



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



AUTOMATIZAÇÃO DA ANÁLISE DE OPERAÇÃO DE CVD DE 1ª EXTREMIDADE
COM INTEGRAÇÃO PYTHON-ORCAFLEX

DANIEL TEIXEIRA WANDERLEY

Projeto de Graduação apresentado aos docentes do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal Fluminense, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadores: Gabriel de Carvalho Nascimento

NITERÓI, RJ

2025



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



“Ninguém liberta ninguém, ninguém se liberta sozinho: os homens se libertam em comunhão.” (FREIRE, Paulo. Pedagogia do Oprimido. 1996. 29 p.)

Este trabalho é dedicado a todos os que contribuem para a pesquisa acadêmica para o desenvolvimento industrial no Brasil. Que por meio de nossa comunhão se promova o bem-estar social e seja possível amenizar as desigualdades estruturais da nação.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL





UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



AGRADECIMENTOS

Não são poucas as pessoas que contribuíram para que a minha trajetória profissional-acadêmica pudesse ser construída e para que este projeto pudesse ser elaborado. Por meio desta, desejo externar minha gratidão:

É impossível não agradecer a Deus. Nos meus momentos difíceis, esteve comigo, foi meu amigo, meu refúgio. Me deu forças todas as vezes em que fui fraco, e propósito em todas as vezes que me senti vazio.

À Maria C. M. T. Wanderley, Jonatas T. Wanderley e Walter F. Wanderley, minha família, por me sustentarem, me ensinarem a não desistir, por me cobrarem quanto aos meus estudos desde muito cedo, por me ensinarem a buscar uma condição de vida melhor para mim.

À Letícia A. de Oliveira, minha futura esposa, por estar sempre ao meu lado e me tratar tão bem, por buscar os interesses nossos, por ser verdadeira e por me amar.

Preciso também agradecer a Bernardo Rocha e Marcelo Araújo, da Brucke Engenharia, André Esteves, da Arte&Pontes, Wallace Souza e Luiz C. F. Rios, da EMCCAMP Residencial, Carlos Cavalcante, da CBR Engenharia, Jodele Esposti, Cândido Magalhães e Fernando Fontenelle, da Abilitá Projetos Estruturais, Camila C. Coutinho, do Grupo Águas do Brasil, Nathalia N. A. Santafé, Eduardo Y. Carvalho e Ana-Caroline Mesquita, da TechnipFMC. Estes foram grandes profissionais que tive o prazer de conhecer ao longo da minha graduação. Eles me ofereceram oportunidades de estágio e são parte importante desta caminhada.

Meus agradecimentos ao D. Sc. Gabriel C. Nascimento, meu orientador. É uma grande honra poder desenvolver este projeto sob a orientação de profissionais pelos quais possuo grande admiração.

Por último, agradeço a todos os homens e todas as mulheres que deram suas contribuições para construção de todo o conhecimento científico nas minhas áreas de estudo, engenharia e tecnologia. Suas contribuições tornaram possível expandir a fronteira do conhecimento e revolucionar o modo de vida em sociedade.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



RESUMO

O número crescente de aplicações para o mercado da engenharia demonstra uma busca constante por soluções que agreguem valor às atividades, com processos mais produtivos, em termos de redução de custos e de prazos, e que de forma substancial sejam qualitativamente melhores. Os procedimentos de análise estrutural de instalações submarinas para a indústria de óleo e gás possuem impacto direto no tempo necessário para que as equipes embarcadas realizem as operações e, portanto, nos custos das atividades. Além disso, deve-se considerar o fator de segurança envolvido na análise, de modo que a equipe embarcada tenha conhecimento prévio de como manusear as estruturas e acessórios a serem instalados para que não ocorram acidentes e prejuízos de qualquer natureza. A operação de Conexão Vertical Direta, também conhecida como CVD, consiste na conexão da linha flexível, lançada por uma embarcação, ou PLSV, com o hub da ANM, por meio do módulo de conexão vertical, o MCV. Para o escopo deste projeto, foi desenvolvida uma aplicação em Python cuja função é automatizar a análise de CVD de 1º extremidade, integrando o código ao OrcaFlex, software comercial de análises *subsea*, seguindo os critérios estabelecidos em especificações técnicas (ETs), quanto aos casos de carregamento referentes às etapas de instalação. Os algoritmos foram implementados com base na metodologia descrita e validado com 9 casos de estudos ou de testes, obtendo resultados aprovados com base nos mesmos critérios das análises manualmente executadas.

PALAVRAS-CHAVE

Conexão Vertical Direta. Otimização. linha flexível. Módulo de Conexão Vertical. Python. Desenvolvimento de software. Subsea. Análise dinâmica.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



ABSTRACT

The increasing number of applications in the engineering market demonstrates a constant pursuit of solutions that add value to activities through more productive processes in terms of cost and time reduction, while also being qualitatively better. The structural analysis procedures for underwater installations in the oil and gas industry have a direct impact on the time required for offshore teams to perform operations, and therefore on the associated costs. Additionally, the safety factor involved in the analysis must be considered so that the offshore team has prior knowledge of how to handle the structures and accessories to be installed, preventing accidents and any type of losses. The Direct Vertical Connection (DVC) operation, also known as CVD, involves the connection of a flexible line deployed by a vessel, or PLSV, to the ANM hub via the vertical connection module, MCV. For the scope of this project, a Python application was developed to automate the analysis of the 1st end CVD, integrating Python with OrcaFlex, a commercial software for subsea analyses, following the criteria established in the technical specifications ET-3000.00-1500-951-PMU-001 Rev F and ET-3000.00-1500-941-PMU-006 Rev C, regarding the loading cases related to the installation stages. The algorithm were implemented based on the described methodology and validated with 9 test or study cases, achieving approved results according to the same criteria applied in manually executed analysis.

KEYWORDS

Direct Vertical Connection. Optimization. Flexible line. Vertical Connection Module. Python. Software development. Subsea. Dynamic analysis.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA.....	12
1.2	1.2 MOTIVAÇÃO DESTE PROJETO	16
1.3	1.3 ELEMENTOS DAS OPERAÇÕES OFFSHORE	16
1.3.1	EMBARCAÇÕES, <i>FSO</i> E <i>FPSO</i>	16
1.3.2	POÇOS DE PETRÓLEO	24
1.3.3	LINHAS FLEXÍVEIS, DESCRIÇÃO E COMPARATIVO	28
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1	2.1 INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE LINHAS SUBMARINAS	31
2.2	2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DE PROJETO DE RISERS E FLOWLINES	35
2.2.1	CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO	38
2.3	2.3 ANÁLISE DE CVD, DE ACORDO COM A “ET-3000.00-1500-951-PMU-001” E A “ET-3000.00-1500-941-PMU-006”.....	39
2.3.1	ANÁLISE DA OPERAÇÃO	39
2.3.2	CONDUÇÃO DA OPERAÇÃO	44
2.3.3	CONSTRUÇÃO DO MODELO	45
2.3.4	METODOLOGIA.....	54
2.3.5	FLUTUADORES E PESO MORTO.....	59
2.3.6	AÇÕES MITIGATÓRIAS.....	59
3	OPERAÇÃO DE CONEXÃO VERTICAL DIRETA.....	61
3.1	3.1 A OPERAÇÃO DE CVD	61
3.2	3.2 ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE CVD	63
3.2.1	EQUILÍBRIO DO SISTEMA	63
3.2.2	CONSIDERAÇÕES SOBRE A FLEXÃO DO DUTO FLEXÍVEL (HISTERESE)	



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



4	APLICAÇÃO “CVD AUTOMÁTICO”	67
4.1	4.1 EXPLICANDO A APLICAÇÃO	67
4.1.1	A INTERFACE	67
4.1.2	PROCESSAMENTO	72
5	CONCLUSÕES E RESULTADOS	80
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
7	APÊNDICE	83
7.1	CASOS DE ESTUDO	83
7.1.1	1º caso de análise – CVD em águas ultra-profundas	83
7.1.2	2º caso de análise – CVD em águas profundas, com flexível leve, de 4”, e batimetria variável	85
7.1.3	3º caso de análise – CVD-jumper em águas ultra-profundas, com flexível pesado, de 6”, com batimetria variável	88
7.1.4	4º caso de análise – CVD-jumper em águas ultra-profundas, com batimetria variável	91
7.1.5	5º caso de análise – CVD-jumper em águas ultra-profundas, com flexível pesado, de 6”. MCV pesado e batimetria variável	94
7.1.6	6º caso de análise – CVD igual à do 5º caso de análise, mas com outra embarcação	97
7.1.7	7º caso de análise – CVD em águas rasas, com flexível leve, de 4”, vértebra polimérica, adaptador de flange e batimetria variável	97
7.1.8	8º caso de análise – CVD igual à do 7º caso de análise, mas considerando o anular da linha alagado	101
7.1.9	9º caso de análise – CVD-jumper em águas ultra-profundas, com flexível pesado, de 6”, e MCV pesado	102
7.2	RESULTADOS FINAIS	105



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DA OPERAÇÃO PLUTO	13
FIGURA 2 - CAMADAS DA LINHA FLEXÍVEL DESENVOLVIDA NA OPERAÇÃO PLUTO	13
FIGURA 3 - RECORDES MUNDIAIS DE EXPLORAÇÃO EM ÁGUAS PROFUNDAS E ULTRAPROFUNDAS.	14
FIGURA 4 - PLATAFORMA P-56, NO CAMPO DE MARLIM SUL.....	15
FIGURA 5 - EMBARCAÇÃO REALIZANDO LANÇAMENTO DE LINHAS FLEXÍVEIS	17
FIGURA 6 - EMBARCAÇÃO REALIZANDO LANÇAMENTO DE LINHAS RÍGIDAS.....	17
FIGURA 7 - EMBARCAÇÃO COM BOW TURRET.....	18
FIGURA 8 - EMBARCAÇÃO COM BOBINAS CARREGADAS NO CONVÉS	18
FIGURA 9 – TENSIONADOR PARA LANÇAMENTO/RECOLHIMENTO VERTICAL	19
FIGURA 10 - GUINDASTE OFFSHORE DE 250 TF	20
FIGURA 11 - GUINCHO DE LINHA	21
FIGURA 12 - CESTA DA EMBARCAÇÃO.....	22
FIGURA 13 - ROV DA EMBARCAÇÃO.....	23
FIGURA 14 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DE LEVANTAMENTO SÍSMICO MARÍTIMO.	25
FIGURA 15 - LEVANTAMENTO MARÍTIMO 3-D.	25
FIGURA 16 - ESQUEMA DE UMA SONDA ROTATIVA	26
FIGURA 17 - SEÇÃO TÍPICA DE UM DUTO FLEXÍVEL	29
FIGURA 18 – <i>SKETCH</i> DO PASSO-A-PASSO DE UMA INSTALAÇÃO SUBMARINA TÍPICA	32
FIGURA 19 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO MÉTODO DE CATENÁRIA LIVRE	33
FIGURA 20 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO MÉTODO DE CATENÁRIA LIVRE	34
FIGURA 21 – DESENHO ESQUEMÁTICO DOS MÉTODOS <i>PLIANT WAVE</i> , <i>LAZY S</i> E <i>STEEP S</i>	34
FIGURA 22 – ILUSTRAÇÃO DE DIVERSOS TIPOS DE INSTALAÇÕES DE LINHAS SUBMARINAS	35
FIGURA 23 – CATENÁRIA TÍPICA DE UM <i>RISER</i> DE AÇO.....	36
FIGURA 24 – CONFIGURAÇÃO DE LINHA FLEXÍVEL	36
FIGURA 25 – <i>RISER</i> DE TENSÃO DE TOPO, EM PLATAFORMAS.....	37
FIGURA 26 – CONFIGURAÇÃO DE <i>RISER</i> HÍBRIDO	37
FIGURA 27 – MODELO ESTÁTICO NO ORCAFLEX.....	40
FIGURA 28 – MODELO DINÂMICO NO ORCAFLEX (<i>HEAVE UP</i>).....	42
FIGURA 29 – MODELO DINÂMICO NO ORCAFLEX (<i>TOUCH DOWN POINT</i>)	42
FIGURA 30 – SISTEMA DE REFERÊNCIA PARA OS ESFORÇOS SOLICITANTES.....	43
FIGURA 31 – DIÂMETROS INTERNO E EXTERNO DA MENOR SEÇÃO DA VÉRTEBRA	48
FIGURA 32 – GRÁFICO DE MOMENTO X CURVATURA DA VÉRTEBRA	49



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



FIGURA 33 – VÉRTEBRA TÍPICA, COM INDICAÇÃO DO MBR.	50
FIGURA 34 – GRÁFICO MOMENTO X CURVATURA NÃO CONVENCIONAL	51
FIGURA 35 – EXEMPLO DE DATASHEET DE UM MCV	53
FIGURA 36 – INSERÇÃO DA HISTERESE E DA TORSÃO NO DUTO FLEXÍVEL NO ORCAFLEX	56
FIGURA 37 – CURVA TÍPICA DE MOMENTO FLETOR AO LONGO DO TEMPO	58
FIGURA 38 – CONEXÃO DO DUTO COM O HUB	61
FIGURA 39 – OPERAÇÃO DE PASSAGEM	62
FIGURA 40 – INSTALAÇÃO DOS ACESSÓRIOS, ANTES DO OVERBOARDING	63
FIGURA 41 – VERTICALIZAÇÃO E CVD	63
FIGURA 42 – SISTEMA DE FORÇAS ATUANDO SOBRE O SISTEMA.	64
FIGURA 43 - GRÁFICO DE MOMENTO X CURVATURA (HISTERESE)	66
FIGURA 44 - FLUXOGRAMA DO FUNCIONAMENTO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL	67
FIGURA 45 – PRIMEIRA SESSÃO DA INTERFACE.	69
FIGURA 46 – SEÇÃO DE “INPUTS” DA LINHA FLEXÍVEL.	69
FIGURA 47 – SESSÃO DE “INPUTS” DA VÉRTEBRA.	70
FIGURA 48 – SESSÃO DE “INPUTS” DO CONECTOR.	70
FIGURA 49 – SESSÃO DE “INPUTS” DO ADAPTADOR DE FLANGE.	71
FIGURA 50 – SESSÃO DE “INPUTS” DO MCV E DA BATIMETRIA.	71
FIGURA 51 – SESSÃO DE “INPUTS” DA CONFIGURAÇÃO DE FLUTUADORES E DOS LIMITES ESTRUTURAIS.	72
FIGURA 52 – PONTOS DE INTERESSE PARA A MODELAGEM DO MCV NO ORCAFLEX	75
FIGURA 53 – VERIFICAÇÃO DA PROXIMIDADE DA LINHA COM O LEITO MARINHO.	77
FIGURA 54 – VERIFICAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO MCV	77
FIGURA 55 – VERIFICAÇÃO DA INCLINAÇÃO DO MCV	79
FIGURA 56 – RESULTADOS OBTIDOS PARA O CASO 2 DE ANÁLISE.....	105
FIGURA 57 – RESULTADOS OBTIDOS PARA O CASO 3 DE ANÁLISE.....	105
FIGURA 58 – RESULTADOS OBTIDOS PARA O CASO CONTINGENCIAL DE ANÁLISE.....	106



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



LISTA DE ABREVIÇÕES E TERMOS

ANM: Árvore de Natal Molhada, equipamento de cabeça de poço, para operação submarina. Pode ser do tipo diverless, guidelineless ou de instalação/desinstalação totalmente remota;

BAP: Base Adaptadora de Produção, dispositivo que serve para guiar a ANM e o FLH para instalação por Conexão Vertical Direta ou Indireta;

CVD: Operação de conexão Diverless de um “flowline hub” sobre uma BAP, ou de um MCV sobre um manifold;

END-FITTING: Conector de extremidade de qualquer tramo de um duto flexível;

FAD: Fator de amplificação dinâmica – Fator aplicado às cargas estáticas para obtenção do equivalente estático das cargas dinâmicas);

Flowline: Trecho estático de linha flexível ou rídida (apoiado no fundo do mar) que interliga o sistema submarino de coleta/exportação à unidade de produção;

FPSO: Floating Production, Storage and Offloading System.

LDA: Lâmina d’água.

MANIFOLD ou MIS: Equipamento coletor e distribuidor de fluidos de um sistema de produção ou injeção, composto de válvulas de acionamento mecânica, hidráulico e/ou elétrico. Equipamento para coleta de óleo cru e distribuição de gas-lift e água de injeção;

MOON POOL: Abertura existente na região central de um navio ou plataforma flutuante, que permite a passagem de cargas do convés de trabalho para o mar e vice-versa;

OVERBOARDING: Operação de transposição de linhas ou equipamentos por sobre as rodas de lançamento do LSV, de modo a preservar a linha ou equipamento em questão contra esforços de flexão elevados no lançamento;

PLSV: Pipe Laying Support Vessels (Embarcações de Suporte à Instalação de Dutos);

RISER: Linha flexível projetada para trabalhar com esforços submarinos dinâmicos. Normalmente após instalada fica com uma das extremidades suspensa, e outra conectada a uma linha de fluxo (*flowline*);

MBR: Raio mínimo de curvatura de armazenamento do duto flexível/umbilical de controle;



1 INTRODUÇÃO

1.1 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA.

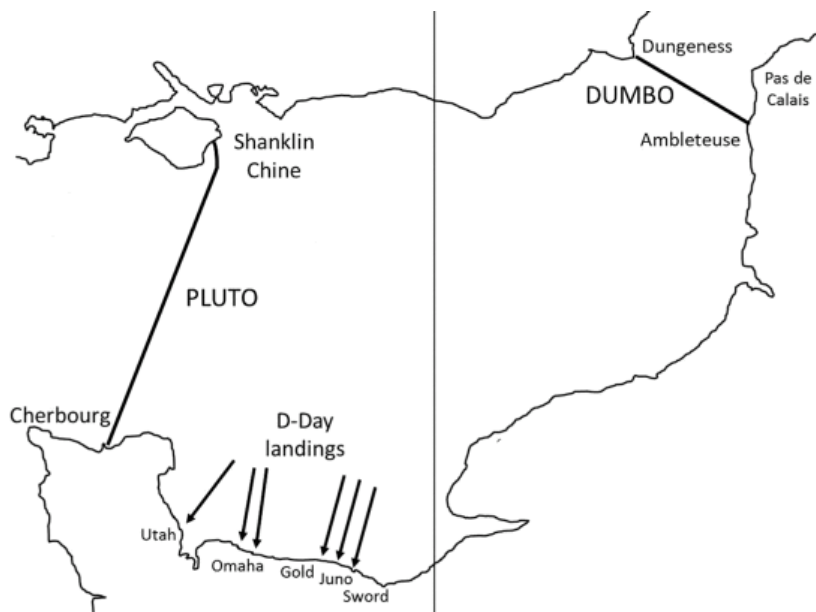
Em 1942, no contexto da Segunda Guerra Mundial, como fruto de uma tentativa de invasão da Tríplice Aliança na Normandia, foi executada a Operação Plutão (“Pipeline Under Ocean”): O propósito era fazer com que a carga de combustíveis das tropas militares fosse transportada por meio de dutos lançados no interior do Canal da Mancha, de modo a evitar atrasos nos deslocamentos das tropas e ataques aéreos (Figura 1).

Para realizar esta missão, a tecnologia de dutos existente até então não era capaz de atender ao desafio. Diante desse cenário, por meio do empenho conjunto dos membros da aliança, numa série de negociações com indústrias petrolíferas, e após muitas tentativas e erros de executar a operação, criou-se a tecnologia dos dutos flexíveis (Figura 2).

