

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Alef de Oliveira Nascimento

**Análise de conexão vertical direta de
equipamentos submarinos**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Anderson Pereira

Rio de Janeiro

Junho de 2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus e a vosso filho, por nunca terem desistido de mim, ainda que por um tempo eu tenha esquecido d'Eles.

Agradeço a minha família: Antonio, Pai, exemplo de trabalho, resiliência, esforço, disposição e disciplina. O mesmo nunca faltou ao dever, e eu jamais poderei lhe retribuir à altura. Buscarei ser na vida metade do que és. Lucimar, Mãe, melhor amiga, exemplo de ética, moral, respeito, verdade, amor, cuidado e carinho. Eu realmente não consigo imaginar o que seria de mim sem você. E Ana, irmã, exemplo de foco, constância e atitude. A melhor tia e amiga que meu filho poderia ter. Obrigado por durante todos esses longos anos de estudos nunca deixarem eu perder minha força de vontade em lutar por dias cada vez melhores e nunca me faltarem com suporte. Hoje só é um dia melhor, graças a vocês.

Agradeço ao meu filho, Felipe. Com você, eu descobri o real propósito da vida, e enquanto ela durar seremos os melhores amigos que o mundo verá. Obrigado por todo amor e carinho que me proporciona. Sem você, eu não chegaria até aqui. Meu mundo é mais feliz quando estou contigo.

Agradeço a minha namorada, Letícia. Em um período atípico da história e um dos mais difíceis da graduação, conseguiu despertar em mim o mais nobre sentimento de que sempre é possível ser melhor, independente do cenário. Estar onde estou não teria sido possível sem você todos os dias comigo durante os últimos anos. Você desperta minha melhor versão. Conquistaremos o mundo.

Agradeço a todos os amigos que pude fazer no ensino fundamental, médio, técnico, superior e na vida. Sou grato por cada momento que passamos juntos nessa trajetória. Serão eternamente lembrados.

Agradeço à toda a TechnipFMC, onde pude vivenciar e obter conhecimento sobre o trabalho de embarcações PLSVs e a realidade Offshore. Em especial a Tadeu, Maria e toda minha equipe que confiaram e continuam confiando em meu trabalho e em meus resultados.

Por fim, agradeço a PUC-Rio e aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica por proporcionarem o que há de melhor no país em termos de estrutura de ensino, laboratórios, acomodações, conhecimento e suporte. Um agradecimento em especial ao Anderson, meu professor orientador. Um dos poucos professores que pode ver a minha trajetória além aluno.

Este trabalho é dedicado ao “meu peixe”, “Bel” ou Francisco Demontie.

Não há momento bom nem justificativa suficiente para a partida, mas através do título alcançado e de tudo que vivemos juntos, serás eternamente lembrado.

“Senhor, agradeço por me dar força e convicção para cumprir a tarefa a qual me confiou. Obrigado por me guiar sem exitar, apesar dos muitos obstáculos em meu caminho. Por me manter determinado quando tudo parecia perdido. Agradeço sua proteção e os muitos sinais ao longo do caminho. Agradeço pelos amigos que fiz. Olhe por eles como tem olhado por mim. Obrigado pelo bem que eu possa ter feito e lamento muito pelo mal. Combati o bom combate, terminei a corrida, mantive a fé.”

RESUMO

Análise de conexão vertical direta de equipamentos submarinos

Diante da necessidade de execução de operações críticas de instalação de estruturas flexíveis e equipamentos submarinos, a indústria investe não só em produtos mas também em análises estruturais prévias às operações com o objetivo de prezar pela segurança e proteção à vida em todas as fases de um projeto.

A motivação deste trabalho é analisar as características mecânicas das estruturas utilizadas na produção e transporte de petróleo quando sujeitas aos esforços oriundos do processo de instalação de linhas submarinas. Para isso, foi desenvolvido neste trabalho a análise estrutural da operação de conexão vertical direta de uma instalação de linha flexível entre equipamentos submarinos através do software Orcaflex. Como conclusão, será demonstrado o resultado da análise para melhor configuração de operação de lançamento de linhas.

Palavras chaves: Método de Elementos Finitos. Análise Estrutural. Equipamentos Submarinos. Dutos Flexíveis. Instalações Submarinas. Engenharia Submarina.

ABSTRACT

Direct vertical connection analysis of subsea equipment

Faced with the need to carry out critical operations for the installation of flexible structures and subsea equipment, the industry invests not only in products but also in structural analyzes before the operations with the objective of valuing safety and protection of life in all phases of a project.

The motivation of this work is to analyze the mechanical characteristics of the structures used in the production and transport of oil when subjected to the efforts arising from the process of installing submarine lines. Consequently, the structural analysis of the direct vertical connection operation of a flexible line installation between subsea equipment was developed through the Orcaflex software. As conclusion, will be demonstrated the result of the analyze for the best configuration of the line launching operation and a motivation for such choice.

Keywords: Finite Element Method. Structural Analysis. Submarine Equipment. Flexible Pipes. Subsea Installation. Subsea Engineering.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. O MERCADO DE ÓLEO E GÁS NACIONAL.....	11
1.2. MOTIVAÇÃO.....	13
1.3. OBJETIVOS.....	13
1.4. ORGANIZAÇÃO DO PROJETO	14
2. LINHAS FLEXÍVEIS.....	15
2.1. DUTOS FLEXÍVEIS.....	15
2.2. UMBILICAIS.....	17
3. PRINCIPAIS ACESSÓRIOS.....	18
3.1. CONECTOR / END FITTING.....	18
3.2. ENRIJECEDOR / BEND STIFFENER	19
3.3. VÉRTEBRA / BEND RESTRICTOR.....	20
3.4. MÓDULO DE CONEXÃO VERTICAL.....	21
4. TIPOS DE OPERAÇÕES.....	22
4.1. OPERAÇÃO DE PULL-IN	23
4.2. OPERAÇÃO DE CVD	24
5. METODOLOGIA	25
5.1. DEFINIÇÃO DE FLUTUADORES	25
5.2. RELAÇÃO ENTRE FLEXÃO E RAIO DE CURVATURA.....	27
5.3. RIGIDEZ À FLEXÃO.....	29
5.4. SIMULAÇÕES NO ORCAFLEX.....	31
6. RESULTADOS OBTIDOS.....	35
6.1. ITENS DO MODELO.....	35
6.1.1. CARACTERÍSTICAS DO DUTO FLEXÍVEL	36
6.1.2. CARACTERÍSTICAS DOS ACESSÓRIOS	36
6.1.3. CARACTERÍSTICAS DO MÓDULO DE CONEXÃO VERTICAL.....	37
6.1.4. DISCRETIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DE LINHA E VÉRTEBRA	37
6.2. PRÉ-DEFINIÇÃO DOS FLUTUADORES.....	38
6.3. ANÁLISE ESTÁTICA DA CVD DE 1ª EXTREMIDADE.....	40
6.3.1. CASO ESTÁTICO 1: FLUTUADORES NA VÉRTEBRA	42
6.3.2. CASO ESTÁTICO 2: FLUTUADORES NA VÉRTEBRA E LINHA.....	44
6.4. ANÁLISE DINÂMICA DA CVD DE 1ª EXTREMIDADE.....	46
6.4.1. CASO DINÂMICO 1: FLUTUADORES NA VÉRTEBRA	47

6.4.2. CASO DINÂMICO 2: FLUTUADORES NA VÉRTEBRA E LINHA.....	49
6.5. RESULTADOS OBTIDOS.....	51
7. CONCLUSÃO.....	54
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56
ANEXOS.....	58

Lista de Figuras

<i>Figura 1 - Histórico e Projeção de Produção em BOE (Firmo, 2019)</i>	11
<i>Figura 2 – Tipos de Plataformas de Produção de Petróleo (Mauro, 2013)</i>	12
<i>Figura 3 - CVD de 2ª Extremidade (Thorley, 2015)</i>	14
<i>Figura 4 - Esquemático de um Riser Flexível Típico (API 17B, 2002)</i>	15
<i>Figura 5 – Perfil de Carcaça (API 17B, 2002)</i>	16
<i>Figura 6 – Perfis dos Tipos Z, C e T de Armaduras de Pressão (API 17B, 2002)</i>	16
<i>Figura 7 – Estrutura de Umbilical Genérico (Petrobras, 2015)</i>	17
<i>Figura 8 – Conector convencional (API 17B, 2002)</i>	18
<i>Figura 9 – Processo de montagem de conector convencional (Simeros, 2017)</i>	19
<i>Figura 10 – Enrijecedor de Topo e Enrijecedor Intermediário (Balmoral, 2022)</i>	20
<i>Figura 11 – Vértebra instalada, travada e colar bipartido (API 17B, 2002)</i>	20
<i>Figura 12 – MCV com formato funnel up e funnel-down (API 17B, 2002)</i>	21
<i>Figura 13 – PLSV Skandi Búzios (DOF, 2022)</i>	22
<i>Figura 14 – Sistema de Lançamento Horizontal e Vertical (Rodrigues, 2016)</i>	22
<i>Figura 15 – Guindaste Subsea e Guincho de Iniciação (Haine, 2014)</i>	23
<i>Figura 16 – Troca de Cabos em Operação de Pull-in de 2ª (Ferreira, 2013)</i>	24
<i>Figura 17 – Overboarding, Verticalização e Pré-Conexão do MCV (Ferreira, 2013)</i>	24
<i>Figura 18 – Esforços em Operação de CVD de 1ª</i>	25
<i>Figura 19 – Tensões de Tração e Compressão em Vigas (Beer, 1995)</i>	27
<i>Figura 20 – Momento Fletor vs Curvatura da Vértebra (Lopes, 2005)</i>	30
<i>Figura 21 – Discretização da Linha por Elementos (Orcina, 2008)</i>	31
<i>Figura 22 – Discretização de Linha e Vértebra</i>	32
<i>Figura 23 – Exemplo de Elementos de Linha</i>	32
<i>Figura 24 – Sombra de Variação e Estágios de 0 a 3</i>	34
<i>Figura 25 – FPSO Cidade de Caraguatatuba (Petrobras, 2016)</i>	35
<i>Figura 26 – Discretização de trechos de linha e conector</i>	38
<i>Figura 27 – Resultados da Análise Estática Sem Flutuadores</i>	41
<i>Figura 28 – Pré-assentamento e profundidade da linha - Caso 1</i>	42
<i>Figura 29 – Altura da extremidade de fundo - Caso 1</i>	43
<i>Figura 30 – Curvatura de Vértebra e Linha Normalizada - Caso 1</i>	43
<i>Figura 31 – Pré-assentamento e profundidade da linha - Caso 2</i>	44
<i>Figura 32 – Altura da extremidade de fundo - Caso 2</i>	45
<i>Figura 33 – Curvatura de Vértebra e Linha Normalizada - Caso 2</i>	45
<i>Figura 34 – Variação de Estágios de 0 a 3 em HS=2,5m</i>	47
<i>Figura 35 – Início, maior amplitude e assentamento - Caso 1</i>	47
<i>Figura 36 – Curvatura da Linha em HS de 1,5m e 2,5m - Caso 1</i>	48
<i>Figura 37 – Curvatura da Vértebra em HS=1,5m e 2,5m - Caso 1</i>	48
<i>Figura 38 – Momento Fletor na área da vértebra em HS=1,5m e 2,5m - Caso 1</i>	49

<i>Figura 39 – Início, maior amplitude e assentamento - Caso 2</i>	<i>50</i>
<i>Figura 40 – Curvatura da Linha em HS=1,5m e 2,5m - Caso 2</i>	<i>50</i>
<i>Figura 41 – Curvatura da Vértebra em HS=1,5m e 2,5m - Caso 2</i>	<i>51</i>
<i>Figura 42 – Momento Fletor na área da vértebra em HS=1,5m e 2,5m - Caso 2</i>	<i>51</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 – Dados da Estrutura Flexível em Análise</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 2 – Dados da Vértebra em Análise</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 3 – Dados do Conector em Análise</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 4 – Dados do Módulo de Conexão Vertical em Análise.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 5 – Forças Atuantes no Sistema</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 6 – Momentos Atuantes no Sistema</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 7 – Definição Teórica de Flutuadores</i>	<i>39</i>
<i>Tabela 8 – Definição com Flutuadores Catalogados</i>	<i>40</i>
<i>Tabela 9 – Distribuição de Flutuadores Total Analisadas.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 10 – Critérios e Resultados da Análise Estática - Casos 1 e 2.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 11 –Critérios e Resultados de Curvatura Dinâmica - Casos 1 e 2</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 12 – Critérios e Resultados de Momento Fletor Dinâmico - Casos 1.1 e 2.1</i>	<i>53</i>

1. Introdução

1.1. O Mercado de Óleo e Gás Nacional

Nos últimos anos, apesar da recorrente busca por fontes de energia renovável, a demanda de produtos derivados do petróleo segue crescente em todo o mundo. O Brasil possui reservas abundantes e grande capacidade de crescimento de produção. De acordo com um estudo colaborativo entre o IBP e a Ernst & Young (2019), a projeção a partir de 2018 apresenta o potencial de triplicar o histórico de produção em milhões de barris por dia, conforme apresentado na Figura 1:

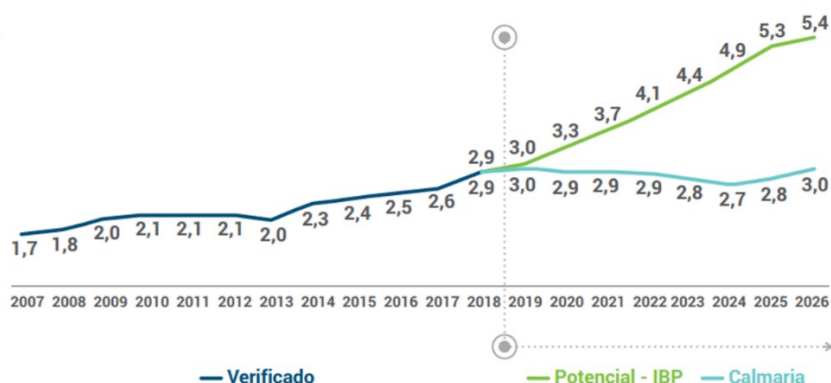


Figura 1 - Histórico e Projeção de Produção em BOE (Firmo, 2019)

Segundo o IEA (2020c), a demanda de petróleo atinge a máxima histórica em 2030 de forma abrupta. Já segundo a OPEC (2020c) uma recuperação da demanda global para níveis acima do pré-pandemia ocorrerá durante a década de 2020, atingindo a máxima em 2030 mas de forma mais lenta e gradual.

Apesar da alta produção de petróleo projetada para o país e da grande perspectiva de investimentos, apenas 7% das bacias sedimentares brasileiras foram estudadas até o momento. Os principais campos estudados encontram-se Bacia de Santos, em águas profundas e ultra profundas com profundidade de até 5 quilômetros, na muito comentada camada do pré-sal. De acordo com um estudo do Instituto Nacional de Petróleo e Gás da Universidade Estadual do Rio de Janeiro, o pré-sal brasileiro pode alcançar em torno de 176 bilhões de barris de petróleo equivalente, colocando o Brasil entre os principais produtores mundiais de petróleo.

O petróleo utilizado como matéria-prima para diversos derivados, podem ser encontrados em bolsões em terra firme, abaixo do fundo do mar. Mas da pré-descoberta até a extração, é exigido alto investimento em serviços especializados de engenharia.

Para a obtenção do petróleo, a mesma pode-se resumir em três principais etapas, do conhecimento do poço até a obtenção. São elas: a prospecção, a perfuração e a extração. A prospecção define os locais com potencial de presença de rochas-reservatório; Já a perfuração é feita por meio de torres de perfuração ou navios-sonda em profundidades de 800 a 6000 metros; As embarcações de extração aplicam os primeiros processos de separação do óleo dos demais substratos (como água, gás e areia), armazenam e aguardam a retirada por outras embarcações que levam os produtos para as demais fases de processamento. As plataformas são do normalmente do tipo estacionárias (UEP) ou navios de produção e armazenamento (FPSO), conforme apresentado na Figura 2:

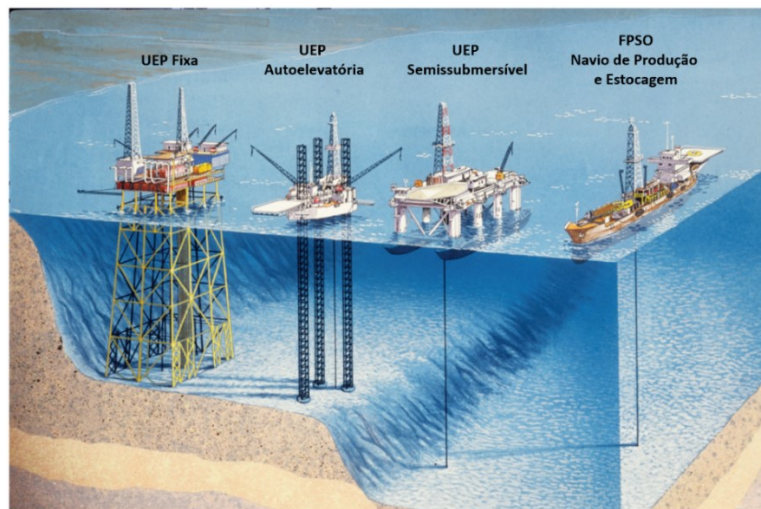


Figura 2 – Tipos de Plataformas de Produção de Petróleo (Mauro, 2013)

A produção é extremamente dependente da Engenharia Submarina, sendo essencial e decisiva para águas profundas e ultraprofundas. Soluções tecnológicas, equipamentos específicos e instalações submersas permitem o transporte do petróleo e gás natural do leito marinho até as unidades de produção.

