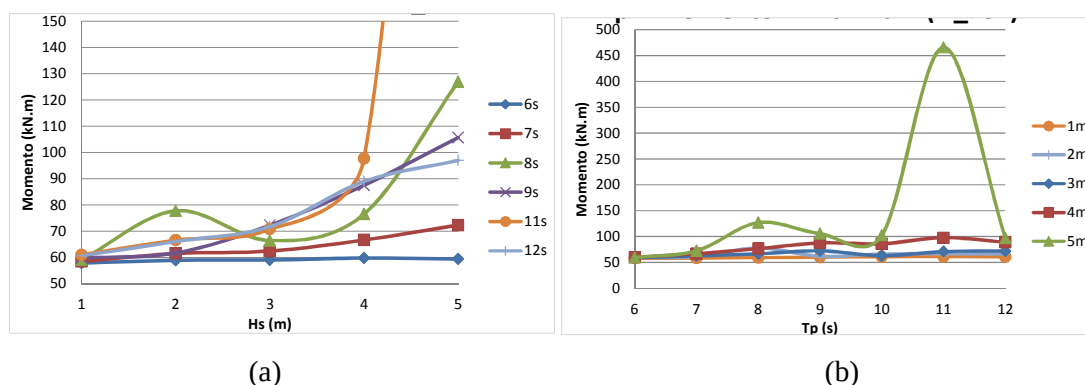


Figura 6.3 – Momento Fletor vs Altura significativa (a) e Momento Fletor vs Período de Pico (b) para sistema com movimento livre – Corrente de Proa.

Os valores obtidos da tração efetiva no topo do duto flexível, ou seja, na saída do navio de lançamento estão descritos na Tabela 6.3 e Tabela 6.4. O critério de aceitação para o duto possui uma relação com a tensão exercida pelas sapatas no duto durante seu lançamento. Como este cálculo não está no escopo deste estudo, as cores variaram do valor máximo para o mínimo encontrado.

Tabela 6.3 – Tração Efetiva na extremidade do Duto (Topo) – Corrente / Onda Proa.

Tração Efetiva_Linha [kN] - End A_Corrente S (IW)							
1 m	3508,91	3554,01	3565,71	3544,63	3541,89	3533,66	3525,53
2 m	3692,41	3755,51	3787,36	3675,99	3662,55	3652,90	3639,42
3 m	3756,91	3975,86	3826,67	3815,98	3698,37	3794,43	3790,76
4 m	3884,06	3974,57	3936,75	3996,98	3940,19	3958,71	3906,18
5 m	4050,91	4113,42	4105,58	4143,45	3986,14	4099,04	4008,08
H_s / T_p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Tabela 6.4 – Tração Efetiva na extremidade do Duto (Topo) – Corrente Través e Onda Proa.

Tração Efetiva_Linha [kN] - End A_Corrente E (IW)							
1 m	3509,19	3554,48	3566,27	3545,14	3542,45	3534,42	3525,85
2 m	3692,73	3756,97	3699,45	3676,60	3663,04	3654,34	3639,96
3 m	3757,26	3977,33	3828,67	3816,80	3788,31	3794,93	3792,13
4 m	3883,81	3975,83	3940,07	4000,69	3941,00	3959,15	3908,40
5 m	4050,44	4114,91	4108,40	4148,12	3987,60	4099,51	4008,61
H_s / T_p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Os gráficos apresentados na Figura 6.4 descrevem a relação entre a altura significativa das ondas com tração efetiva no topo do duto flexível.

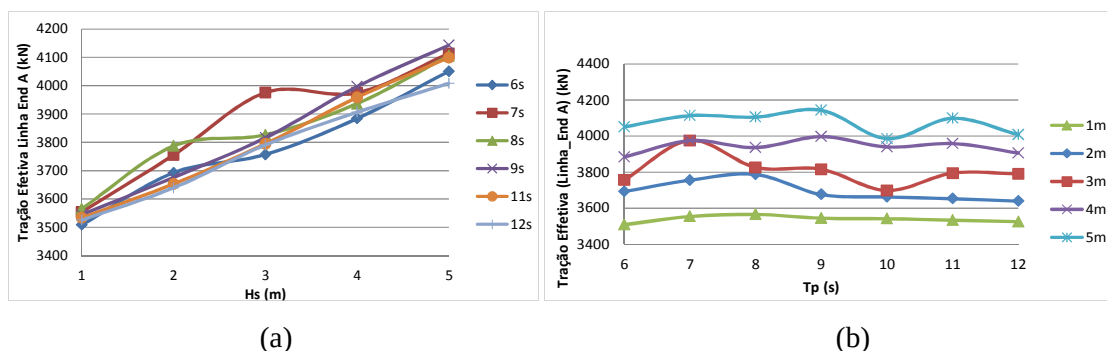


Figura 6.4 – Tração Efetiva vs Altura significativa (a) e Tração Efetiva vs Período de Pico (b) para sistema com movimento livre – Corrente de Proa.

6.2.2 Resultados no Cabo – Movimento livre

Os valores obtidos da tração efetiva no topo do cabo de aço, ou seja, na saída do guinaste estão descritos na Tabela 6.5 e Tabela 6.6.

Tabela 6.5 – Tração Efetiva na extremidade do Cabo (Topo) – Corrente / Onda Proa.

Tração Efetiva_Cabo [kN] - End A_Corrente S (IW)							
1 m	777,27	779,07	786,17	786,96	787,95	792,49	790,59
2 m	807,94	802,73	866,67	812,71	821,67	827,28	824,28
3 m	834,41	822,77	834,12	857,59	815,20	787,95	848,07
4 m	855,49	856,33	878,84	880,73	902,08	901,93	899,73
5 m	879,63	880,46	904,07	917,99	967,74	908,51	934,19
H_s / T_p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Tabela 6.6 – Tração Efetiva na extremidade do Cabo (Topo) – Corrente Través e Onda Proa.

Tração Efetiva_Cabo [kN] - End A_Corrente E (IW)							
1 m	777,25	779,13	786,30	787,13	788,08	792,67	790,68
2 m	807,81	802,60	815,35	812,85	821,74	827,58	824,33
3 m	834,22	822,67	833,84	857,49	866,44	788,08	848,15
4 m	855,31	856,54	878,71	880,24	901,69	901,74	900,10
5 m	879,18	880,72	903,06	917,08	968,08	909,22	935,85
H_s / T_p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Os gráficos apresentados na Figura 6.5 descrevem a relação entre a altura significativa das ondas com tração efetiva no topo do cabo de aço.

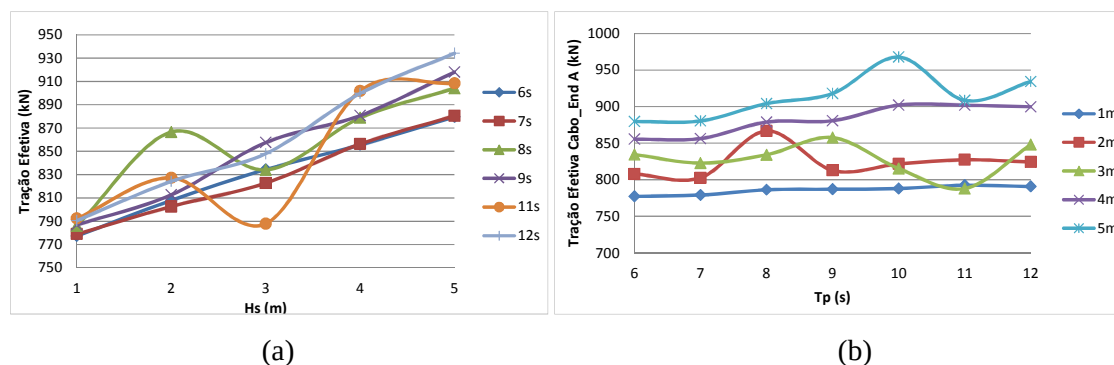


Figura 6.5 – Tração Efetiva vs Altura significativa (a) e Tração Efetiva vs Período de Pico (b) para sistema com movimento livre – Corrente de Proa.

6.2.3 Resultados no Restritor de Curvatura – Movimento livre

Os resultados expostos na Tabela 6.7 e Tabela 6.8 a seguir são referentes ao raio mínimo de curvatura no duto flexível. O critério limitante para esta análise é um MBR de no máximo 3,68 m ($MBR_{admissível} = MBR \text{ de estocagem} * 1,5$).

Tabela 6.7 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível – Corrente / Onda Proa.

Raio Mínimo de Curvatura_Linha [m]_Corrente S (IW)							
1 m	3,99	3,95	3,94	3,93	3,94	3,96	3,96
2 m	3,89	3,81	3,68	3,84	3,85	3,85	3,87
3 m	3,85	3,68	3,71	3,68	3,81	3,70	3,77
4 m	3,78	3,63	3,68	3,54	3,60	3,58	3,56
5 m	3,71	3,54	3,55	3,45	3,41	3,48	3,45
H_s / T_p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Tabela 6.8 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível – Corrente Través e Onda Proa.

Raio Mínimo de Curvatura_Linha [m]_Corrente E (IW)							
1 m	4,01	3,98	3,98	3,96	3,97	3,99	3,99
2 m	3,93	3,86	3,87	3,89	3,90	3,92	3,93
3 m	3,89	3,74	3,78	3,75	3,75	3,78	3,85
4 m	3,84	3,71	3,75	3,61	3,68	3,66	3,64
5 m	3,78	3,62	3,60	3,52	3,48	3,55	3,53
H_s / T_p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Os gráficos apresentados na Figura 6.6 descrevem a relação entre a altura significativa das ondas com raio de curvatura no restritor de curvatura.

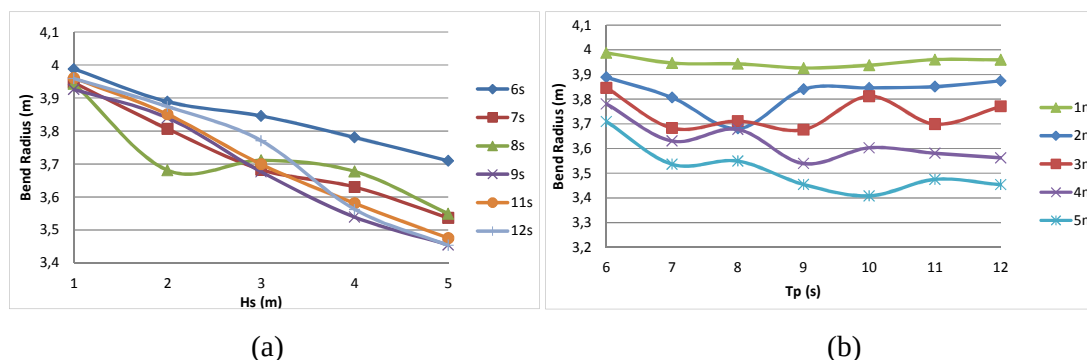


Figura 6.6 – Raio de Curvatura vs Altura significativa (a) e Raio de Curvatura vs Período de Pico (b) para sistema com movimento livre – Corrente de Proa.

6.3 CARGAS NA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE PRIMEIRA EXTREMIDADE – MOVIMENTO RESTRITO

Os resultados expostos a seguir são referentes às análises dinâmicas de lançamento vertical direto de primeira com movimento restrito a 2500 m de lâmina d'água para um duto de 9", utilizando o diagrama operacional exposto na Tabela 5.1, seção 5.6. A Figura 6.7 ilustra a configuração dos pontos avaliados neste item.

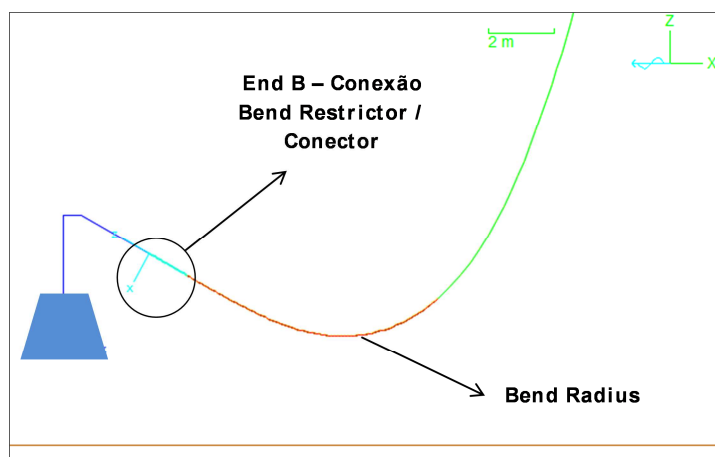


Figura 6.7 – Conexão restritor de curvatura e conector – Conjunto em movimento restrito.