Este novo sistema possuía as seguintes características:

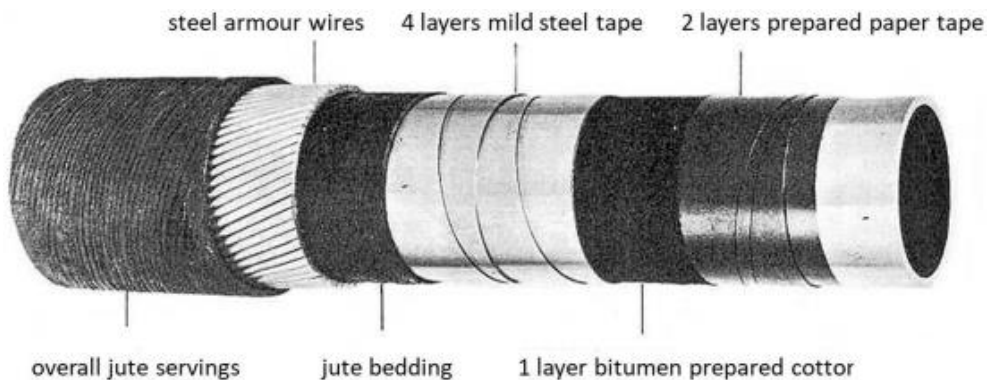
- 1) raio de atuação menor, o que possibilitava maior liberdade para instalação de equipamentos submarinos;
- 2) poderia ser reutilizado, pois possibilitava montagem e desmontagem;
- 3) maior facilidade de lançamento e instalação;
- 4) menores custos quanto aos barcos necessários para executar as operações de lançamento.

Figura 1 - Representação da localização da operação Pluto



Fonte: GRIFFITHS, Hugh (2021).

Figura 2 - Camadas da linha flexível desenvolvida na operação Pluto



Fonte: GRIFFITHS, Hugh (2021).

É importante ressaltar que a tecnologia de linhas flexíveis não é superior à sua antecessora, os dutos rígidos. Apenas, desempenha melhor performance em determinadas situações. De modo geral, linhas rígidas possuem um menor custo por metro, isto é, são mais baratas, embora os custos das embarcações de lançamento sejam mais elevados. Portanto, cabe à equipe de engenharia realizar o estudo de qual tecnologia utilizar para cada caso de projeto. Não



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



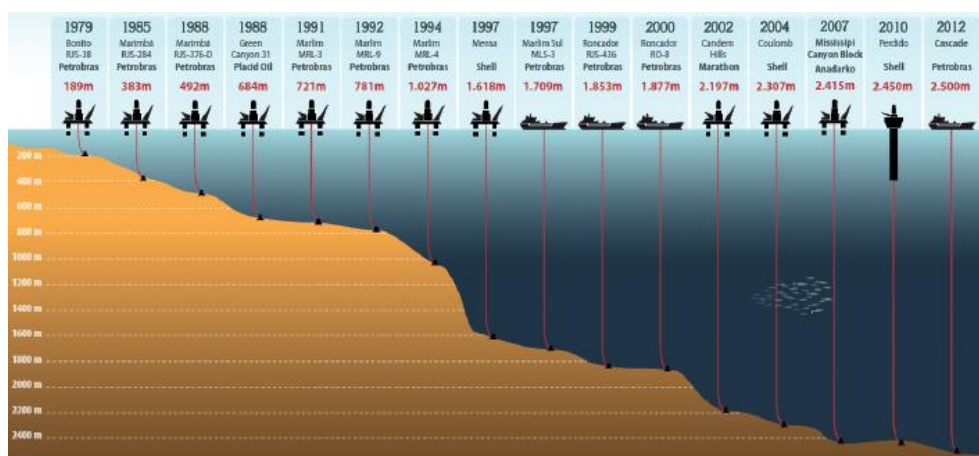
são raras as vezes em que se adota uma solução híbrida, explorando o melhor potencial de cada tecnologia.

Após o surgimento da tecnologia de flexíveis, já na década de 50, a ampliação do conjunto de regulações internacionais sobre as atividades da indústria *offshore* (exploração de petróleo em alto mar) formou um marco na história da engenharia. Gerando um crescimento no número de atividades deste setor. No Brasil, tais atividades, de exploração em águas profundas, iniciaram em 1968, com a exploração de pequenos campos em Sergipe, no Nordeste do país. Na década de 70, com a descoberta e exploração da Bacia de Campos, a indústria de óleo e gás nacional obteve um grande crescimento e se tornou definitivamente uma das áreas estratégicas da economia brasileira.

Desde então, a atividade petrolífera nacional, acompanhada pelo desenvolvimento tecnológico de prospecção, perfuração, exploração e produção de petróleo, liderado sobretudo pelo maior ativo público-estratégico do setor, a Petrobrás, alcançou importantes marcos, como por exemplo a exploração dos campos do Pré-Sal, na costa litorânea do país, correspondendo a uma área de aproximadamente 800km de extensão, com reservatórios a 7 km de profundidade.

Em ‘Petróleo em águas profundas’, Morais (2023) apresenta os recordes mundiais de LDA’s transpostas até 2012, por empresas internacionais, incluindo a Petrobras (Figura 3).

Figura 3 - Recordes mundiais de exploração em águas profundas e ultraprofundas.



Fonte: MORAIS (2023).



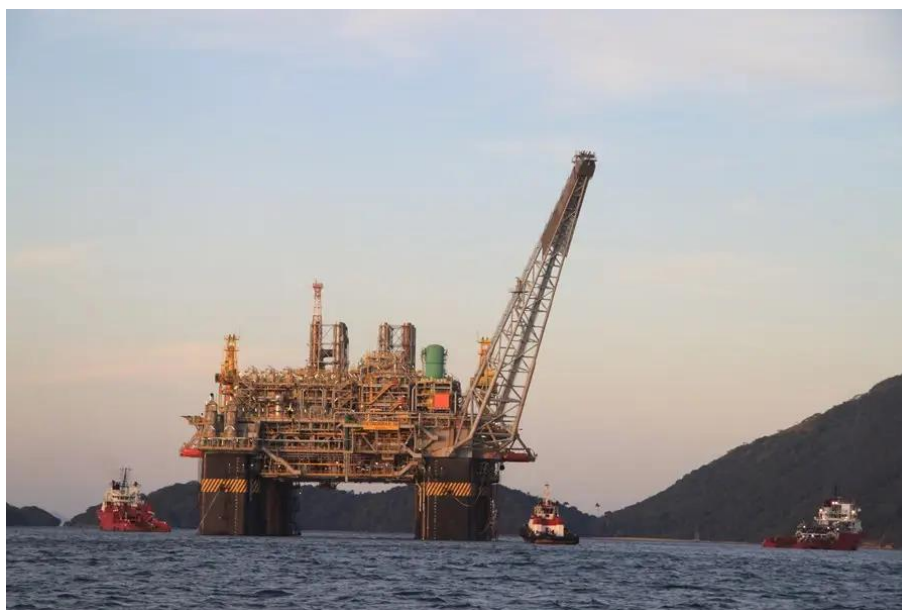
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



No ano de 2015, no campo de Marlim Sul (Figura 4), o 4º maior campo produtor de petróleo da Petrobrás até então, segundo a ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), ocorreu um acidente muito grave durante uma operação de CVD. A ocorrência deste evento provocou uma mobilização de esforços para realização de estudos que explicassem qual era o problema, uma vez que os relatórios de cálculos das empresas contratadas para analisar a viabilidade das operações não apresentavam erros, considerando o CT TS 013/2010, a especificação técnica que balizava as análises para este tipo de operação, na época.

Constatou-se que havia uma deficiência na metodologia para o cálculo dos esforços no flange dos MCVs. Segundo o relatório CT TDUT 002/12 Rev. 0, esta deficiência consistia em uma representação simplificada do comportamento à flexão do duto flexível, na qual não era considerada a histerese do duto, uma vez que apenas análises estáticas em cada etapa de instalação eram especificadas na metodologia descrita no CT TS 013/2010. A partir desta constatação, foram realizadas análises com intuito de avaliar melhorias na determinação dos esforços nos flanges dos MCVs, incluindo a consideração da histerese, estabelecendo uma nova metodologia na ET-3000.00-1500-951-PMU-001 Rev.D.

Figura 4 - Plataforma P-56, no Campo de Marlim Sul



Fonte: NOGUEIRA, Marta. 2024.



1.2 1.2 MOTIVAÇÃO DESTE PROJETO

Por meio do histórico da indústria offshore brasileira, verifica-se o crescimento do número e da complexidade das operações navais. E como todo trabalho é social e coletivo, a ampliação destas operações promove a demanda por uma série de atividades e aplicações que se desenvolvem nos campos da Engenharia e da Tecnologia. Com esta motivação, este trabalho tem por objetivo apresentar e descrever uma aplicação, desenvolvida principalmente em linguagem de programação Python, cujo funcionamento consiste na automatização dos procedimentos da análise de Conexão Vertical Direta, por meio da integração entre o código desenvolvido e o OrcaFlex, software comercial utilizado para análises de sistemas subsea, no contexto das operações *offshore*. Os critérios para aprovação/reprovação da análise serão os presentes na ET-3000.00-1500-951-PMU-001 Rev F.

1.3 1.3 ELEMENTOS DAS OPERAÇÕES OFFSHORE

Dando continuidade às tratativas introdutórias, cabe aqui ressaltar os principais elementos encontrados nas operações da Engenharia Offshore, tais como as embarcações e seus componentes a bordo, os poços ou campos de exploração e as linhas flexíveis, conforme está detalhado a seguir:

1.3.1 EMBARCAÇÕES, FSO E FPSO

As embarcações são veículos motorizados dotados de equipamentos para atividades Offshore. Há muitos tipos de *PLSVs*, cada um para uma finalidade, do mesmo modo, funcionam as plataformas. As principais categorizações de plataformas são:

- *FSO (Floating Storage Offloading)*
- *FPSO (Floating Production Storage Offloading)*

A diferença entre *FSO's* e *FPSO's* está no fato de que o último possui equipamentos necessários para separação do óleo, a partir do aglomerado de óleo, minerais, água e gases que são extraídos do poço. Estes são navios de alta capacidade de carga e com um convés muito amplo, capaz de receber as instalações de diversos equipamentos para as atividades de estoque e produção do óleo. (Figura 5, Figura 6 e Figura 7)

Os *FPSO's* surgem na história da indústria do Óleo e Gás a partir de uma brecha na lei estadunidense. O entendimento permitido por lei era de que só podia ser considerado navio uma embarcação que fosse motorizada. A partir de então, empresas do setor adaptaram antigos navios



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



cargueiros em estações flutuantes com capacidade de estocar e produzir óleo (MORAIS, 2023).

Estas unidades possuem ainda duas variações:

- *FPDSO*: possui equipamentos para perfuração do poço (D - *Drilling*)
- *FPWSO*: possui equipamentos para intervenções no poço (W – *Workover*)

Figura 5 - Embarcação realizando lançamento de Linhas flexíveis



Fonte: FERREIRA, Débora. 2013.

Figura 6 - Embarcação realizando lançamento de linhas rígidas



Fonte: FERREIRA, Débora. 2013.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 7 - Embarcação com Bow Turret



Fonte: CHAKRABARTI, Subrata. 2005. Volume I.

Os *PLSVs* são dotados dos seguintes equipamentos:

i. BOBINAS

As bobinas desempenham o papel de armazenar as linhas durante seu transporte antes do lançamento (Figura 8). As linhas flexíveis podem ser transportadas em bobinas com raios a partir de 3,0m, devido ao raio de curvatura limite mais permissivo, enquanto as linhas rígidas precisam de bobinas com mais de 10,0m de raio.

Figura 8 - Embarcação com bobinas carregadas no convés



Fonte: MENDES, Mateus (2021).



ii. TENSIONADORES

Os tensionadores, conhecidos também como "Lagartas", referem-se a esteiras dispostas em torno da "*Fire Line*", com a finalidade de aplicar uma pressão uniforme ao longo de seu comprimento (Figura 9). Isso permite que, através do atrito, a linha seja adequadamente sustentada durante o lançamento e tracionada durante o recolhimento.

Figura 9 – Tensionador para lançamento/recolhimento vertical



Fonte: Marine Developments. 2024.

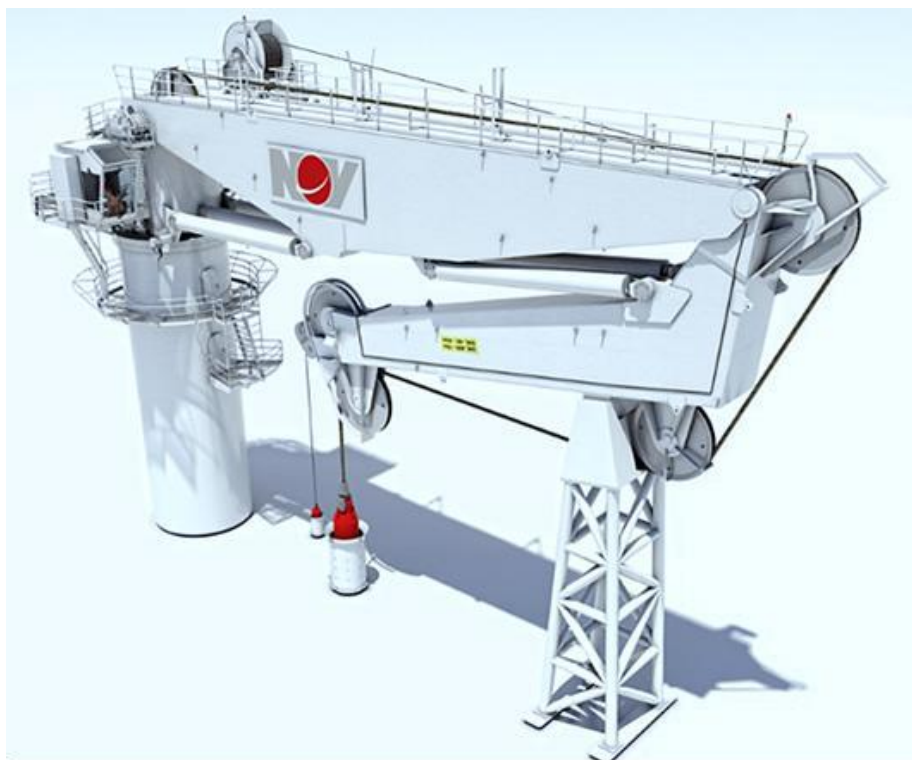


iii. GUINDASTES

Os guindastes são dispositivos que têm a função de movimentar cargas tanto nas áreas próximas à embarcação quanto em seu interior (Figura 10).

Os modelos mais avançados de guindastes estão equipados com sistemas que permitem compensar as oscilações verticais dinâmicas, que são causadas pelas ondas, garantindo assim uma operação mais estável mesmo diante das movimentações da embarcação.

Figura 10 - Guindaste Offshore de 250 tf



Fonte: SILVEIRA COSTA, Pedro. 2015.



iv. GUINCHOS

Os guinchos consistem em cabos altamente resistentes que desempenham diversas funções essenciais, incluindo a transferência de cargas, o abandono e o recolhimento de linhas no fundo do mar (Figura 11).

Figura 11 - Guincho de linha



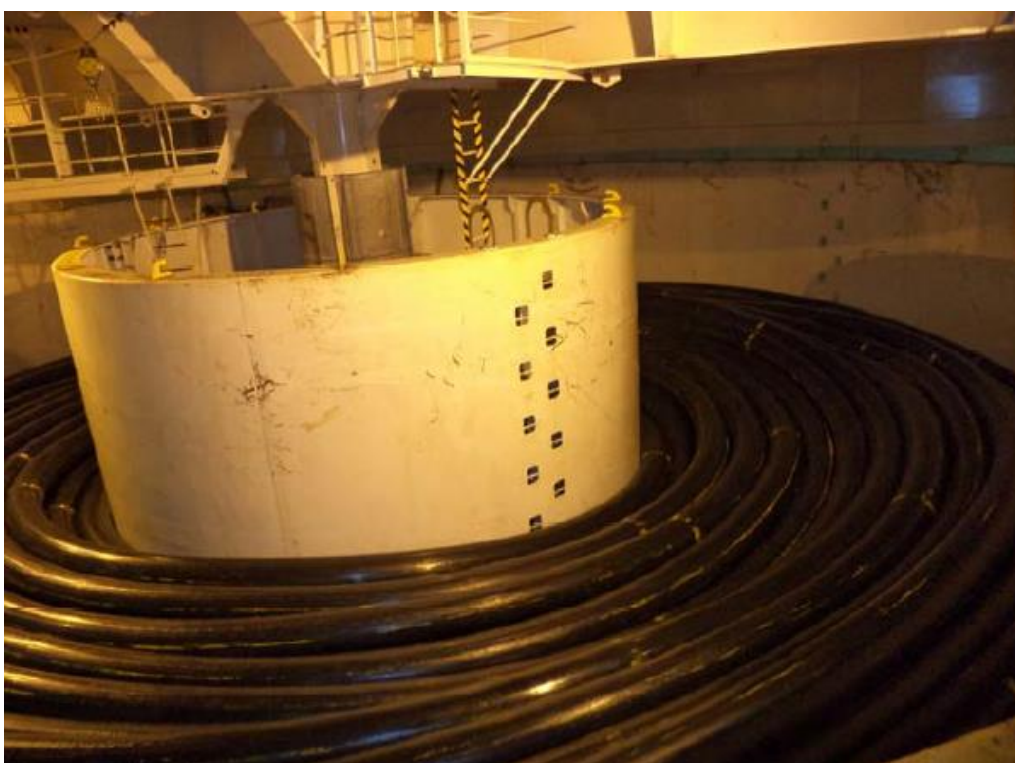
Fonte: SILVEIRA COSTA, Pedro. 2015.



v. CESTAS

As cestas são recipientes designados para armazenar as linhas flexíveis (Figura 12). Em uma única embarcação, é possível encontrar várias cestas, cada uma contendo quilômetros de linha em seu interior.

Figura 12 - Cesta da embarcação



Fonte: FERREIRA, Débora. 2013.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



vi. ROV

Esses são veículos controlados remotamente, destinados a operações submarinas (Figura 13). Equipados com braços manipuladores e câmeras, permitem tanto a observação quanto a manipulação de instalações subaquáticas.

Figura 13 - ROV da embarcação



Fonte: FERREIRA, Débora. 2013.



1.3.2 POÇOS DE PETRÓLEO

Existem dois tipos principais de poços: os de produção, onde o óleo e/ou gás natural é extraído, e os de injeção de água ou gás, que mantêm a estabilidade do reservatório. A injeção de água ou gás ajuda a controlar as condições de pressão e temperatura do sistema, garantindo que o escoamento seja facilitado. Deste modo, esses poços de injeção podem ser usados para aumentar a pressão e facilitar a extração de óleo, ou criar uma zona de baixa pressão para promover sucção do óleo. Essas são técnicas comuns na extração de óleo de um reservatório.

De forma resumida e geral, as etapas para completação de um poço de petróleo, são as descritas abaixo:

i. PROSPECÇÃO DO CAMPO DE EXPLORAÇÃO

Trata-se de um programa cujo objetivo é localizar, dentro de uma bacia sedimentar, as situações geológicas que tenham condição para acumulação de petróleo e verificar qual, dentre estas situações, possui mais chance de conter petróleo. Os tipos de prospecção se enquadram nas categorias de Métodos geológicos, Métodos Potenciais e Métodos Sísmicos.