Os equipamentos submarinos em geral são utilizados para distribuição e controle de fluxos entre o poço e a plataforma. Os principais deles são: Árvores de

Natal Molhada (ANM), Manifolds, Equipamentos de Interligação (MCV, MCH), Linhas Rígidas e Linhas Flexíveis.

Há também a complexidade que envolve a instalação dos equipamentos em grandes lâminas d'água. Como cada equipamento tem suas características particulares, a instalação torna-se um fator crucial a ser controlado a fim de viabilizar uma instalação segura, mantendo a integridade de pessoas e dos itens envolvidos na instalação.

1.2. Motivação

No Brasil, os equipamentos submarinos foram devolvidos para atender a demanda majoritária por dutos flexíveis. Para a interligação de um duto flexível a uma ANM, é utilizado como interface o Módulo de Conexão Vertical (MCV), possibilitando o escoamento e controlando o fluxo em direção à plataforma de produção. O ato da conexão é chamado de Conexão Vertical Direta.

Na Conexão Vertical Direta de 1ª Extremidade, operação em análise durante o presente projeto, o MCV é conectado à 1ª extremidade do duto flexível em uma embarcação de lançamento (PLSV) e conduzido até o leito marinho, onde é feita a conexão com o equipamento verticalizado sobre um hub da ANM. Para ajustes tanto da posição da linha quanto do equipamento envolvido, se faz necessária a utilização também de flutuadores durante a operação.

A viabilidade da operação analisada está diretamente interligada à necessidade de manter a integridade dos equipamentos envolvidos. Fatores como a curvatura da linha flexível, momento fletor atingido pela linha e pela vértebra enrijecedora e condições de verticalização são variáveis minuciosamente controladas para a obtenção de um cenário seguro para os equipamentos. A garantia prévia de que é possível a execução de uma operação reduz o tempo, o custo e o risco atribuído ao projeto.

1.3. Objetivos

Os objetivos do presente projeto são obter e analisar através do método de elementos finitos, os efeitos estáticos e dinâmicos da instalação do Módulo de Conexão Vertical (MCV) a uma Árvore de Natal Molhada (ANM).

Um modelo de pré-definição de flutuadores deve ser feito e posto em prática a fim de, obter uma configuração estática que seja suficiente para continuidade das análises dinâmicas. A partir das definições utilizadas no modelo de pré-definição, o mesmo deve ser comparado aos resultados obtidos através de alguns cenários de análise, com a particularidade principal na disposição dos flutuadores do sistema.

Através das análises estáticas e dinâmicas, busca-se tornar possível a avaliação da viabilidade da operação de conexão em determinada configuração de itens do sistema. Empuxo de flutuadores, curvatura máxima da linha, curvatura máxima da vértebra e momento fletor da vértebra devem ser obtidos para tal avaliação.

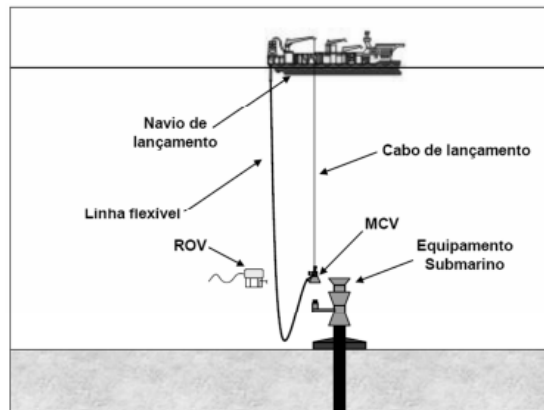


Figura 3 - CVD de 2ª Extremidade (Thorley, 2015)

1.4. Organização do Projeto

Os capítulos 2, 3 e 4 apresentam as linhas flexíveis, acessórios e as principais operações envolvendo dutos flexíveis.

Os capítulos 5 e 6 apresentam a metodologia utilizada no projeto, a definição dos itens considerados na análise computacional, os principais inputs utilizados, os resultados obtidos através da análise em elementos finitos e comentários.

O capítulo 7 apresenta a conclusão da análise, comentários sobre a comparação entre o estudo da análise e o critério estabelecido pelo fabricante, comentários sobre a viabilização da operação segundo análise e indicação de possíveis melhorias ao estudo.

O capítulo 8 apresenta a bibliografia utilizada e os anexos são apresentados na sequência.

2. Linhas Flexíveis

Segundo definição (API 17B, 2002), “o duto flexível para aplicações offshore e onshore é agrupado em uma categoria estática ou dinâmica. Ele é usado para uma infinidade de funções, incluindo o seguinte: Produção (p.e. óleo, gás, condensado, água), Injeção (p.e. água, gás, produtos químicos de fundo de poço), Exportação (p.e. óleo e gás semiprocessados) e Serviços (p.e. produtos químicos de cabeça de poço, fluidos de controle).”

2.1. Dutos Flexíveis

Para dutos flexíveis (exceto umbilicais) utilizados para injeção de água ou gás ou para produção de óleo, gás ou condensado, pode-se definir suas camadas conforme Figura 10 a seguir:

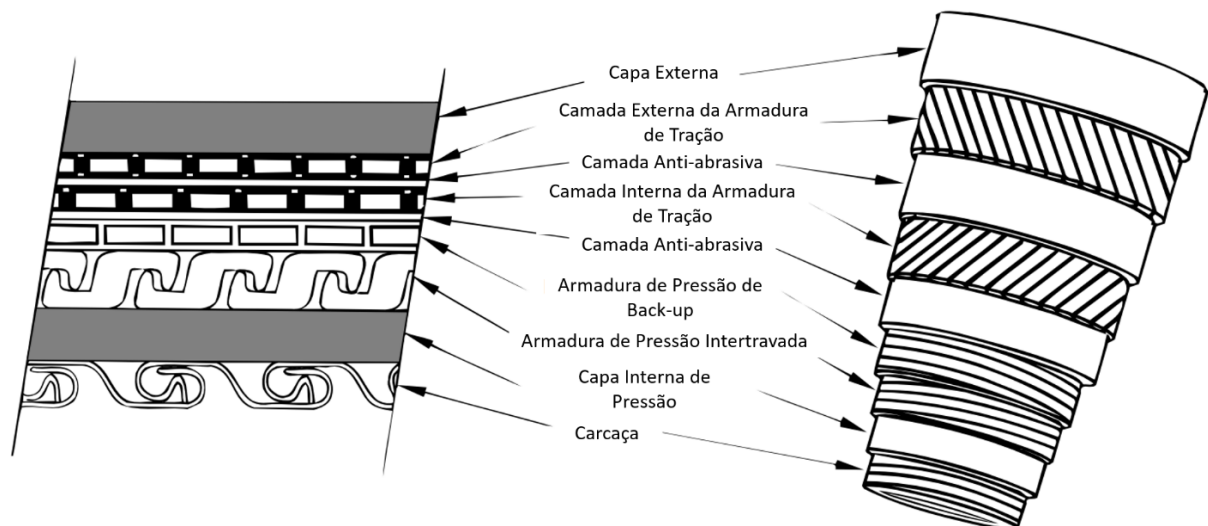


Figura 4 - Esquemático de um Riser Flexível Típico (API 17B, 2002)

As principais camadas (API 17B, 2002) podem ser definidas a seguir:

- Carcaça: Camada interna de perfis conectados que proporciona resistência ao colapso. Geralmente, São moldadas em perfil conforme apresentado na Figura 5:



Figura 5 – Perfil de Carcaça (API 17B, 2002)

- Camada de Pressão Interna: Camada interna que proporciona a manutenção da pressão de fluxo do líquido de trabalho. Em geral, costumam ser poliméricas. Há pesquisas que buscam integração dessa camada com materiais compósitos.
- Armadura de Pressão: Camada intertravada que suporta o carregamento da pressão na direção radial, advinda do fluxo de líquidos de trabalho. Para altas pressões, é utilizado uma camada de pressão de back-up, auxiliando a suportar carregamentos de maior magnitude. Podem ter diferentes perfis. São apresentados na Figura 6, exemplos de perfis comumente utilizados:

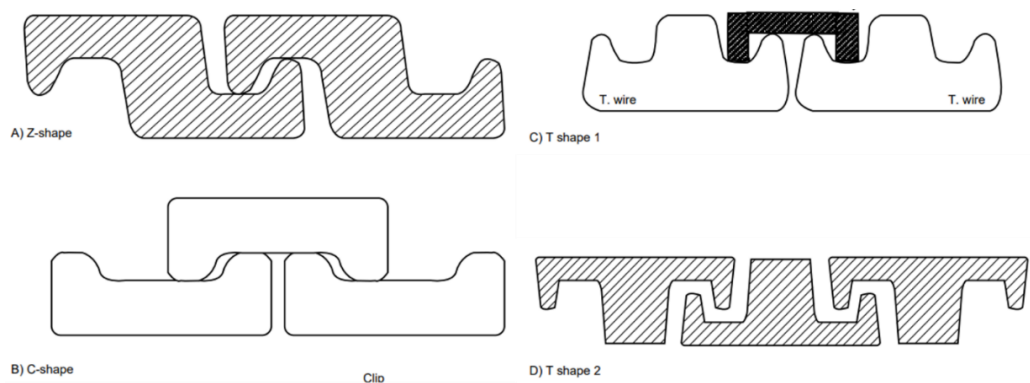


Figura 6 – Perfis dos Tipos Z, C e T de Armaduras de Pressão (API 17B, 2002)

- Armadura de Tração: Camada de fios metálicos, normalmente planos ou de seção circular em duas ou quatro camadas e em inclinação entre 20° a 60° . Para casos em que não há armadura de pressão, os fios são enrolados em 55° a fim de obter um balanceamento à torção e às cargas axiais.

- Capa Externa: Camada polimérica externa que tem como função a proteção do ambiente externo proporcionando integral proteção referente ao ambiente externo.

2.2. Umbilicais

Já os umbilicais são utilizados principalmente para Injeção e Serviços de fundo de poço como a injeção de produtos químicos através de mangueiras. São compostos também por conjuntos de cabos elétricos para monitoramento de parâmetros operacionais dos poços e mangueiras utilizadas para operar remotamente válvulas submarinas (Petrobras, 2015). A Figura 7

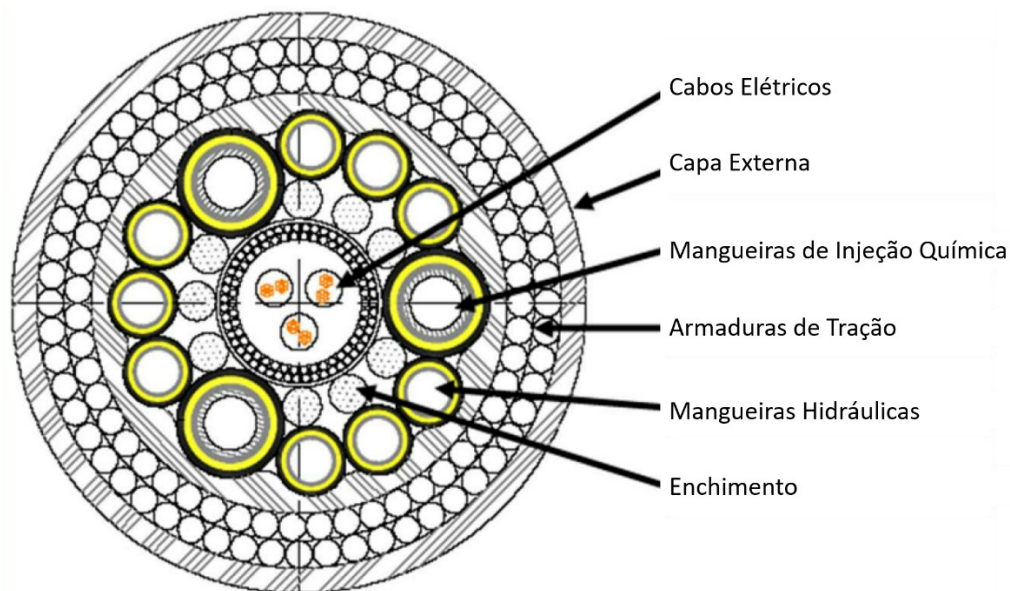


Figura 7 – Estrutura de Umbilical Genérico (Petrobras, 2015)

Dentre todas as diferenças entre os tipos de dutos, ambos têm o modo de instalação similar. Com as premissas de instalação respeitadas, pode-se garantir uma execução segura sem risco ao meio ambiente e aos colaboradores envolvidos.

3. Principais Acessórios

Neste capítulo, são apresentados os principais acessórios dos dutos flexíveis e umbilicais.

3.1. Conector / End Fitting

É a terminação de um duto flexível. É composto por um flange padronizado (API 17, 2002), com função de conexão entre tramos ou entre um tramo e um equipamento. A estrutura do conector convencional pode ser dividida conforme Figura 8 a seguir:

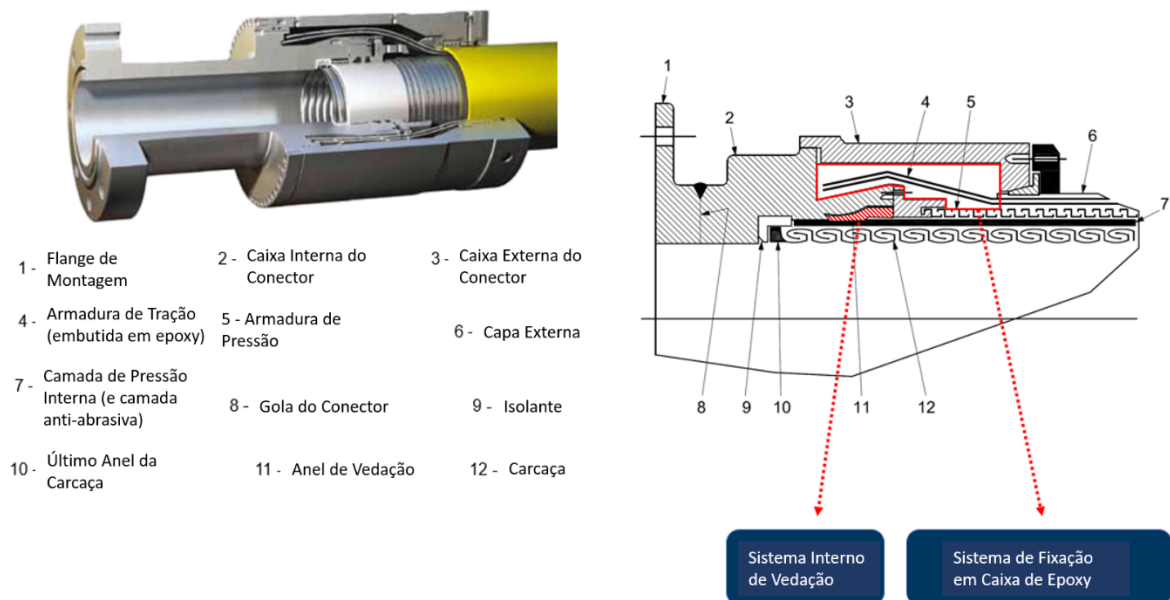


Figura 8 – Conector convencional (API 17B, 2002)

Os fios da armadura de tração são dobrados durante a montagem do acessório para dar acesso à camada de vedação interna polimérica do tubo flexível. Assim o sistema de vedação interno do acessório é instalado. Esquemático da montagem do conector conforme Figura 9 a seguir:

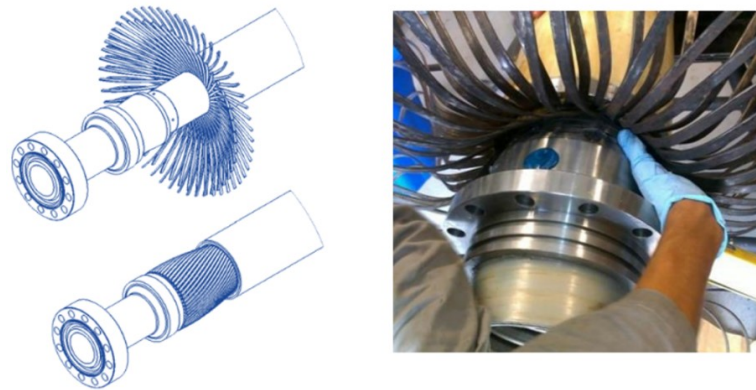


Figura 9 – Processo de montagem de conector convencional (Simeros, 2017)

A região de junção entre conector e linha flexível é considerada uma região crítica devido a necessidade de fragilização das camadas do duto para montagem do conector.