6.3.1 Resultados na Extremidade do Duto Flexível – Movimento restrito

Os valores encontrados de momento fletor na extremidade duto flexível, ou seja, na conexão entre conector e restritor de curvatura estão expostos na Tabela 6.9 e Tabela 6.10.

Tabela 6.9 – Momento Fletor na extremidade do Duto Flexível (End B) – Corrente / Onda Proa
– Movimento restrito.

FIXED_My_Conector_Linha [kN.m] - End B_Corrente N							
1 m	69,46	76,00	79,51	82,63	81,86	83,95	83,08
2 m	93,27	103,89	103,89	104,29	104,86	109,23	108,07
3 m	91,63	120,17	118,62	115,69	115,69	126,59	118,12
4 m	109,28	147,94	128,91	127,49	142,86	148,13	158,30
5 m	124,20	163,95	154,27	149,34	156,48	180,37	185,78
H _s / T _p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Tabela 6.10 – Momento Fletor na extremidade do Duto Flexível (End B) – Corrente Través e
Onda Proa – Movimento restrito.

FIXED_My_Conector_Linha [kN.m] - End B_Corrente E (IW)							
1 m	72,45	79,34	83,4	85,92	85,02	87,45	86,06
2 m	99,4	111,45	111,45	110,19	110,57	115,45	113,48
3 m	101,36	129,03	125,84	123,31	123,31	134,84	127,64
4 m	115,53	158,23	138,83	134,63	152,14	157,6	169,92
5 m	131,47	175,05	165,69	160,63	166,85	196,81	201,66
H _s / T _p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Observa-se uma grande faixa em que os valores ultrapassam o critério de aceitação do estudo. Contudo, para este caso em questão, por ser uma faixa curta de tempo entre a fixação no *hub* e o lançamento da linha flexível no leito marinho, os resultados não serão utilizados como limitante do diagrama operacional final. Vale ressaltar que os resultados expostos na Tabela 6.9 e na Tabela 6.10 englobam casos de contingência, simulando uma falha no lançamento da linha flexível.

Os valores obtidos da tração efetiva no topo do duto flexível, ou seja, na saída do navio de lançamento estão descritos na Tabela 6.11 e Tabela 6.12. Explicado anteriormente, não foi definido um critério limitante para a tração no topo.

Tabela 6.11 – Tração Efetiva na extremidade do Duto (Topo) – Corrente / Onda Proa –
Movimento restrito.

FIXED_Tração Efetiva_Linha [kN] - End A_Corrente N (IW)							
1 m	3484,80	3522,27	3532,73	3515,61	3517,53	3511,00	3503,37
2 m	3617,25	3685,85	3685,85	3618,60	3608,66	3606,37	3596,25
3 m	3668,52	3857,21	3751,37	3742,30	3742,30	3734,10	3723,73
4 m	3761,05	4101,41	3889,50	3823,93	3865,65	3850,67	3860,25
5 m	3907,91	4191,78	4044,30	3957,73	3937,41	3994,57	3969,64
H _s / T _p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Tabela 6.12 – Tração Efetiva na extremidade do Duto (Topo) – Corrente Través e Onda Proa – Movimento restrito.

FIXED_ Tração Efetiva_Linha [kN] - End A_Corrente E							
1 m	3485,83	3523,55	3534,22	3517,50	3519,11	3513,29	3504,78
2 m	3618,04	3618,04	3687,82	3621,06	3610,78	3610,55	3598,76
3 m	3668,00	3668,00	3857,21	3754,71	3743,62	3736,28	3727,02
4 m	3759,33	4100,68	3894,74	3835,74	3868,18	3853,92	3863,42
5 m	3902,56	4193,97	4049,24	3960,32	3941,18	3996,81	3973,08
H_s / T_p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

6.3.2 Resultados no Restritor de Curvatura – Movimento restrito

Os resultados expostos na Figura 6.8 e Figura 6.9 a seguir são referentes ao raio mínimo de curvatura no duto flexível. O critério limitante para esta análise é um MBR de no máximo 3,63 m ($MBR_{admissível} = MBR \text{ de estocagem} * 1,5$).

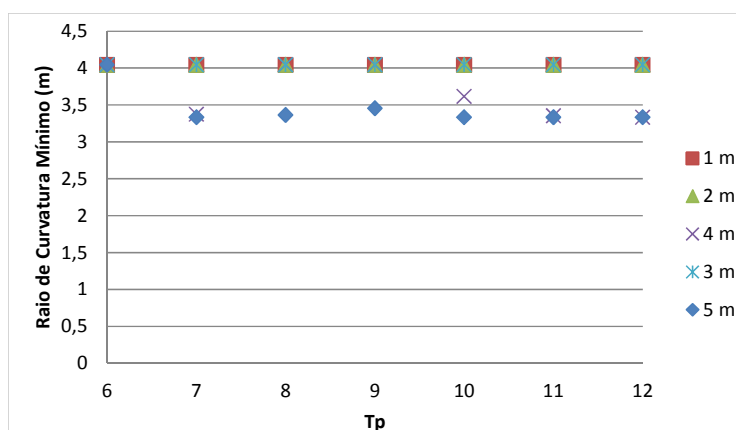


Figura 6.8 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível - Corrente / Onda De Proa – Movimento restrito.

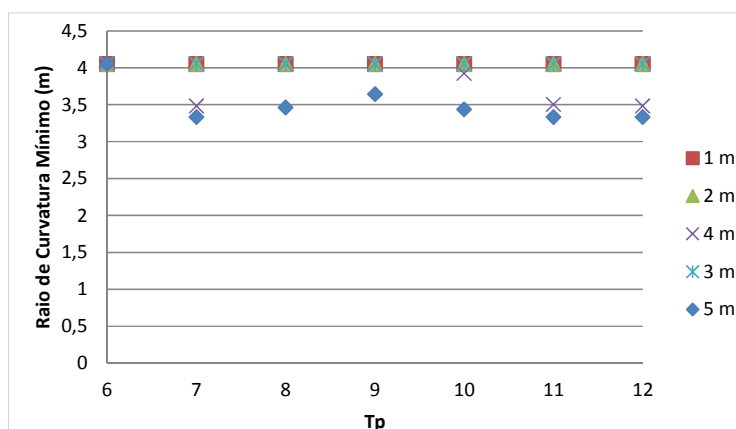


Figura 6.9 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível - Corrente De Través e Onda De Proa – Movimento restrito.

Como pode ser observados nos resultados expostos nas tabelas acima, a janela operacional deve ser limitada para ondas de H_s máximas de 3 m, podendo trabalhar em qualquer frequência de onda.

6.4 CARGAS NA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE PRIMEIRA EXTREMIDADE – PROCEDIMENTO DE DESCIDA

Diferentes níveis de lâmina d'água em análises de instalação podem ser praticados no momento de descida de módulo de conexão vertical, como também em instalações mais rasas em casos de *jumpers* dinâmicos a serem conectados em boias flutuantes. Exemplos dessas configurações são o BSR (*Buoyancy-Supported Risers*) e o FSHR (*Free Standing Hybrid Riser*). Os MCVs são conectados em lâminas d'água rasas, criando a configuração de flexíveis dinâmicos. Ambas as configurações se caracterizam por absorver as forças propagantes das condições ambientais pelas quais a Unidade Marítima está exposta. A Figura 6.10 demonstra a configuração de FSHR e a Figura 6.11 ilustra o BSR.

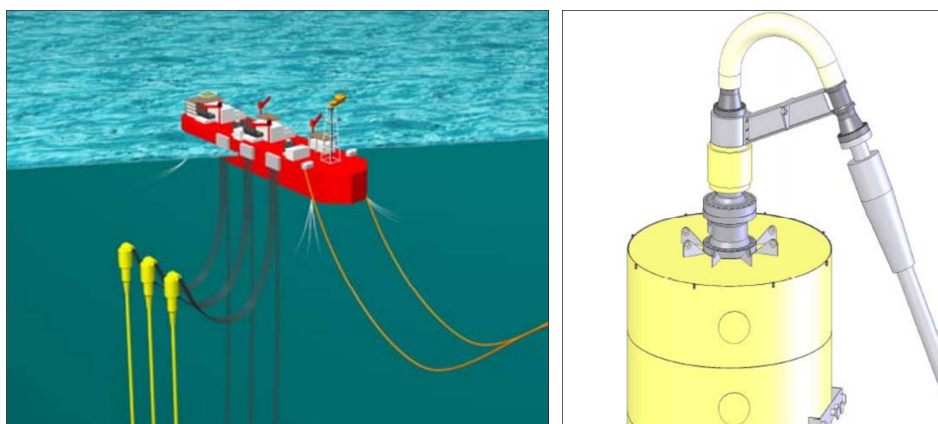


Figura 6.10 – Arranjo FSRH – Campo de Girassol e ilustração da conexão do MCV [5]

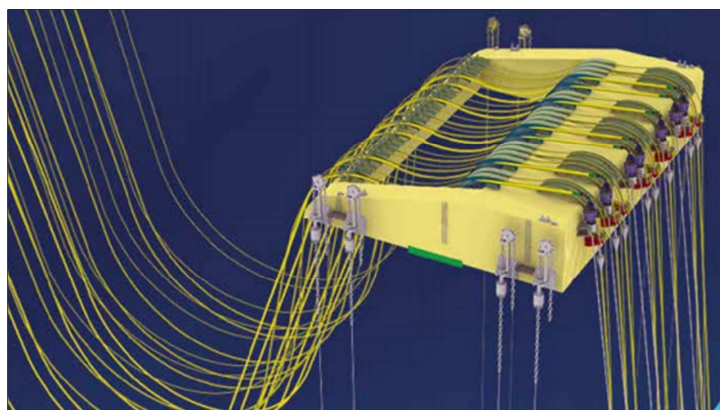


Figura 6.11 – Arranjo BSR (Subsea 7).

Os resultados a seguir são compostos por diferentes lâminas d'água de forma a avaliar o comportamento do duto flexível para uma conexão vertical direta de primeira extremidade com movimento livre para oscilar.

6.4.1 Procedimento de descida – Parâmetros da Análise

De forma a simular uma configuração de instalação durante a descida, foi utilizado um mar aleatório com o H_s de 3 m e T_p de 8 s. Para a avaliação da compatibilidade entre as análises, fez-se o uso do mar determinístico, com $H_{\max}$ de $1,86H_s$ e $T_{\max}$ associado. A Tabela 6.13 apresenta os parâmetros utilizados na análise.

Tabela 6.13 – Parâmetros utilizados para as análises durante o procedimento de *offloading*.

H_s	$H_{\max}$	T_p	$T_{\max}$ Associado	Lâmina D'água	Corrente	Onda	Estado de Mar
3 m ⁽¹⁾	5,58 m ⁽²⁾	8 s	9,5 s ⁽²⁾	100 m	Proa / Través	Proa	Mar Irregular (IW) / Mar Regular (RW)
				500 m			
				1000 m			
				1500 m			
				2000 m			
				2500 m			

(1) H_s referente ao mar aleatório

(2) $H_{\max}$ e $T_{\max}$ referente ao mar determinístico

6.4.2 Resultados na Extremidade do Duto Flexível (End B) – Procedimento de Descida em Movimento Livre

Os valores encontrados de momento fletor na extremidade duto flexível, ou seja, na conexão entre conector e restritor de curvatura estão expostos na Figura 6.12.

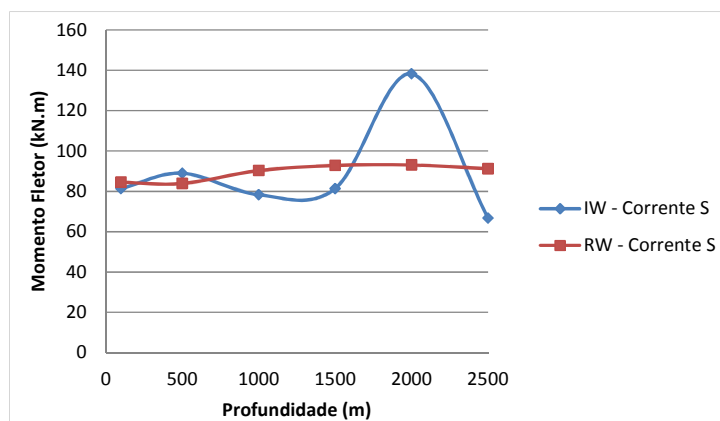


Figura 6.12 – Momento Fletor na extremidade do Duto Flexível (End B) – Procedimento de *Offloading*.