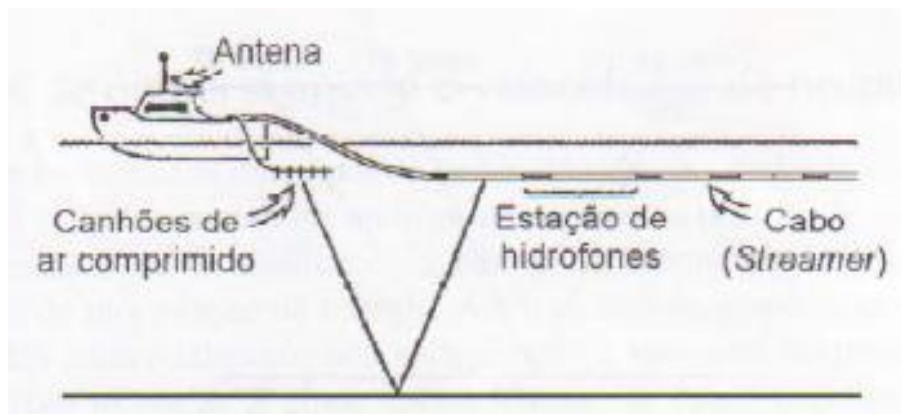
Os Método sísmico de reflexão é o mais utilizado. Nele, por meio de aeronaves, drones ou satélites, são emitidas ondas que permeiam o oceano e chegam até o leito marinho, com a capacidade de mapear um sequenciamento de rochas. Conforme a Figura 14 e a Figura 15, os canhões e o cabo contendo os hidrofones são estabilizados entre 10 e 15 metros de profundidade. Em alguns casos, o navio reboca duas baterias de canhões que são disparados alternadamente, e vários cabos, cujo afastamento lateral pode chegar a centenas de metros.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 14 - Esquema ilustrativo de levantamento sísmico marítimo.



Fonte: THOMAS, José (2001).

Este sequenciamento é fundamental para o estudo de geólogos e outros especialistas, que emitirão um parecer sobre a potencialidade local de um campo de exploração. (THOMAS; Fundamentos de Engenharia de Petróleo; 2001)

Figura 15 - Levantamento marítimo 3-D.



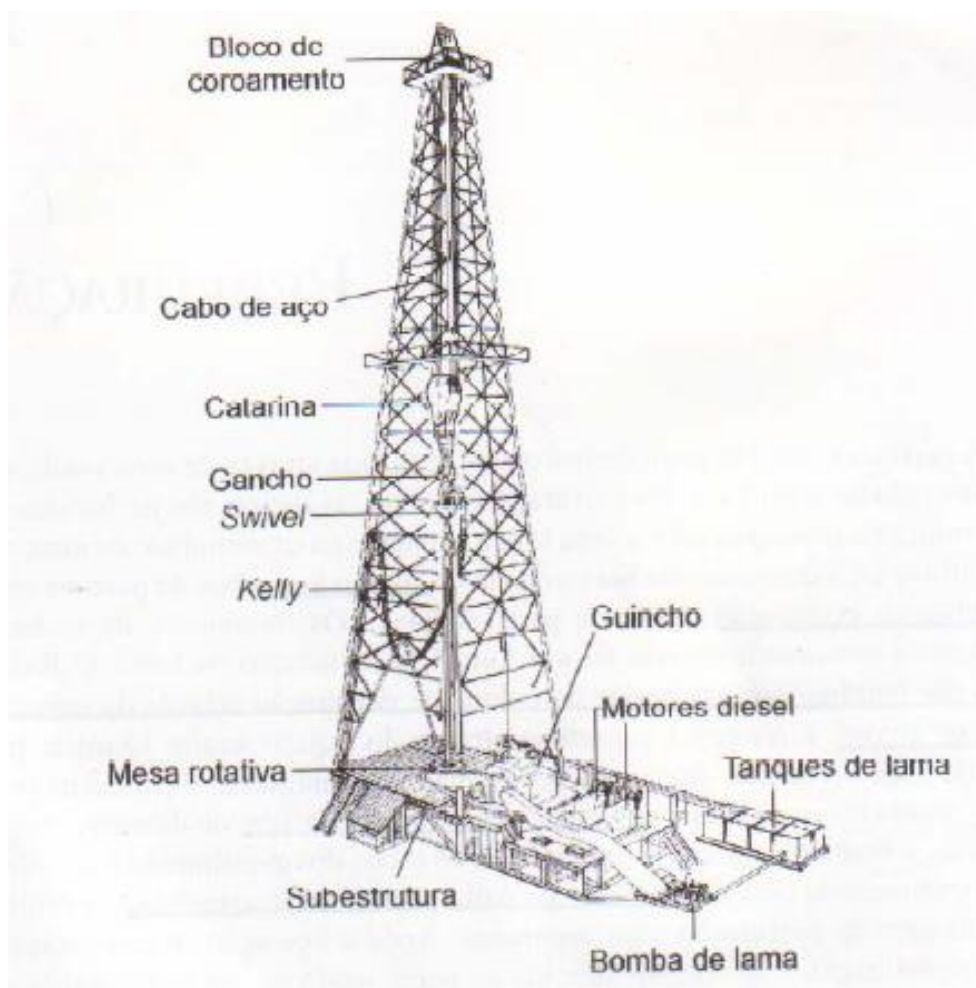
Fonte: THOMAS, José (2001).



ii. PERFURAÇÃO DO POÇO

A perfuração de um poço é realizada mediante uma sonda de perfuração. Na perfuração rotativa, as rochas são perfuradas pela ação da rotação e peso aplicados a uma broca existente na extremidade de uma coluna de perfuração (Figura 16). Os fragmentos da rocha são removidos continuamente através de um fluido de perfuração.

Figura 16 - Esquema de uma sonda rotativa



Fonte: THOMAS, José (2001).



iii. PERFILAÇÃO A POÇO ABERTO

O perfil de um poço é a imagem, em relação à profundidade, de uma ou mais características ou propriedades das rochas perfuradas.

iv. ANÁLISE DE VIABILIDADE:

A taxa de produção de um poço é dada pela dificuldade encontrada em se extrair o óleo contido nele e pela quantidade que é possível extrair. Portanto, são realizados muitos estudos e, a partir de então, define-se o potencial de viabilidade econômica de exploração do poço.

Um exemplo de fator que deve ser considerado é o potencial de infarto do sistema. Tal problema consiste na possibilidade de aumento da viscosidade do óleo extraído, causado por trocas de calor entre o óleo e a região externa do duto, enquanto este ainda estiver transitando ao longo da linha.

v. COMPLETAÇÃO (BLOW OUT PREVENT)

O BOP é um dispositivo instalado acima da cabeça do poço para prevenir fluxos descontrolados e explosões. Ele é capaz de segurar a pressão dos gases e, no caso de uma iminente explosão, cisalhar a coluna de acesso ao poço.

vi. COMPLETAÇÃO (INSTALAÇÃO DE ANM)

A instalação da ANM (Árvore de Natal Molhada) é como instalar uma válvula do tipo “abre e fecha” na rede de exploração. Esta completação pode ser seca (na plataforma) ou molhada, entra a cabeça do poço e o BOP.

Nas costas litorâneas do continente sul-americano e do continente africano, os reservatórios costumam ser bastante espalhados ao longo do leito marinho. Isto faz com que a instalação de um campo de exploração seja altamente dependente do relevo. Por isso, no Brasil, a maior parte das completações de poços são do tipo molhada ou mistas.

vii. PERFILAÇÃO DE PRODUÇÃO

A perfilagem de produção é feita através de perfis corridos após a descida do revestimento de produção e completação inicial do poço, visando determinar a efetividade de uma completação ou as condições de produtividade.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



viii. SANGRIA DO RESERVATÓRIO

Nesta etapa, desce-se um disco explosivo (Caioneio) que consegue realizar perfurações que provocam o escoamento do óleo. É necessário ter muito controle nesta operação para que não ocorram acidentes. A partir da sangria do reservatório, e com toda a estrutura da ANM, pode-se realizar a CVD para exploração do campo.

1.3.3 LINHAS FLEXÍVEIS, DESCRIÇÃO E COMPARATIVO

Os dutos flexíveis funcionam semelhantes a mangotes, com diversas camadas de armadura e de materiais especiais, utilizados nas atividades de produção. São utilizados em plataformas ou navios de exploração. A sua configuração possibilita, com segurança, uma rigidez a flexão baixa, de tal modo que se pode obter um raio de curvatura reduzido quando comparado com o raio de curvatura dos dutos rígidos.

Os flexíveis possuem diversas aplicações. Podem servir para transporte de óleo (produção) ou de gás ou água (injeção) ou para transporte de fluidos de controle hidráulico ou elétrico. Neste último caso, são chamados de umbilicais.

Os flexíveis com objetivo de produção e de gás-lift possuem vazão de gases ao longo de seu *Bore*. Estes flexíveis, possuem uma camada, que envolve o *Bore*, chamada Carcaça, cuja função é resistir às pressões que podem gerar o colapso do duto. Entretanto, há casos nos quais, após análise, se verifica a não necessidade da Carcaça, devido à diferença de pressões interna e externa estar bem reduzida, sendo possível substituí-la por uma camada polimérica que auxilia no controle da difusão de gás. Em casos extremos, pode-se utilizar uma linha com ambas as camadas.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



O modelo padrão de uma linha flexível está exemplificado na Figura 17 abaixo:

Figura 17 - Seção típica de um duto flexível



Fonte: Engenharia compartilhada. 2024.

Bore: Região interna da linha, onde percola o fluido do reservatório

Carcaça: Região de armadura destinada a resistir ao colapso (hidrostático), resistir as cargas radiais de compressão e suportar a corrosão;

Camada de pressão: Conjunto destinado a estancar a passagem de fluidos pela carcaça e transmitir os esforços de pressão interna para as armaduras;

Armadura de pressão: Camada destinada a resistir os esforços de pressão, impedindo deformações excessivas;

Camada anti-abrasão: Camada destinada a amenizar o atrito entre as camadas de aço;

Camada anti-colapso: Conjunto destinado a ser uma barreira de segurança, para o caso de colapso da capa externa;

Armaduras de tração: Camada destinada a resistir os esforços de tração;

Capa externa: Camada de interface com a água do mar, assegurando a estanqueidade e protegendo as camadas internas.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



A estrutura de um flexível é constituída por camadas poliméricas e metálicas, cada uma com uma função específica, conforme detalhado acima. Estas camadas podem deslizar umas sobre as outras quando a estrutura é submetida a dinâmica dos esforços de flexão, no entanto, atualmente já existem estruturas nas quais estas camadas são intertravadas ou coladas entre si por um material elastomérico, uma espécie de borracha vulcanizada.

Os dutos flexíveis podem receber duas nomeações em função das solicitações que irão sofrer. Quando são nomeados “*Riser*” estarão submetidos a efeitos de ondas, portanto, operam sobre solicitações dinâmicas, e estarão com suas extremidades conectadas no FPSO e no leito marinho, cruzando a LDA de projeto. Quando são chamados “*Flowline*” estarão submetidos a efeitos de correntezas, portanto, operam sobre solicitações estáticas, e estarão totalmente apoiados no leito marinho, exceto em pequenos trechos, previamente analisados, nos quais podem haver vãos livres. Um *Riser* também se diferencia de uma *Flowline* por possuir camadas “anti-wear” entre as suas armaduras, para impedir a abrasão entre as partes metálicas durante a movimentação relativa destas.

Em uma operação, as linhas são dotadas de acessórios, tais como:

- **Conector:** acessório que conecta a extremidade da linha à extremidade de outro equipamento, geralmente ao flange do MCV;
- **Vértebra:** acessório cuja função é garantir que o raio mínimo da estrutura não seja infringido, geralmente é utilizado junto às extremidades das conexões da linha;
- **MCV:** equipamento que permite a conexão entre a extremidade final do duto flexível ao poço.



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 2.1 INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE LINHAS SUBMARINAS

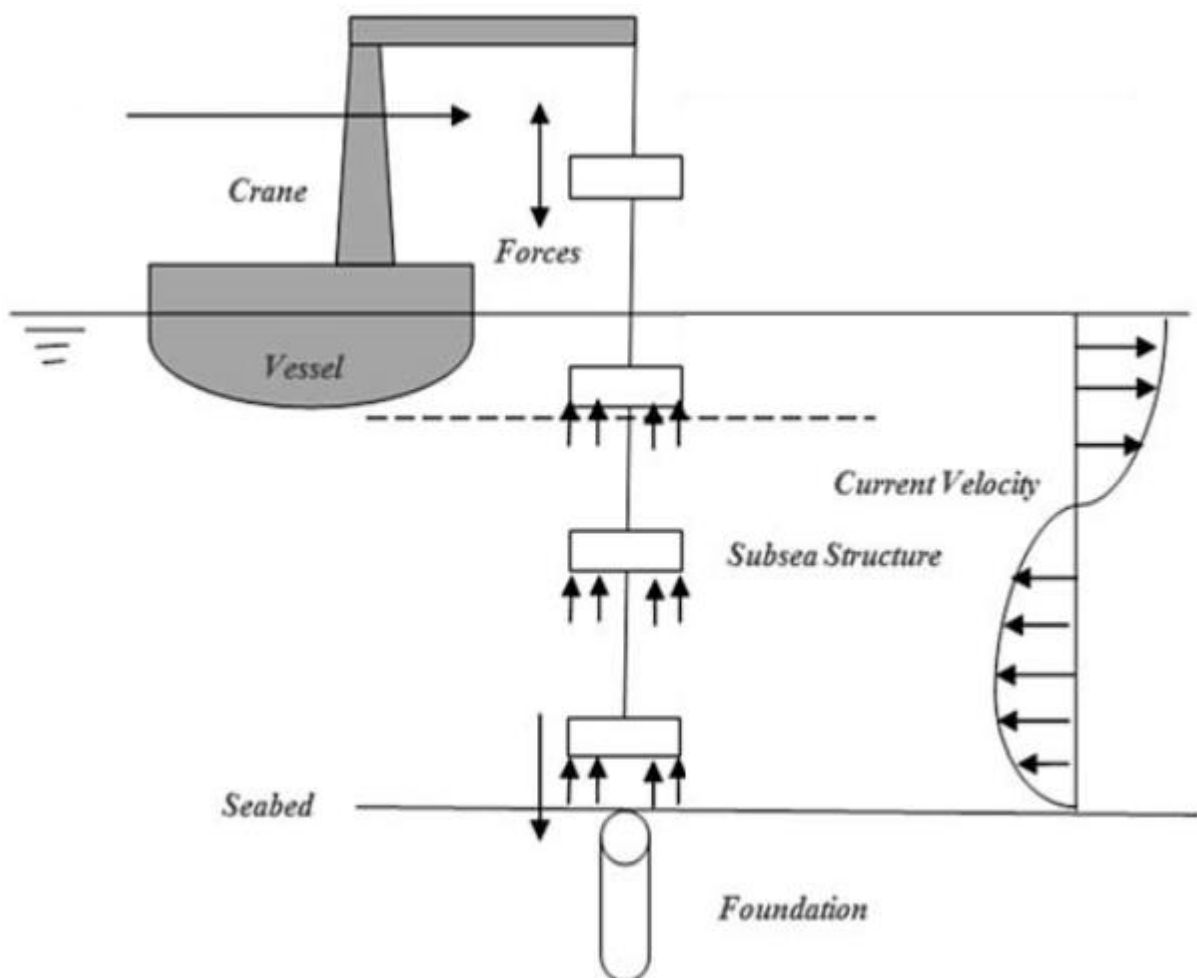
A análise de instalações é a melhor forma de validar índices de resistência dos materiais que precisam ser, garantidamente, superiores às solicitações às quais o equipamento analisado estará submetido, de modo que nenhum modo de falha do material venha ocorrer. De acordo com Fergestad e Lotveit (2017), as análises podem ser classificadas como:

1. Análise preliminar para determinação da metodologia, das embarcações, dos equipamentos e de fatores como custos e duração estimada. Este tipo de análise está associado às atividades muito críticas.
2. Análise detalhada com objetivo de desenvolver os procedimentos da instalação. É neste caso que se enquadra a análise de Conexão Vertical Direta, bem como outras análises

Além disso, as análises de instalações submarinas, geralmente, incluem etapas de verificação/cálculo das etapas descritas na lista abaixo e na Figura 18.

1. Carregamentos
2. Posições para fixação marítima, caso necessário
3. Transporte
4. Estudo do local
5. Implantação (incluindo lançamento, descida, pouso, posicionamento e configuração das instalações)
6. Levantamento de *as-built*

Figura 18 – *Sketch* do passo-a-passo de uma instalação submarina típica



Fonte: do próprio autor.

A análise de instalações é comumente separada em duas etapas. A primeira etapa é uma análise estática que desconsidera qualquer carregamento do ambiente (como ondas e correntes). O seu propósito consiste em responder questões como:

- Qual a melhor posição para a plataforma ou embarcação estar durante a operação?
- Quanto de linha deve ser pago para a realização da instalação?
- Quais são as tensões que todo o sistema seria submetido, ainda sob condições estáticas?



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL

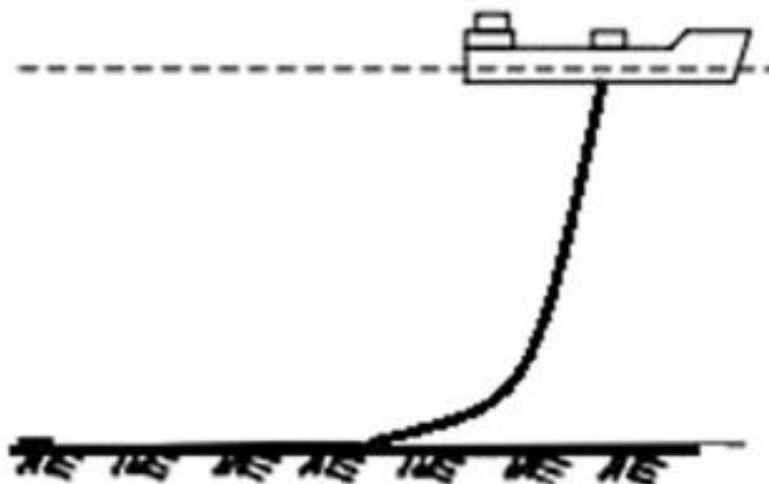


A segunda etapa é uma análise dinâmica, os carregamentos de ondas e correntes são finalmente inseridos. Nesta fase, o estudo tem propósito de determinar quais são os estados de mar nos quais a operação pode ser realizada, em função dos máximos esforços de tensão máximas e a da distribuição de tensão/deformação. Estes resultados são verificados em cada ponto crítico da instalação.

A instalação de linhas flexíveis, possui os seguintes métodos:

- Catenária livre: Método de instalação mais barata, devido à facilidade de instalação e dispensação de muitas infraestruturas submarinas. Apesar das vantagens deste método, é necessário maior atenção à flambagem por compressão na região de contato com o leito marinho e às solicitações devido à dinâmica do PLSV durante o efeito de onda.

Figura 19 – Desenho esquemático do método de catenária livre

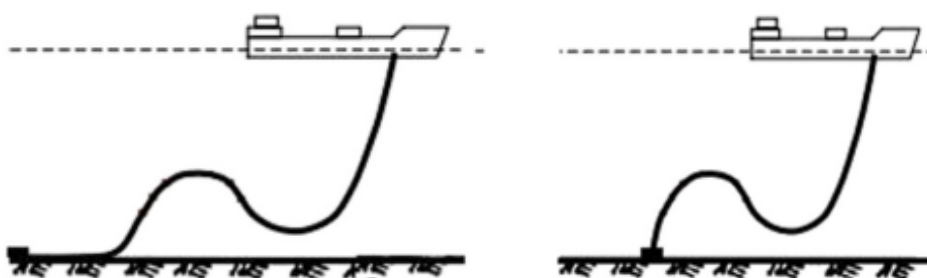


Fonte: BAI, Qiang (2014)

- *Lazy wave* ou *Steep wave*: Em determinadas condições, a instalação em catenária livre provocaria cargas muito elevadas no topo da linha. O método de *lazy wave*, embora seja mais complexo, possibilita melhor condicionamento da linha por

meio da adição de flutuadores em determinada extensão da linha, resultando em solicitações menores.