3.2. Enrijecedor / Bend Stiffener

É um acessório de linhas flexíveis que limita a curvatura, aplicado principalmente em risers. É utilizado logo após o conector de risers de topo, porém é visto também em risers intermediários (API 17B, 2002).

O acessório é feito de polímero e tem como principal função evitar os chamados efeitos de “kink”, que define o ato de dobrar excessivamente a linha, infringindo o mínimo raio de curvatura que a mesma suporta, gerando dano a estrutura.

O principal enrijecedor que é aplicado aos risers de topo fica instalado na extremidade conectada na base da unidade de produção. Já os enrijecedores aplicados aos risers intermediários ficam no meio da lâmina d’água, e são particularmente menores quando comparados aos enrijecedores de topo. Alguns ainda tem a capacidade de se deslocar pela linha, limitados por um colar batente, limitando assim a área de deslocamento do mesmo. A Figura 10 a seguir apresenta um típico enrijecedor de topo e um enrijecedor intermediário.



Figura 10 – Enrijecedor de Topo e Enrijecedor Intermediário (Balmoral, 2022)

3.3. Vértebra / Bend Restrictor

É outro acessório de linhas flexíveis que limita a curvatura, porém este é aplicado principalmente em flowlines. Há também casos de aplicação em umbilicais. Diferente dos enrijecedores, as vértebras são constituídas por um conjunto de colares de aço. Muitas vezes, esses são bipartidos para facilitar na montagem e desmontagem (API 17B, 2002).

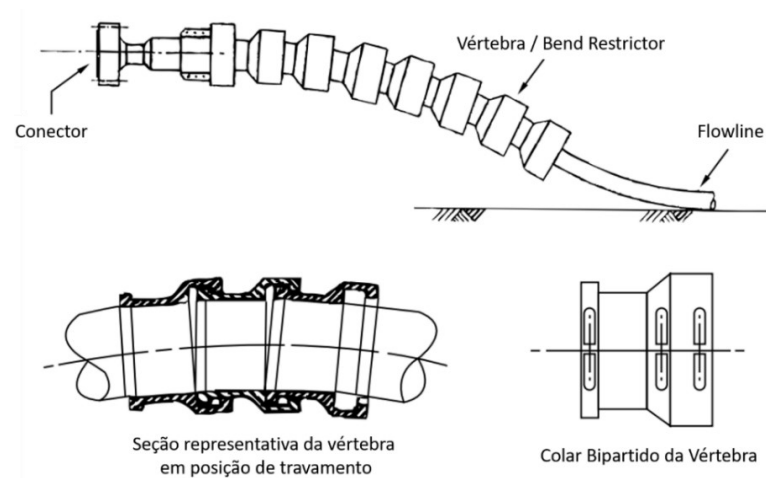


Figura 11 – Vértebra instalada, travada e colar bipartido (API 17B, 2002)

Conforme pode-se observar na Figura 11, a vértebra é montada como uma “armadura extra”, sobre a linha. Na seção representada, pode-se observar uma folga entre as unidades de colar, cuja qual permite gerar a curvatura vista no exemplo. A posição de travamento representa o limite máximo de curvatura permitido pela vértebra, evitando assim que o duto flexível atinja o raio de curvatura mínimo.

3.4. Módulo de Conexão Vertical

O Módulo de Conexão Vertical (MCV) é o elemento que faz a interligação entre a linha e a árvore de natal molhada, através da operação de conexão vertical. Considerando a análise, tem como características principais o pescoço de ganso (ou gooseneck) e o swível.

O pescoço de ganso, é um duto de aço curvado onde é fixo o duto flexível. Normalmente tem ângulo de 45° ou 60° e uma altura mínima do flange do pescoço de ganso, quando tem o MCV travado, de 3 metros (API 17B, 2002).

Já o swivel é um componente de ligação entre o gooseneck e o flange do conector da linha flexível. Esse componente em especial permite o movimento relativo de rotação entre eles, aliviando uma possível torção residual na linha devido ao desenrolamento durante o lançamento.

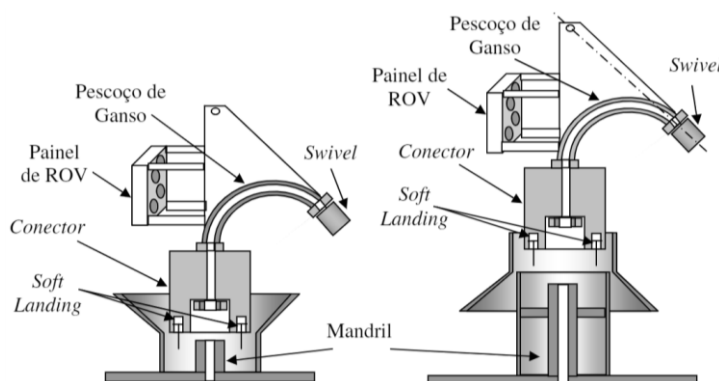


Figura 12 – MCV com formato funnel up e funnel-down (API 17B, 2002)

Conforme apresentado na Figura 12, o MCV pode ter dois formatos: funil invertido (funnel-down - com receptáculo na BAP) e funil (funnel-up – com receptáculo no equipamento). Não há impeditivo para a determinação do tipo de MCV, desde que compatível com o sistema submarino.

4. Tipos de Operações

A execução de operações submarinas envolvem diversos tipos de embarcações. As principais embarcações de lançamento de dutos flexíveis são definidas como Pipe Laying Support Vessels (PLSVs), conforme Figura e são responsáveis pelo lançamento de linhas, conexões submarinas e instalações complexas envolvendo, por exemplo, árvores de natal, módulos de conexão vertical, manifolds, dentre outros.



Figura 13 – PLSV Skandi Búzios (DOF, 2022)

Tais embarcações podem ainda ser divididas pela maneira que efetuam a instalação, podendo lançar dutos pela horizontal (pela popa do navio) e pela vertical (pela mesa central ou por um dos bordos da embarcação). A forma de definição vem da posição do equipamento chamado de tensionador, conforme Figura 14 a seguir:

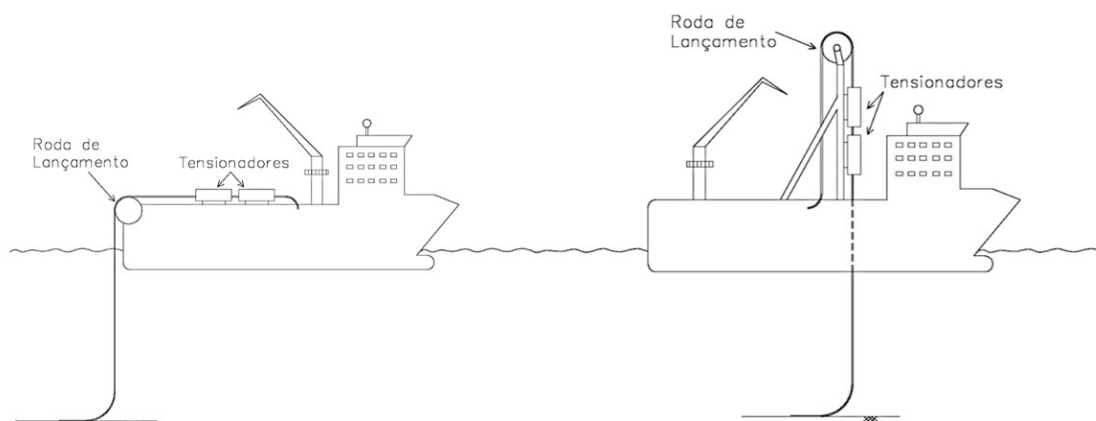


Figura 14 – Sistema de Lançamento Horizontal e Vertical (Rodrigues, 2016)

Além dos tensionadores, para as operações de lançamento são utilizados também guinchos e guindastes, conforme Figura 15 a seguir. Ambos ajudam a suportar a carga gerada durante o lançamento de linhas em momentos de passagem pela torre de lançamento, retirada das linhas da cesta ou bobina, dentre outros.



Figura 15 – Guindaste Subsea e Guincho de Iniciação (Haine, 2014)

Com auxílio de tais equipamentos e embarcações, é possível a concretização das operações submarinas. De forma genérica, as operações envolvendo dutos flexíveis podem ser divididas entre Pull-in e CVD.

4.1. Operação de Pull-in

A operação do Pull-in é responsável pela passagem da linha flexível do PLSV para a UEP. O duto é sustentado e conectado para posterior início de operação do poço de produção e pode ser lançado de 1ª ou 2ª extremidade.

O Pull-in de 1ª extremidade se diferencia na possibilidade de trabalho com cargas menores quando comparado ao Pull-in de 2ª extremidade. Isso se dá devido ao curto comprimento de catenária, onde o mesmo é dividido entre o PLSV e a UEP. Porém, de acordo com possíveis limitações do guincho da UEP, limitações dimensionais do sistema de lançamento do PLSV, ou ainda em lançamento de umbilicais onde o mesmo é pressurizado pelo próprio PLSV, utiliza-se ainda o Pull-in de 2ª extremidade com frequência.

A operação de Pull-in de 1ª geralmente antecede a operação de CVD de 2ª. Seguindo a mesma lógica, a operação de Pull-in de 2ª acontece posteriormente à CVD de 1ª. Para ambos os casos, a extremidade é a mesma a chegar na UEP, sendo composta por um enrijecedor para evitar infringimento de curvatura na

extremidade de topo, sendo a linha do tipo riser. A Figura 16 a seguir apresenta a troca de cabos em uma operação de Pull-in de 2ª extremidade:

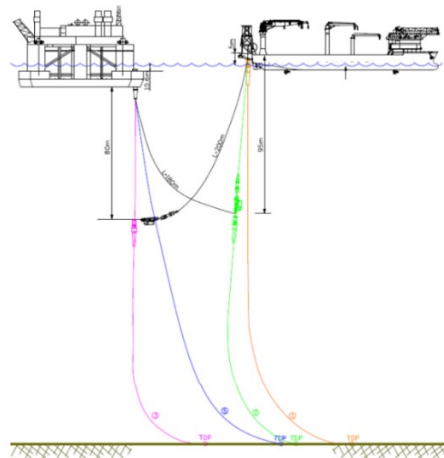


Figura 16 – Troca de Cabos em Operação de Pull-in de 2ª (Ferreira, 2013)

4.2. Operação de CVD

A Conexão Vertical Direta é definida como operação responsável pela conexão do duto flexível a Árvore de Natal Molhada. Assim como o Pull-in, pode ser subdividida entre de 1ª ou 2ª extremidade.

O Módulo de Conexão Vertical funciona como interface entre a linha e o equipamento submarino. O mesmo desce em anexo à linha, com auxílio do guindaste subsea, e mantendo o aproamento da embarcação, é feita a conexão no equipamento, os testes de selagem, e dada continuidade na operação de lançamento. A Figura 17 a seguir apresenta o momento de Overboarding, Verticalização e aproximação do equipamento ao poço.

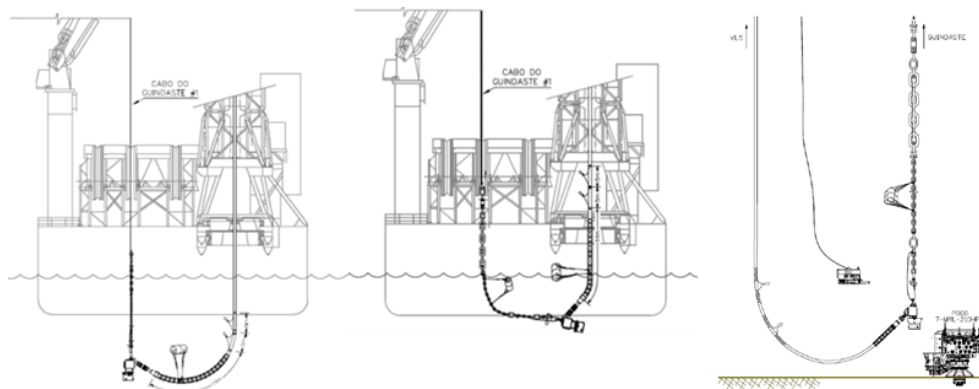


Figura 17 – Overboarding, Verticalização e Pré-Conexão do MCV (Ferreira, 2013)

5. Metodologia

Para tornar viável a conexão de linhas flexíveis em poços de produção, é necessário uso de acessórios conforme explícito nas seções anteriores a fim de garantir a integridade dos itens envolvidos. Porém, durante a instalação, apenas os acessórios de linha não são suficientes para garantir uma instalação sem danos aos componentes do sistema.

Dessa forma, é feito o uso de flutuadores para tornar possível a operação de conexão submarina. Tanto a distribuição como suas características são essenciais para viabilizar uma execução do projeto de interligação de linhas segura. A Figura 18 a seguir ilustra as componentes sem infringir a curvatura dos elementos e respeitando as premissas de instalação do sistema.

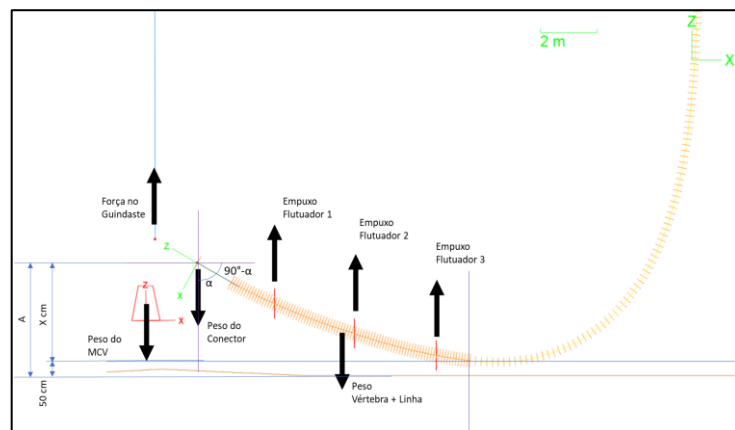


Figura 18 – Esforços em Operação de CVD de 1ª

Além das componentes de equilíbrio do sistema, é preciso verificar também os esforços mecânicos dos equipamentos envolvidos na operação. A metodologia utilizada para análise da operação de conexão vertical direta são apresentadas a seguir.

5.1. Definição de Flutuadores

Para fins da conexão vertical de 1ª extremidade, conforme Figura 18, foi possível definir considerando uma distribuição de 3 flutuadores equidistantes, os seguintes esforços:

- $P_{mcv} \rightarrow$ Peso do MCV;
- $P_{v+l} \rightarrow$ Peso da Linha com Vértice;
- $P_{con} \rightarrow$ Peso do Conector;
- $E_{fi} \rightarrow$ Empuxo dos Flutuadores 1, 2 e 3;
- $F_g \rightarrow$ Força Aplicada pelo Guindaste;

Já para o somatório dos momentos, é considerado como ponto de origem do sistema, o ponto de içamento onde é verificada a resultante do guindaste, dado fato que se torna o ponto de força a ser conhecida. Para definição dos momentos envolvidos, é considerado também:

- $D_{mcv} \rightarrow$ Distância do CG do MCV à Origem;
- $D_{v+l} \rightarrow$ Distância do CG de Linha e Vértice à Origem;
- $D_{con} \rightarrow$ Distância do CG do Conector à Origem;
- $D_{fi} \rightarrow$ Distância dos Flutuadores 1, 2 e 3 à Origem;

A quantidade de flutuadores utilizados foi definida considerando uma melhor distribuição do empuxo resultante a fim de evitar oscilações ao longo da vértebra, conforme equação (1) a seguir:

$$\sum M_x = P_{mcv}D_{mcv} + P_{con}D_{con} + P_{v+l}D_{v+l} + \sum_{i=1}^n E_{fi}D_{fi} = 0 \quad (1)$$

Já para início de definição do raio de curvatura ao qual a linha estará sujeita, é preciso ainda descobrir a força que o guindaste gera ao sistema. Para tal, utiliza-se o somatório de forças atuantes para a conexão vertical, conforme equação (2) a seguir:

$$\sum F_y = P_{mcv} + P_{con} + P_{v+l} + \sum_{i=1}^n E_{fi} + F_g = 0 \quad (2)$$

No capítulo 6, é possível visualizar a influência da configuração dos flutuadores durante a conexão vertical direta no comportamento dos itens do sistema. Tal configuração de flutuadores encontrada através das equações (1) e (2) permitiu posteriormente avaliar através das análises estática e dinâmica no Orcaflex, a viabilidade da interligação de equipamentos submarinos à linhas flexíveis analisando as condições físicas das estruturas.