Os valores obtidos da tração efetiva no topo do duto flexível, ou seja, na saída do navio de lançamento estão descritos na Tabela 6.14 e na Figura 6.13. Explicado anteriormente, não foi definido um critério limitante para a tração no topo.

Tabela 6.14 – Tração Efetiva na extremidade do Duto Flexível (Topo – End A) – Procedimento de *Offloading*.

Tração Efetiva na Linha – End A [kN]_ Corrente S_LDA			Tração Efetiva na Linha – End A [kN]_ Corrente E_LDA		
100 m	160,48	202,66	100 m	158,79	204,48
500 m	730,31	937,52	500 m	728,36	942,48
1000 m	1451,48	1677,21	1000 m	1452,03	1680,97
1500 m	2185,03	2358,61	1500 m	2185,51	2361,38
2000 m	2939,00	3156,20	2000 m	2940,12	3160,18
2500 m	3807,19	3968,04	2500 m	3851,30	3971,36
LDA	IW	RW	LDA	IW	RW

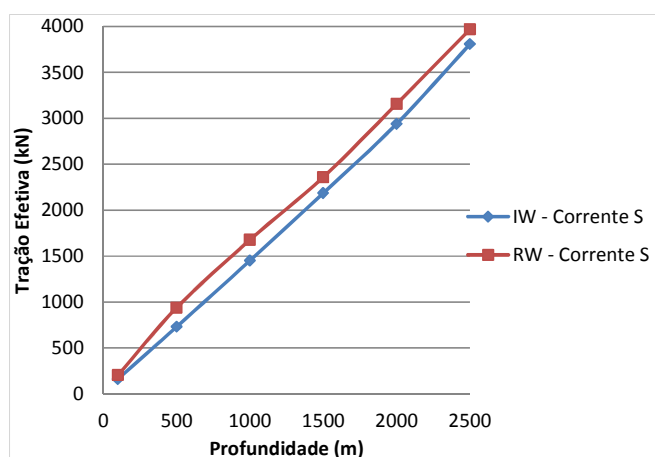


Figura 6.13 – Tração Efetiva na extremidade do Duto Flexível (Topo – End A) – Procedimento de *Offloading*.

6.4.3 Resultados no Cabo – Procedimento de Descida em Movimento Livre

Os valores obtidos da tração efetiva no topo do cabo de aço, ou seja, na saída do guinaste estão descritos na Tabela 6.15 e na Figura 6.14.

Tabela 6.15 – Tração Efetiva na extremidade do Cabo (Topo – End A) – Procedimento de *Offloading*.

Tração Efetiva no Cabo [kN] - End A_Corrente S_LDA			Tração Efetiva no Cabo [kN] - End A_Corrente E_LDA		
100 m	189,94	346,04	100 m	190,37	345,61
500 m	295,20	436,92	500 m	295,83	435,01
1000 m	426,76	542,88	1000 m	427,29	541,41
1500 m	558,66	663,14	1500 m	558,83	661,68
2000 m	692,72	786,54	2000 m	692,96	786,03
2500 m	823,37	910,95	2500 m	835,56	910,29
LDA	IW	RW	LDA	IW	RW

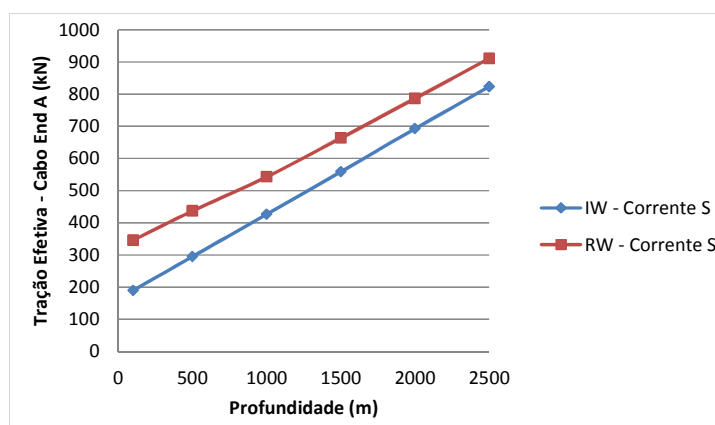


Figura 6.14 – Tração Efetiva na extremidade do Cabo (Topo – End A) - Corrente De Través e Onda De Proa (IW e RW) – Procedimento de *Offloading*.

6.4.4 Resultados no Restritor de Curvatura – Procedimento de Descida em Movimento Livre

Os resultados expostos na Tabela 6.16 são referentes ao raio mínimo de curvatura no duto flexível. O critério limitante para esta análise é um MBR de no máximo 3,68 m ($MBR_{\text{admissível}} = MBR \text{ de estocagem} * 1,5$).

Tabela 6.16 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível – Procedimento de *Offloading*.

Raio Mínimo de Curvatura da Linha [m]_Corrente S_LDA			Raio Mínimo de Curvatura da Linha [m]_Corrente E_LDA		
100m	4,31	4,21	100m	4,69	4,59
500m	3,92	3,93	500m	4,18	4,16
1000m	3,92	3,92	1000m	4,01	4,03
1500m	3,86	3,76	1500m	3,96	3,82
2000m	3,78	3,79	2000m	3,9	3,85
2500m	3,84	3,81	2500m	3,79	3,81
LDA	IW	RW	LDA	IW	RW

Os gráficos apresentados na Figura 6.15 e Figura 6.16 descrevem a relação entre a tração efetiva e o comprimento do *riser* para as lâminas d'água analisadas.

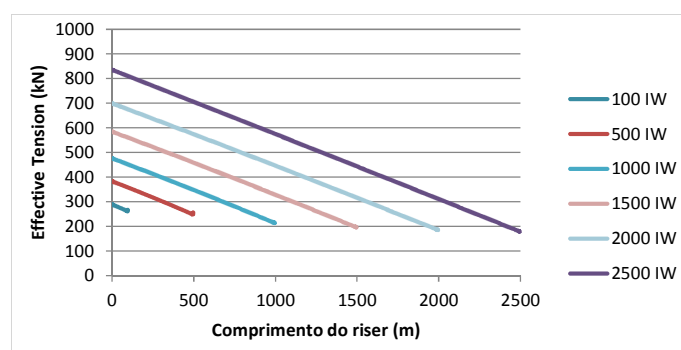


Figura 6.15 – Tração efetiva vs Comprimento do duto flexível em um sistema com movimento livre – Corrente de Través – Mar irregular.

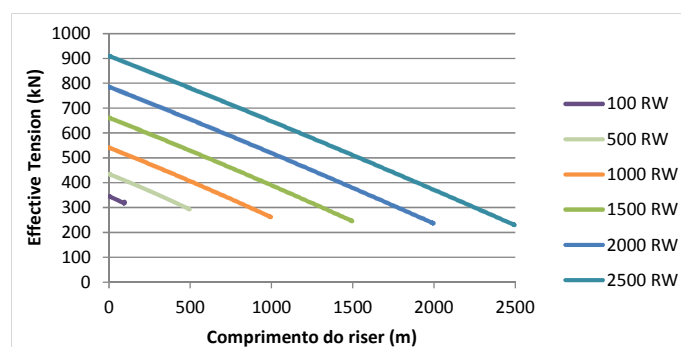


Figura 6.16 – Tração efetiva vs Comprimento do duto flexível em um sistema com movimento livre – Corrente de Través – Mar regular.

6.5 CARGAS NO MOMENTO DA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE SEGUNDA EXTREMIDADE – TOPO

Este modelo tem como objetivo determinar a maior carga de tração no *pescoço de ganso* e o comportamento do raio mínimo de curvatura para uma lâmina d'água de 2500 m. O ângulo de lançamento no topo da catenária para a conexão vertical direta de segunda extremidade foi de 1°, tornando o problema mais conservador. Para este caso foi escolhida a simulação com o H_s de 1 m a 5 m e T_p de 6 s a 12 s em mar aleatório. A Tabela 6.17 apresenta os parâmetros utilizados na análise.

Tabela 6.17 – Parâmetros utilizados para as análises de conexão de Segunda Extremidade.

H_s	T_p	Corrente	Onda	Estado de Mar
1 m a 5 m	6 s a 12 s	De Proa/ De Través	De Proa	Mar Irregular (IW)

6.5.1 Resultados no Duto Flexível - Segunda extremidade (topo)

Os valores encontrados de momento fletor máximo ao longo duto flexível estão expostos na Tabela 6.18 e na Tabela 6.19.

Tabela 6.18 – Momento Fletor ao longo do Duto Flexível – Corrente / Onda Proa (IW) – Segunda Extremidade.

2nd_ Momento Fletor_Linha [kN.m]_Corrente N							
1 m	58,81	59,70	60,60	60,58	62,26	61,06	61,36
2 m	63,68	65,76	68,34	68,19	75,73	71,67	73,26
3 m	69,02	72,52	77,68	77,18	95,70	87,06	91,91
4 m	74,75	79,95	88,91	89,22	117,11	105,21	112,60
5 m	80,89	88,14	100,29	102,33	127,99	123,80	128,06
H_s / T_p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Tabela 6.19 – Momento Fletor ao longo do Duto Flexível – Corrente Través e Onda Proa (IW) – Segunda Extremidade.

2nd_ Momento Fletor_Linha [kN.m]_Corrente E							
1 m	62,85	63,84	64,66	64,60	66,57	65,29	65,62
2 m	68,17	70,45	73,08	72,93	81,13	76,74	78,55
3 m	73,99	77,88	83,20	82,82	100,60	93,43	97,40
4 m	80,98	86,04	94,99	94,97	111,55	110,95	109,60
5 m	87,72	94,87	105,78	107,87	124,03	126,35	123,92
H_s / T_p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Os gráficos apresentados na Figura 6.17 descrevem a relação entre a altura significativa das ondas / período de pico com o momento fletor máximo ao longo do duto flexível.

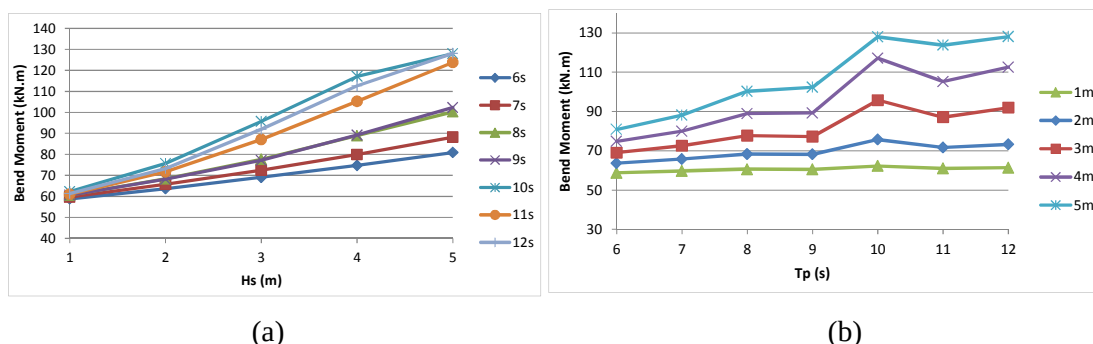


Figura 6.17 – Momento fletor máximo vs Altura significativa (a) e Momento fletor máximo vs Período de Pico (b) para sistema de segunda extremidade – Corrente de Proa.

Os valores encontrados de raio mínimo de curvatura ao longo duto flexível estão expostos na Tabela 6.20 e na Tabela 6.21 a seguir.

Tabela 6.20 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível – Corrente / Onda Proa (IW) – Segunda Extremidade.

2nd_Raio Mínimo de Curvatura_Linha [m]_Corrente N							
1 m	81,07	79,86	78,68	78,70	76,58	78,08	77,70
2 m	74,87	72,51	69,77	69,92	62,96	66,53	65,08
3 m	69,08	65,75	61,38	61,77	48,74	54,77	51,87
4 m	63,79	59,63	53,62	53,44	33,48	41,36	36,96
5 m	58,94	54,09	44,90	43,34	19,09	25,62	19,24
H_s / T_p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Tabela 6.21 – Resultado do Raio Mínimo de Curvatura do Duto Flexível – Corrente Través e Onda Proa (IW) – Segunda Extremidade.