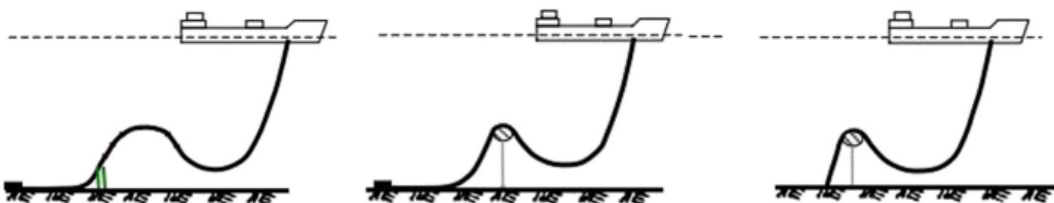
Figura 20 – Desenho esquemático do método de catenária livre



Fonte: BAI, Qiang (2014)

- Outros (*Pliant wave*, *Lazy S*, *Steep S*): Todos os demais métodos de instalação usualmente utilizados para linhas flexíveis são variáveis do método *lazy wave*, com uso de outras infraestruturas submarinas que possibilitam especificidades como: controle do TDP, por meio de ancoragem submarina, como é no caso do método *Pliant wave*, ou utilização de flutuadores ancorados para apoio da linha, aliviando assim as tensões solicitantes, como são os métodos *Lazy S* e *Steep S*.

Figura 21 – Desenho esquemático dos métodos *Pliant wave*, *Lazy S* e *Steep S*



Fonte: BAI, Qiang (2014)

A escolha da metodologia de lançamento do duto se dá por meio da verificação dos limites estruturais dos equipamentos submarinos, da lâmina d'água de projeto, da compatibilidade ou

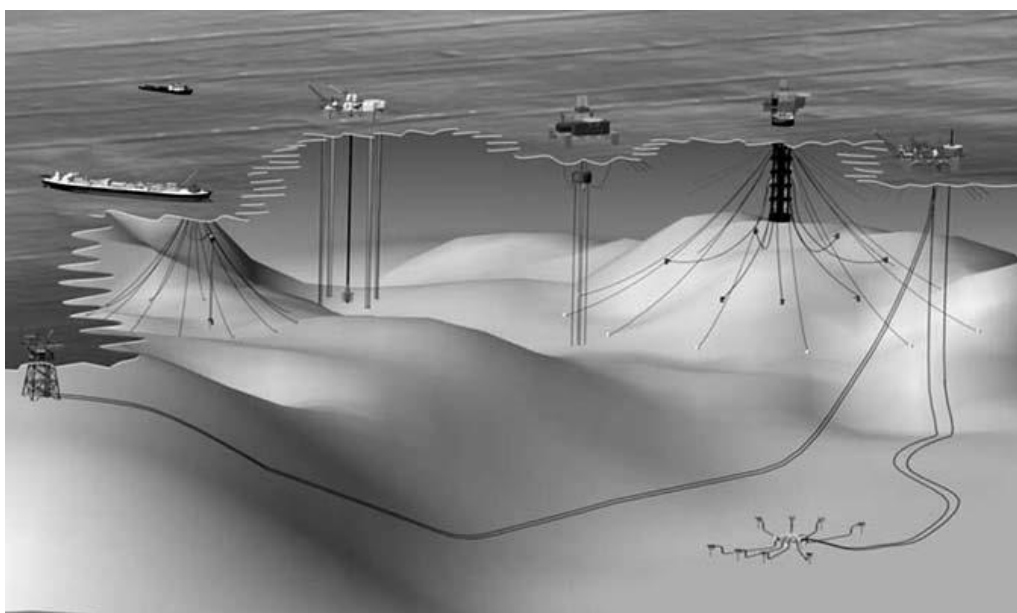


posição de lançamento em função do layout do campo e das respostas dinâmicas da embarcação em função dos carregamentos ambientais. Para além disso, devem ser respeitadas também as especificações da instaladora.

2.2 2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DE PROJETO DE RISERS E FLOWLINES

As linhas submarinas de produção se destinam a conectar plataformas ou embarcações flutuantes às instalações no leito marinho e são um dos mais complexos sistemas com os quais se pode lidar no processo de análise. Há diversos tipos de linhas submarinas do tipo *risers*, as mais comuns são as linhas rígidas e as linhas flexíveis. A Figura 22 ilustra bem diversos tipos de sistemas com linhas submarinas, bem como a Figura 23, a Figura 24, a Figura 25 e a Figura 26.

Figura 22 – Ilustração de diversos tipos de instalações de linhas submarinas



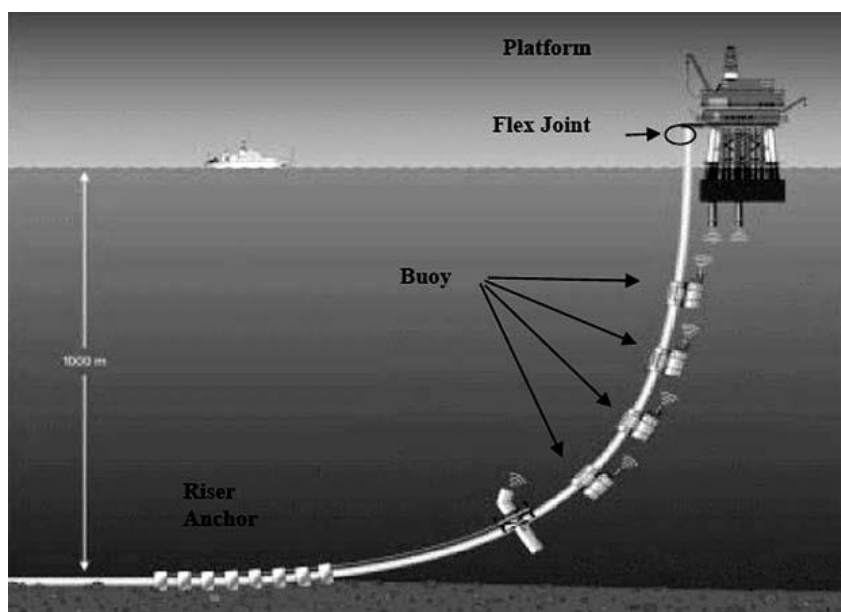
Fonte: BAI, Qiang. 2014.

De modo geral, em função da arquitetura do campo da instalação e do custo, pode ser definida a adoção entre linhas flexíveis e rígidas. As linhas flexíveis possuem custo por metro mais elevado. Porém, sua instalação é mais barata e possui maior tolerância com os carregamentos dinâmicos. As linhas submarinas possuem um número grande de propósitos:

- Linhas de transporte ou exportação

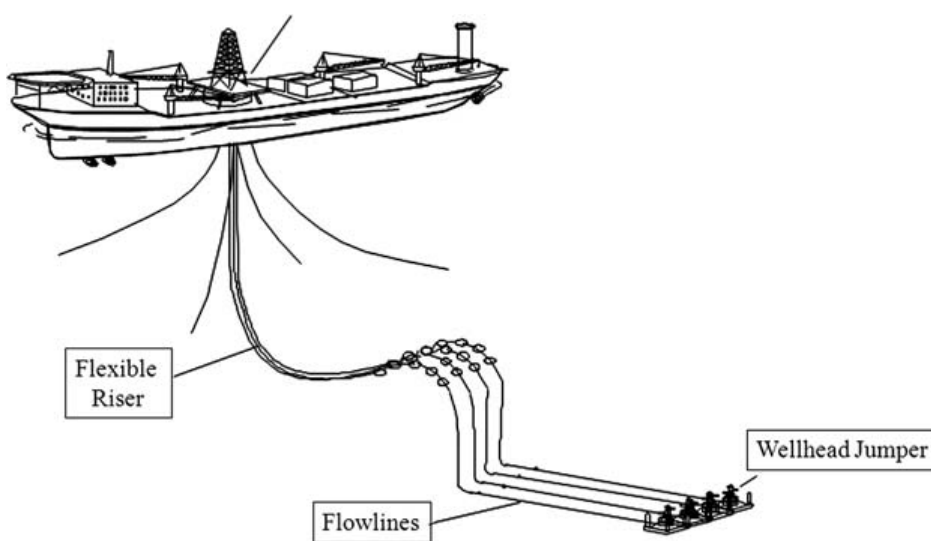
- Linhas para transferir produtos entre plataformas, manifold e poços
- Linhas para transferir produtos da plataforma para as linhas de transporte
- Linhas para injeção de água ou produtos químicos

Figura 23 – Catenária típica de um *riser* de aço



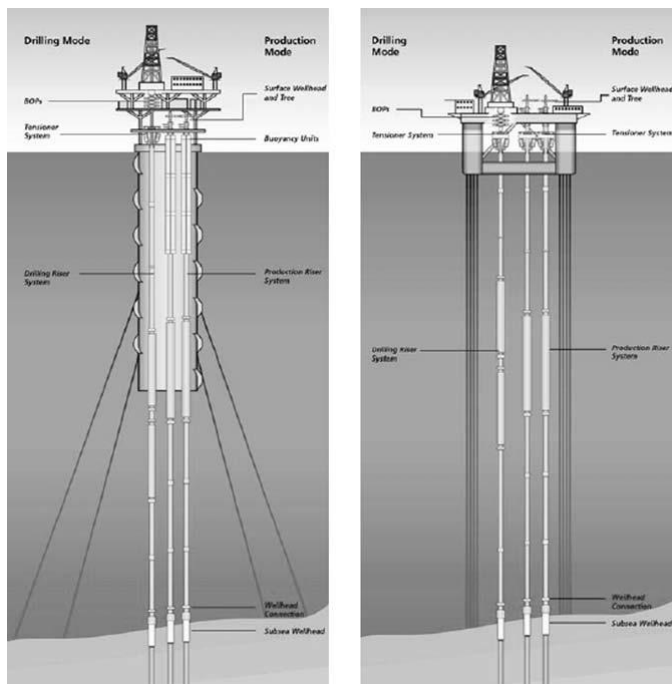
Fonte: BAI, Qiang (2014).

Figura 24 – Configuração de Linha flexível



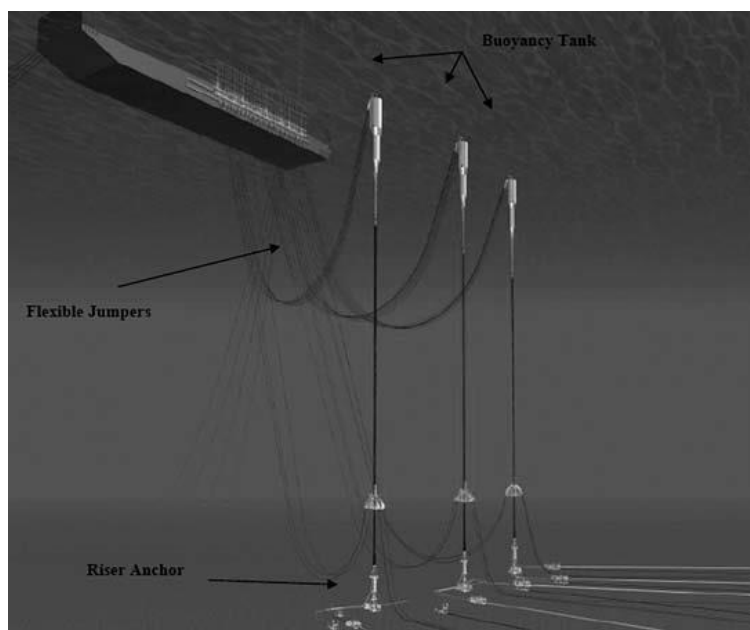
Fonte: BAI, Qiang (2014).

Figura 25 – Riser de tensão de topo, em plataformas



Fonte: BAI, Qiang (2014).

Figura 26 – Configuração de Riser híbrido



Fonte: BAI, Qiang (2014).



2.2.1 CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento das linhas submarinas inicia com as considerações do diâmetro e da espessura do tubo flexível, de modo a se garantir o funcionamento adequado da estrutura e a otimização dos custos. Alguns fatores que influenciam estas decisões são:

- O planejamento quanto às questões de transporte, limpeza, inspeção
- Características do poço a ser explorado
- Limitações estruturais
- Características da instalação
- Características de fabricação
- Condição de águas profundas

A partir das considerações anteriores, devem ser adotados os materiais, em função dos requerimentos para resistir aos modos de falha e das disponibilidades construtivas (limitações tecnológicas). Além disso, deve-se levar em consideração o “*Metoccean Data*”, que define as melhores janelas operacionais, em função das condições de mar.

Outro ponto relevante de análise é a interação entre o flexível e o solo marinho. Considerações sobre este tópico da análise não podem reproduzir perfeitamente o cenário real. Isto se deve principalmente às dificuldades existentes no estudo do solo do leito marinho, sobretudo em grandes profundidades. Para além disto, muitas vezes as operações *offshore* se valem de intervenções no leito marinho, como remodelação do solo, escavação de valas e preenchimentos do solo.

As considerações dos efeitos provocados pela movimentação da embarcação devem ser feitas a partir das análises de domínio no tempo e de domínio na frequência. Deve ser considerado o RAO (*Response amplitude operator*) definido no CoG (*Center of gravity*) para carregamentos predefinidos.

Um ponto muito importante também consiste na definição da teoria de onda que será adotada para a análise. Para condições de mar mais regulares, o uso comum está na modelagem da teoria de Stokes de 5º ordem, conforme Fergestad e Lotveit (2017).

Após estas considerações, a análise estática determinará uma configuração baseada na teoria de catenária, considerando principalmente o ângulo de *hang-off*, a profundidade, e o peso



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



por metro da linha submarina. O objetivo geral é garantir eficiência em superar quaisquer modos de falha.

2.3 2.3 ANÁLISE DE CVD, DE ACORDO COM A “ET-3000.00-1500-951-PMU-001” E A “ET-3000.00-1500-941-PMU-006”.

A metodologia para a análise e a condução da operação de CVD são critérios definidos pela Petrobras nas Especificações Técnicas ET-3000.00-1500-951-PMU-001 e ET-3000.00-1500-941-PMU-006. Na data da elaboração deste documento, ambas as ETs se encontram, respectivamente, nas revisões F e C.

A Especificação técnica ET-3000.00-1500-951-PMU-001 tem por conteúdo a descrição da metodologia de instalação de MCVs, e na sua última revisão foram inseridos também os tópicos referentes à desinstalação de MCVs. Portanto, é possível encontrar nela os requisitos para análise das operações de CVD e DCVD. Seu objetivo é balizar as análises numéricas e a condução da operação de CVD por parte das instaladoras.

Já a especificação técnica ET-3000.00-1500-941-PMU-006, tem por conteúdo a descrição da metodologia para análise de carga em MCVs. Portanto, em seu conteúdo é possível encontrar as diretrizes para a construção do modelo da operação de CVD, descrições da metodologia de análise de CVD, diretrizes para a elaboração de uma configuração de CVD e para atuar com ações mitigatórias para viabilização da análise da operação de CVD. Seu objetivo é detalhar a metodologia de análise no que se refere ao cálculo de esforços e elaboração da configuração aceitável de CVD.

Para o escopo da aplicação desenvolvida neste trabalho, serão verificados apenas os critérios de análise de instalação (casos de carregamento 1 a 3 das Especificações Técnicas informadas). Não serão verificadas as etapas de análise 4 e 5 (Testes hidrostático e de operação).

2.3.1 ANÁLISE DA OPERAÇÃO

O capítulo 3 da ET-3000.00-1500-951-PMU-001 (2019) trata dos requisitos para análise numérica da operação de CVD. A ET visa estipular o mínimo escopo que a análise, apresentada pela instaladora, deve ter, os critérios que cada etapa da análise deve verificar e atender e os limites estruturais do MCV, como referência de esforços admissíveis.



i. ESCOPO DE ANÁLISE MÍNIMO

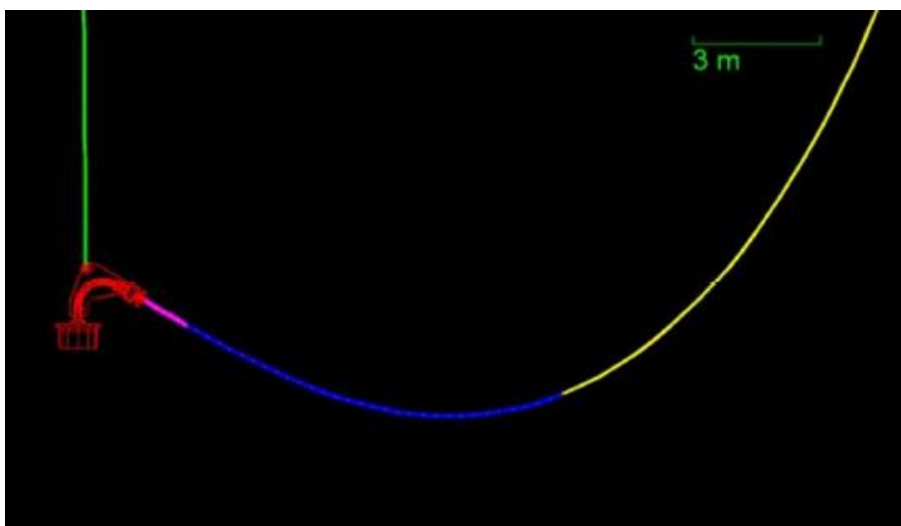
De forma geral, a ET (2019) configura como escopo de análise “todos os possíveis casos de carregamento que possam gerar esforços significativos no MCV e curvatura acentuada do duto durante a operação de CVD”. Isto é afirmado, no entanto, com propósito de englobar possíveis casos não previstos pela ET, que, caso existam, devem ser acrescentados na análise.

Os pontos mínimos ou fundamentais de aceitação da análise são:

- **Equilíbrio em condição estática:**

De acordo com a ET (2019), este caso de análise “consiste em estabelecer uma configuração do duto em que o ângulo de inclinação do MCV seja igual à 0 grau, sendo que, em casos extremos, pode-se considerar um desalinhamento máximo do MCV de módulo igual a 0,5 grau na configuração do modelo numérico. Além disso, recomenda-se a não permissão do travamento da vértebra. O objetivo deste caso é definir a configuração de linha e flutuadores/peso morto, que leva à verticalização do MCV, e, por conseguinte, à condição do mesmo ser acoplado” (Figura 27).

Figura 27 – Modelo estático no OrcaFlex.



Fonte: ET-3000.00-1500-951-PMU-001 (2019)



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- **MCV no HUB com linha suspensa:**

De acordo com a ET (2019), este caso de análise “é o caso que simula a situação de CVD na qual o MCV está acoplado no HUB, e, portanto, com movimento restringido, e a linha é suspensa pelo PLSV devido à ação de uma onda. O propósito aqui é determinar o momento máximo na interface do MCV com a linha, no sentido de suspender o flange do MCV. Este momento máximo é determinado aplicando-se um deslocamento vertical na extremidade da linha, a partir da condição anterior” (Figura 28).

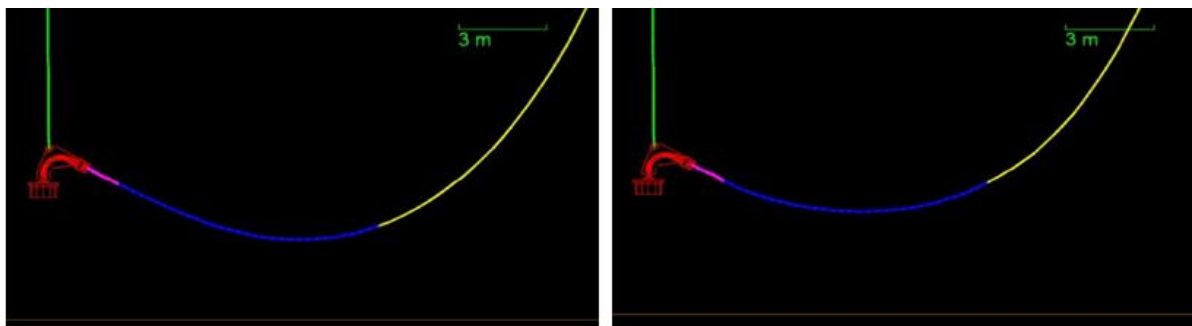
A ET também ressalta que as características do PLSV impactam no resultado da análise e, portanto, estas características devem ser levadas em conta. Está se falando de fatores como: a posição do ponto de lançamento da linha, o RAO (*Response Amplitude Operator*), a posição do guincho, entre outros. Embora já em 2015, em sua revisão C, a ET já reconhecesse que as características do PLSV impactam nos resultados da operação, somente em sua revisão D (2017), virá a apresentar o seguinte imperativo para as instaladoras: “o valor de deslocamento vertical deverá ser utilizado com período e intensidade baseados no comportamento dinâmico do barco que fará a instalação, levando sempre em conta a possibilidade de correção do aproamento para evitar picos de ressonância”.