5.2. Relação entre Flexão e Raio de Curvatura

Após a definição da configuração dos flutuadores e definição das forças e momentos atuantes nos sistema estático que tornam possível a instalação, o sistema dinâmico passa a ser o motivo principal de estudo.

Visto as condições ambientais gerando efeitos dinâmicos no sistema, emergem preocupações quanto a integridade dos acessórios em particular, de acordo com suas características. Os principais fatores limitantes considerando um cenário dinâmico se resume a análise da curvatura da linha flexível e da vértebra e o momento fletor da vértebra (por ter maior rigidez frente ao duto).

Analiticamente, os esforços de flexão quando dentro do regime elástico, considera o momento fletor como principal. O momento fletor está diferentemente associado a curvatura atingida.

Os esforços de tração e compressão são crescentes, conforme afastamento da superfície neutra (Beer, 1995), atingindo seu grau máximo no ponto externo da superfície do duto.

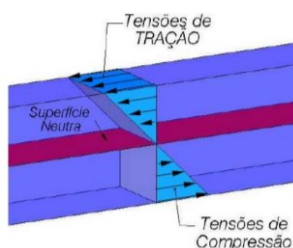


Figura 19 – Tensões de Tração e Compressão em Vigas (Beer, 1995)

A deformação na superfície externa do item fletido pode ser definido pela equação (3) a seguir:

$$\varepsilon_x = \frac{y}{\rho} \quad (3)$$

Onde:

- **y → distância da seção de esforços à seção neutra:** para linha flexível, trata-se do raio;
- **ε_x → deformação específica da seção de esforços:** para linha flexível, trata-se da deformação na superfície externa da linha;
- **ρ → raio de curvatura:** para linha flexível, trata-se da curvatura da linha.

A deformação por sua vez é relacionada a tensão conforme apresentado na equação (4) a seguir:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{M \cdot y}{I} \quad (4)$$

Ainda através da deformação, pode-se então encontrar a relação entre momento fletor e o raio de curvatura, apresentado na equação (5) a seguir:

$$\varepsilon_x = \frac{M \cdot y}{IE} = \frac{y}{\rho} \rightarrow \varepsilon_x = \frac{M}{\alpha} = \frac{1}{\rho} \quad (5)$$

Onde:

- **M → Momento Fletor;**
- **I → Momento de Inércia;**
- **E → Módulo de Elasticidade;**
- **α → Rigidez à Flexão.**

O α apresentado na equação (5) pode ser definido como a rigidez do produto ao esforço de flexão. Para produtos como dutos flexíveis e umbilicais, α é fornecido.

Obtida a seguinte relação, pode-se então verificar de tal maneira como é verificada a curvatura através dos esforços observados no sistema ao qual estão sujeitos os equipamentos envolvidos na conexão vertical direta. A equação (6)

apresenta a relação inversamente proporcional entre o momento fletor da estrutura com o raio de curvatura:

$$\frac{M}{\alpha} = \frac{1}{\rho} \rightarrow \rho = \frac{\alpha}{M} \quad (6)$$

5.3. Rigidez à Flexão

A rigidez é atribuída ao sistema de acordo com as características da linha e da vértebra. A linha tem uma curva de rigidez atribuída ao longo de toda a extensão da catenária. A vértebra por sua vez restringe a curvatura da linha até um determinado raio de curvatura, com uma rigidez desprezível antes do travamento, devido ao seu grau de liberdade.

A vértebra está alocada apenas nos primeiros metros da linha após a conexão entre a linha e equipamento submarino e o raio mínimo de curvatura da vértebra geralmente é maior ou igual ao raio mínimo da linha flexível, servindo como uma camada de segurança para a linha em sua área de aplicação.

Segundo Lopes (2005), a rigidez a curvatura da vértebra é muito baixa em raios maiores que o MBR atribuído a vértebra, sendo considerada praticamente nula. Enquanto o sistema não atinge o raio de curvatura da vértebra, a mesma não acrescenta ao sistema nenhum efeito de rigidez.

Ainda segundo Lopes (2005), ao atingir o raio de travamento, a vértebra tende a uma alta rigidez. Geralmente é feita de material metálico e sua rigidez tende a infinito, impedindo que o raio mínimo de curvatura ao longo de seu perímetro se aproxime do raio mínimo de curvatura da linha, podendo danificar a mesma.

Segundo Lopes (2005), um exemplo de resultado para momento vs raio de curvatura de um trecho de duto flexível e vértebra à temperatura de 5° é representado na Figura 20 a seguir.

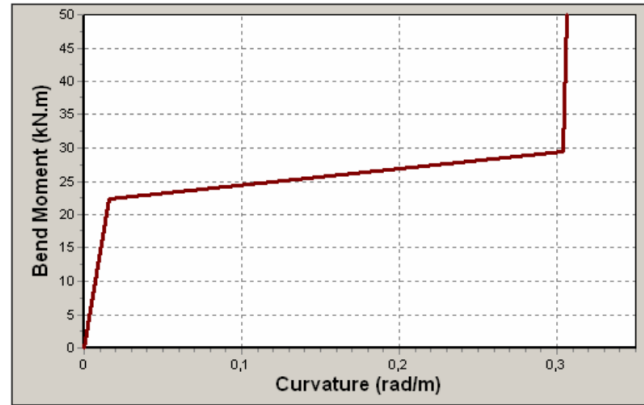


Figura 20 – Momento Fletor vs Curvatura da Vértebra (Lopes, 2005)

. Pode-se observar que ao atingir o raio de travamento da vértebra de 0,31 rad/m (em torno de 3,3 metros), a rigidez à flexão sofre uma elevação brusca. A rigidez em si poderia ser observada pela inclinação da reta.

Para fins de projeto em si, o cálculo da rigidez a flexão para itens como a vértebra e o conector é calculado conforme equação (7) a seguir segundo norma API 17B (2002). Para casos de vértebras polimétricas, o mesmo é fornecido pelo fabricante do acessório.

$$EI_{vértebra} = (2,07 \times 10^8) \times \frac{\pi}{4} \left(\left(\frac{D_{ext}}{2} \right)^4 - \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^4 \right) \quad (7)$$

Porém, para fins da modelagem, a área de aplicação da vértebra foi modelada de forma a atribuir algumas características da linha e da vértebra aos mesmos elementos de linha, sendo uma estrutura homogênea da modelagem. Na área da vértebra, foi atribuído a massa de ambas as estruturas, considerando o diâmetro maior da vértebra e a rigidez a flexão do duto, já que busca-se viabilizar a operação sem o travamento da vértebra.

Através das equações (3), (4), (5) e (6) é possível verificar a relação entre a curvatura e momento fletor. Durante as simulações no Orcaflex, deve ser possível então observar a relação inversamente proporcional encontrada na equação (6) da diminuição da curvatura e do aumento do momento fletor da estrutura em análise.

5.4. Simulações no Orcaflex

As simulações de operações subsea e execução de operações submarinas são desenvolvidas através do programa OrcaFlex, desenvolvido pela Orcina. A ferramenta permite fazer análises estáticas e dinâmicas envolvendo equipamentos submarinos, dutos rígidos e flexíveis de unidades marítimas de produção, dentre outros.

As linhas são representadas no OrcaFlex por um modelo de massa concentrada. Ou seja, a linha é modelada como uma série de 'nós' com massa atribuída, unidos por 'molas' sem massa que são chamadas de segmentos, formando uma espécie de 'colar'. Cada segmento representa um pequeno pedaço da linha, cujas propriedades (massa, empuxo, arrasto etc.) são agrupadas para fins de modelagem, nos nós em suas extremidades. Abaixo, a Figura 21 apresenta um exemplo de uma linha que vai de uma embarcação até uma bóia.

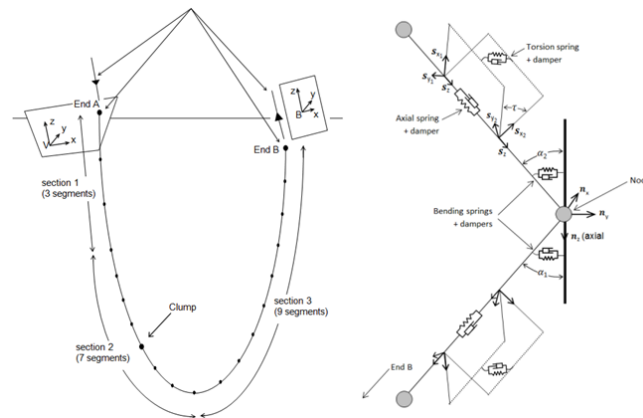


Figura 21 – Discretização da Linha por Elementos (Orcina, 2008)

Através da ferramenta, pode-se dividir a linha de instalação em várias seções consecutivas definidas previamente à simulação. Para cada seção, define-se o comprimento, o tipo de linha de que é feita e o número de segmentos em que deve ser dividida para fins de modelagem. Uma linha reúne uma quantidade de propriedades como por exemplo para o nosso caso um diâmetro, massa por unidade de comprimento, rigidez de flexão. A Figura 22 a seguir ilustra a discretização do trecho da vértebra e da linha, respectivamente.

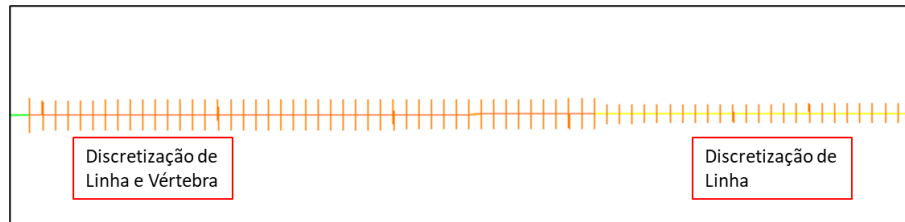


Figura 22 – Discretização de Linha e Vértebra

Conforme visto na instalação que há a inclusão de diversos equipamentos, podem ser definidos anexos a fim de representar itens conectados à linha. Por exemplo, os acessórios podem ser usados para modelar pesos de conectores, flutuadores gerando empuxo, MCV a ser instalado gerando pesos, dentre outros.

As extremidades de uma linha são definidas como extremidade A e B e cada extremidade pode ser independentemente livre, fixa, ancorada ou conectada a uma embarcação, bóia, linha, etc. A numeração das partes de uma linha é sempre feita a partir da extremidade A.

O proposto para o projeto em questão trata-se a conexão vertical direta de 1ª extremidade, conforme apresentado anteriormente no capítulo 4.2. O modelo definido para a simulação da operação no OrcaFlex é composto pelos seguintes elementos, conforme pode ser visto na Figura 23 a seguir:

- Line - o duto flexível ou umbilical;
- Link - o cabo do guindaste do PLSV;
- 3D Buoy - os flutuadores instalados na linha;
- 6D Buoy - o MCV;

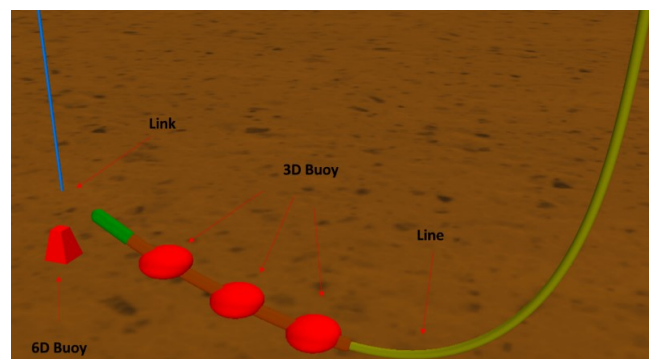


Figura 23 – Exemplo de Elementos de Linha

Para a definição do modelo da simulação, os itens da simulação e suas características foram dados como inputs conforme a seguir:

- Módulo de Conexão Vertical (MCV);
- Linha Flexível de Gás Lift;
- Conector;
- Vértebra.

Apesar do lançamento de linhas flexíveis iniciar com o overboarding da linha e do módulo de conexão vertical, para fins de análise, apenas são considerados como esforços a serem detalhados na análise as seguintes etapas da instalação:

A 1ª etapa da análise se inicia logo após o início do assentamento do equipamento, ou seja, o mesmo está conectado e considera-se que a seguir, o módulo de conexão vertical será sustentado pela árvore de natal molhada ao fundo precisando esse estar verticalizado. A linha por sua vez ainda encontra-se sustentada pela embarcação de lançamento.

Busca-se nesse primeiro momento principalmente a curvatura da vértebra e da linha flexível. É possível fazer tal verificação apenas através da análise estática. Isso se deve ao fato de não haver variação das cargas do sistema.

Já na 2ª etapa, são aplicadas variação no comprimento do cabo do guincho na extremidade B (próximo a lâmina d'água) nos estágios 1 e 3.

Para o estágio 1, considera-se uma variação de comprimento que represente a altura de onda (HS). Para operações submarinas em condições seguras, a altura de onda normalmente encontra-se entre 1,5 a 2,5 metros. De tal forma, deve-se buscar analisar as operações sob ambas as configurações, onde quanto maior a altura de onda, pior o estado de mar.

Já para o estágio 3, considera-se uma variação de comprimento suficiente para o assentamento da linha no leito marinho. Para a configuração de catenária escolhida para os casos 1 e 2, um comprimento de linha a partir de 6 metros é suficiente para o toque da linha no leito. A Figura 24 a seguir apresenta o efeito da variação e os estágios da simulação dinâmica:

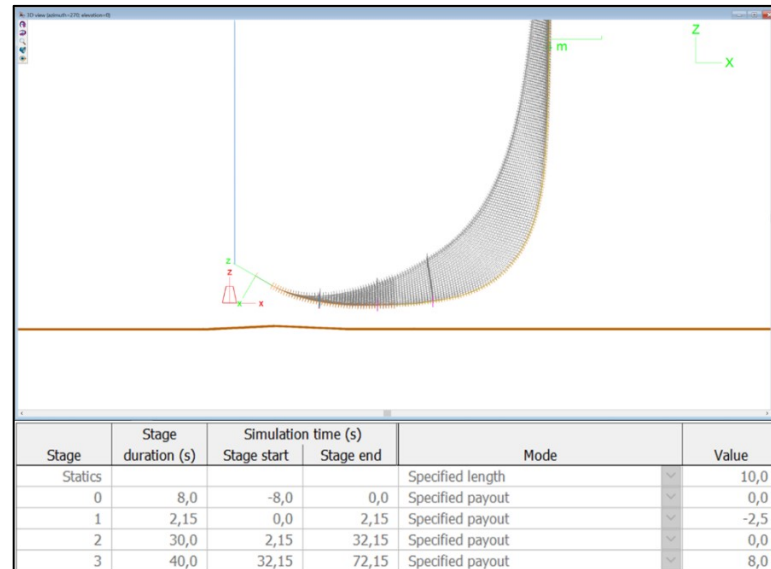


Figura 24 – Sombra de Variação e Estágios de 0 a 3

Para o segundo momento, busca-se definir as curvaturas máximas da linha e da vértebra durante a variação, assim como o momento fletor da vértebra.

Não são aplicadas variações ao guindaste que sustenta o MCV. O mesmo faz uso de um heave compensator, que mantém o equipamento estável compensando todo efeito dinâmico externo.

O comportamento e os resultados obtidos após as simulações são devido às características atribuídas a cada elemento do sistema como a rigidez atribuída e aos carregamentos de tração e compressão absorvidos por cada elemento discretizado da linha e da vértebra. Com tais informações obtidas através das análises estática e dinâmica, torna-se possível atestar a viabilidade da operação de instalação.

6. Resultados Obtidos

O caso proposto para a análise detalha os principais esforços considerando uma instalação de uma linha de injeção de gás, ligando o poço de Carioca Norte ao FPSO Cidade de Caraguatatuba, localizada na Bacia de Santos, representado na Figura 25 a seguir:



Figura 25 – FPSO Cidade de Caraguatatuba (Petrobras, 2016)

A plataforma trata-se de um FPSO ancorado em uma lâmina d'água com cerca de 2200 metros de profundidade, encontra-se localizado no campo de Lapa a aproximadamente 270km da costa do Estado de São Paulo. O mesmo tem capacidade de processamento em cerca de 100 mil barris/dia e armazenamento de 1,6 milhão de barris de óleo (Petrobras, 2016).