2nd_Raio Mínimo de Curvatura_Linha [m]_Corrente E							
1 m	75,86	74,69	73,73	73,80	71,62	73,02	72,66
2 m	69,94	67,67	65,24	65,38	58,77	62,13	60,70
3 m	64,44	61,22	57,30	57,57	44,67	51,03	47,30
4 m	58,88	55,41	49,50	49,50	37,51	37,86	38,64
5 m	54,35	49,62	40,97	39,66	25,29	21,90	25,39
H_s / T_p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Os gráficos apresentados na Figura 6.18 descrevem a relação entre a altura significativa das ondas / período de pico com o raio mínimo de curvatura ao longo do duto flexível.

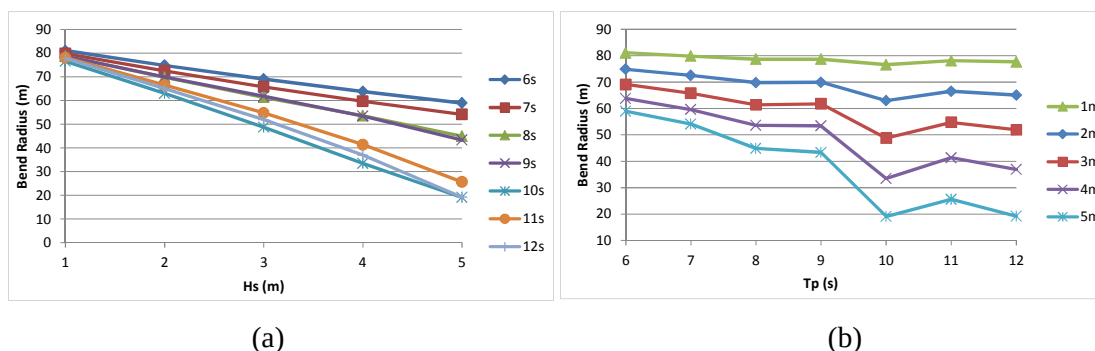


Figura 6.18 – Raio mínimo de curvatura vs Altura significativa (a) e Raio mínimo de curvatura vs Período de Pico (b) para sistema de segunda extremidade – Corrente Proa.

6.5.2 Resultados no Pescoço de gancho - Segunda extremidade (topo)

Os valores encontrados de tração efetiva no pescoço de gancho estão expostos na Tabela 6.22 e na Tabela 6.23 a seguir.

Tabela 6.22 – Tração Efetiva na extremidade do Duto Flexível (Topo – Pescoço de gancho) – Corrente / Onda Proa (IW) – Segunda Extremidade.

2nd_ Tração Efetiva _Linha [kN] - End A_ Corrente N							
1 m	3651,62	3678,00	3680,82	3679,34	3715,86	3676,99	3702,07
2 m	3756,29	3801,62	3824,84	3817,07	3893,47	3813,96	3859,88
3 m	3851,93	3913,94	3968,46	3954,92	4061,70	3965,76	4032,17
4 m	3935,57	4015,80	4058,02	4069,21	4217,18	4099,85	4179,39
5 m	4017,86	4109,92	4169,67	4184,33	4344,28	4214,91	4377,44
H _s / T _p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Tabela 6.23 – Tração Efetiva na extremidade do Duto Flexível (Topo – Pescoço de gancho) – Corrente Través e Onda Proa (IW) – Segunda Extremidade.

2nd_ Tração Efetiva _Linha [kN] - End A_ Corrente E							
1 m	3644,96	3671,14	3672,94	3671,41	3706,37	3667,81	3692,58
2 m	3750,96	3796,24	3817,41	3808,88	3881,79	3805,66	3858,70
3 m	3845,51	3908,91	3957,20	3946,79	4048,19	3951,39	4018,87
4 m	3934,90	4013,62	4050,61	4057,11	4098,61	4082,02	4122,17
5 m	4017,34	3934,90	4165,64	4176,14	4208,20	4188,20	4237,35
H _s / T _p	6 s	7 s	8 s	9 s	10 s	11 s	12 s

Os gráficos apresentados na Figura 6.19 descrevem a relação entre a altura significativa das ondas / período de pico com tração efetiva no pescoço de gancho.

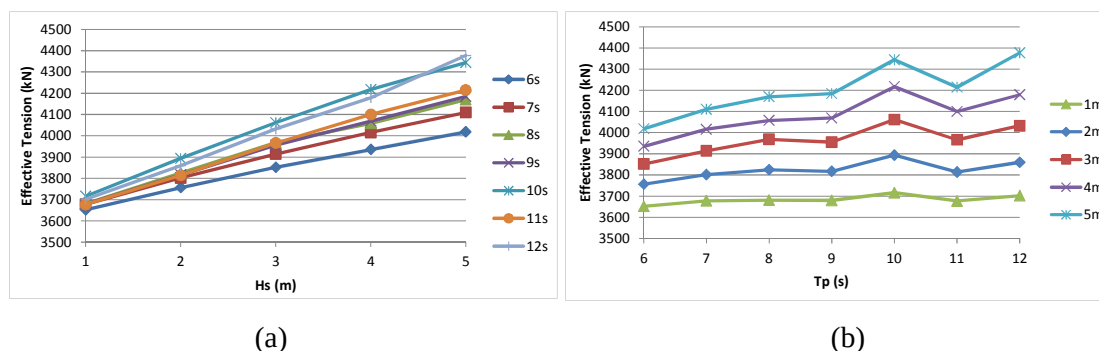


Figura 6.19 – Tração efetiva vs Altura significativa (a) e Tração efetiva vs Período de Pico (b) para sistema de segunda extremidade – Corrente Proa.

6.5.3 Comparativo entre cargas de instalação (ELT e DLT)

Conforme apresentado na seção 5.4, as cargas de lançamento calculadas no topo podem ser definidas através da equação de carga estimada de lançamento (ELT), observada abaixo:

$$ELT = p \times (LDA+10) \times 1,06 \times 1,3 + A \quad [7]$$

Considerando o peso dos acessórios A como 15 toneladas, p como o valor do peso molhada cheio de água do duto flexível por unidade de comprimento, teremos um valor de aproximadamente 4857 kN.

O valor utilizado para as análises posteriores será o maior valor encontrado comparando a “Máxima Carga de Lançamento” das análises dinâmicas e a “Carga Estimada de Lançamento (ELT)”. O maior valor obtido é considerado a Carga de Lançamento (DLT), conforme Tabela 6.24. As análises que utilizariam como referência as análises dinâmicas fariam uso da carga DLT para as próximas etapas de simulação, não estudadas nesta dissertação.

Tabela 6.24 – Cargas de Lançamento

Carga máxima no navio de lançamento (análises dinâmicas) [kN]	ELT [kN]	DLT [kN]
4191	4857	4857

Pode-se observar na Tabela 6.24 que o valor encontrado nas análises dinâmicas é referente a uma onda H_s de 5 m com período de pico pequeno, sendo esta caracterizada por uma probabilidade pequena de ocorrência. Contudo, o valor de ELT se mostrou conservador em relação a este primeiro. Desta forma, o emprego da carga ELT,

embora seja uma boa alternativa para as empresas de projeto atuantes na área *offshore*, pode vir a gerar resultados mais conservativos.

6.6 CARGAS NO MOMENTO DA CONEXÃO VERTICAL DIRETA DE SEGUNDA EXTREMIDADE – FUNDO

Este caso tem como objetivo determinar o posicionamento adequado no lançamento do módulo de conexão vertical para a instalação por conexão de segunda extremidade. A configuração leva em consideração a distância entre lingadas, capazes de elevar o duto flexível e criando uma corcova. O momento de conexão do módulo de conexão vertical e a ANM devem manter um ângulo de 60°, usualmente utilizado em lançamentos dessa natureza, e uma velocidade não superior a 1,5 m/s. O mar determinístico foi usado nessas simulações. As posições de simulação estão representadas na Tabela 6.25. Todas as análises consideraram a mesma distância do módulo de conexão ao receptáculo.

Tabela 6.25 – Arranjo das lingadas.

Lingada 1	Lingada 2
7 m	12 m
12 m	17 m
17 m	22 m
22 m	27 m

Os casos acima citados foram simulados para ondas máximas de 1,86 m, 3,72 m, 5,58 m e 7,44 m para um mar regular considerando um período de 8 s, representado por uma onda de Airy.

6.6.1 Posicionamento das lingadas de instalação

As respostas obtidas na configuração estática estão representadas nas figuras seguintes.

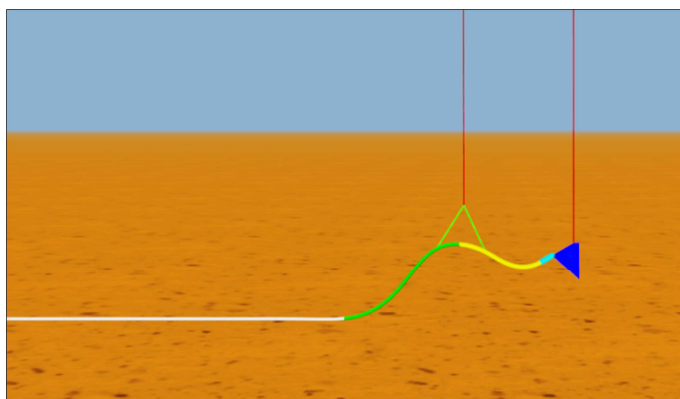


Figura 6.20 – Lingada com posicionamento 7 m e 12 m do módulo de conexão.

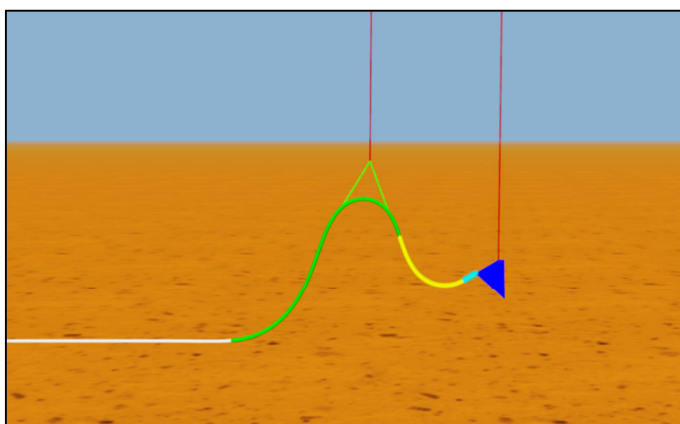


Figura 6.21 – Lingada com posicionamento 12 m e 17 m do módulo de conexão.

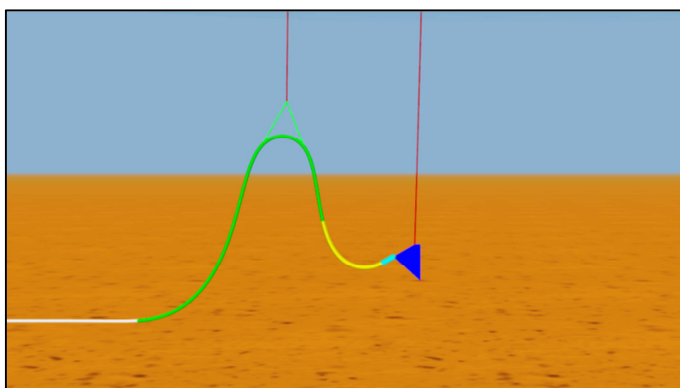


Figura 6.22 – Lingada com posicionamento 17 m e 22 m do módulo de conexão.

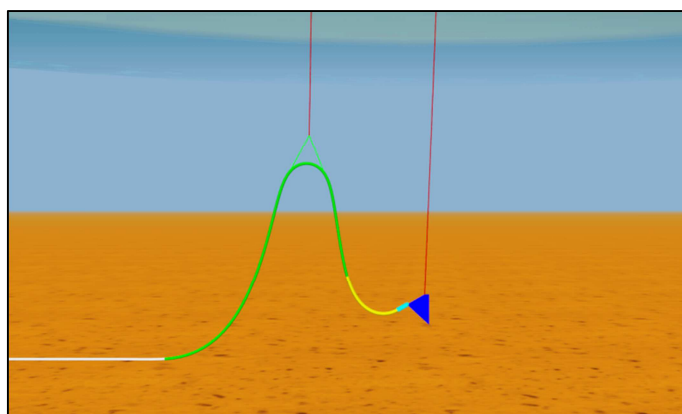


Figura 6.23 – Lingada com posicionamento 22 m e 27 m do módulo de conexão.