Observações gerais:

- Este caso depende das particularidades de cada PLSV, tais como: posição do ponto de lançamento da linha, posição do guincho ou guindaste e RAO;
- Nas análises realizadas pela Petrobras, considera-se um deslocamento vertical máximo da linha de 2,5 metros, aplicados em 2,15 segundos;
- Deve ser levado em conta a possibilidade de correção do aproamento para evitar picos de ressonância;
- A instaladora não considera valores de movimento vertical e período associado que causem restrição à janela de operação contratada sem autorização prévia da Petrobras;



Figura 28 – Modelo dinâmico no OrcaFlex (*Heave up*).

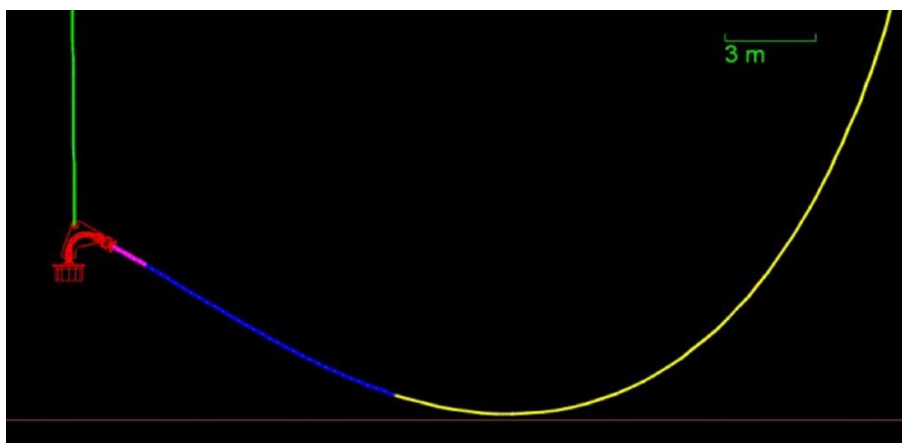


Fonte: ET-3000.00-1500-951-PMU-001 (2019)

- **MCV no HUB:**

De acordo com a ET (2019): “O objetivo desta análise é verificar os esforços na interface do MCV com o duto no instante em que a linha realiza o primeiro contato com o solo após a conexão do MCV no hub” (Figura 29).

Figura 29 – Modelo dinâmico no OrcaFlex (*Touch Down Point*)



Fonte: ET-3000.00-1500-951-PMU-001 (2019)

Observações gerais:

- No caso das linhas da GE, as análises são realizadas considerando a curva de rigidez à flexão da linha com anular alagado, em equilíbrio hidrostático (tipicamente, caso 6 do documento, exceto quando indicada outra informação).



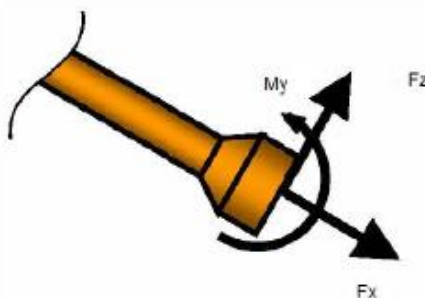
- Toda ocorrência de divergência entre a configuração projetada pela Instaladora e a configuração real é documentada e anexada ao Relatório de Serviço da operação.

ii. LIMITE ESTRUTURAL DO MCV

Está previsto na ET (2019) que, para cada operação de CVD, “a Petrobras fornecerá à instaladora um Relatório Técnico de Análise de MCV”. Neste relatório estão todas as informações necessárias para realização da análise, um conjunto de carregamentos admissíveis para o *gooseneck* do MCV, em função do que está descrito no item anterior (Escopo de análise mínimo) e o raio de travamento e momento admissível da vértebra verificados na análise da operação. Em 2017, na revisão D, foi adicionada à ET a permissão para configurações nas quais há travamento de vértebra (tal condição era proibida na revisão C), com a condicionante de que os esforços medidos na vértebra travada não ultrapassassem seu limite estrutural.

Os carregamentos são verificados seguindo o mesmo sistema de referência, apresentado na ET, conforme a Figura 30:

Figura 30 – Sistema de referência para os esforços solicitantes



Fonte: ET-3000.00-1500-951-PMU-001 (2019)

Uma grande mudança ocorreu entre as revisões C (2015) e D (2017) no que se refere à verificação dos esforços admissíveis. Na revisão C (2015), a ET-3000.00-1500-951-PMU-001 não previa, para o Relatório, o limite estrutural para o caso de Equilíbrio em condição estática. Além disso, os esforços encontrados na análise deveriam ser comparados, individualmente (tração com tração, cisalhamento com cisalhamento e momento com momento) e em módulo, com seus respectivos casos de análise. Na revisão D (2017), a ET passa a prever o limite



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



estrutural para o caso de Equilíbrio em condição estática e adiciona o seguinte dizer em seu conteúdo: “A comparação não precisa feita necessariamente com os casos correspondentes do relatório de cargas.” Isto significa que, a partir da revisão D (2017), a ET passa a permitir que os esforços de quaisquer casos de análise sejam verificados com os esforços do relatório nos quais os valores máximos sejam apresentados. Por exemplo, se, no Relatório apresentado pela Petrobras, os esforços admissíveis máximos estão no caso de análise “MCV no hub com linha suspensa”, estes, caso a instaladora deseje, serão os esforços máximos admissíveis a serem comparados com os esforços encontrados na análise para qualquer caso da análise.

2.3.2 CONDUÇÃO DA OPERAÇÃO

i. VERTICALIZAÇÃO DO MCV NO CAMPO (ANTES DO ACOPLAMENTO)

A operação de CVD é acompanhada por ROV, realizando comparações entre a configuração real observada no campo e a configuração de CVD projetada pela instaladora (e registrada no PE). Em caso de configuração divergente, verifica-se se a nova configuração provoca o travamento do acessório vértebra. Em caso negativo, a operação prossegue. No entanto, em caso de travamento da vértebra, deve ser efetuada uma nova simulação numérica, considerando as condições de contorno do momento da operação (ajuste da rigidez à flexão do duto e parâmetros geométricos do lançamento).

A ET também ressalta que todas as linhas flexíveis de fabricação da GE devem ser consideradas no escopo da análise com seu anular alagado. A diferença entre anular alagado e anular seco se dá na ordem de grandeza de rigidez flexional apresentada pela linha. A presença de fluidos nos interstícios do anular das linhas reduz significativamente a rigidez da linha flexível e, inclusive, altera o comportamento da linha, que, antes, com anular seco, apresentaria o comportamento de rigidez flexional, correspondente à relação Momento x curvatura, possuindo 2 trechos curvos, que podem ser aproximados por retas concorrentes. Mas, com anular alagado, o comportamento de rigidez flexional apresentará 1 único trecho, quase linear e com valores muito mais baixos.

Na revisão F (2019), a ET adiciona a verificação de avaliação de risco após a configuração verticalizada. Em caso de a configuração estar próxima do raio de travamento da vértebra, a



instaladora deve avaliar preventivamente o que pode ser feito para se obter, em análises futuras, raios de curvatura menores e salvar em registro.

ii. MANOBRA DE VERTICALIZAÇÃO DO MCV (APÓS O ACOPLAMENTO DO MCV)

Após o acoplamento do MCV no HUB pode ser necessária à realização de alguma manobra para realizar ajustes finos em sua posição de encaixe, por meio de soft landing. Sendo assim, duas análises de contingência deverão ser realizadas. O objetivo desta ação é não perder tempo operacional com HH de engenharia e com posicionamento de alças estando o projeto já em execução.

Esta operação, chamada Contingenciamento, consiste na instalação de alças no duto, para permitir o manuseio da linha por meio de cabo de guindaste. Esta manobra é utilizada em casos nos quais o travamento do MCV é impossibilitado por algum desalinhamento. A modelagem deste caso é realizada por meio do posicionamento de um ponto de empuxo extra ao longo da linha, simulando o manuseio do guindaste. Verifica-se, assim, o máximo de empuxo possível de se aplicar no ponto das alças de manuseio, sem a violação dos critérios limites da operação.

Observações gerais:

- Nas análises, são previstos 2 pontos de alças previamente instaladas.
- O modelo numérico da análise de contingência considera o MCV já engastado e aproximadamente 10m a mais de linha pagos. Assim, os resultados são mais conservativos.

2.3.3 CONSTRUÇÃO DO MODELO

i. DADOS DO SOLO

A ET-3000.00-1500-941-PMU-006 determina que o modelo padrão do leito marinho deve possuir as seguintes características:

- Coeficiente de atrito longitudinal: 0,35
- Coeficiente de atrito latitudinal: 0,90
- Rigidez vertical: 100,00 kN/m/m
- Rigidez cisalhante: 10.000,00 kN/m/m
- Inclinação: 0,00°



Observação:

A ET salienta que os coeficientes de atrito não dependem apenas do solo, mas também do duto. No programa Orcaflex, por padrão, estes coeficientes são considerados como interação solo-linha flexível.

ii. MODELAGEM DO DUTO E ACESSÓRIOS

- Conector

$$Rigidez\ flexional = E I = E \frac{\pi (OD_{pescoço}^4 - ID_{conector}^4)}{64}$$

$$Rigidez\ axial = E A = E \frac{\pi (OD_{pescoço}^2 - ID_{conector}^2)}{4}$$

$$Rigidez\ torsional = G J = \frac{E}{2(1+\nu)} \frac{\pi (OD_{pescoço}^4 - ID_{conector}^4)}{32}$$

Onde,

$$E = 2,07 \times 10^8 \text{ kN/m}^2 \text{ (Módulo de Young)}$$

$$\nu = 0,3 \text{ (Coeficiente de Poisson)}$$

É utilizado um diâmetro externo equivalente, determinado conforme abaixo:

$$m_{conector,ar} + m_{duto,ar,vazio} = m_{conector,subm.} + m_{duto,subm.,vazio} + \frac{\pi \gamma_w OD_{equivalente}^2}{4}$$

Onde,

$$m: \text{Peso linear } \left(\frac{kgf}{m}\right)$$

Observações:

- Em casos de projetos nos quais não há informação sobre o peso submerso do conector, a ET determina que deve ser feita a estimativa, utilizando como base para o cálculo a densidade típica para o aço ($\gamma_{aço} = 7800 \text{ kg/m}^3$) e a densidade da água salgada ($\gamma_w = 1025 \text{ kg/m}^3$).
- A ET esclarece que a última equação apresentada (referente ao cálculo do diâmetro externo do conector) não corresponde à situação real.

Para as questões referentes à modelagem, considera-se que o comprimento do duto dentro conector é igual ao comprimento do conector. A massa do conector



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



utilizada como entrada de dados no programa deve levar em conta a massa linear de duto flexível em seu interior.

- Restritor de curvatura (Vértebra)

A emissão inicial da ET-3000.00-1500-941-PMU-006 (2016) define que o modelo numérico da vértebra deve possuir as seguintes características:

- Diâmetro interno (ID) = Diâmetro externo do duto flexível
- Diâmetro externo (OD): conforme a formulação abaixo:

$$OD_{equivalente} = \sqrt{\frac{4}{\pi\gamma_w} \left(\frac{P_{vértebraAR}}{L} - \frac{P_{vértebraÁGUA}}{L} \right) + ID^2}$$

Onde,

$OD_{equivalente}$: Diâmetro externo da vértebra (m)

γ_w : 1025 kgf/m³

$P_{vértebraAR}$: Peso da vértebra no ar (kgf)

$P_{vértebraÁGUA}$: Peso da vértebra na água (kgf)

L : Comprimento da vértebra

ID : Diâmetro interno da vértebra

No que se refere à Rigidez flexional a ET indica considerar a Inércia da Vértebra, conforme descrito na equação abaixo:

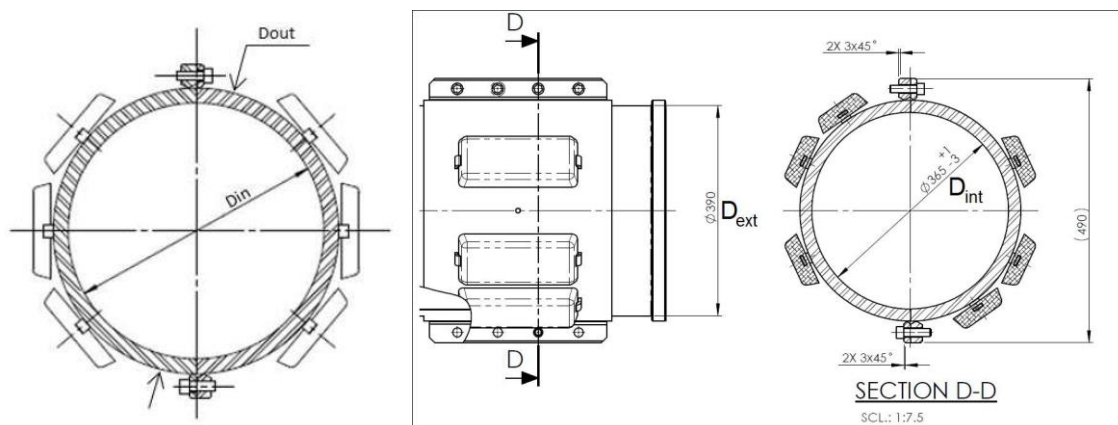
$$I_{vértebra} = \frac{\pi}{4} \left(\left(\frac{D_{ext}}{2} \right)^4 - \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^4 \right)$$

Onde,

D_{ext} : Diâmetro externo da vértebra, na menor seção transversal. (Figura 31)

D_{int} : Diâmetro interno da vértebra, na menor seção transversal. (Figura 31)

Figura 31 – Diâmetros interno e externo da menor seção da vértebra



Fonte: ET-3000.00-1500-941-PMU-006 (2022)

Já a rigidez flexional é definida como:

$$E I_{vértebra} = 2,07 \cdot 10^8 \frac{\pi}{64} (D_{ext}^4 - D_{int}^4)$$

As definições do comportamento Momento x Curvatura para a vértebra sofreram alterações entre a Emissão Inicial da ET (2016) e a Revisão B (2020).

Na Rev. 0 (2016), a curva do comportamento de rigidez da vértebra era definida conforme descrito abaixo:

Curvatura [1/m]	Momento Fletor [kN/m]
0	0
$\frac{1}{MBR_{vértebra}}$	0,01
$1 + \frac{1}{MBR_{vértebra}}$	$0,01 + \left[\left(1 + \frac{1}{MBR_{vértebra}} \right) - \left(\frac{1}{MBR_{vértebra}} \right) \right] + EI$

Na Revisão B (2020), o cálculo passou a ser feito da seguinte forma:

Curvatura [1/m]	Momento Fletor [kN/m]
0	0
$\frac{1}{MBR_{vértebra}}$	0,01



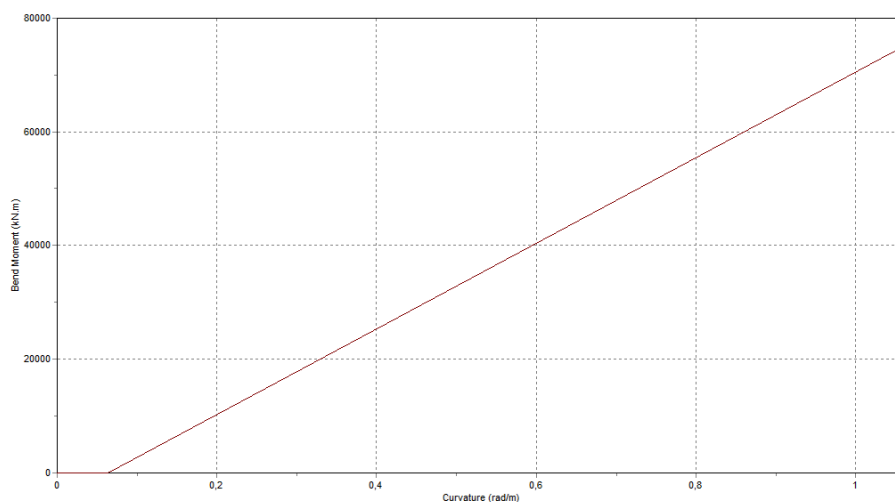
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



$1 + \frac{1}{MBR_{v\acute{e}rtebra}}$	$0,01 + EI$
--	-------------

A modelagem da rigidez da vértebra resulta em uma curva semelhante à da Figura 32 abaixo:

Figura 32 – Gráfico de momento x curvatura da vértebra

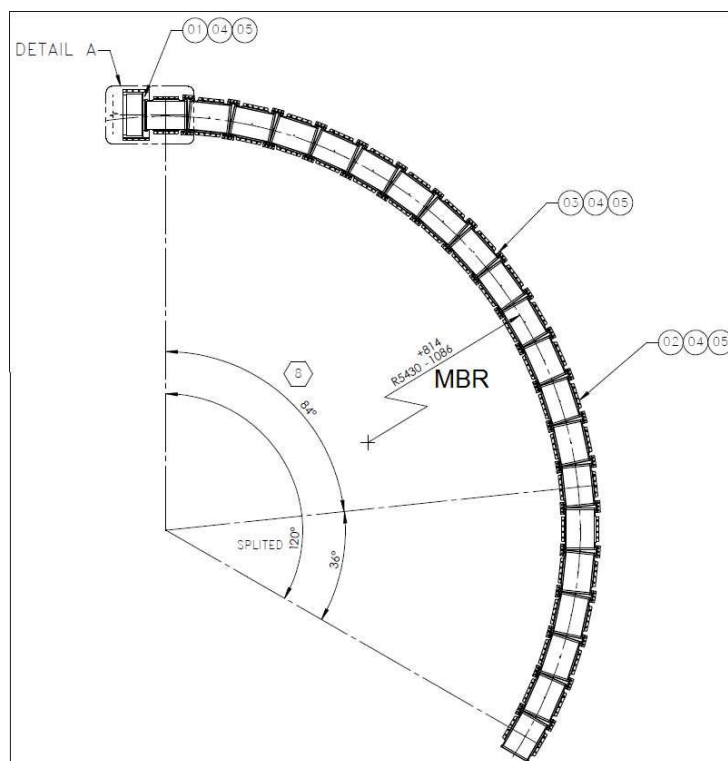


Fonte: ET-3000.00-1500-941-PMU-006 (2022)

A ET também determina que, para a vértebra, deve-se considerar as rigidezes axiais e torcionais como 10 kN e 10 kNm², respectivamente.

Além disso, também é especificado que, nos documentos recebidos pelo time de análise, o MBR é informado com certa tolerância (Figura 33) e deve-se sempre adotar o maior valor informado, como forma conservadora de análise. Também é especificado que a vértebra deve ser modelada, com seu maior comprimento, como elemento do tipo linha e suas propriedades devem ser adicionadas ao modelo na forma de acessório anexado ao trecho de linha correspondente.

Figura 33 – Vértebra típica, com indicação do MBR.



Fonte: ET-3000.00-1500-941-PMU-006 (2022)

Observações:

A ET, em sua Rev.0 (2016), ressalta que não há somente vértebras de aço, mas também poliméricas, e indica que, nestes casos, se qualquer dado necessário não for informado deve-se consultar a Petrobrás.