6.1. Itens do Modelo

Conforme visto anteriormente, será considerada uma análise vertical direta para estrutura flexível de injeção de gás. Para tal, se faz necessário utilização de informações referentes ao módulo de conexão vertical, conector, vértebra e linha flexível.

6.1.1. Características do Duto Flexível

Visando definir a linha flexível no modelo analisado, a característica mais importante a ser considerada é o raio mínimo de curvatura da linha, o MBR (Minimum Bending Radius). Além desta, as demais características da linha são apresentadas conforme Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 – Dados da Estrutura Flexível em Análise

Estrutura de IG - 152.2010		
Comprimento	2152	[m]
Peso no Ar Cheio	165,28	[kg/m]
Peso no Ar Vazio	144,11	[kg/m]
Peso na Água Cheio	95,19	[kg/m]
Peso na Água Vazio	74,01	[kg/m]
Diâmetro Externo	0,29509	[m]
Diâmetro Internto	0,1622	[m]
Diâmetro Nominal	6	["]
MBR de Instalação	2,09	[m]
Rigidez à Flexão	48,9	[kN.m ²]

6.1.2. Características dos Acessórios

Já os acessórios da linha podem ser definidos como vértebra (ou bend restrictor) e conector (end fitting). Suas características são apresentadas conforme Tabelas 2 e 3 a seguir:

Tabela 2 – Dados da Vértebra em Análise

Vértebra Bipartida - BR1522510-00-10		
Comprimento	8912	[mm]
Peso na Água Vazio	2714,4	[kg/m]
Peso no Ar Vazio	3120	[kg]
Diâmetro Externo	668	[mm]
Diâmetro Internto	538	[mm]
Diâmetro de Contato	475	[mm]
MBR de Travamento	4,14	[m]
Momento Fletor Admissível	70	[kN.m]
Força Cortante Admissível	24,5	[kN]

Tabela 3 – Dados do Conector em Análise

Conector - EF1522510-00-07		
Comprimento	1374	[mm]
Peso na Água Vazio	1189	[kg/m]
Peso no Ar Vazio	1367	[kg]
Diâmetro Externo	254	[mm]
Diâmetro Interno	152,2	[mm]
Diâmetro de Contato	535	[mm]

6.1.3. Características do Módulo de Conexão Vertical

Por fim, as principais características para análise do módulo de conexão vertical direta – equipamento submarino o qual faz a interface entre a linha/conector e árvore de natal conforme apresentado nas seções 3.4 e 4.2 – incluem também as referências de posição como altura, distância do flange ao hub, dentre outras coordenadas de instalação prevista em projeto. As mesmas são apresentadas na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4 – Dados do Módulo de Conexão Vertical em Análise

Módulo de Conexão Vertical - Anular		
Peso do MCV	6752	[kg]
Ângulo do Gooseneck	60	[°]
Altura do CG	1,341	[m]
Altura do Flange	1,956	[m]
Altura do Olhal de Içamento	2,789	[m]
Distância do Flange ao Centro da Base	1,851	[m]
Distância do CG ao Centro da Base	0,172	[m]
Distância do Olhal ao Centro da Base	0,36	[m]
LDA do MCV ao Solo	2150,1	[m]

6.1.4. Discretização dos Elementos de Linha e Vértebra

A discretização do modelo, conforme introduzido no capítulo 5.3 é dividida por elementos de massa interligados. É possível verificar na Figura 29 a linha flexível dividida em 6 segmentos com acréscimo de 1 elemento como o conector.

Os segmentos mais próximos do conector e do equipamento submarino são os que sofrem maior deformação durante as análises. Tal fato nos induz a definir uma malha de elementos mais refinada, onde foi definido o comprimento do trecho, a quantidade de segmentos e a distância de cada segmento entre si.

Já os segmentos mais afastados da extremidade próxima ao equipamento submarino sofrem menos com o efeito de curvatura e, conseqüentemente absorvem menos esforços mecânicos de tração e compressão. A fim de ter um ganho computacional, a malha para os segmentos mais distantes dos pontos de maiores tração e compressão são menos refinados e, conseqüentemente menor número de segmentos. A Figura 26 apresenta a discretização dos elementos do sistema:

No.	Line type	Section length (m)	Expansion factor	Target segment length (m)	Number of segments	Clash check	Cumulative values	
							Length (m)	Segments
1	152.2510-DR-4041-6	1824,0	~	4,0	456	<input type="checkbox"/>	1824,0	456
2	152.2510-DR-4041-6	160,0	~	2,0	80	<input type="checkbox"/>	1984,0	536
3	152.2510-DR-4041-6	100,0	~	1,0	100	<input type="checkbox"/>	2084,0	636
4	152.2510-DR-4041-6	20,0	~	0,5	40	<input type="checkbox"/>	2104,0	676
5	152.2510-DR-4041-6	40,0	~	0,2	200	<input type="checkbox"/>	2144,0	876
6	152.2510-DR-4041-6	8,912	~	0,2	45	<input type="checkbox"/>	2152,91	921
7	Conector	1,374	~	~	1	<input type="checkbox"/>	2154,29	922

Figura 26 – Discretização de trechos de linha e conector

6.2. Pré-definição dos Flutuadores

Considerado a metodologia conforme apresentado no capítulo 5.1 e as características dos itens conforme apresentado nos capítulos 6.1.1 a 6.1.3, foi possível criar um modelo de cálculo de momentos.

A fim de definir o empuxo inicial aplicado no modelo do Orcaflex, pode-se estimar inicialmente verificando os valores de forças atuantes e momentos conforme Tabelas 5 e 6 a seguir:

Tabela 5 – Forças Atuantes no Sistema

Σ Forças			
Fm _{cv}	66,24	[kN]	Peso do MCV
F _{con}	0,013	[kN]	Peso do Conector
F _{ver}	34,95	[kN]	Peso da Vértebra + Linha
F _{guin}	50,60	[kN]	Força do Guindaste
F _{eng}	50,60	[kN]	Força no "Engaste"

Tabela 6 – Momentos Atuantes no Sistema

Definição	Σ Momentos no Engaste		Σ Momentos no Guindaste		Unidade
Momento do MCV	Mmcv→eng	657,58	Mmcv→guin	12,45	[kN.m]
Momento do Conector	Mcon→eng	0,70	Mcon→guin	0,029	[kN.m]
Momento da Vértebra	Mver→eng	134,87	Mver→guin	255,87	[kN.m]
Momento do Engaste	Mguin→eng	595,92	Meng→guin	595,92	[kN.m]
Momento no Guindaste	Meng	1389,07	Mguin	864,28	[kN.m]

Conforme pode ser visto na Tabela 6, foi considerado um “engaste”, o mesmo pode ser visto na Figura 24 e para fins de simplificação de cálculos, foi considerado ao final da vértebra. Outras premissas determinadas foram a vértebra com o ângulo de 60° (conforme ângulo do gooseneck do MCV), em seu estado neutro, ou seja, com um raio de curvatura nulo e ainda considerando todas as bóias dentro do perímetro da vértebra.

Obtidos os valores para as forças, calculando os valores de momentos para os pontos fixos do sistema (guindaste e engaste) e definindo a distância mínima do 1º flutuador ao conector de 3 metros, foi possível estimar os empuxos para os 3 flutuadores conforme Tabela 7:

Tabela 7 – Definição Teórica de Flutuadores

Definição de Flutuadores - Teórico			
Nf	3	[-]	Quantidade de Flutuadores
Meng	1389,07	[kN.m]	Momento no Engaste a ser vencido
Mguin	864,28	[kN.m]	Momento no Guindaste a ser vencido
Df1→olhal	1,43	[m]	Distância do Olhal ao 1º Flutuador
Dfn→Dfn-1	3	[m]	Distância entre Flutuadores
Empuxo 1	1500	[kN]	Empuxo dos Flutuador 1
Empuxo 2	1500	[kN]	Empuxo dos Flutuador 2
Empuxo 3	413	[kN]	Empuxo dos Flutuador 3
Mres	2253,43	[kN.m]	Momento Resultante Flutuadores
Dif	0	[kN.m]	Diferença de Momentos

A estimativa de empuxo dos flutuadores não segue a realidade, dado fato dos acessórios presentes no mercado terem seu empuxo definido de fábrica. Consultando os flutuadores catalogados conforme existente no mercado, definiu-se os valores de empuxo encontrando os seguintes resultados conforme Tabela 8:

Tabela 8 – Definição com Flutuadores Catalogados

Definição de Flutuadores - Flutuadores Catalogados			
Nf	3	[-]	Quantidade de Flutuadores
Meng	1389,07	[kN.m]	Momento no Engaste a ser vencido
Mguin	864,28	[kN.m]	Momento no Guindaste a ser vencido
Df1→olhal	1,43	[m]	Distância do Olhal ao 1º Flutuador
Dfn→Dfn-1	3	[m]	Distância entre Flutuadores
Empuxo 1	1376	[kN]	Empuxo dos Flutuador 1
Empuxo 2	1345	[kN]	Empuxo dos Flutuador 2
Empuxo 3	871	[kN]	Empuxo dos Flutuador 3
Mres	2567,03	[kN.m]	Momento Resultante Flutuadores
Dif	313,68	[kN.m]	Diferença de Momentos

Como pode-se observar, a diferença de momento não atingiu o valor nulo, porém foi alcançada a verticalização do MCV na análise estática do Orcaflex com distribuição dos flutuadores pela vértebra. A verticalização é condição necessária para a operação, visto necessidade da conexão ser vertical.

6.3. Análise Estática da CVD de 1ª Extremidade

A análise estática neste trabalho tem como principal função verificar a configuração de pré-assentamento do equipamento submarino ao hub conforme descrito no capítulo 5.3. A mesma torna possível a análise dinâmica.

Para fins de análise, além das principais características mecânicas e dimensionais da linha flexível e dos acessórios presentes no sistema (conforme Tabelas 1, 2 e 3), os parâmetros da Tabela 4 referentes ao módulo de conexão vertical são cruciais para determinação da posição do equipamento durante a conexão.

O modelo estático segue as seguintes premissas importantes para posterior continuidade da análise dinâmica:

- Distância de 0,5m ou mais da corcova da linha ao leito marinho a fim de evitar o choque com o leito marinho durante a conexão;
- Módulo de Conexão Vertical com angulação de -0,5 a 0,5 graus a fim de respeitar o ângulo do gooseneck do MCV;

- Módulo de Conexão Vertical com coordenada y da base do equipamento com valor menor que 0,1 metros;
- Curvatura Máxima da Linha respeitada, acima do MBR de Instalação da linha;
- Curvatura Máxima da Vértebra respeitada, acima do MBR de Travamento.

Tais premissas juntas tornam possível a verticalização do equipamento e deve ser respeitada antes que seja dado segmento ao estudo de caso dinâmico.

Como forma de verificação, foi feita a simulação estática conforme apresentado na Figura 27, sem considerar os flutuadores. Definido o comprimento da vértebra, não é possível encontrar uma configuração onde o equipamento verticalize, a estrutura fique acima de 0,5m e com uma curvatura considerável, próximo às curvaturas limites dos equipamentos.

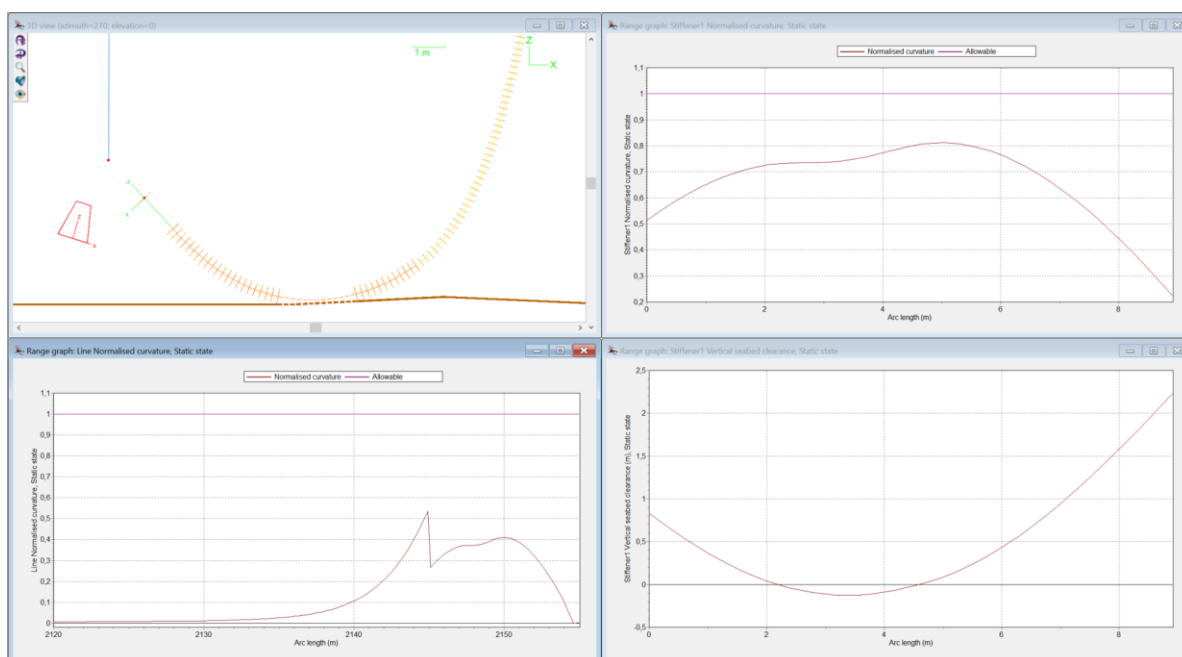


Figura 27 – Resultados da Análise Estática Sem Flutuadores

Concluindo que há a necessidade de flutuadores, foi decidida a utilização de dois casos de estudo. Além das premissas indicadas, o primeiro caso considera também a distribuição dos flutuadores apenas sobre a vértebra, consideração a qual foi repetida também no método de estimativa de flutuadores criado. Já o

segundo caso considera, além das premissas acima, a distribuição livre dos flutuadores ao longo da vértebra e da linha. Ambos os casos 1 e 2 são apresentados a seguir.

6.3.1. Caso Estático 1: Flutuadores na Vértebra

Inicialmente para o caso 1 estático, foi verificada a soma de momentos considerando o empuxo dos flutuadores. Posteriormente, os empuxos foram alterados conforme os itens disponíveis no mercado. Por fim, a configuração foi simulada obtendo os seguintes resultados, demonstrando a composição do sistema e a profundidade de cada trecho da linha conforme aumenta a lâmina d'água, vide Figura 28 a seguir:

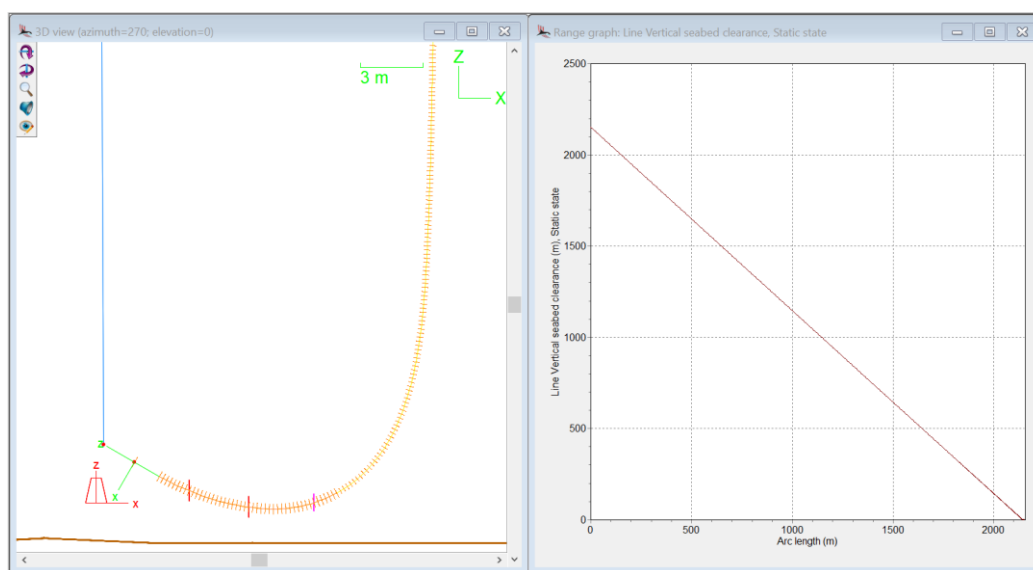


Figura 28 – Pré-assentamento e profundidade da linha - Caso 1

A configuração da Figura 28, além de apresentar o MCV verticalizado e apresentar a profundidade da linha por metro de linha lançado, apresenta os flutuadores distribuídos na vértebra conforme foi indicado anteriormente.