As configurações de lingadas com distâncias grandes do conector induzem a uma corcova alta, gerando um momento fletor elevado e o raio de curvatura atinge o limite mínimo permitido pelo projeto, supondo um MBR de 3,68 m – valor utilizado em todas as análises dessa dissertação. De acordo com a Figura 6.24, o posicionamento que mais se aproxima é o de 7 m e 12 m, para uma altura máxima de onda menor que 2 m. Modelos com distância 17 m / 22 m e 22 m / 27 m para um mar de altura de onda 7,44 m não convergiram, portando os resultados não englobam esses dois casos.

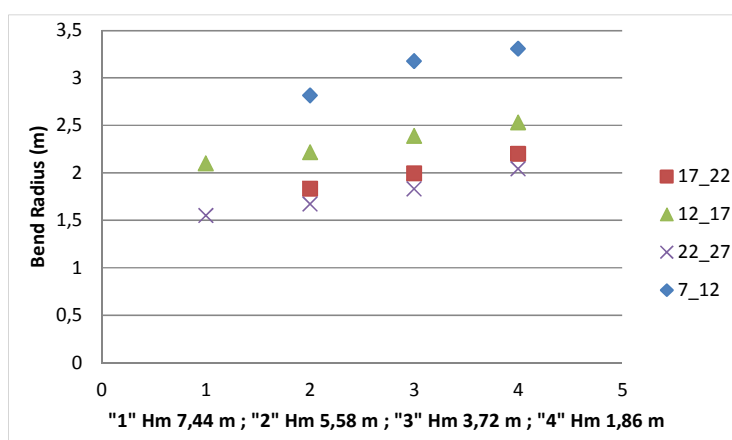


Figura 6.24 – Resultados do Raio de Curvatura – Lingadas (análises dinâmicas).

As lingadas mais próximas ao conector induziram uma carga menor ao sistema após as análises dinâmicas. Para alturas máximas de onda 7,44 m e 5,58 m, as cargas de momento foram mais expressivas, vide Figura 6.25.

A velocidade máxima do módulo de conexão encontrada foi de aproximadamente 1 m/s na altura de onda máxima de 7,44 m. A velocidade não representa um problema para o procedimento de conexão em questão.

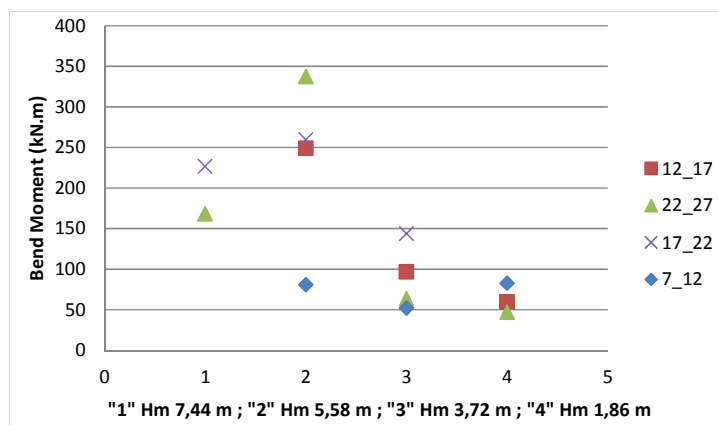


Figura 6.25 – Resultados do Momento Fletor – Lingadas.

Com o propósito de verificar se a mudança de um parâmetro seria capaz de se adequar aos fatores limitantes do restritor de curvatura, visto que o valor que mais se aproxima é de 3,3 m, modificou-se a distância entre as lingadas. A nova configuração de lingada utiliza distância de 8 m e 11 m do conector.

As respostas referentes à análise das lingadas a 8 m e 11 m afastadas do conector estão expostas na Figura 6.26. Através dessa composição, o MBR mínimo de 3,36 m pode ser respeitado.

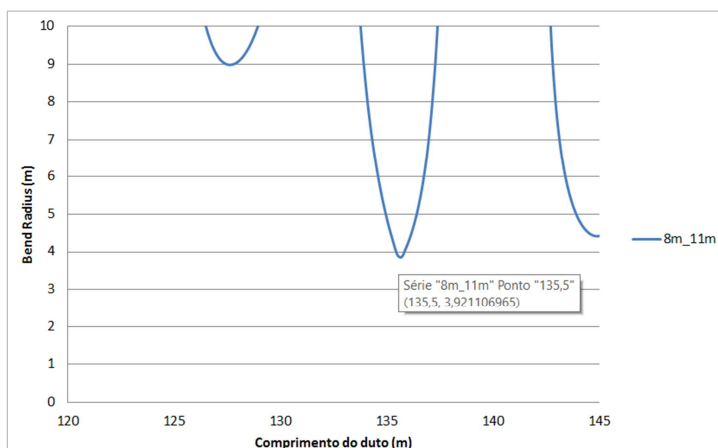


Figura 6.26 – Resultados do Raio de Curvatura da lingada 8 m e 11 m do conector (análise dinâmica).

Para os casos apresentados, utilizando as configurações do duto flexível de 9", apenas a lingada com posicionamento 8 m e 11 m estaria apta a realizar esta conexão. Os testes de caracterização realizados pelos fabricantes de linhas flexíveis ainda são muito questionáveis, uma vez que os mesmos impõem um grau de conservadorismo grande, inviabilizando algumas condições ambientais que não são consideradas extremas.

6.7 ANÁLISE LIMITE DA TRAÇÃO DE TOPO

As respostas mais críticas de tração efetiva no topo do duto flexível observadas na configuração conexão vertical direta de primeira extremidade movimento livre foram no período de pico de 7 s a 9 s e altura significativa de 5 m. Para o movimento restrito, a configuração mais crítica foi com período de pico de 7 s e altura significativa de 5 m. A configuração de segunda extremidade no topo obteve como extremos todos os períodos de 5 m. No caso de H_s igual a 3 m, o período de mais relevância foi o de 10 s.

As respostas mais críticas de tração efetiva no cabo de aço observadas na configuração conexão vertical direta de primeira extremidade movimento livre foram no período de pico de 9 s a 11 s

As respostas mais críticas de momento no conector do duto flexível observadas na configuração conexão vertical direta de primeira extremidade movimento livre foram no período de pico de 8 s a 9 s. O modelo para 11 s e 5 m obteve um valor discrepante dos demais. A configuração de segunda extremidade obteve como extremos altos em 10 s e 12 s.

O período natural de *heave* da embarcação é próximo de 10 s (Figura 9.2), o que pode explicar essa maior solicitação neste período de pico.

6.8 ANÁLISE LIMITE DA COMPRESSÃO NO FUNDO

As respostas mais críticas de MBR do restritor de curvatura observadas na configuração conexão vertical direta de primeira extremidade movimento livre foram no período de pico de 7 s a 9 s. Em 3 m de H_s , esses períodos também estavam mais significativos. Para o movimento restrito, a configuração mais crítica foi com período de pico de 7 s e 10 s e altura significativa de 4 m e 5 m. Apresentou curvaturas menores em 3 m com T_p 4 s e 8 s, próximo ao limite estipulado. A configuração de segunda extremidade no topo obteve como extremos o período de 10 s com onda significativa de 5 m.

A curvatura da linha flexível sofre influência de todos os DOFs da embarcação. Uma forma de minimizar maiores esforços seria utilizar o guindaste em uma área de menor propensão aos deslocamentos verticais e manter uma distância entre cabo de aço e duto flexível ótima.

Os momentos observados no conector foram acima do critério de aceitação em quase todas as ondas no momento em que o MCV já está conectado. A janela operacional exposta no item seguinte não levou em consideração esta etapa por se tratar de uma operação rápida realizada pela equipe a bordo.

Comparando as respostas de mar aleatório e determinístico, os resultados referentes às trações e curvatura foram em sua maioria piores no caso determinístico. Contudo, para o caso do momento fletor no conector, o mar irregular se mostrou o pior cenário.

6.9 CONDIÇÕES CRÍTICAS DE INSTALAÇÃO

As condições críticas para a instalação podem ser consideradas para alturas de ondas significativas maiores que 3 m. A Tabela 6.26 mostra um panorama de uma janela operacional para este estudo com os resultados anteriormente expostos combinados.

Os valores referentes ao processo de fixação do módulo de conexão vertical no hub foram desprezados, uma vez que o tempo simulado representa um caso de contingência durante a operação.

Tabela 6.26 – Janela Operacional – Período de Pico e Altura Significativa de Onda.

Janela Operacional						
1 m						
2 m						
3 m						
4 m						
5 m						
H_s / T_p	6 s	7 s	8 s	9 s	11 s	12 s

Os valores expostos nos itens anteriores mostram que para H_s de 3 m, apenas períodos de pico até 8 s atendem aos critérios de aceitação. De forma conservadora, podem-se adotar alturas significativas de mares de até 2,5 m, uma vez que os valores que delimitaram o uso da faixa de 3 m de altura de onda estão próximo ao limite aceitável.

6.10 TRATAMENTO DE DADOS POR WEIBULL

O tempo de análise dinâmica para o mar aleatório proposto nas análises foi de 3600 segundos, valor menor que o estipulado em projetos, que seria de 10800 segundos (3 horas de tempestade). Algumas simulações de instalação com 3 horas de duração foram realizadas de modo a permitir uma comparação entre as análises realizadas com um tempo menor. Essas comparações podem ser observadas na Tabela 6.27, Tabela 6.28, Tabela 6.29 e Tabela 6.30.

Tabela 6.27 – Momento no duto flexível (End B – conector).

My_Conector_Linha [kN.m] - End B_Corrente N		
LDA_100 m	65,08	81,36
LDA_1000 m	61,23	78,28
LDA_1500 m	63,30	81,35
LDA_2500 m	67,54	66,67
FIX SIM 12	118,62	115,69
Período de Simulação	3 horas	1 hora

Tabela 6.28 – Tração Efetiva no duto flexível (End A – topo).

Effective Tension_Linha [kN] (End A)_Corrente N		
LDA_100 m	159,12	160,48
LDA_1000 m	1450,93	1451,48
LDA_1500 m	2184,71	2185,03
LDA_2500 m	3838,26	3807,19
FIX SIM 12	3769,01	3742,30
Período de Simulação	3 horas	1hora

Tabela 6.29 – Tração Efetiva no cabo de aço (topo).

Effective Tension_Cabo [kN] - End A_Corrente N		
LDA_100 m	191,19	189,94
LDA_1000 m	429,12	426,76
LDA_1500 m	561,08	558,66
LDA_2500 m	838,52	823,37
FIX SIM 12	-	-
Período de Simulação	3 horas	1hora

Tabela 6.30 – Mínimo raio de curvatura no duto flexível (restritor de curvatura).

Bend Radius_Linha [m]_Corrente N		
LDA_100 m	4,30	4,31
LDA_1000 m	3,92	3,92
LDA_1500 m	3,85	3,86
LDA_2500 m	3,72	3,84
FIX SIM 12	4,04	4,04
Período de Simulação	3 horas	1hora

De forma a avaliar os extremos encontrados nos resultados dessa dissertação com os valores para 3 horas de simulação, um tratamento de dados por Weibull foi realizado em algumas análises dinâmicas em conexão vertical de primeira extremidade. O gráfico apresentado na Figura 6.27 fez uso do programa MARIN para obter os valores de pico e crista e parâmetros necessários para a manipulação de dados. A linha verde descreve Weibull, enquanto os pontos em azul são os valores das análises dinâmicas.