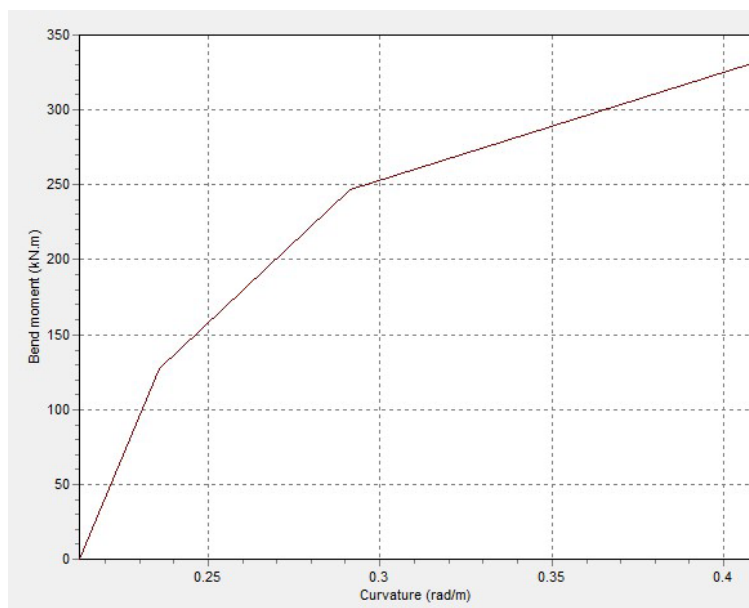
Minimum Bending Radius – Raio Mínimo de Flexão: refere-se ao menor raio que o elemento pode apresentar, quando se curvar sob o efeito de flexão, para se garantir que a integridade do elemento foi garantida. Caso, em análise, o elemento apresentar Raio de Curvatura inferior ao MBR, significa que o elemento entrou em modo de falha.

A ET, em sua Rev. C (2022), trouxe também considerações sobre Vértebras não convencionais. São considerados restritores de curvatura não convencionais aqueles cujo comportamento de rigidez flexional é ajustado sem que se infrinja o MBR, conforme a Figura



34 apresenta. A ET indica como obrigação do fornecedor do acessório informar a sua curva Momento Fletor x Curvatura.

Figura 34 – Gráfico momento x curvatura não convencional



Fonte: ET-3000.00-1500-941-PMU-006 (2022)

- Duto flexível

Segundo a ET, o duto deve ser modelado como elemento do tipo linha, da categoria “General”, no Orcaflex. Os diâmetros interno e externo precisam ser calculados em função dos pesos lineares, conforme as equações abaixo:

$$D_{out} = \sqrt{\frac{4}{\pi p_w} (w_1 - w_2)} \quad D_{in} = \sqrt{\frac{4}{\pi p_w} (w_3 - w_2)}$$

Onde,

p_w : 1025 kg/m³

w_1 : Peso linear do duto flexível vazio no ar (kg/m)

w_2 : Peso linear do duto flexível vazio na água (kg/m)

w_3 : Peso linear do duto flexível cheio d’água na água (kg/m)

A rigidez flexional deve ser adotada em função de cada um dos casos de carregamento:



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



– **Caso 1:**

Temperatura da máxima LDA de projeto

Pressão interna igual à pressão atmosférica

Pressão externa equivalente à máxima pressão da LDA de projeto

– **Caso 2:**

Temperatura da máxima LDA de projeto

Pressão interna e externa ao duto equivalente à máxima pressão da LDA de projeto

– **Caso 3:**

Temperatura da máxima LDA de projeto

Pressão interna igual à pressão de projeto acrescida da pressão devido à coluna de fluido (considerar a linha cheia de água do mar)

Pressão externa equivalente à máxima pressão da LDA de projeto

– **Caso 4:**

Temperatura da máxima LDA de projeto

Pressão interna igual a 110% da pressão de projeto do duto

Pressão externa equivalente à máxima pressão da LDA de projeto

(Atentar para o fato de que a pressão de teste é medida no topo, ou seja, deverá ser acrescentada à pressão hidrostática do fluido de teste no interior do duto)

(Pior caso: água do mar)

Observações:

- O raio mínimo deve ser igual ao MBR operacional. (Quando não informado, o MBR operacional deve ser considerado 1,5 vezes o MBR de armazenamento.
 - Uma extremidade da linha deve ser conectada ao MCV, alinhada com o flange do goose neck e outra presa a um guincho (utilizado para impor movimento vertical).
 - Amortecimento estrutural deve ser proporcional à rigidez de 5% no período de 8,6s.
- Módulo de conexão vertical



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



A ET (2022) determina que o Módulo de conexão vertical deve ser modelado como um objeto 6D_buoy (boia com 6 graus de liberdade – 3 de translação e 3 de rotação), segundo um datasheet (folha de dados) fornecido ao time de análise (Figura 35).

Entre a Rev. 0 (2016) e a Rev. B (2020) foi acrescido ao datasheet do MCV a coordenada H, referente à um pequeno desalinhamento horizontal do CoG (Centro de gravidade) e o eixo do *gooseneck* do MCV.

Figura 35 – Exemplo de datasheet de um MCV

DADOS PARA ANÁLISE DE CARGAS DOS MCVs - FASE DE INSTALAÇÃO				
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	4807	4114	3443
A (4m) *	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	4547	4374	3733
A (8m) *	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	4797	4614	4053
A (12m) *	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	5027	4894	4153
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	601	615	305
E	Distância horizontal do flange ao centro de gravidade	1564	1679	1142
F	Distância vertical do flange à base do MCV	1964	1956	1197
G	Distância horizontal do flange ao centro do hub do MCV	1866	1851	1242
H	Posição do centro de gravidade em relação ao Eixo Y	50	50	7
	Peso do MCV submerso [kgf]	5648	6752	3276

Fonte: ET-3000.00-1500-941-PMU-006 (2022)

A ET (2022) também determina que o engenheiro responsável pela análise tem liberdade para desenhar o MCV conforme desejar, com a condição de respeitar os pontos indicados pelas coordenadas do olhal, do flange e do centro de gravidade. Além disso, é especificado que a linha deve ser fixada ao flange com rigidezes flexional e torcional infinitas e com ângulo de inclinação conforme indicado no *datasheet*.

- Flutuadores

A ET (2022) determina que os flutuadores devem ser modelados com o objeto 3D_buoy (boia com 3 graus de liberdade – 3 graus de translação). Os flutuadores devem ser conectados à linha por meio de objetos link com 3 m de comprimento e rigidez axial de 1000 kN.

As demais características, como massa, volume, altura, áreas e coeficientes hidrodinâmicos, devem ser informadas conforme abaixo:



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Empuxo, em tf
- Massa, em tf
- Volume, em m³
- “*Bulk modulus*” (Módulo de compressibilidade volumétrica), inserido como “*Infinity*” (Infinito)
- Altura, em m
- Área de arrasto, em m², nas 3 direções, x, y e z
- Coeficientes de arrasto, nas 3 direções, x, y e z
- Coeficientes de massa adicionada, nas 3 direções, x, y e z
- Peso morto

A ET (2022) determina que os pesos mortos devem ser modelados da mesma forma que os flutuadores. No entanto, neste caso, não há consideração de forças hidrodinâmicas, portanto, deve-se inserir volume nulo.

- Cabo do guindaste do MCV

A ET (2022) determina que o cabo do guindaste que sustenta o MCV deverá ter as seguintes propriedades:

- OD = 0,09
- ID = 0
- W = 31 kgf/m
- Rigidez à flexão (EI) = 50 kN.m²
- Rigidez axial (EA) = 500.000 kN
- Rigidez torcional (GJ) = 200 kN.m²
- Coeficiente de Poisson = 0,3

2.3.4 METODOLOGIA

Após a conclusão da modelagem do modelo numérico, em conformidade com os dados informados, segue-se para a análise, em função dos casos de carregamento.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Condição de carregamento	Caso de carregamento	Descrição
Instalação	Caso 1	Caso exclusivo da CVD de 2° extremidade, com o duto flexível sustentado pelo MCV, o qual se encontra ainda no PLSV.
	Caso 2	Condição de equilíbrio, MCV próximo ao HUB do equipamento submarino e na posição vertical
	Caso 3	MCV conectado ao HUB do equipamento submarino: i. Linha suspensa com aplicação de movimento vertical do PLSV. ii. Lançamento do duto flexível, momento em que ele toca o fundo do mar.

i. CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO – ANÁLISE ESTÁTICA

Na época de sua emissão inicial, a ET (2016) indicava que, para o caso de “Condição de Equilíbrio – Análise Estática”, deveria se buscar uma configuração para a qual o ângulo de inclinação máximo do MCV fosse igual a 0° , com tolerância de $\pm 0,1^\circ$. Na Rev. B (2020), a ET tornou-se mais flexível em relação a isto, e passou a adotar tolerância de $\pm 0,5^\circ$.

A ET (2022) também determina “ligar” as considerações sobre o comportamento histerético e sobre a torção do flexível. Isto é feito por meio do seguinte caminho (Figura 36):

Model Browser > Variable Data > Bending stiffness

Selecionando a rigidez da linha, clica-se na opção “*histeretic*”.

Model Browser > Line data

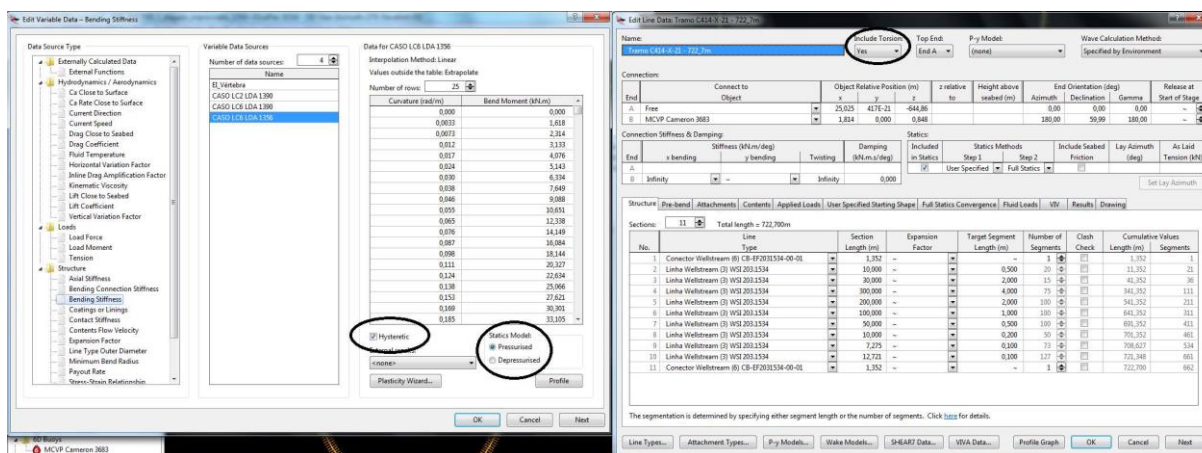
Na caixa que irá parecer, clica-se em “yes” no campo “*Include torsion*”.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 36 – Inserção da histerese e da torsão no duto flexível no Orcaflex



Fonte: ET-3000.00-1500-941-PMU-006 (2022)

A ET deixa a cargo do responsável pela análise a definição da distância horizontal considerada entre o ponto de içamento do MCV e o ponto de saída da linha do PLSV, podendo este variar entre 13m e 70m. Ressalta-se que, salvo algumas exceções, tal distância é adotada igual a 30m.

Consideradas todas estas informações, deve-se obter uma configuração que será utilizada para os casos de carregamentos seguintes, desde que garantida a integridade de todo o sistema. Mas, antes, devem ser coletados os resultados dos esforços e do mínimo MBR ao longo de todo o comprimento da vértebra.

ii. MCV CONECTADO AO HUB

Considerando a configuração obtida na etapa anterior, deve-se engastar o MCV. Neste caso de carregamento, com o MCV engastado, será efetuado uma análise dinâmica onde o duto será submetido a um deslocamento vertical ascendente (*heave up*) simulando uma passagem de uma onda de superfície, e em seguida é assentado no leito marinho até que os esforços no flange não sofram mais alteração.

O movimento vertical, pela ET (2022), foi determinado com base no período crítico de movimentos do PLSV Sunrise e, portanto, só pode alterado com consentimento da Petrobras.

O passo-a-passo deste caso de carregamento é dado conforme descrição abaixo.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Número do estágio	Duração (s)	Tempo de simulação ao final do estágio (s)	Descrição
0	1	0	-
1	2,15	2,15	Aplicação de movimento vertical de 2,5m na extremidade suspensa do duto através do recolhimento do guincho.
2	50	52,15	Tempo para estabilização dos esforços no flange.
3	100	152,15	Lançamento de 10m de duto flexível pagando guincho à velocidade constante de 0,1m/s.
4	500	652,15	Lançamento de 50m de duto flexível e movimentação do PLSV ao longo do azimute da linha. Ambos os movimentos executados à velocidade de 0,1m/s.
5	50	702,15	Tempo para estabilização dos esforços no flange.
6	50	752,15	Liberação dos flutuadores (ou peso morto), se houver e tempo para estabilização dos esforços no flange.

Observação:

- O caso 3 é subdividido em 2 momentos:
 - Movimento vertical do PLSV, logo após o MCV ser assentado no HUB, simulando uma onda passando pelo PLSV com o propósito de determinar o momento máximo na interface do MCV com a linha no sentido de suspender o flange do MCV.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Primeiro contato entre o duto e o leito marinho durante o seu lançamento, com o objetivo de determinar os esforços na interface do MCV com o duto no instante em que ocorre o primeiro contato do duto com o fundo do mar.

Segundo a ET (2022), para que os resultados obtidos considerem a dinâmica do duto durante o heave up, deve ser feita uma análise transiente em que a amplitude do movimento é aplicada em um tempo igual a $1/4$ do período do movimento imposto ($T = 8,6s$), neste caso 2,15s. A velocidade de lançamento deve ser de 0,10m/s a 0,12m/s e a velocidade de avanço do PLSV deve ser de 0,10m/s a 0,2m/s.

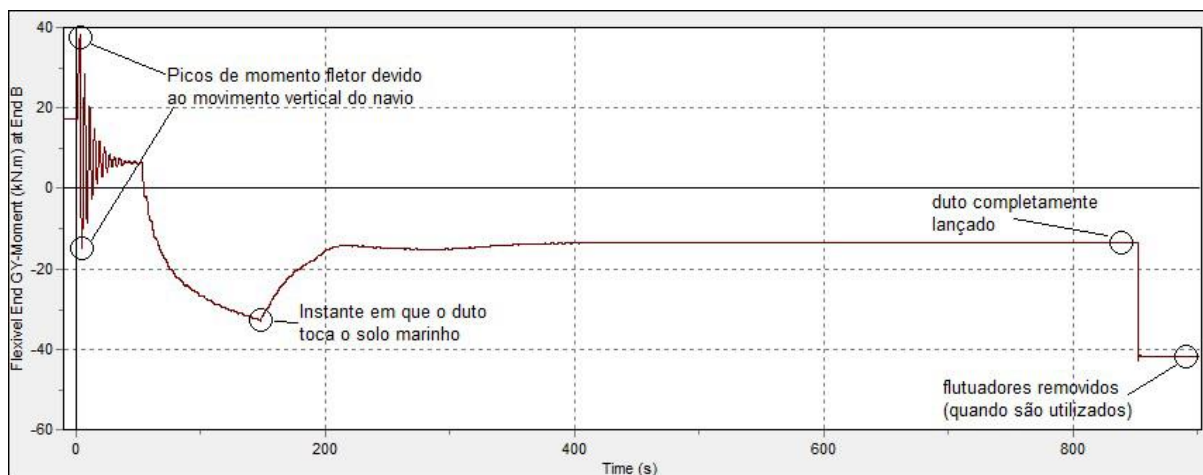
Além disso, para prever possíveis incoerências a respeito dos dados batimétricos, determina-se que a análise seja realizada duas vezes.

- Altura do flange ao solo marinho nominal + 52 cm.
- Altura do flange ao solo marinho nominal – 52 cm.

O valor de 52 cm é obtido a partir de uma inclinação média do solo de 3° com um TDP a 10m do equipamento submarino.

O gráfico típico do momento fletor ao longo do tempo neste caso de carregamento é dado conforme a Figura 37:

Figura 37 – Curva típica de momento fletor ao longo do tempo



Fonte: ET-3000.00-1500-941-PMU-006 (2022)



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Segundo a ET (2022), o pico de momento fletor devido ao movimento vertical do navio, juntamente com seus esforços associados, constituem os esforços a serem informados no caso 3i (máx. e mín.). O momento fletor correspondente ao instante em que o duto toca o solo marinho e seus respectivos esforços associados comporão o conjunto de esforços do caso 3ii.

Por fim, a ET (2022) comunica que “os esforços correspondentes à situação de duto completamente lançado não serão computados nos casos 3i e 3ii, porém deverão ser armazenados para serem utilizados nos casos 4 e 5. Após obtenção dos resultados, a configuração final da linha lançada sobre o solo deverá ser salva para que possa ser utilizada em outras simulações dinâmicas”.

Os casos de testes hidrostáticos e de operação não serão avaliados neste trabalho.

2.3.5 FLUTUADORES E PESO MORTO

i. POSICIONAMENTO DE FLUTUADORES

De acordo com a ET (2022), o posicionamento de flutuadores deve respeitar as seguintes condições:

- Manter uma distância mínima de 3m de distância do MCV;
- Não utilizar empuxos maiores do que 2000 kgf no mesmo ponto de aplicação;
- Manter uma distância mínima de 3m de distância entre pontos de aplicação de flutuadores.

Na sua emissão inicial (2016), a ET determinava distância mínimo do MCV de 5m e empuxo máximo de 1500 kgf num único ponto. Condições muito mais conservadoras.

Observações:

- Os flutuadores devem ser liberados um conjunto de cada vez.

ii. PESO MORTO

De acordo com a ET (2022), não se pode pôr mais do que 300 kgf de peso morto em um único ponto de aplicação e deve ser respeitado um espaçamento mínimo de 1m entre eles.

2.3.6 AÇÕES MITIGATÓRIAS

Há casos nos quais, mesmo utilizando flutuadores e peso morto, não se consegue obter uma configuração aceitável, de acordo com os critérios de análise. Nestes casos, a ET-3000.00-



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



1500-941-PMU-006 (2022) determina que podem ser adotadas algumas ações para tentar viabilizar a operação. São elas:

- Admissão de travamento da vértebra, contato que não se exceda o momento fletor máximo admissível na vértebra.
- Redução do *heave up*
 - Valor mínimo aceitável é de 1,8m
- Dragagem do solo marinho
 - Somente em caso de as duas alternativas anteriores não funcionarem ou em caso de não se obter uma configuração sem que a linha toque no solo.

Entretanto, a ET determina que o responsável pela análise deve esgotar todas as possibilidades ou tentativas, antes de adotar uma das ações mitigatórias relatadas acima. Isto se dá porque toda ação mitigatória pode gerar um impacto negativo na operação, seja por restrição de mar, aumento do risco de dano a equipamentos ou necessidade de dispor de recursos adicionais.