A primeira premissa para o caso estático citada no primeiro tópico do capítulo 6 é respeitada conforme observado na Figura 29 a seguir, onde a distância ao leito é maior que 0,5m do ponto mais baixo da linha, atingindo uma altura de 1,5m.

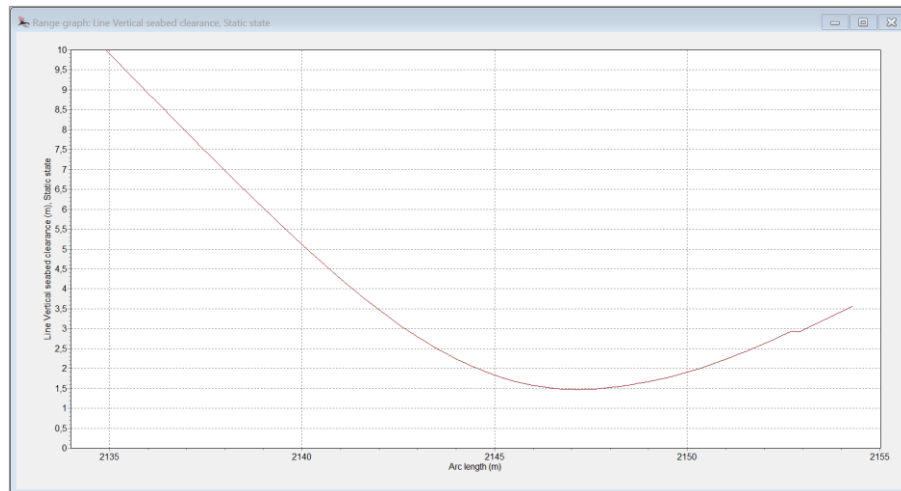


Figura 29 – Altura da extremidade de fundo - Caso 1

Posteriormente é preciso verificar as condições dos acessórios. Para o caso estático, verifica-se os dois últimos tópicos conforme apresentado no início do capítulo 6. A Figura 30 a seguir apresenta as curvas normalizadas. Através das curvas, é possível verificar que tanto para a vértebra quanto para a linha, o MBR (Minimum Bending Radius) citado nas Tabelas 1 e 2, foram respeitados.

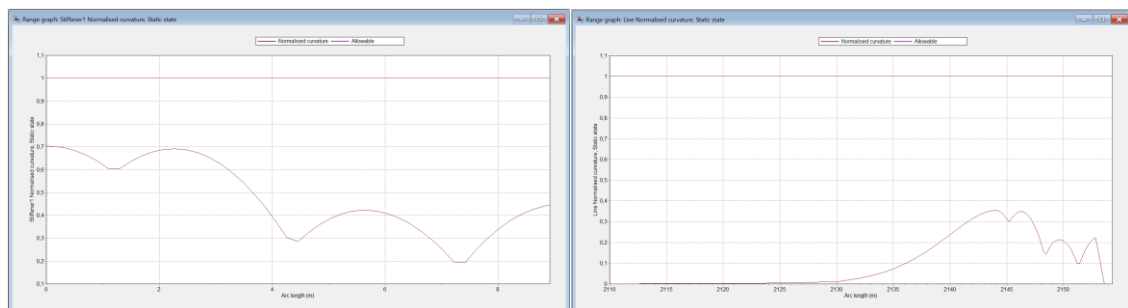


Figura 30 – Curvatura de Vértebra e Linha Normalizada - Caso 1

Segundo os resultados, foi validada a configuração de flutuadores. Após a validação estática, o caso 1 deve ser fixado como ponto inicial para a análise dinâmica, conforme é apresentado posteriormente.

6.3.2. Caso Estático 2: Flutuadores na Vértebra e Linha

Para o caso 2, considera-se a amarração de flutuadores ao longo também do corpo da linha flexível onde não há vértebra. Novamente, os empuxos foram alterados conforme itens disponíveis no mercado. Como o estudo para determinação inicial de flutuadores considera a distribuição unicamente ao longo da vértebra, o mesmo não é utilizado para este caso para estimativa de empuxo e de posição.

A configuração foi simulada obtendo os seguintes resultados, demonstrando a composição do sistema e a profundidade de cada trecho da linha conforme aumenta a lâmina d'água, vide Figura 31 a seguir:

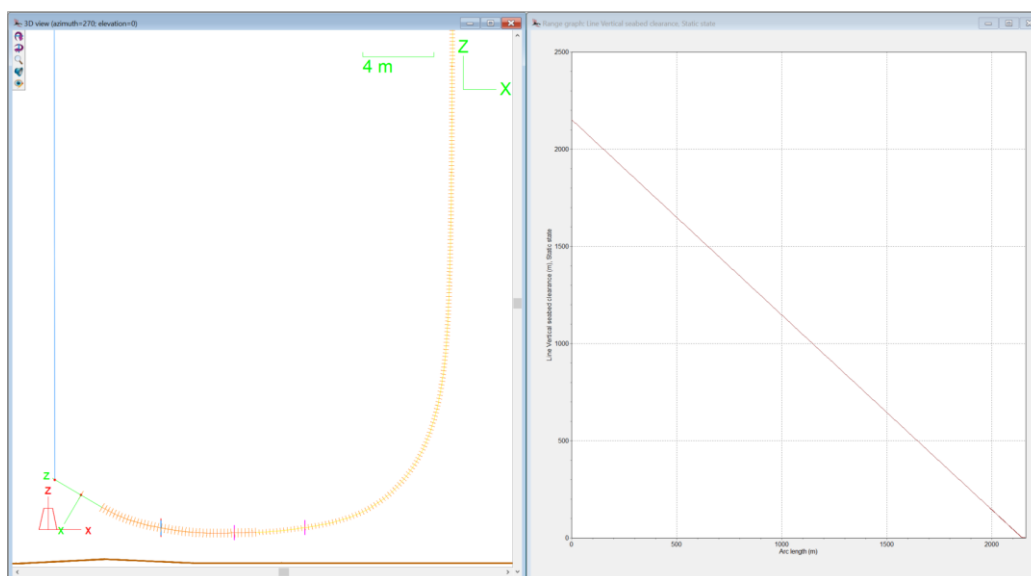


Figura 31 – Pré-assentamento e profundidade da linha - Caso 2

A configuração apresentada na Figura 31 apresenta o MCV verticalizado e a profundidade da linha por metro de linha lançado. Pode-se observar que a nova configuração do sistema apresenta os flutuadores distribuídos na linha e na vértebra.

A primeira premissa para o caso estático citada no primeiro tópico do capítulo 6 é respeitada conforme observado na Figura 32 a seguir onde a distância ao leito é maior que 0,5m do ponto mais baixo da linha, atingindo uma altura de 1,5m.

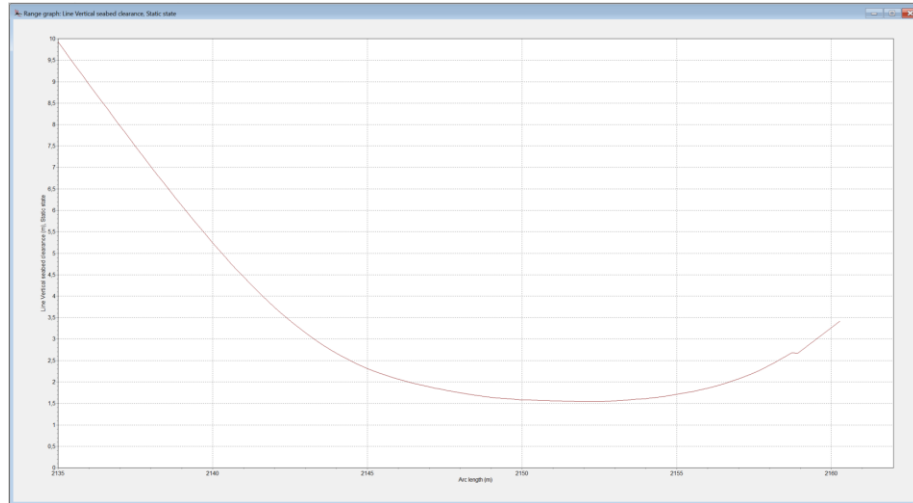


Figura 32 – Altura da extremidade de fundo - Caso 2

São verificadas as condições dos acessórios. As duas últimas premissas apresentadas no início do capítulo 6 são respeitadas e pela Figura 33 a seguir, apresenta-se as curvas normalizadas. É possível verificar que tanto para a vértebra quanto para a linha, o MBR (Minimum Bending Radius) citado nas Tabelas 1 e 2, também foi respeitado.

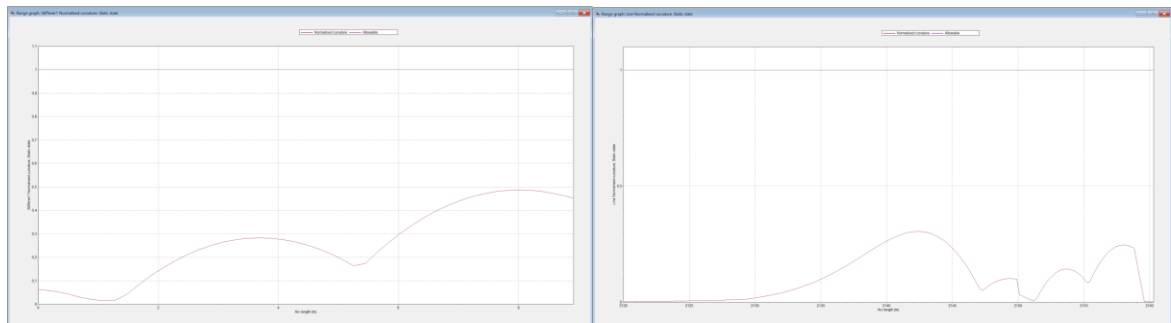


Figura 33 – Curvatura de Vértebra e Linha Normalizada - Caso 2

O caso 2 também foi validado conforme os tópicos citados anteriormente no início do capítulo 6. Após a validação estática, o caso 2 deve ser fixado como ponto inicial para a análise dinâmica, conforme será apresentado posteriormente.

6.4. Análise Dinâmica da CVD de 1ª Extremidade

Conforme indicado no capítulo 6.3, a análise dinâmica considera como ponto de partida a configuração de pré-assentamento do equipamento submarino ao hub de conexão.

Para fins de análise, as principais características mecânicas e dimensionais da linha flexível e dos acessórios presentes no sistema conforme Tabelas 1, 2, 3 e 4, continuam sendo cruciais para determinação dos esforços mecânicos e das condições físicas dos equipamentos durante a simulação dinâmica da operação.

Diferente do modelo estático, para a análise dinâmica são definidas algumas condições de operação a serem simuladas ao longo de um tempo pré determinado. A variação aplicada ao sistema possibilita a verificação dos elementos analisados quando submetidos, por exemplo a uma tração ou uma compressão. O ato de induzir o tracionamento ou compressão de uma linha (ou a vértebra) ao longo do tempo nos permite verificar as cargas atuantes sob tais condições.

Consequentemente, tendo as cargas as quais são submetidas as estruturas, torna-se possível determinar se a execução do projeto é viável ou não, em um ponto de vista teórico da operação.

Para os casos 1 e 2 dinâmicos, foram aplicadas as seguintes premissas:

- Variação de altura de onda de limites 1,5m e 2,5m, onde o limite superior considera o pior estado de mar possível;
- Variação do comprimento de linha de 8m a 12m, finalizando a análise com parte da linha assentada ao leito marinho;
- Verificação do Momento no ponto entre o Conector e a Linha Flexível;
- Verificação do Momento Fletor atuante sobre a Vértebra da Linha;
- Curvatura Máxima da Linha respeitada, acima do MBR de Instalação da linha;
- Curvatura Máxima da Vértebra respeitada, acima do MBR de Travamento.

Conforme Figura 34 a seguir, pode-se observar os 4 estágios definidos pelo usuário utilizado para ambos os casos de $HS=2,5m$. Foi determinado o tempo para cada estágio e a variação do comprimento de linha lançada:

Stage	Stage duration (s)	Simulation time (s)		Mode	Value
		Stage start	Stage end		
Statics				Specified length	10,0
0	8,0	-8,0	0,0	Specified payout	0,0
1	2,15	0,0	2,15	Specified payout	-2,5
2	30,0	2,15	32,15	Specified payout	0,0
3	40,0	32,15	72,15	Specified payout	8,0

Figura 34 – Variação de Estágios de 0 a 3 em $HS=2,5m$

Através dos parâmetros definidos anteriormente e no capítulo 5.3, pode-se então gerar as análises dinâmicas a partir dos casos estáticos previamente citados.

6.4.1. Caso Dinâmico 1: Flutuadores na Vértebra

Para a análise dinâmica, parte-se da configuração após análise estática conforme visto anteriormente. A mesma é definida de acordo com as premissas explícitas no tópico 6.4.

Na Figura 35 a seguir, é possível visualizar três momentos distintos da análise: o instante inicial obtido através da análise estática, o instante de maior momento sobre a interface do conector e da linha e o momento final de assentamento da linha no leito.

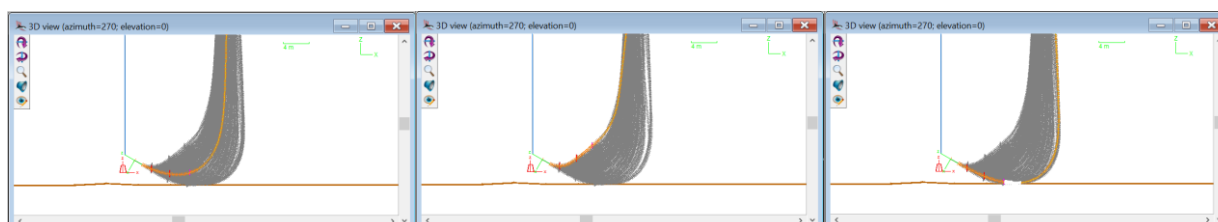


Figura 35 – Início, maior amplitude e assentamento - Caso 1

Feita a simulação, é possível verificar a curvatura atingida ao longo do tempo durante a simulação dinâmica tanto para a linha, como para a vértebra. Diferente

da verificação estática, no caso dinâmico é verificado a curvatura atingida ao longo do tempo entre as etapas de pré instalação do MCV até o assentamento da linha no leito com o MCV já conectado.

Na Figura 36, com um HS de 1,5m, pode-se verificar que não há o infringimento da curvatura. É possível verificar, porém que acontece o infringimento do MBR da linha flexível no momento final da instalação para um HS de 2,5m na Figura à direita, através da curva normalizada. Caso para a análise fosse suficiente apenas a verificação de curvatura da linha, o limitante da operação seria principalmente o estado de mar durante a execução do projeto.

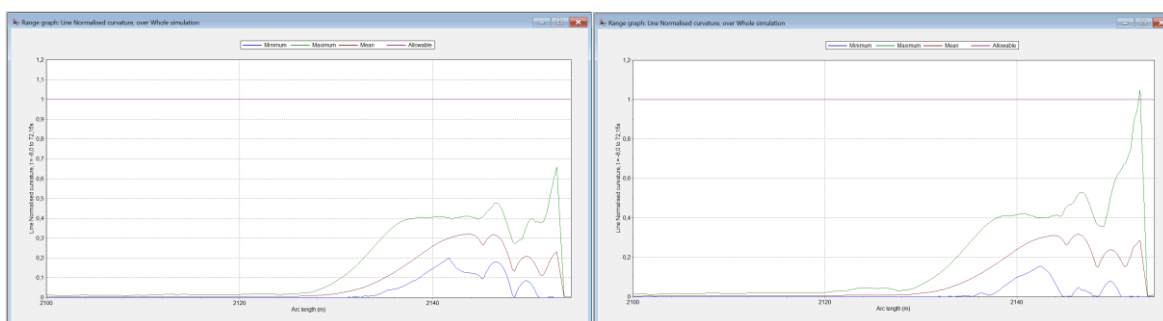


Figura 36 – Curvatura da Linha em HS de 1,5m e 2,5m - Caso 1

Apesar do caso de HS de 1,5m satisfazer a curvatura imposta para a linha flexível, ao verificar a Figura 37 a seguir, foi possível visualizar que para ambos os casos (de HS de 1,5m e 2,5m), não é possível garantir o não infringimento do raio de curvatura da vértebra, onde a mesma ao final da simulação infringiu o raio de travamento para ambos os HS's.