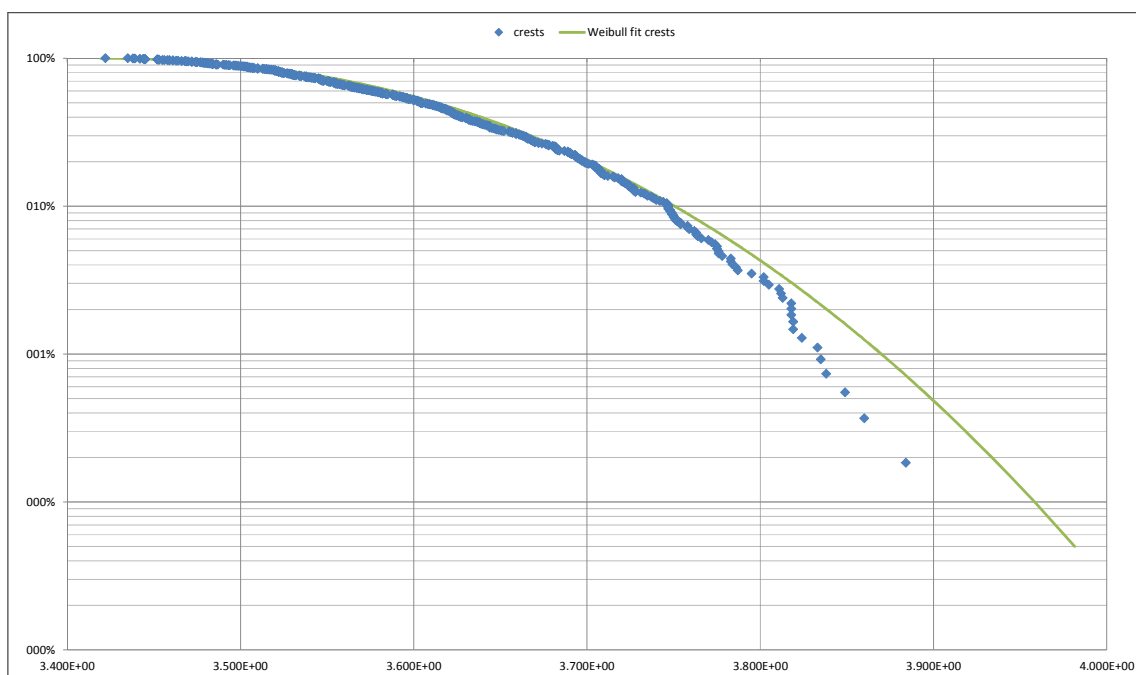


Figura 6.27 – Tratamento de dados por Weibull – Sistema conexão vertical direta de primeira extremidade.

O tempo de 1 hora de simulação para as análises propostas foi um tempo adequado, visto que esse tempo se tornou longo o suficiente para os valores máximos fossem plenamente contemplados, como observado nas respostas obtidas nas tabelas anteriores e na Figura 6.27. Portanto, as respostas obtidas nas análises podem ser consideradas satisfatórias.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A exploração de petróleo vem atingindo águas cada vez mais profundas, hoje em torno de 3000 m. Algumas regiões das bacias do sudeste brasileiro são guarnecidas de águas ultraprofundas passíveis de temperaturas baixas e elevada pressão hidrostática. A influência destes parâmetros está ligada diretamente às mudanças nas propriedades dos dutos flexíveis. Durante a instalação dessas linhas em águas ultraprofundas e fazendo uso de módulos de conexão vertical, o cenário acima descrito pode ser observado. Caso as mudanças nas propriedades do duto não sejam previstas, complicações podem ocorrer durante as etapas de instalação, como o travamento do restritor de curvatura e, conseqüentemente, um aumento exponencial do momento fletor. Em situações onde a conexão vertical de primeira extremidade encontra travamento em seu restritor, faz-se uso de boias para aliviar as forças ao tentar obter a configuração de conexão da linha. Uma análise prévia dos parâmetros dos dutos e seus suportes devem ser feitas antes de passar ao processo de instalação.

Diante deste cenário, o presente trabalho tratou diversos aspectos do comportamento de dutos flexíveis para instalação em águas profundas, através do método de instalação tipo *J-Lay*. Foram abordados os aspectos mais relevantes e inerentes ao lançamento neste cenário, assim como apresentadas as principais referências normativas aplicáveis. Através de estudos de casos, avaliaram-se os carregamentos ambientais críticos em torno do problema.

Estudos prévios e estudos paramétricos foram realizados de forma a conduzir um estudo de casos próximo aos critérios desejados. Avaliações analíticas em torno do problema foram também utilizadas. Observou-se que a inclusão do fenômeno da histerese altera consideravelmente os esforços que permeiam as análises dinâmicas em águas ultraprofundas. Essas alterações podem modificar projetos de instalação de linhas flexíveis. A consideração da curva de rigidez não linear com histerese representa melhor o comportamento real de uma linha flexível do que uma aproximação com a rigidez constante, simulando as interações de escorregamento e retorno das camadas.

Com a proposição de diferentes posições de lançamento de linhas flexíveis, verificou-se que lançamentos a bombordo e boreste da embarcação promovem um aumento significativo dos esforços nas sapatas, expressando a importância do movimento de *pitch* de uma embarcação neste tipo de lançamento. Valendo-se destes resultados, lançamentos alinhados à linha de centro da embarcação possibilitam um

cenário de instalação *offshore* mais seguro.

Nos estudos prévios foi possível observar que a instalação de equipamentos de grande ou médio porte em águas profundas, pelo método de lançamento vertical clássico, não é viável sem o uso do compensador de *heave*. Em determinadas situações é preciso inclusive utilizar grupos de boias para reduzir os esforços no equipamento e impedir que as frequências naturais coincidam.

Em análises de conexão vertical de primeira extremidade normalmente utiliza-se o ângulo de pescoço de ganso (*gooseneck*) de 60°, devido às experiências e estudos obtidos ao longo dos anos. Este ângulo, quando atendido, garante a verticalização do módulo de conexão vertical com a AMN ou outro receptor.

Durantes as análises de conexão de primeira e segunda extremidade (catenária livre), os critérios de aceitação foram observados, tais como o MBR do restritor de curvatura, o momento no conector (localizado na extremidade do restritor de curvatura), tração no cabo de aço, TDP e esforços na saída no duto flexível. O cabo de aço não é um item preocupante, já que seus esforços foram menores que metade do máximo permitido pelo fabricante. Os resultados pertinentes aos outros parâmetros obtiveram uma janela operacional com H_s máximo de 3 m, excuso os períodos de pico maiores que 9 s. Contudo, devido à dificuldade para os operadores de ROV em executar esses serviços em períodos pequenos, a janela operacional pode ser adequada para H_s máximo de 2,5 m, como já vem sendo utilizada nas instalações atuais, independente da embarcação que comandará a operação. O momento mais crítico durante a operação de primeira extremidade é no momento em que o MCV está conectado ao receptáculo. Este movimento, por ser restrito, causa uma diminuição na curvatura do duto, aumentando o momento no local. Entretanto, este passo não foi incluído na análise de casos por se tratar de um tempo pequeno em que a linha passará nesta configuração.

Em análises de conexão de segunda extremidade próxima ao solo marinho, algumas variáveis como localização das lingadas, velocidade do MCV, comprimento do cabo de aço de apoio e comportamento da rigidez à flexão do duto submarino devem ser observadas. A corcova é um dos fatores mais limitantes, visto que dependendo da posição dos estropos a corcova formada pode gerar um momento fletor muito alto devido à pequena curvatura da linha. Pode-se observar que a configuração com os estropos mais próximos ao conector aumenta a curvatura (considerando um restritor de curvatura de 9 m de comprimento), diminuindo a probabilidade de falhas estruturais. A utilização de restritores menores e o conhecimento do comportamento da rigidez flexional antes da instalação são fundamentais para que as operações ocorram com

sucesso.

Questões relacionadas à viabilidade de lançamento de um duto flexível devem ser discutidas sob o ponto de vista estrutural, como a análise do pescoço de ganso. Outra forma de se entender melhor a atuação das lingadas na composição da conexão vertical direta de segunda extremidade seria investigar a influência do restritor de curvatura e as diversas configurações de dutos flexíveis.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Apostila de Engenharia Submarina – LabEco, UFRJ, 2013, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. ORCINA, *Orcaflex Manual User*, UK, 2015.
- [2] HUANG, K. Subsea flexible flowline installations issues and solutions. DMAR Engineering Inc. 2013, Houston, Texas, USA.
- [3] Petrobras – Fatos e Dados. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/economizamos-com-tecnica-inedita-de-instalacao-de-equipamento-submarino-no-pre-sal.html>. Acesso em: 31 jan. 2015, 10:30:00.
- [4] GUO, B., SONG, S., GHALAMBOR, A., LIN, R., 2014, *Offshore Pipelines: Design, Installation and Maintenance*. 2 ed. Oxford, UK, Elsevier.
- [5] RIBEIRO, M., 2008, *Concepção de Manifolds Submarinos para Lançamento Pendular em Águas Ultra Profundas*. Dissertação de M.Sc., PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [6] LIU, X., 2014, *Dynamic Response of Flexible Pipes Considering Different Damping Models*. Master These., NTNU – Trondheim, Norway.
- [7] LIU, Y., KYRIAKIDES, S., “Effect of Geometric and Material Discontinuities on the Reeling of Pipelines”. *Offshore and Arctic Engineering*, OMAE 24474, San Francisco, California, USA, 2014.
- [8] DAWOOD, A., KENNY, S., “A Parametric study on the Influence of Imperfections on Pipe Mechanical Response During Bending in Reel-Lay Installation Using Finite Element Method”. *Offshore and Arctic Engineering*, OMAE 24250, San Francisco, California, USA, 2014.
- [9] Catálogo Vertebrae Bend Restrictor. Disponível em: <http://www.subenesol.co.uk/Vertebrae-Bend-Restrictors>. Acesso em: 7 jun. 2015, 20:12:00
- [10] API-RP-17B, Recommended Practice for Flexible pipe. 1998, American Petroleum Institute.
- [11] LOPES, V., 2005, *Influência da Rigidez à Flexão de Duto Flexível na Instalação de Módulos de Conexão Vertical em Águas Profundas*. Dissertação de M.Sc., PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- [12] TELLIER, E., THETHI, R., Offshore Inc. “The Evolution of Freestanding Risers”. *Offshore and Arctic Engineering*, OMAE 79487, Honolulu, Hawaii, USA, 2009.
- [13] Catálogo Bridon Cabo de Aço – Blue Strand Class 6x36 Steel Core. Disponível

em: http://www.bridon.com/china/x/downloads/crane/6x36_c.pdf. Acesso em: 28 mai. 2015, 21:57:00

- [14] ORCINA, *Orcaflex Manual User*, UK, 2015.
- [15] API Specification 17J, Specification for Unbonded Flexible Pipes, US, 2002
- [16] NEWMAN, J., *Panel Method in Marine Hydrodynamics*. Australasian Fluid Mechanical Conference, 1992, Hobart, Australia.
- [17] KOPP, F., LIGHT, B. D., PRELI, T. A., RAO, V. S., STINGL, K. H., Shell International E&P - EP Projects. "Design and Installation of the Na Kika Export Pipelines, Flowlines and Risers". *Offshore Technology Conference*, OTC 16703, Houston, Texas, USA, 2004.
- [18] TAN, Z., QUIGGIN, P., SHELDRAKE, T., Wellstream International Ltd. "Time Domain Simulation of the 3D Bending Hysteresis Behavior of an Unbounded Flexible Riser". *Offshore Mechanical and Arctics Engineering*, OMAE 29315, San Diego, California, USA, 2007
- [19] BRAESTRUP, M, ANDERSEN, J. B., ANDERSEN, L. W., BRYNDUM, M. B., NIELSEN, N. R., 2005, *Design and Installation of Marine Pipelines*. 1 ed. Oxford, Blackwell Science Ltd.
- [20] BRANDÃO, C., CORREA, F., JACOB, B., 2015, Generation of Multiple Equivalent Regular Waves for Preliminary Analyses of Floating Production Systems. ISOPE, Kona, Hawaii, USA.
- [21] Data Sheet bend restrictor, ABSO Subsea
- [22] DNV-OS-F101, *Submarine Pipeline Systems*. Det Norske Veritas, 2010.
- [23] GAUGOUL, E. C., 2009, *Simulação Numérica de Procedimentos de Instalação de Dutos Submarinos*. Dissertação de M.Sc., PEC/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

9 ANEXO 1 - RESPONSE AMPLITUDE OPERATOR

O navio está sujeito a 6 tipos de movimentos, três translacionais – *surge* (avanço), *sway* (desvio) e *heave* (afundamento) – e três rotacionais – *roll* (jogo), *pitch* (arfagem) e *yaw* (guinada), conforme ilustrado na Figura 9.1.