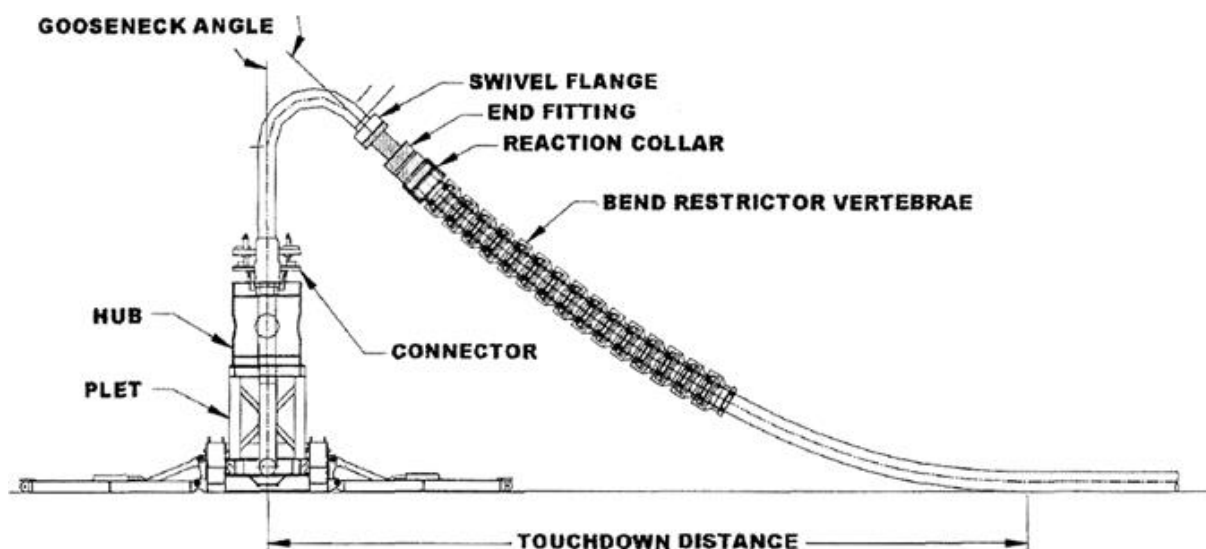
Na sua versão de Emissão inicial (2016), a ET determinava que só era permitido travamento de vértebra, como medida mitigatória, caso o *heave up* já tivesse sido reduzido para seu valor mínimo (que naquela época correspondia a 1,5m) e, ainda assim, não tivesse sido obtida uma configuração aceitável. Já o caso de dragagem, só era permitido no caso de ambas as soluções anteriores terem sido adotadas e, ainda assim, não houvesse sucesso.

3 OPERAÇÃO DE CONEXÃO VERTICAL DIRETA

3.1 3.1 A OPERAÇÃO DE CVD

A operação de Conexão Vertical Direta, mais conhecida pela sigla CVD, é a operação onde se conecta o duto flexível ou umbilical ao poço (Figura 38). Esta conexão é possível por meio do módulo de conexão vertical, ou MCV. A operação de CVD inicia após o Overboarding e a verticalização do MCV, com a conexão no HUB, e termina com o assentamento da flowline no leito marinho.

Figura 38 – Conexão do duto com o HUB



Fonte: BAI, Young (2019).

A Operação de CVD, tradicionalmente, é precedida das seguintes operações:

- **Passagem da linha pelo Gutter da torre de lançamento**

Consiste em fazer a linha passar pelo Gutter e pelas Lagartas da Torre de lançamento, sem infração de nenhum critério limite da estrutura;

- **Tombamento do MCV**

Pode ser necessária a análise estática do tombamento do MCV para garantir sua adequada suspensão, sem infringir qualquer critério limite da linha/vértebra;

- **Overboarding e verticalização**



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL

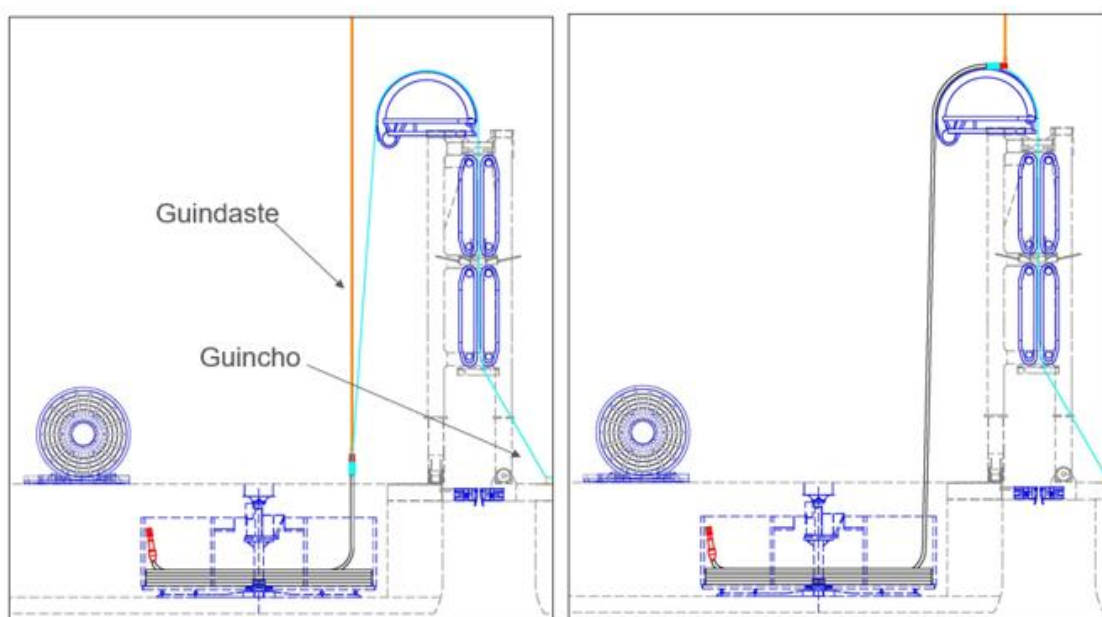


Consiste no lançamento da linha e na formação da catenária, por meio da conexão do guindaste ao sistema de manilhas do MCV.

Estas categorizações dos trechos da operação de CVD representam diferentes cenários críticos sob o ponto de vista de uma análise, de modo que, conforme solicitação do time de engenharia da embarcação, podem e devem ser realizadas análises particulares para cada etapa, a fim de auxiliar a operação no melhor manuseio dos elementos.

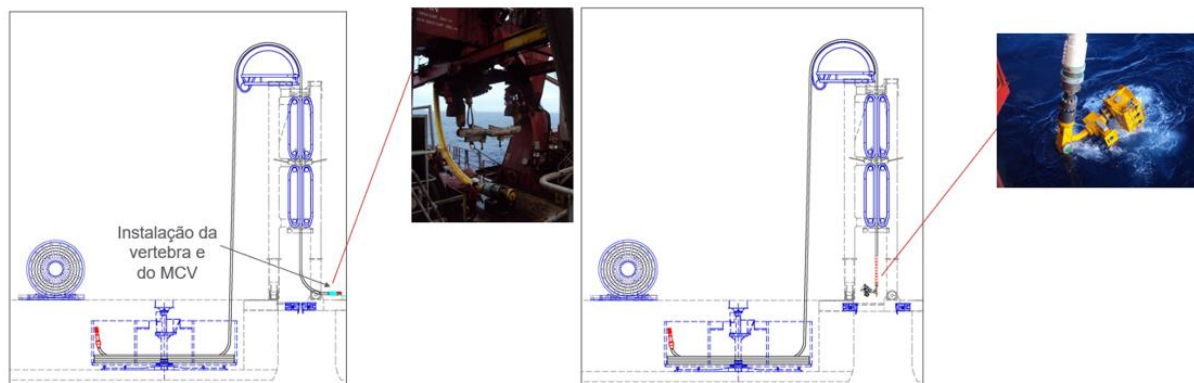
A seguir, está representado, pelas Figura 39, Figura 40 e Figura 41, o passo-a-passo de uma operação de CVD de 1º extremidade, desde seu overboarding até a efetiva conexão com a ANM, para facilitar a compreensão das atividades:

Figura 39 – Operação de Passagem



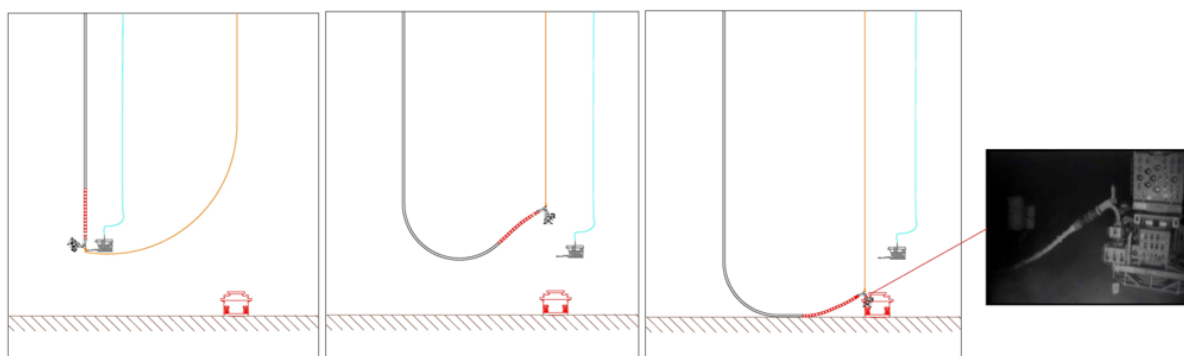
Fonte: do próprio autor.

Figura 40 – Instalação dos acessórios, antes do Overboarding



Fonte: do próprio autor

Figura 41 – Verticalização e CVD



Fonte: do próprio autor

3.2 3.2 ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE CVD

3.2.1 EQUILÍBRIO DO SISTEMA

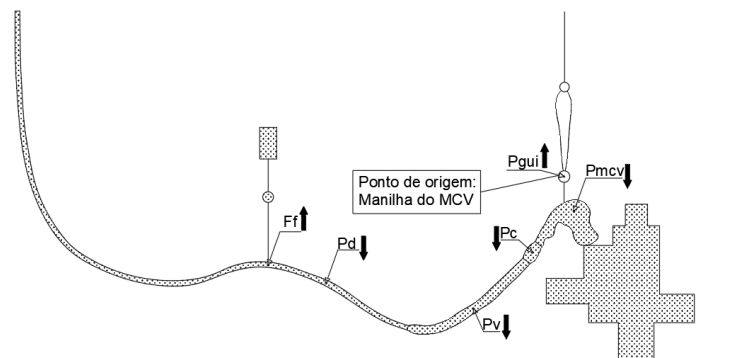
O estudo da fase "(1) Equilíbrio em condição estática" envolve o equilíbrio de momentos e forças no sistema composto pelos flutuadores, cabo e acessórios, MCV e guindaste, de modo a permitir a verticalização do MCV com uma variação de ângulo limitada a $\pm 0,5$ graus, conforme a Figura 42. Para análises analíticas do procedimento, sugere-se adotar como ponto de referência a manilha do MCV, onde o guincho está conectado. Esse é o ponto ideal devido às incertezas relacionadas às cargas efetivamente aplicadas pelo guincho em cada momento da operação.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 42 – Sistema de forças atuando sobre o sistema.



Fonte: do próprio autor

$\overrightarrow{P_{MCV}}$ = Resultante do peso do módulo de conexão vertical

$\overrightarrow{F_{GUI}}$ = Resultante da força aplicada pelo guindaste

$\overrightarrow{P_C}$ = Resultante do peso do conector

$\overrightarrow{P_V}$ = Resultante do peso da vértebra

$\overrightarrow{P_D}$ = Resultante do peso do duto flexível

$\overrightarrow{F_F}$ = Resultante do empuxo do flutuador

$\overrightarrow{D_{MCV}}$ = Distância do CG do MCV à manilha do MCV

$\overrightarrow{D_C}$ = Distância do CG do conector à manilha do MCV

$\overrightarrow{D_V}$ = Distância do CG da vértebra à manilha do MCV

$\overrightarrow{D_D}$ = Distância do CG da parte suspensa do duto à manilha do MCV

$\overrightarrow{D_D}$ = Distância do CG da parte suspensa do duto à manilha do MCV.

$\overrightarrow{D_F}$ = Distância do ponto de atuação da $\overrightarrow{F_F}$ à manilha do MCV

Pelo somatório dos momentos:

$$\sum M_x = 0 \rightarrow P_{MCV} \cdot D_{MCV} + P_C \cdot D_C + P_V \cdot D_V + P_D \cdot D_D + F_F \cdot D_F = 0$$

Observações:

- Admite-se, neste exemplo, que há somente um conjunto de flutuadores aplicado e F_F é a resultante do seu empuxo.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- As cargas dos elementos da operação (linha, MCV, vértebra, conector) são os seus pesos submersos, isto é, já se considera descontado o empuxo.
- O sistema é analisado com liberdade de movimento para transladar no eixo x.

Pelo somatório das forças:

$$\sum F_Y = 0 \rightarrow P_{MCV} + P_C + P_V + P_D + F_F = 0$$

O equilíbrio do sistema, no eixo y, é buscado no ponto de altura em relação ao leito marinho informado como sendo a altura do flange do MCV.

Cabe ressaltar que análises quanto aos esforços de torção ou análises de ressonância não são realizadas. Isto ocorre devido ao fato de que é prática comum das empresas do setor realizar análises e estudos das condições de mar, a fim de conhecer e determinar as melhores janelas operacionais para a realização das operações e devido ao fato de que todos os equipamentos das operações são fabricados sob condições conservativas de dimensionamento, o que faz com que exista uma margem considerável de segurança nas operações.

3.2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE A FLEXÃO DO DUTO FLEXÍVEL (HISTERESE)

Segundo Tan, Quiggin e Sheldrake (2007), há uma dificuldade no entendimento e na modelagem do comportamento das camadas de armaduras do riser, quando submetidas a contínuas mudanças de magnitude e direção de flexão, para compor com maior refino o comportamento de histerese do duto flexível. Por causa desta dificuldade, a prática mais comum na indústria é modelar o riser como uma estrutura linear, de forma bastante conservadora, e depois submetê-los a cargas dinâmicas globais para um modelo local detalhado, para verificação das tensões e avaliação do ciclo de vida.

Quando a linha é fletida, cada camada flete com a linha, gerando uma contribuição de momento resistente que não é histerético e que é fácil de se modelar. A tarefa torna-se complexa quando estas camadas interagem entre si, abrasando umas às outras, e gerando tensões residuais. É como se tentassem deslizar umas sobre as outras, enquanto curvam sob o efeito de flexão.

A modelagem pelo OrcaFlex utiliza um modelo de um vetor matemático natural. A curva AC é especificada como uma série de n_{+1} pontos (x_i, y_i) , sendo y a magnitude do momento correspondente a x, que é a magnitude da curvatura.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Entre os pontos (x_i, y_i) e (x_{i+1}, y_{i+1}) , a curva é tomada como linear e a rigidez à flexão é dada por: $k_i = \frac{(y_i - y_{i-1})}{(x_i - x_{i-1})}$.

O modelo calcula o vetor momento correspondente ao vetor curvatura, sendo este vetor dado por: $C = \delta C_1 + \delta C_2 + \dots + \delta C_{n+1}$.

O incremento de curvatura δC possibilita escrever o momento da seguinte forma:

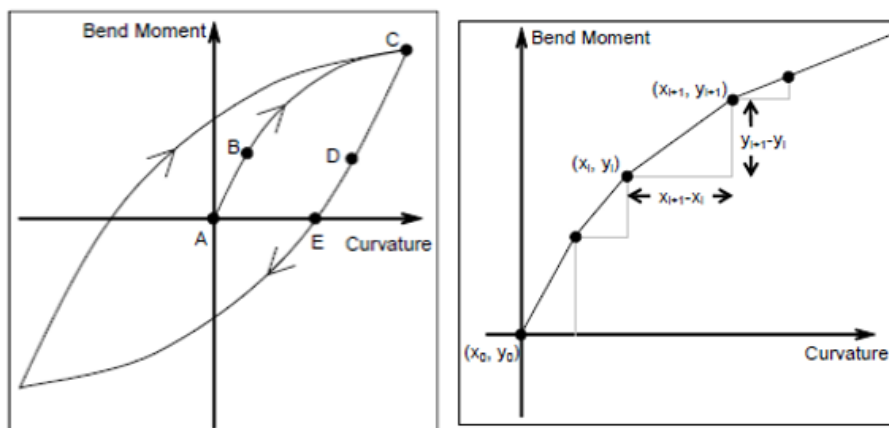
$$M = k_1 \cdot \delta C_1 + k_2 \cdot \delta C_2 + \dots + k_{n+1} \cdot \delta C_{n+1}$$

O comportamento de histerese do modelo depende totalmente da forma como a curvatura C é composta pelos seus incrementos δC . Inicialmente o vetor C (curvatura total) e seus incrementos são tomados como nulos, correspondendo a um estado de repouso.

A partir de qualquer tempo dado na simulação, faz-se com que o vetor incremento δC seja calculado: $\delta C = C(t) - C(t - \delta t)$.

Deste modo, qualquer nova mudança de curvatura é alocada a partir da soma dos incrementos como o menor incremento possível (Figura 43). Assim, garante-se que para cada instante, o esforço será calculado pela curvatura temporal correspondente e seus incrementos.

Figura 43 - Gráfico de Momento x Curvatura (Histerese)



Fonte: OMAE2007-29315



4 APLICAÇÃO “CVD AUTOMÁTICO”

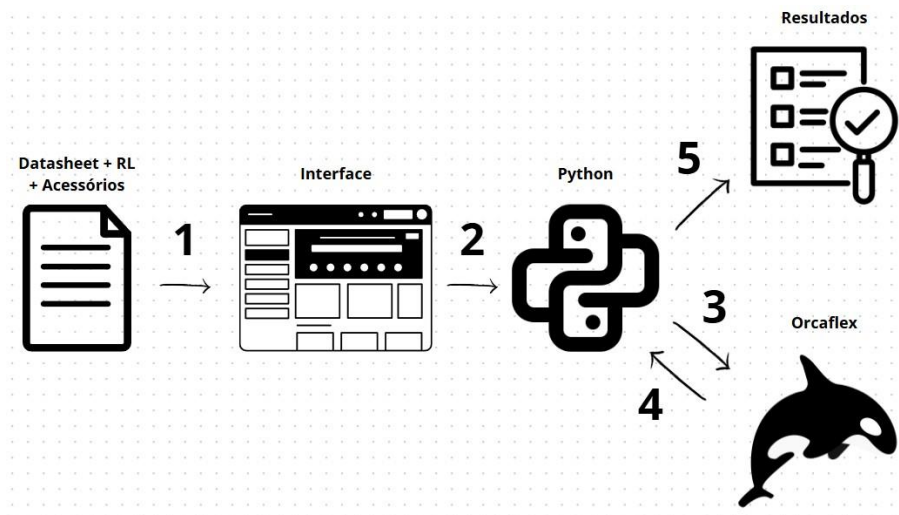
O propósito da aplicação consiste em fornecer ao usuário uma solução viável e factível para análise da operação de CVD, em conformidade com a especificação técnica. Para tanto, decidiu-se estabelecer a seguinte sequência de procedimentos:

1. Desenvolvimento da interface da aplicação com a biblioteca Streamlit.
2. Desenvolvimento do processamento de dados a partir da linguagem Python, utilizando as bibliotecas Numpy e Matplotlib.
3. Integração do Python com o Orcaflex, por meio da biblioteca OrcFxAPI, para modelagem e automatização da análise

4.1 4.1 EXPLICANDO A APLICAÇÃO

A aplicação possui seu funcionamento descrito conforme o fluxograma abaixo:

Figura 44 - Fluxograma do funcionamento da ferramenta computacional



Fonte: do próprio autor.

4.1.1 A INTERFACE

Para que o usuário possa fornecer os dados referentes ao sistema que deve ser modelado, foi desenvolvida uma interface com linguagem python, utilizando as seguintes bibliotecas:

- Streamlit: Biblioteca utilizada para criar interface web interativas;



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Streamlit-aggrid: Extensão da biblioteca streamlit que permite manipular tabelas;
- Pandas: Biblioteca utilizada para manipulação e análise de dados;
- Plotly: Biblioteca para criação de gráficos interativos e visualizações;
- Json: Biblioteca/Módulo para manipulação de dados no formato .json;
- Os: Biblioteca para interação com o sistema operacional;
- PIL: Biblioteca para processamento de imagens;
- Collections Biblioteca/Módulo que oferece certos tipos de dados especializados.

A interface é composta por seções, cada uma com seus inputs para interação do usuário.

A primeira sessão é dotada de um menu, com botões de controle de navegação, por meio dos quais o usuário pode navegar por cada sessão:

- a. Explicação dos dados adotados na análise
- b. Linha flexível & Curva de rigidez
- c. Vértebra (Metálica ou Polimérica)
- d. Conector
- e. Adaptador de Flange
- f. MCV & Batimetria
- g. Configuração de flutuadores & Limites estruturais



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 45 – Primeira sessão da interface.