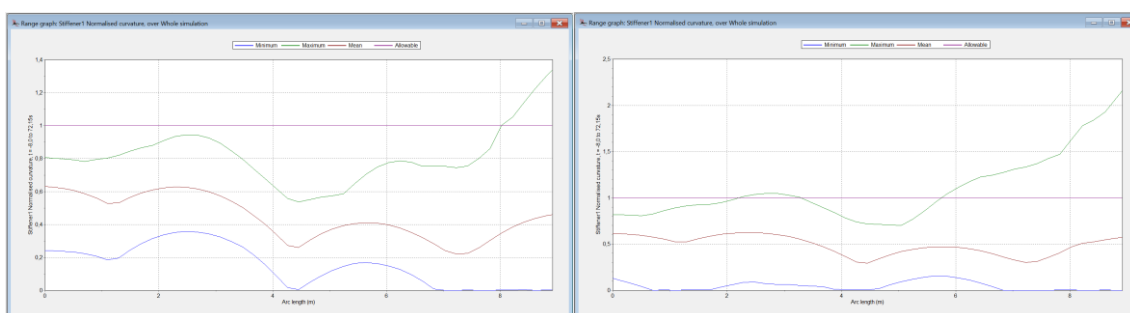


Figura 37 – Curvatura da Vértebra em HS=1,5m e 2,5m - Caso 1

Por fim, foi possível ainda através da análise do Momento Fletor na Vértebra, identificar o infringimento do momento fletor máximo para ambas as alturas de onda analisadas, conforme Figura 38 a seguir:

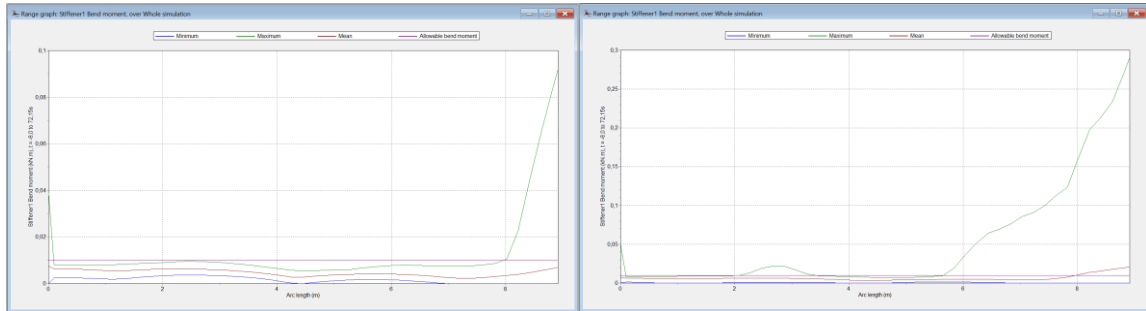


Figura 38 – Momento Fletor na área da vértebra em HS=1,5m e 2,5m - Caso 1

Logo, para o caso 1 em questão onde os flutuadores foram definidos inicialmente considerando a distribuição apenas pela vértebra e o cálculo dos momentos definiram os empuxos, não foi possível ainda garantir a instalação respeitando todas as premissas de projeto citadas.

6.4.2. Caso Dinâmico 2: Flutuadores na Vértebra e Linha

Para fins de análise do caso 2, os flutuadores foram definidos arbitrariamente de acordo com sua disponibilidade de mercado e sua distribuição se foi dada ao longo da vértebra e da linha. Como pode-se ver, a Figura 39 apresenta o sistema. As premissas explícitas no tópico 6.4. seguem mantidas.

Na Figura 39 a seguir, é possível visualizar três momentos distintos da análise: o instante inicial obtido através da análise estática, o instante de maior momento sobre a interface do conector e da linha e o momento final de assentamento da linha no leito.

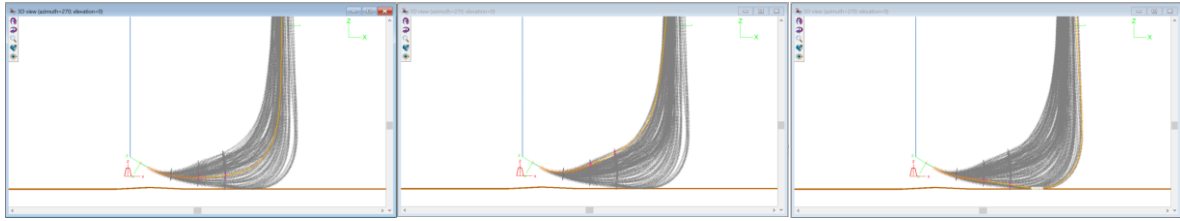


Figura 39 – Início, maior amplitude e assentamento - Caso 2

Feita a simulação, é possível novamente verificar a curvatura atingida ao longo do tempo durante a simulação dinâmica tanto para a linha, como para a vértebra, agora na configuração do caso 2. Diferente da verificação estática, no caso dinâmico é verificado a curvatura atingida ao longo do tempo entre as etapas de pré instalação do MCV até o assentamento da linha no leito com o MCV já conectado.

Na Figura 40, com ambos os HS de 1,5m e 2,5m, pode-se verificar que não há o infringimento da curvatura através da curva normalizada.

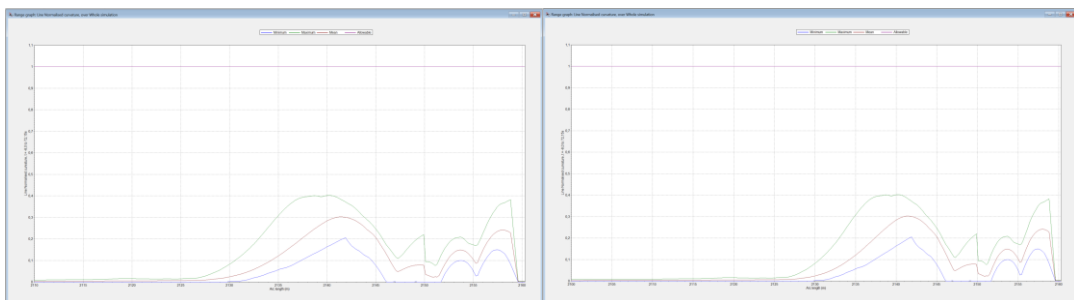


Figura 40 – Curvatura da Linha em HS=1,5m e 2,5m - Caso 2

Foi possível visualizar que para ambos os casos de HS, é possível garantir o não infringimento do raio de curvatura da vértebra. Diferente do observado no capítulo 6.4.1., a simulação do caso 2 não infringiu o raio de travamento conforme Figura 41.

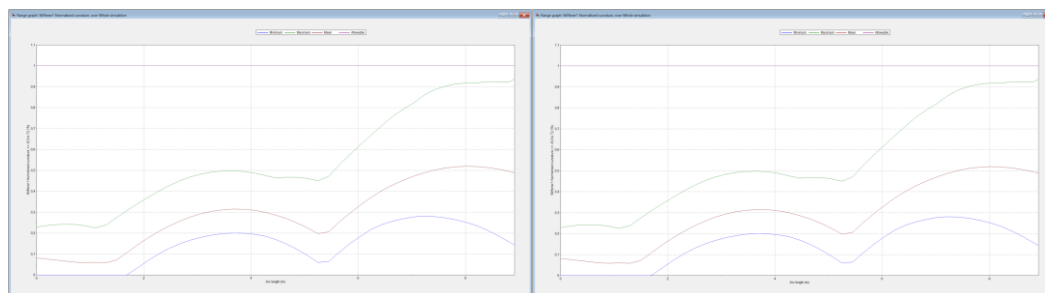


Figura 41 – Curvatura da Vértebra em HS=1,5m e 2,5m - Caso 2

Por fim, foi possível ainda através da análise do Momento Fletor na área da Vértebra para o caso 2, identificar que não houve o infringimento do momento fletor máximo para ambas as alturas de onda analisadas, conforme Figura 42 a seguir:

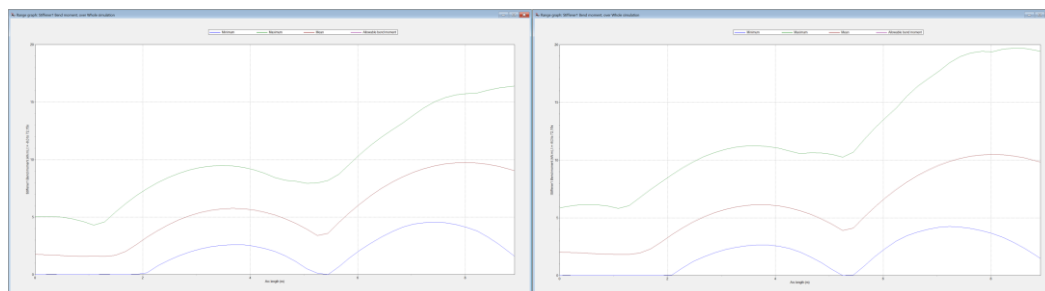


Figura 42 – Momento Fletor na área da vértebra em HS=1,5m e 2,5m - Caso 2

Logo, para o caso 2 em questão onde os flutuadores foram definidos considerando a distribuição pela vértebra e também em um trecho ao longo da linha, já foi possível garantir a instalação respeitando todas as premissas de projeto citadas.

6.5. Resultados Obtidos

Foram apresentados nos capítulos 6.3 e 6.4 as melhores configurações de acordo com a distribuição de flutuadores na vértebra e a distribuição na vértebra e na linha, para as estruturas analisadas. Os casos apresentados anteriormente são definidos como caso 1.1 e 2.1. Além dos casos analisados, foram analisados também

os seguintes cenários apresentados na Tabela 9 a seguir que auxiliaram na conclusão da melhor configuração:

Tabela 9 – Distribuição de Flutuadores Total Analisadas

Caso	Flutuadores					
	Empuxo 1 [kN]	kp1 [m]	Empuxo 2 [kN]	kp2 [m]	Empuxo 3 [kN]	kp2 [m]
1.1	1376	3	1345	6	871	9
1.2	2413	4	754	9	-	-
1.3	3219	7	-	-	-	-
2.1	1726	5	1531	9	660	13
2.2	1742	3	1320	7	532	11

Com o auxílio das simulações utilizando o Orcaflex que, por sua vez utiliza como base o método de elementos finitos, foi verificado inicialmente pela análise estática os seguintes fatores conforme indicados na Tabela 10:

Tabela 10 – Critérios e Resultados da Análise Estática - Casos 1 e 2

Caso	Profundidade		MBR da Linha		MBR da Vértebra		MCV Verticalizado?
	Critério [m]	Atingido [m]	Critério [m]	Atingido [m]	Critério [m]	Atingido [m]	
1.1	0,5	1,50	2,09	5,90	4,14	5,89	Sim
1.2	0,5	0,80	2,09	3,75	4,14	6,46	Sim
1.3	0,5	1,75	2,09	5,27	4,14	6,99	Sim
2.1	0,5	1,50	2,09	6,86	4,14	8,50	Sim
2.2	0,5	0,69	2,09	4,24	4,14	7,61	Sim

Os critérios foram obtidos através do datasheet das estruturas, conforme disponível nos anexos.

Os resultados das simulações que representam as curvaturas instantaneamente antes da conexão do MCV em definitivo e do assentamento permitiram a continuidade do uso das configurações na análise dinâmica. Pode-se concluir que para a análise estática, o modelo utilizado para definição dos flutuadores funcionou conforme o esperado.

Após as análises estáticas, foi possível iniciar as verificações dinâmicas para ambos os casos. A posição do MCV foi definida como fixa, e aplicada uma altura de onda de HS 1,5m e 2,5m em um determinado período de tempo conforme capítulo 5.4, e os critérios utilizados de referência estão disponíveis também no capítulo de

anexos. Pode-se então analisar primeiramente o MBR dos itens conforme Tabela 11 a seguir:

Tabela 11 – Critérios e Resultados de Curvatura Dinâmica - Casos 1 e 2

Caso	MBR da Linha				MBR da Vértebra			
	Critério [m]	HS=1,5m	HS=2,5m	MBR Infringido?	Critério [m]	HS=1,5m	HS=2,5m	MBR Infringido?
		Atingido [m]	Atingido [m]			Atingido [m]	Atingido [m]	
1.1	2,09	3,18	1,99	Sim	4,14	3,09	1,92	Sim
1.2	2,09	3,58	2,61	Não	4,14	4,27	2,49	Sim
1.3	2,09	3,59	2,39	Não	4,14	3,55	2,35	Sim
2.1	2,09	5,19	4,48	Não	4,14	5,45	4,42	Não
2.2	2,09	3,32	3,02	Não	4,14	5,40	3,58	Sim

A partir da análise dinâmica, foi possível verificar que o método criado para distribuição de flutuadores no perímetro da vértebra ficaria bem limitado quando analisado o infringimento do MBR da linha (caso 1.1). Já para o MBR da vértebra, o modelo de definição de flutuadores infringe consideravelmente, isso se dá ao elevado critério de MBR utilizado para o travamento da vértebra. No sistema estático pode-se perceber que a configuração gera uma considerável curva sob a vértebra e, com os efeitos dinâmicos, a mesma vem a atingir um raio muito abaixo do critério.

Verificando o momento fletor da vértebra, foi possível a obtenção dos seguintes resultados conforme Tabela 12 a seguir:

Tabela 12 – Critérios e Resultados de Momento Fletor Dinâmico - Casos 1.1 e 2.1

Caso	Momento Fletor Máximo da Vértebra			
	Critério [kN.m]	HS=1,5m	HS=2,5m	Momento Infringido?
		Atingido [kN.m]	Atingido [kN.m]	
1.1	70	91,65	289,62	Sim
2.1	70	16,39	19,70	Não

Através dos resultados obtidos, foi possível concluir que todos os cenários observados no caso 1 não tornam viável a instalação, mesmo com um HS abaixo de 1,5m dado o fato que em tal cenário, houve o infringimento do valor admitido conforme indicado pelo fabricante. Apenas o caso 2.1 tornou a instalação viável segundo todos os critérios observados.

7. Conclusão

Os dutos flexíveis dominam o mercado brasileiro. Dado seu armazenamento e instalação diferenciados, quando comparado aos dutos rígidos, as mesmas absorvem deformações maiores sem danos à estrutura. Ao longo do tempo o mesmo tomou conta do mercado e evoluiu muito em tecnologia e performance.

Nesse trabalho, foi apresentada uma metodologia a qual visa estimar a distribuição de flutuadores ao longo da vértebra a fim de facilitar as análises estática e dinâmica durante uma conexão vertical direta de 1ª extremidade.

Além da estimativa, foram analisados dois casos de distribuição de flutuadores a fim de chegar na melhor configuração dos mesmos, respeitando os critérios definidos para cada item do sistema em análise.

O uso do OrcaFlex foi justificado já que torna possível observar a influência da rigidez à flexão da linha, através do momento fletor atingido da estrutura, como um dos fatores principais para a instalação dos equipamentos submarinos de forma integral, sem infringimento do MBR da linha e da vértebra.

Os resultados foram suficientemente coerentes quanto à eficácia da distribuição e das características dos flutuadores, quando aplicados ao sistema, tornando, segundo a análise, a operação viável e segura.

Por fim, pode-se concluir que, apesar do modelo criado para determinação de flutuadores apresentar uma boa aproximação para fins estáticos, o mesmo pode não apresentar resultados satisfatórios quando analisado de forma dinâmica.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a busca por soluções de pré-definição de flutuadores considerando a distribuição de flutuadores pela vértebra e pela linha. Assim tornando o cálculo de forças e momentos mais fiel à disposição da catenária e alcançando boa aproximação na pré-definição dos flutuadores e posições e, consequentemente se aproximando de um resultado de análise dinâmica viável operacionalmente.