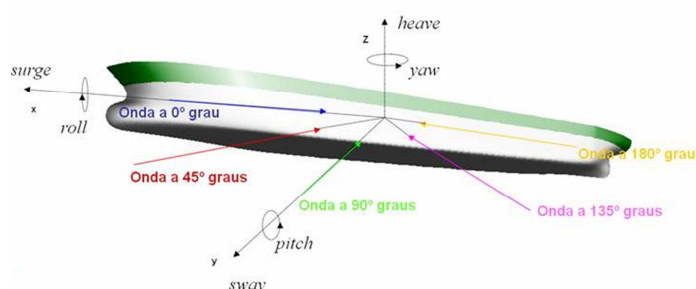


Figura 9.1 – Graus de liberdade do movimento de um navio

Para cada movimento acima citado, um cálculo de RAO é feito. O RAO (operador de resposta de amplitude) pode ser descrito como o movimento do navio para cada frequência de excitação, adimensionalizados com a altura da onda. O estudo de caso considerará o RAO para todos os graus de liberdade de um navio.

RAO é a resposta da embarcação sob a ação de uma onda de amplitude unitária para as várias direções de incidência da onda sobre o casco e para várias frequências. Os movimentos de resposta à excitação provocada pela energia das ondas do mar são de natureza harmônica.

As curvas dos RAOs tendem a faixa de baixas frequências, pois esta é a faixa onde a embarcação move-se verticalmente acompanhando a onda. Desta forma, a frequência do movimento de resposta é igual a da excitação.

O navio utilizado para os processos de instalação das linhas flexíveis dessa dissertação foi um PLSV. O PLSV é um tipo de embarcação responsável principalmente pelo lançamento e instalação de linhas e equipamentos necessários junto aos poços de petróleo.

Para as análises realizadas neste estudo de casos, utilizou-se o lançamento vertical pelo método *J-Lay*, também utilizados em águas profundas, através da *moonpool* da embarcação. O sistema de posicionamento dinâmico foi considerado para este problema, de forma a manter a embarcação na mesma posição durante o lançamento da linha flexível ao longo da lâmina d'água, permitindo que somente as respostas de primeira ordem da embarcação fossem consideradas.

A Tabela 9.1 expõe informações acerca desta embarcação.

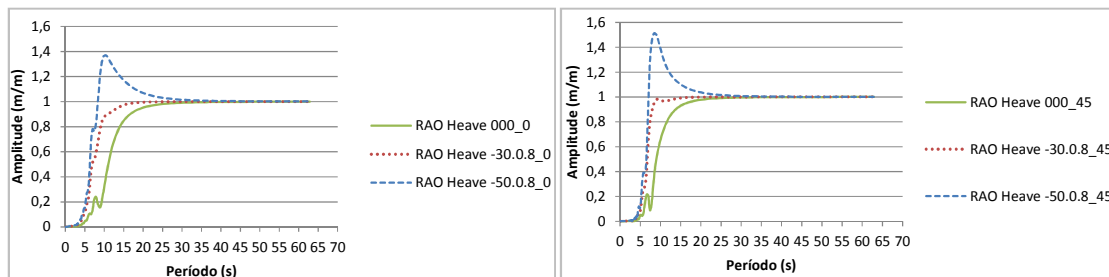
Tabela 9.1– Parâmetros da embarcação de lançamento.

Características Principais	
Pontal	19 m
Calado de lançamento	8,8 m
Comprimento	139 m
Boca	30 m
Peso deslocado	16000 kg

O operador de amplitude de resposta (RAO) é tido como uma função de transferência. Os movimentos de translação e rotação são gerados no navio como uma resposta à excitação das ondas do mar. Para medir estes movimentos é necessária a utilização do RAO, descrito como a resposta do navio a uma onda de amplitude de 1 metro. O RAO utilizado para a embarcação foi calculado através do programa HYDROSTAR, o qual utiliza o mesmo processo de obtenção de RAO do programa WAMIT, amplamente utilizado nos projetos de ancoragem (Método dos Painéis Ref. [16]).

A Figura 9.2 e Figura 9.3 descrevem os valores para três movimentos do navio (*surge*, *heave*, *pitch*) associado com as ondas incidindo a 0° , 45° , 90° , 135° e 180° .

Os RAO expostos na Figura 9.2 e Figura 9.3 são para as posições de lançamento em *J-Lay* (0,0,8), lançamento no *moonpool* no convés de operação (-30,0,8) e em lançamento *S-Lay* (-50,0,8). Todas as unidades foram consideradas em metros e com coordenadas em x,y,z , seguindo as coordenadas globais do ORCAFLEX.



(a)

(b)

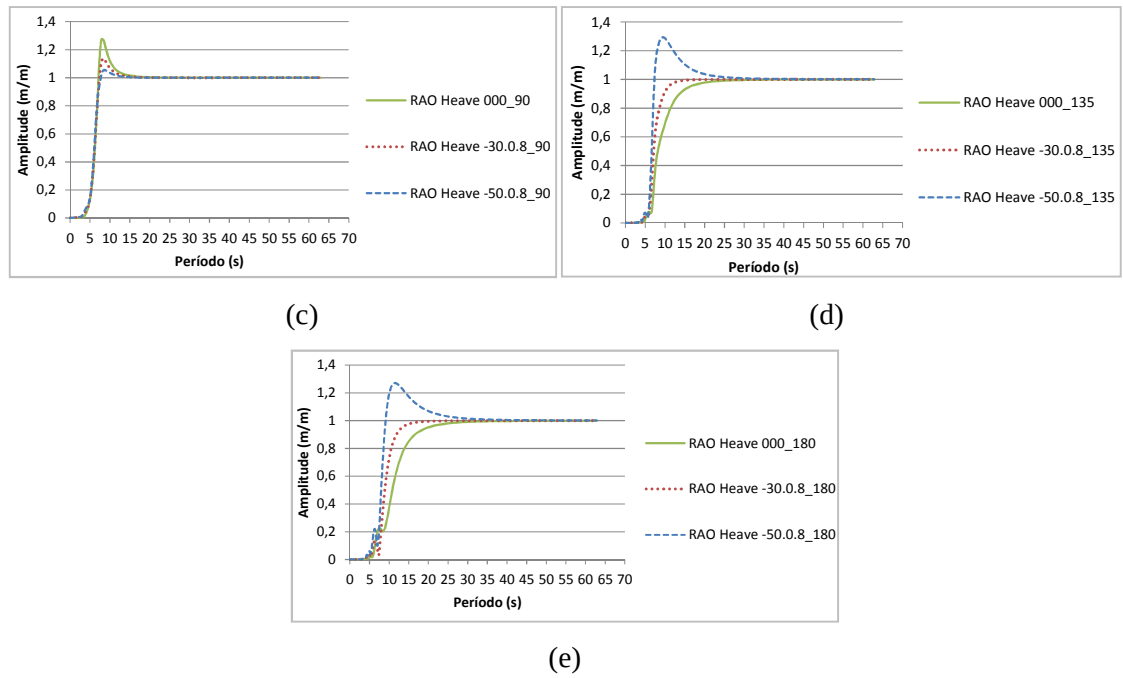


Figura 9.2 – RAOs *Heave* para ângulos de incidência de (a) 0 grau, (b) 45 graus, (c) 90 graus, (d) 135 graus e (e) 180 graus.

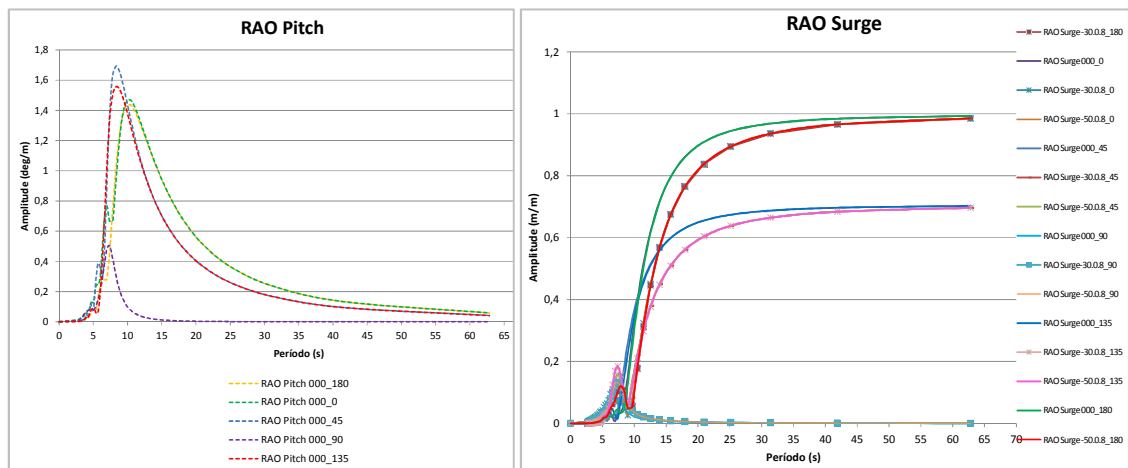


Figura 9.3 – RAO *Pitch* e *Surge* para os ângulos de incidência de 0, 45, 90, 135 e 180 graus, respectivamente.

10 ANEXO 2 – FREQUÊNCIA NATURAL EM EQUIPAMENTOS SUBMARINOS

A) MANIFOLD

Características do Manifold:

$L_m := 15\text{m}$	comprimento
$w := 9\text{m}$	largura
$h := 5\text{m}$	altura
$W_p := 300000\text{kg}$	Peso limitado pela capacidade do navio selecionado
$dox := 15\text{m}$	distância x entre olhais
$doy := 9\text{m}$	distância y entre olhais

Propriedades Hidrodinâmicas do Manifold:

$C_{ax} := 0.32$	Coefficiente de arrasto na direção x
$C_{ay} := 0.66$	Coefficiente de arrasto na direção y
$C_{az} := 0.72$	Coefficiente de arrasto na direção z
$\rho_{\text{mar}} := 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Massa específica da água do mar
$V_{rz} := \frac{\pi}{4} \cdot dox \cdot dox^2 = 954.259 \cdot \text{m}^3$	Volume de referência [DNV - RP C205, Anexo D]
$\text{HydroMassz} := V_{rz} \cdot \rho_{\text{mar}} = 978.115 \cdot \text{tonne}$	Massa Hidrodinâmica [OrcaFlex Help]
$M_{az} := C_{az} \cdot \text{HydroMassz}$	
$M_{az} = 704.243 \cdot \text{tonne}$	Massa Adicionada [DNV - RP C205] Flat Plate

Estimativa do comprimento das eslingas:

diagonal entre olhais:

$$do := \sqrt{dox^2 + doy^2} = 17.493 \text{ m}$$

Posição do Masterlink relativa aos olhais de içamento:

$$mx := \frac{dox}{2} \text{ m}$$

$$my := \frac{doy}{2} \text{ m}$$

$$mz := \frac{\frac{do}{2}}{\cos\left(\frac{73 \cdot \pi}{180}\right)} = 29.915 \text{ m}$$

comprimento das eslingas:

$$Ls := mz \cdot \sin\left(\frac{73 \cdot \pi}{180}\right) = 28.608 \text{ m}$$

Cabo de aço:

6x36 IWRC 102mm - Bridon Ropes

MBF := 647000kg

MBF = 647-tonne

minimum breaking force

$\phi := 102\text{mm}$

diâmetro

$F_{\text{m}} := 0.460$

Nominal metallic area factor

$A_{\text{m}} := F \cdot \phi^2 = 4.786 \times 10^3 \cdot \text{mm}^2$

MCS - metallic cross section

$E_c := 104.0524 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}$

Elastic modulus

$E_c \cdot A = 497.978 \cdot \text{MN}$

Axial Stiffness

$Wc_{\text{dry}} := 44 \frac{\text{kg}}{\text{m}}$

Peso por metro no ar

$Wc_{\text{wet}} := Wc_{\text{dry}} \cdot 0.87 = 0.038 \cdot \frac{\text{tonne}}{\text{m}}$

Peso por metro na água

Devido a estimativa do peso molhado a partir da multiplicação do peso no ar por um fator de flutuabilidade de 0,87, foi realizada uma correção do diâmetro para calibrar o modelo numérico com o analítico. Optou-se por manter o peso por unidade de comprimento do cabo.