Outro ponto a considerar para trabalhos futuros seria a rigidez à flexão após o travamento da vértebra. Para o trabalho atual, foi encontrada uma solução que viabilize a instalação sem considerar a rigidez atribuída a vértebra, devido ao não travamento da mesma durante a instalação. Recomenda-se assim um estudo que

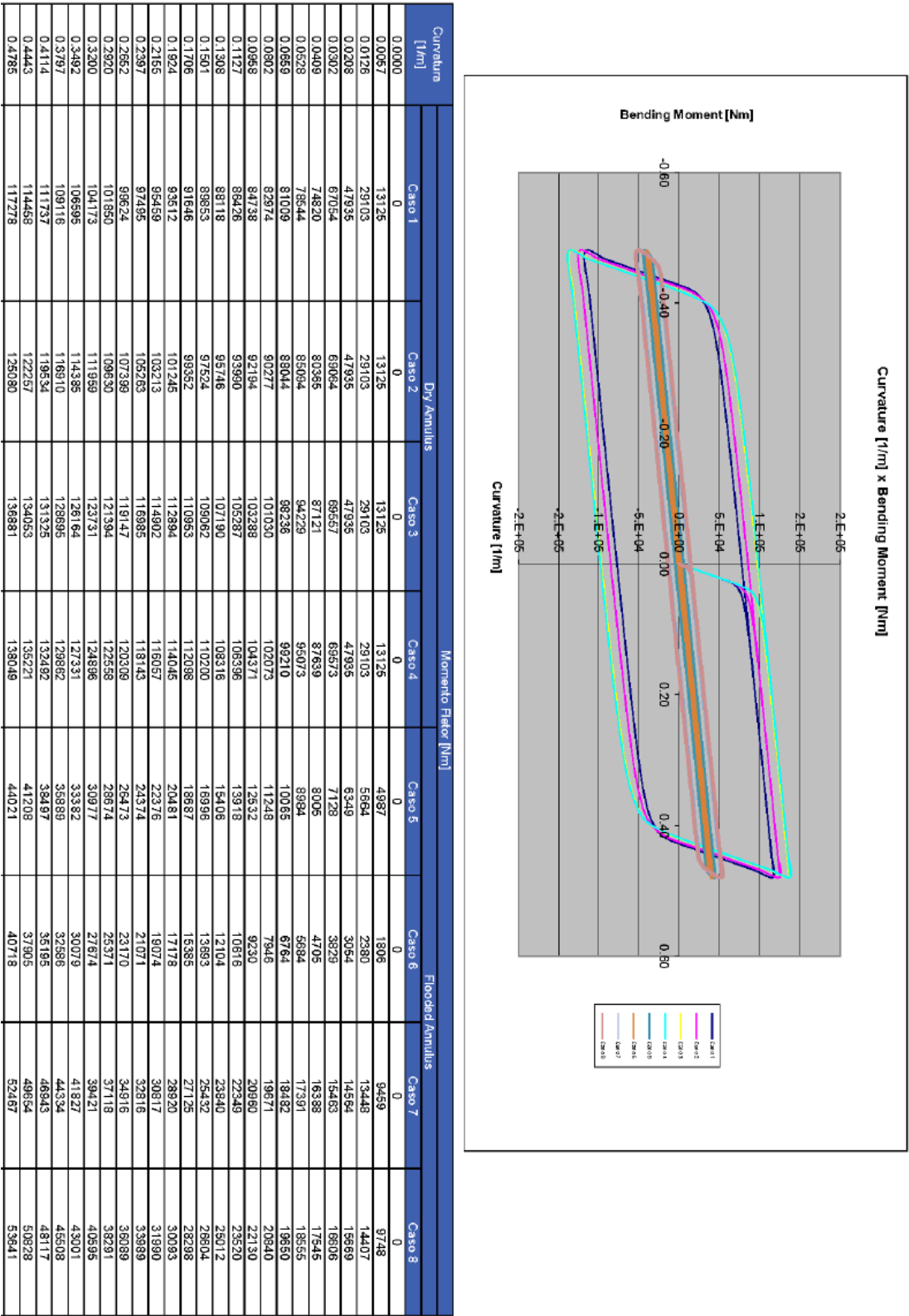
analise a instalação após o travamento da vértebra, determinando limites de flexão até a ruptura da mesma.

8. Referências Bibliográficas

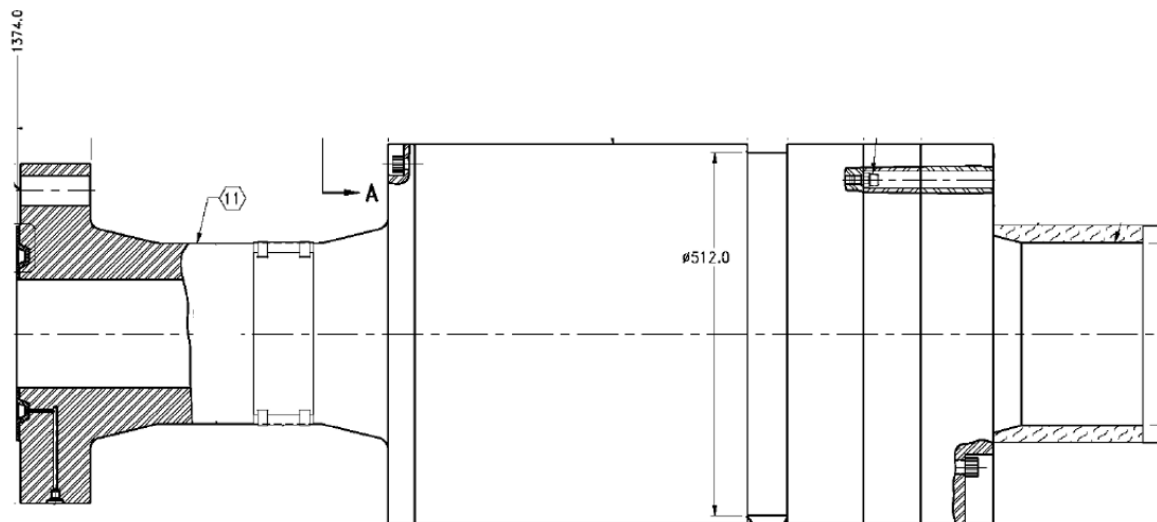
- [1]. FIRMO, José. Ernest & Young e Instituto Brasil Petróleo – “A relevância do Petróleo & Gás para o Brasil”. 2019.
- [2]. FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. "Exploração e extração do petróleo"; Brasil Escola. 2022.
- [3]. MORAIS, M. J., “Petróleo em águas profundas - Uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore”, Revisão Técnica - Ipea, Petrobras, 2013. 424p. 2013
- [4]. TECHNIP, Disponível em: <<http://www.technip.com>>. Consulta em 27 de Março de 2022.
- [5]. TECHNICAS, Disponível em: <<https://www.technicas.sg/>>. Consulta em 27 de Março de 2022.
- [6]. OILEQUIP, Disponível em: <<https://www.oilequip.com.br/>>. Consulta em 27 de Março de 2022.
- [7]. ORCINA, ORCAFLEX Reference Manual, ORCINA Ltd. 2008.
- [8]. COUTINHO, T. M. N., “Análise global de configurações de risers flexíveis em águas profundas”, Projeto de Graduação, Engenharia Mecânica, PUC-Rio. 2018.
- [9]. THORLEY, R. F. D. “Análise de Instalação de Dutos Flexíveis por Conexão Vertical Direta”. Projeto de Graduação. Engenharia Naval. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2015.
- [10]. HAINE, J. G. C., “Simulação de um tensionador de quatro lagartas para embarcações PLSV”, Projeto de Graduação, Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto. 2014.
- [11]. SOUSA, M. R. J., “Análise local de linhas flexíveis pelo método de elementos finitos”, Programa de Pós-Graduação. Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2005.
- [12]. BEER, F.P. e JOHNSTON, JR., E.R. Resistência dos Materiais, 3.º Ed., Makron Books, 1995
- [13]. DOF, Disponível em: <<http://www.dof.no>>. Consulta em 1 de Abril de 2022
- [14]. SIMEROS, Disponível em: <<https://www.simeros.com>>. Consulta em 1 de Abril de 2022
- [15]. TRELLEBORG, Disponível em: <<https://www.simeros.com>>. Consulta em 1 de Abril de 2022
- [16]. BALMORAL, Disponível em: <<https://www.balmoraloffshore.com>>. Consulta em 1 de Abril de 2022
- [17]. PETROBRAS, Disponível em: <<https://www.petrobras.com.br>>. Consulta em 8 de Maio de 2022

- [18]. LOPES, V., “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. 2005.
- [19]. RIBEIRO, F., 2020, “Influência da Rigidez à Flexão Não Linear de Dutos Flexíveis em Análises Globais de Instalação de em Águas Profundas”. Projeto de Graduação, Engenharia Mecânica. Universidade Federal Fluminense. 2020.
- [20]. API 17B - Recommended Practice for Flexible Pipe, 3ed. 2002
- [21]. SILVA, I., 2020, “Aplicação de Técnicas de Otimização em Operações de Conexão Vertical Direta de 1ª Extremidade”. Projeto de Graduação. Engenharia Mecânica. Pontifícia Universidade Católica – PUC-Rio. 2021.

ANEXOS

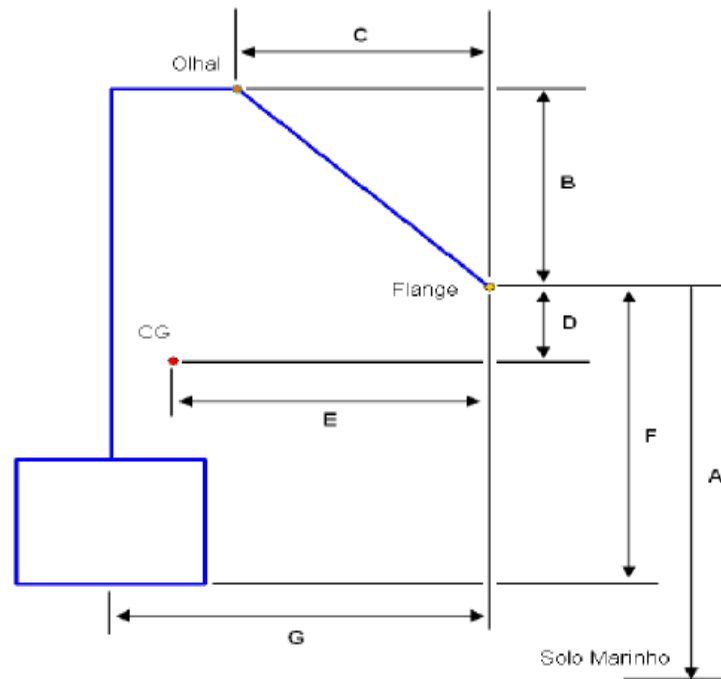


Wt, Empty in Air	144.11 kg/m
S/W filled in Air	165.28 kg/m
Air filled in S/W	74.01 kg/m
S/W filled in S/W	95.19 kg/m
Outside Diameter	295.03 mm
Storage Radius, SBR	2.09 m
Operating Radius, OBR	2.09 m
Stiff direction	2547 kNm ²
Axial Stiffness	312774 kN

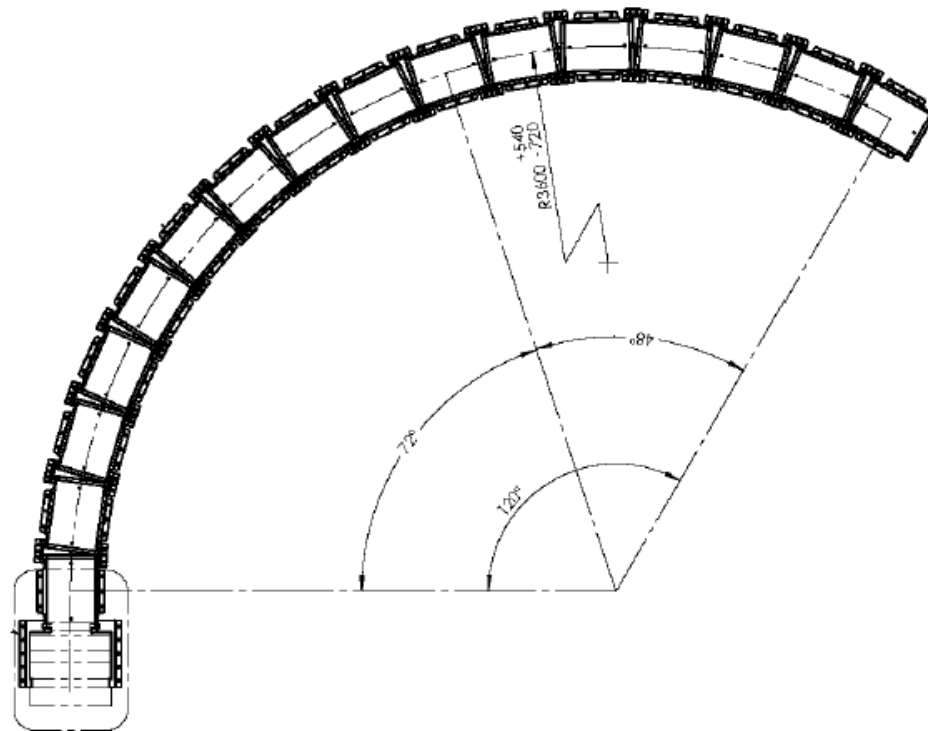


MASS: 1367 Kg.

MAXIMUM ALLOWABLE LOAD TO SUPPORT THE ENDFITTING: 480tf



COTA (mm)	DESCRIÇÃO	INFORMAÇÃO					
		MCVP	MCVA	MCVU			
α	Ângulo do gooseneck	60°	60°	45°			
A (0m)	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	2787	3874	2203			
A (5m)	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	3457	3624	2503			
A (10m)	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	3557	3844	2663			
B	Distância vertical do olhal ao flange	833	833	985			
C	Distância horizontal do olhal ao flange	1491	1491	1051			
D	Distância vertical do flange ao centro de gravidade	595	615	305			
E	Distância horizontal do flange ao centro de gravidade	1546	1679	1142			
F	Distância vertical do flange à base do MCV	1956	1956	1197			
G	Distância horizontal do flange ao centro do hub do MCV	1851	1851	1242			
H	Posição do centro de gravidade em relação ao Eixo Y	50	50	7			
	Peso do MCV submerso [kgf]	5648	6752	3276			



WEIGHT IN AIR: 3120 Kg (APPROX.).

MAXIMUM ALLOWABLE BENDING MOMENT: 70 kNm.

BEND RESTRICTOR DESIGNED CONSIDERING FLOODED BORE CONDITION

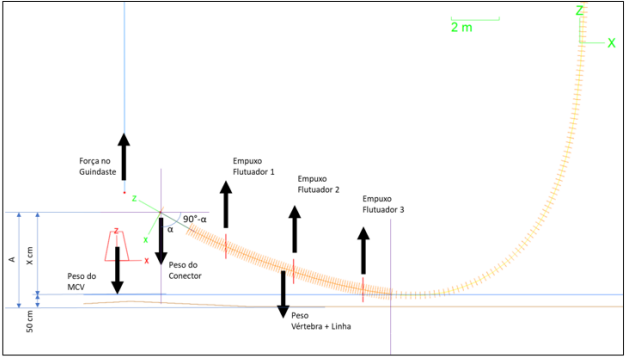
BEND RESTRICTOR SPLITTED TOTAL 120°: COMPRESSED LENGTH= 8072mm.
FREE LENGTH= 8912mm.

Σ Forças			
Fmcv	66,24	[kN]	Peso do MCV
Fcon	0,013	[kN]	Peso do Conector
Fver	34,95	[kN]	Peso da Vértebra + Linha
Fguin	50,60	[kN]	Força do Guindaste
Feng	50,60	[kN]	Força no "Engaste"

Σ Momentos no Engaste			
Mmcv→eng	657,58	[kN.m]	Momento do MCV
Mcon→eng	0,699	[kN.m]	Momento do Conector
Mver→eng	134,87	[kN.m]	Momento da Vértebra
Mguin→eng	595,92	[kN.m]	Momento do Guindaste
Meng	1389,07	[kN.m]	Momento no Engaste

Σ Momentos no Guindaste			
Mmcv→guin	12,45	[kN.m]	Momento do MCV
Mcon→guin	0,029	[kN.m]	Momento do Conector
Mver→guin	255,87	[kN.m]	Momento da Vértebra
Meng→guin	595,92	[kN.m]	Momento do Engaste
Mguin	864,28	[kN.m]	Momento no Guindaste

g	9,81
---	------



Definição de Flutuadores - Teórico			
Nf	3	[-]	Quantidade de Flutuadores
Meng	1389,07	[kN.m]	Momento no Engaste a ser vencido
Mguin	864,28	[kN.m]	Momento no Guindaste a ser vencido
Df1→olhal	1,43	[m]	Distância do Olhal ao 1º Flutuador
Dfn→Dfn-1	3	[m]	Distância entre Flutuadores
Empuxo 1	1500	[kN]	Empuxo dos Flutuador 1
Empuxo 2	1500	[kN]	Empuxo dos Flutuador 2
Empuxo 3	413	[kN]	Empuxo dos Flutuador 3
Mres	2253,43	[kN.m]	Momento Resultante Flutuadores
Dif	0	[kN.m]	Diferença de Momentos

	Quantidade de Flutuadores		
	1	2	3
Empuxo	1376	1345	871
Posição	3	6	9
Diferença	3		



Definição de Flutuadores - Flutuadores Catalogados			
Nf	3	[-]	Quantidade de Flutuadores
Meng	1389,07	[kN.m]	Momento no Engaste a ser vencido
Mguin	864,28	[kN.m]	Momento no Guindaste a ser vencido
Df1→olhal	1,43	[m]	Distância do Olhal ao 1º Flutuador
Dfn→Dfn-1	3	[m]	Distância entre Flutuadores
Empuxo 1	1376	[kN]	Empuxo dos Flutuador 1
Empuxo 2	1345	[kN]	Empuxo dos Flutuador 2
Empuxo 3	871	[kN]	Empuxo dos Flutuador 3
Mres	2567,03	[kN.m]	Momento Resultante Flutuadores
Dif	313,68	[kN.m]	Diferença de Momentos