Calibragem para 40 m de cabo:

Correção do diâmetro:

$Pr := Wc_{\text{dry}} \cdot 40\text{m} \cdot g = 17.26 \cdot \text{kN}$

peso real - no ar

$Pa := Wc_{\text{wet}} \cdot 40\text{m} \cdot g = 15.016 \cdot \text{kN}$

peso aparente

$E := \frac{Pr - Pa}{40\text{m}} = 0.056 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Empuxo por metro de cabo

$\rho_{\text{mar}} := 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

massa específica da água do mar

+

$\phi_{\text{corrigido}} := \sqrt{\frac{4 \cdot E}{\pi \cdot \rho_{\text{mar}} g}} = 84.293 \cdot \text{mm}$

diâmetro corrigido

Estimativa do comprimento do cabo:

O comprimento do cabo é estimado de forma que o período natural do sistema seja igual ao período de pico do espectro.

$$T_n = T_p$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_p} \quad \text{frequência natural}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Estimativa da frequência natural de vibração considerando o sistema com um grau de liberdade}$$

Para:

onde:

$$k = \frac{E \cdot A}{L} \quad m = M_e + M_a$$

M_e - Massa da estrutura no ar

M_a - Massa adicionada

$$\frac{2\pi}{T_p} = \sqrt{\frac{\frac{E \cdot A}{L}}{M_e + M_a}}$$

$$L = \frac{E \cdot A \cdot (T_p)^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (M_e + M_a)}$$

Dados da onda irregular:

$H_s := 2m$ altura significativa de onda

$T_p := 8.6$ Período de pico

$\gamma := 6.4 T_p^{-0.491} = 2.225$ parâmetro de pico - Gamma

$T_z := T_p \cdot \sqrt{\frac{5 + \gamma}{10.89 + \gamma}} = 6.383$ período de cruzamento zero

$$T_p := 8.6s$$

$$W_p := 300\text{tonne}$$

$$M_{az} = 704.243\text{-tonne}$$

$$L_{res} := \frac{E_c \cdot A}{\left(\frac{2\pi}{T_p}\right)^2 \cdot (W_p + M_{az})}$$

$$L = 928.985\text{-m}$$

Comprimento do cabo do guindaste para o qual espera-se que ocorra a ressonância do sistema

B) PLEM A

Características do PLEM A:

$L := 14\text{m}$	comprimento
$w := 8\text{m}$	largura
$h := 4\text{m}$	altura
$W_p := 150000\text{kg}$	Peso
$dox := L$	distância x entre olhais
$doy := w$	distância y entre olhais

Propriedades Hidrodinâmicas do PLEM 2:

$C_{ax} := 0.3$	Coeficiente de arrasto na direção x
$C_{ay} := 0.15$	Coeficiente de arrasto na direção y
$C_{az} := 0.76$	Coeficiente de arrasto na direção z
$\rho_{mar} := 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Massa específica da água do mar
$V_{rz} := \frac{\pi}{4} \cdot dox \cdot doy^2 = 703.717\text{-m}^3$	Volume de referência [DNV - RP C205, Anexo D]
$V_{rz_m} := V_{rz}$	
$HydroMassz := V_{rz_m} \cdot \rho_{mar} = 721.31\text{-tonne}$	Massa Hidrodinâmica [OrcaFlex Help]
$M_{az} := C_{az} \cdot HydroMassz$	
$M_{az} = 548.195\text{-tonne}$	Massa Adicionada [DNV - RP C205] Flat Plate

Estimativa do comprimento das eslingas:

diagonal entre olhais:

$$\begin{aligned} \text{dox} &:= 14\text{m} \\ \text{doy} &:= 4\text{m} \\ \text{do} &:= \sqrt{\text{dox}^2 + \text{doy}^2} = 14.56\text{m} \end{aligned}$$

Posição do Masterlink relativa aos olhais de içamento:

$$\begin{aligned} \text{mx} &:= \frac{\text{dox}}{2} \text{m} \\ \text{my} &:= \frac{\text{doy}}{2} \text{m} \\ \text{mz} &:= \frac{\frac{\text{do}}{2}}{\cos\left(\frac{73 \cdot \pi}{180}\right)} = 24.9\text{m} \end{aligned}$$

comprimento das eslingas:

$$\text{Ls} := \text{mz} \cdot \sin\left(\frac{73 \cdot \pi}{180}\right) = 23.812\text{m}$$

Estimativa do comprimento do cabo:

O comprimento do cabo é estimado de forma que o período natural do sistema seja igual ao período de pico do espectro.

$$\text{T}_n = \text{T}_p$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{\text{T}_p} \quad \text{frequência natural}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Estimativa da frequência natural de vibração considerando o sistema com um grau de liberdade}$$

Para:

onde:

$$k = \frac{E \cdot A}{L} \quad m = M_e + M_a$$

M_e - Massa da estrutura no ar

M_a - Massa adicionada

$$\frac{2\pi}{\text{T}_p} = \sqrt{\frac{\frac{E \cdot A}{L}}{M_e + M_a}}$$

$$L = \frac{E \cdot A \cdot (\text{T}_p)^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (M_e + M_a)}$$

Dados da onda irregular:

$H_s := 2\text{m}$ altura significativa de onda

$T_p := 8.6$ Período de pico

$\gamma := 6.4T_p^{-0.491} = 2.225$ parâmetro de pico - Gamma

$T_z := T_p \cdot \sqrt{\frac{5 + \gamma}{10.89 + \gamma}} = 6.383$ período de cruzamento zero

$T_p := 8.6\text{s}$

$W_p = 1.5 \times 10^5 \text{ kg}$

$M_{az} = 548.195 \cdot \text{tonne}$

$$L_{\text{cabo}} := \frac{E_c \cdot A}{\left(\frac{2\pi}{T_p}\right)^2 \cdot (W_p + M_{az})}$$

$L = 1.336 \times 10^3 \cdot \text{m}$

Comprimento do cabo do guindaste para o qual espera-se que ocorra a ressonância do sistema

C) PLEM B

Características do PLEM B:

$L_{\text{cabo}} := 13\text{m}$	comprimento	+
$w := 7\text{m}$	largura	
$h := 3\text{m}$	altura	
$W_p := 100000\text{kg}$	Peso	
$dox := L$	distância x entre olhais	
$doy := w$	distância y entre olhais	

Propriedades Hidrodinâmicas do PLEM 3:

$C_{ax} := 0.54$	Coefficiente de arrasto na direção x
$C_{ay} := 0.228$	Coefficiente de arrasto na direção y
$C_{az} := 0.7$	Coefficiente de arrasto na direção z
$\rho_{\text{mar}} := 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Massa específica da água do mar
$V_{rz} := \frac{\pi}{4} \cdot d_{ox} \cdot d_{oy}^2 = 500.299 \cdot \text{m}^3$	Volume de referência [DNV - RP C205, Anexo D]
$V_{rz_m} := V_{rz}$	
$\text{HydroMassz} := V_{rz_m} \cdot \rho_{\text{mar}} = 512.806 \cdot \text{tonne}$	Massa Hidrodinâmica [OrcaFlex Help]
$M_{az} := C_{az} \cdot \text{HydroMassz}$	
$M_{az} = 358.964 \cdot \text{tonne}$	Massa Adicionada [DNV - RP C205] Flat Plate

Estimativa do comprimento das eslingas:

diagonal entre olhais:

$$d_{ox} = 13 \text{ m}$$

$$d_{oy} = 7 \text{ m}$$

$$d_o := \sqrt{d_{ox}^2 + d_{oy}^2} = 14.765 \text{ m}$$

Posição do Masterlink relativa aos olhais de içamento:

$$m_x := \frac{d_{ox}}{2} \text{ m}$$

$$m_z := \frac{\frac{d_o}{2}}{\cos\left(\frac{73 \cdot \pi}{180}\right)} = 25.25 \text{ m}$$

comprimento das eslingas:

$$L_s := m_z \cdot \sin\left(\frac{73 \cdot \pi}{180}\right) = 24.147 \text{ m}$$

Estimativa do comprimento do cabo:

O comprimento do cabo é estimado de forma que o período natural do sistema seja igual ao período de pico do espectro.

$$T_n = T_p$$

$$\omega_n = \frac{2\pi}{T_p} \quad \text{frequência natural}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Estimativa da frequência natural de vibração considerando o sistema com um grau de liberdade}$$

Para:

onde:

$$k = \frac{E \cdot A}{L} \quad m = M_e + M_a$$

M_e - Massa da estrutura no ar

M_a - Massa adicionada

$$\frac{2\pi}{T_p} = \sqrt{\frac{\frac{E \cdot A}{L}}{M_e + M_a}}$$

$$L = \frac{E \cdot A \cdot (T_p)^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot (M_e + M_a)}$$

Dados da onda irregular:

$$H_s := 2m \quad \text{altura significativa de onda}$$

$$T_p := 8.6 \quad \text{Período de pico}$$

$$\gamma := 6.4 T_p^{-0.491} = 2.225 \quad \text{parâmetro de pico - Gamma}$$

$$T_z := T_p \cdot \sqrt{\frac{5 + \gamma}{10.89 + \gamma}} = 6.383 \quad \text{período de cruzamento zero}$$

$$T_p := 8.6s$$

$$W_p = 1 \times 10^5 \text{ kg}$$

$$M_{az} = 358.964 \text{ tonne}$$

$$L := \frac{E \cdot A}{\left(\frac{2\pi}{T_p}\right)^2 \cdot (W_p + M_{az})}$$

$$L = 2.033 \times 10^3 \cdot m$$

Comprimento do cabo do guindaste para o qual espera-se que ocorra a ressonância do sistema

D) MÓDULO DE CONEXÃO VERTICAL

Características do MCV:

$L := 7\text{m}$	comprimento	
$w := 3.0\text{m}$	largura	
$h := 4\text{m}$	altura	
$Wp := 10436\text{kg}$	Peso submerso	
$dox := w$	distância x entre olhais	+
$doy := L$	distância y entre olhais	

Propriedades Hidrodinâmicas do MCV:

$Cax := 0.65$	+	Coeficiente de arrasto na direção x
$Cay := 0.72$		Coeficiente de arrasto na direção y
$Caz := 0.72$		Coeficiente de arrasto na direção z
$\rho_{\text{mar}} := 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$		Massa específica da água do mar
$V_{rz} := \frac{\pi}{4} \cdot dox^2 \cdot doy = 4.948 \times 10^4 \text{ L}$		Volume de referência [DNV - RP C205, Anexo D]
$HydroMassz := V_{rz} \cdot \rho_{\text{mar}} = 50.717 \cdot \text{tonne}$		Massa Hidrodinâmica [OrcaFlex Help]
$Maz := Caz \cdot HydroMassz$		
$Maz = 36.516 \cdot \text{tonne}$		Massa Adicionada [DNV - RP C205]
$Max1 = 2.512 \times 10^4 \text{ kg}$		QUADRADO
$May1 = 6.492 \times 10^4 \text{ kg}$		

Dados da onda irregular:

$Hs := 2\text{m}$	altura significativa de onda
$Tp := 8.6$	Período de pico
$\gamma := 6.4Tp^{-0.491} = 2.225$	parâmetro de pico - Gamma
$Tz := Tp \cdot \sqrt{\frac{5 + \gamma}{10.89 + \gamma}} = 6.383$	período de cruzamento zero

$$T_p := 8.6s$$

$$A = 4.786 \times 10^{-3} m^2$$

$$W_p = 1.044 \times 10^4 kg$$

$$M_{az} = 3.652 \times 10^4 kg$$

$$L := \frac{Ec \cdot A}{\left(\frac{2\pi}{T_p}\right)^2 \cdot (W_p + M_{az})}$$

$$L = 1.987 \times 10^4 m$$

Comprimento do cabo do guindaste para o qual espera-se que ocorra a ressonância do sistema

APENAS O MVC SOZINHO

$$T_p := 7s$$

$$W_p = 1.044 \times 10^4 kg$$

$$M_{az} = 3.652 \times 10^4 kg$$

$$L := \frac{Ec \cdot A}{\left(\frac{2\pi}{T_p}\right)^2 \cdot (W_p + M_{az})} = 1.316 \times 10^4 m$$

$$T_p := 6s$$

$$W_p = 1.044 \times 10^4 kg$$

$$M_{az} = 3.652 \times 10^4 kg$$

$$L := \frac{Ec \cdot A}{\left(\frac{2\pi}{T_p}\right)^2 \cdot (W_p + M_{az})} = 9.672 \times 10^3 m$$