Installation Analysis Subsea

Notes Flexible pipe Bend Restrictor End-Fitting Flange Adapter VCM Analysis Review

ADOPTED DATA

ET-3000.00-1500-951-PMU-001 Rev. F - Basic requirements for the installation of VCMs
ET-3000.00-1500-941-PMU-006 Rev. C - Methodology and guidelines for load analysis in VCM

SEABED DATA
Longitudinal friction coefficient = 0.35
Transversal friction coefficient = 0.9
Normal stiffness = 100 kN/m/m
Shear stiffness = 10000 kN/m/m
Slope = 0.00 °
Note: The friction coefficients are properties that depend not only on the soil but also on the pipe.

STEEL PROPERTIES
Elastic Modulus = 2.07 . 10e8 kN/m²
Poisson's Ratio = 0.3

DENSITIES
Seawater: 1025 kg/m³
Steel: 7800 kg/m³

BEND RESTRICTOR STIFFNESS
Axial Stiffness: 10 kN
Torsional Stiffness: 10 kN.m²

LINK OBJECTS
Length: 3 m
Axial stiffness: 1000 kN

CRANE CABLE
OD = 0.09
ID = 0
W = 31 kgf/m
Bending stiffness (EI) = 50 kN.m²
Axial stiffness (EA) = 500.000 kN
Torsional stiffness (GJ) = 200 kN.m²
Poisson's ratio = 0.3

Fonte: do próprio autor

Figura 46 – Seção de “inputs” da Linha Flexível.

Flexible Pipe

Notes Flexible pipe Bend Restrictor End-Fitting Flange Adapter VCM Analysis Review

Inform the Flexible Pipe's Data

Structure Number: 0,00

Water Depth [m]: 0,00

Lines length Tooltip
Line's length [m]: 0,00

Contact Diameter [mm]: 0,00

Nominal Diameter [mm]: 0,00

MRR Storage [m]: 0,00

MRR Installation [m]: 0,00

Axial Stiffness Tooltip
Axial Stiffness [kN]: 0,00

Wt. Empty in Air [kg/m]: 0,00

S/W Filled in Air [kg/m]: 0,00

Air Filled in S/W [kg/m]: 0,00

S/W Filled in S/W [kg/m]: 0,00

Pipe Bending Stiffness [kN.m²]: 0,00

Torsional Stiffness Tooltip
Torsional Stiffness (Jmp Direction) [kN.m²]: 0,00

Rel. Elong. Tooltip
Rel. Elong. (%) for 100kN: 0,00

Line's Stiffness Curve

Curvature [1/m]	Bend Moment [kN.m]

Generate Chart

Curvature x Bend Moment

Bend Moment [kN.m]

Curvature [1/m]

Fonte: do próprio autor.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 47 – Sessão de “inputs” da Vértebra.

Notes Flexible pipe Bend Restrictor End-Fitting Flange Adapter VCM Analysis Review

Bend Restrictor

Inform the Bend Restrictor's Data

Material Selection <input type="radio"/> Steel <input checked="" type="radio"/> Polymer	Outside Diameter [mm] 0,00 - +	RZ Structure Number []	RZ Total Length [mm] 0,00 - +
Structure Number []	Internal Diameter [mm] 0,00 - +	RZ Document Version []	RZ Outside Diameter [mm] 0,00 - +
Document Version []	Contact Diameter [mm] 0,00 - +	RZ Wt in Air [kg] 0,00 - +	RZ Internal Diameter [mm] 0,00 - +
# Free Length Tooltip Free Length [mm] 0,00 - +	Locking MBR [m] 0,00 - +	Wt in S/W Tooltip RZ Wt in S/W [kg] 0,00 - +	RZ Contact Diameter [mm] 0,00 - +
Wt in Air [kg] 0,00 - +	Maximum Allowable Bend Moment [kN.m] 0,00 - +		
Wt in S/W [kg] 0,00 - +	Maximum Allowable Shear Stress [kN] 0,00 - +		

Typical Bend Restrictor, with MBR

Fonte: do próprio autor

Figura 48 – Sessão de “inputs” do Conector.

Notes Flexible pipe Bend Restrictor End-Fitting Flange Adapter VCM Analysis Review

End-Fitting

Inform the End-Fitting's Data

Structure Number []	Total Length [mm] 0,00 - +
Document Version []	Outside Diameter [mm] 0,00 - +
Wt in Air [kg] 0,00 - +	Internal Diameter [mm] 0,00 - +
Wt in S/W Tooltip Wt in S/W [kg] 0,00 - +	Contact Diameter [mm] 0,00 - +

Typical End Fitting

Fonte: do próprio autor



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 49 – Sessão de “inputs” do Adaptador de Flange.

Fonte: do próprio autor.

Figura 50 – Sessão de “inputs” do MCV e da batimetria.

Fonte: do próprio autor.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 51 – Sessão de “inputs” da configuração de flutuadores e dos limites estruturais.

RT Number	Position [m]	Frequency [Hz]
1	1252	
2	973	
3	828	
4	573	
5	283	
6	205	
7	118	
8	100	

Case 2 - Equilibrium condition	Case 3(i) - Heave up	Case 3(ii) - Touch Down Point
Normal [kN]	Normal [kN]	Normal [kN]
0,00	0,00	0,00
Shear [kN]	Shear [kN]	Shear [kN]
0,00	0,00	0,00
Bend Moment [kN.m]	Bend Moment [kN.m]	Bend Moment [kN.m]
0,00	0,00	0,00

Fonte: do próprio autor.

4.1.2 PROCESSAMENTO

Para simplificar as etapas de modelagem, optou-se por utilizar um arquivo modelo “.dat” para iniciar a . O script “main.py” coordena a chamada de uma sequência de outros scripts, cada um com um conjunto de objetivos específicos a cumprir. São eles:

i. SCRIPT “extract.py”.

Este script python realiza as seguintes funções, em sequência:

- Transfere o arquivo json baixado pela interface para a pasta de projeto.
- Lê os dados do arquivo json transferido e coleta informações, como:
 - Código identificador da análise.
 - Estruturas de dados contendo as informações fornecidas pelo usuário.
 - Conjunto de flutuadores disponíveis para a análise, em função da embarcação que realizará a operação.
- Armazena os dados da leitura em formatos com os quais os próximos scripts possam trabalhar e os disponibiliza.



ii. SCRIPT “methods.py”

Este script python possui o objetivo de, com base nos dados obtidos pelo (i. Script “extract.py”), realizar uma série de cálculos, com o propósito de obter parâmetros necessários para a modelagem no Orcaflex. Os cálculos realizados encontram-se abaixo:

- Diâmetro externo da linha: $OD_{linha}[m] = \sqrt{\frac{4}{\pi \times 1,025} \times \left(\frac{P_{vazio}^{ar}}{1000} - \frac{P_{vazio}^{agua}}{1000} \right)}$;
- Diâmetro interno da linha: $ID_{linha}[m] = \sqrt{\frac{4}{\pi \times 1,025} \times \left(\frac{P_{cheio}^{ar}}{1000} - \frac{P_{vazio}^{agua}}{1000} \right)}$;
- Peso linear do elemento quando não submerso [tf/m]: $P_{linear}^{ar}[\frac{kg}{m}] = \frac{P_{vazio}^{ar}}{L}$;
- Peso linear do elemento quando submerso [tf/m]: $P_{linear}^{agua}[\frac{kg}{m}] = \frac{P_{vazio}^{agua}}{L}$;
- Diâmetro externo: $OD_{vertebra}[m] = \sqrt{\frac{4}{\pi \times 1,025} \times (P_{linear}^{ar} - P_{linear}^{agua}) \times \left(\frac{ID_{vertebra}}{1000} \right)^2}$;

Os cálculos dos $OD_{conector}$ e $OD_{adapt.flange}$ são obtidos da mesma forma;

- Rigidez à flexão: $K_{B,St}[kN.m^2] = \frac{E \times \left(\frac{OD^4}{1000} - \frac{ID^4}{1000} \right)}{64}$;
- Rigidez axial: $K_{A,St}[kN] = \frac{E \times \left(\frac{OD^2}{1000} - \frac{ID^2}{1000} \right)}{4}$;
- Rigidez à torção: $K_{T,St}[kN.m^2] = \frac{\left(\frac{E}{2,6} \right) \times \left(\frac{OD^4}{1000} - \frac{ID^4}{1000} \right)}{32}$;
- Momento fletor último da vértebra [kN.m]: $MF_{lim} = \frac{K_{B,St}^{vertebra}}{10} \times \left(\left(\frac{1}{MBR} + 1 \right) - \frac{1}{MBR} \right)$.

Sendo,

P_{vazio}^{ar} – Peso do elemento vazio e não submerso;

P_{cheio}^{ar} – Peso do elemento cheio de fluido e não submerso;

P_{vazio}^{agua} – Peso do elemento vazio e submerso;

P_{cheio}^{agua} – Peso do elemento cheio de fluido e submerso;

L – Comprimento do elemento;

MBR – Raio mínimo de curvatura do elemento.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Ao final de cada etapa de cálculo, os parâmetros são tomados e inseridos na estrutura de dados referente à cada estrutura e à cada acessório.

iii. SCRIPT “orca.py”

Este script python tem a função de tomar as estruturas de dados do (ii. Script “methods.py”), após todos os cálculos, e, utilizando a API do OrcaFlex, gerar o modelo para análise, restando somente a realização das etapas de análise, em função de cada caso de carregamento.

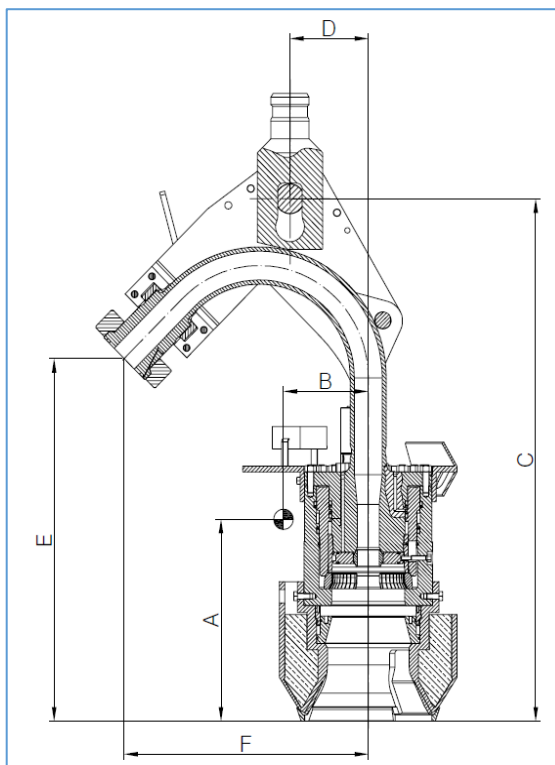
O processamento inicia com o cálculo de variáveis importantes para a modelagem no OrcaFlex, a partir dos dados fornecidos pelo usuário, segundo está descrito em ET-3000.00-1500-941-PMU-006 Rev C.

Também são calculados, nesta etapa, os pontos de interesse no MCV, a partir dos dados fornecidos pelo usuário, conforme descrito abaixo (Figura 52):

- Centro de gravidade do MCV (A[m], B[m])
- Olhal do flange (C[m], D[m])
- Extremidade do flange (E[m], F[m])



Figura 52 – Pontos de interesse para a modelagem do MCV no OrcaFlex



Fonte: do próprio autor.

Os dados referentes a batimetria e ao MCV são utilizados para composição das profundidades de cada ponto em relação à superfície da lâmina d'água de projeto. Desta forma pode-se modelar o comprimento de determinados elementos, tais como a linha flexível e o cabo do guindaste que se prende às manilhas, próximo ao olhal do flange do MCV.

A geometria do MCV é modelada a partir de uma malha de pontos. O MCV, portanto, é modelado com geometria estática, variando somente suas propriedades mecânicas no software de análise OrcaFlex. Após a modelagem dos elementos estar completa, são iniciadas as etapas de análise. Inicialmente, busca-se estabelecer um ou mais pontos de empuxo na linha, conforme descrição fornecida pelo usuário no preenchimento da última tela da interface.

iv. SCRIPT “sim_run.py”

O script “sim_run.py” procura dentro da pasta de projeto o modelo gerado pelo script “orca.py”, pronto para iniciar a análise. Em seguida, inicia o processo que busca modelar no



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



OrcaFlex a sugestão inicial de configuração de flutuadores, fornecida pelo usuário. Este passo-a-passo é definido por uma tentativa inicial de equilíbrio estático para a modelagem, sem considerar a vértebra e enquanto não há flutuadores instalados no modelo. Ao passo que cada convergência é obtida, o script salva as posições, facilitando futuras convergências, desde que o ajuste entre um passo e outro seja “suave” o suficiente. Caso contrário é necessário tentar a convergência considerando a forma geométrica de catenária livre. O passo seguinte é uma tentativa de equilíbrio estático, agora, no entanto, considerando a vértebra instalada. Esta dinâmica de convergir o modelo sem vértebra primeiro consiste no fato de que os modelos convergem melhor quanto mais simples são.

Na sequência, o script busca realizar incrementos de empuxo, com a instalação de flutuadores, seguindo o padrão de sugestão inicial informado pelo usuário. Cada incremento corresponde a 20% do total informado em cada posição, sendo assim, em looping, são realizados 5 iterações até obter um modelo cuja configuração de flutuadores mais se aproxime da sugestão inicial, geralmente, proveniente do RL fornecido pela Petrobrás.

É importante ressaltar que a cada iteração, são extraídos do modelo os resultados que possibilitam verificar se a convergência atende aos critérios do caso 2 da ET. São eles:

1 – A inclinação do MCV, que deve estar dentro da faixa admissível: $[-0,5^\circ, 0,5^\circ]$, conforme

Figura 54);

2 – A proximidade da linha em relação ao leito marinho, que deve ser a menor possível, mas superior à 0,5m (A aplicação considera aceitáveis valores dentro da faixa: $[0,5m; 0,65m]$, conforme Figura 53);

3 – A altura resultante no flange do MCV após a convergência do equilíbrio de forças, que deve coincidir com o valor fornecido pelo RL, informado pelo usuário. Este parâmetro é controlado por um simples ajuste no guincho que está conectado à manilha do MCV.

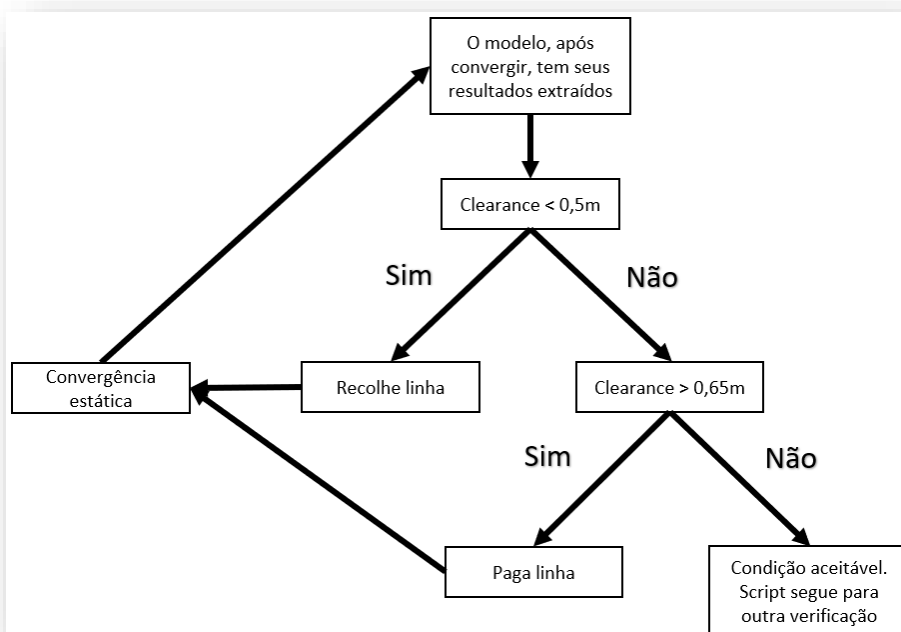
O passo seguinte consiste em um *loop* recursivo que provoca alterações no modelo, em função da inadmissibilidade de cada um dos parâmetros mencionados acima, buscando a solução para o caso 2 da análise. Esta sequência de iterações pode ser descrita pela seguinte estrutura:



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL

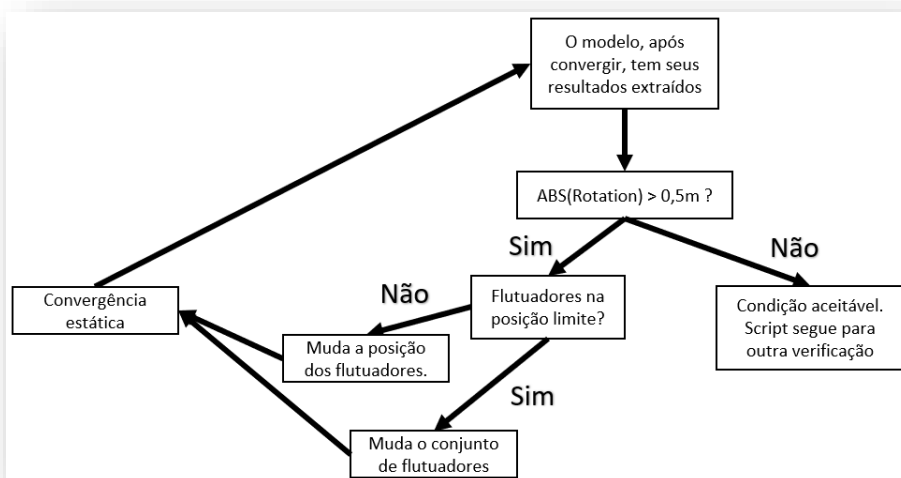


Figura 53 – Verificação da proximidade da linha com o leito marinho.



Fonte: do próprio autor.

Figura 54 – Verificação da inclinação do MCV





UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Fonte: do próprio autor.

Há ainda outros mecanismos que funcionam no decorrer das verificações, realizando atividades como:

- Seleção do conjunto de flutuadores que sofrerá ajuste na posição ou no empuxo, a cada iteração, em função do parâmetro de inclinação do MCV e na constante que define as posições limites dos flutuadores;
- Definição da regra de formação do conjunto de flutuadores em função dos seguintes critérios:
 - Número máximo de posições para instalação de flutuadores;
 - Número máximo de flutuadores instalados em uma única posição.
- Definição da variação de empuxo, em função do parâmetro de inclinação do MCV e do conjunto de flutuadores já instalados;
- Definição da variação da quantidade de linha a ser paga/recolhida, a cada iteração, em função da proximidade da linha com o leito marinho;
- Definição da variação do fator de Damping do modelo, tornando-o menor sempre que possível, a fim de ganhar velocidade na análise numérica, e maior sempre que necessário para se obter convergência;
- Verificação da relação entre o comprimento de linha e a lâmina d'água de operação, para definição da modelagem como CVD normal ou CVD jumper.
- Verificação da geometria de catenária do sistema, a cada iteração, em função do parâmetro de curvatura máxima;
- Verificação dos esforços máximos encontrados no flange do MCV;
- Verificação do trancamento da vértebra, que, em caso afirmativo, realiza a chamada da verificação dos esforços na vértebra;
- Tratamento de erros
- Verificação da condição de falha: Caso para o qual uma solução não pôde ser encontrada.

Após encontrar uma solução para o caso 2 de análise, o script gera um novo modelo para simular o caso 3. Neste caso, para representar o instante no qual o MCV acopla no hub, o script



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



fixa/engasta o MCV. A ET determina que para o caso 3 de análise deve ser feita uma simulação dinâmica considerando um movimento vertical de 2,5m no topo da linha, aplicado em 2,15 segundos, simulando a condição na qual uma onda irregular soergueria a embarcação. Depois da aplicação do *heave up*, o script deixa que o sistema se estabilize durante 50s, para posteriormente, a uma velocidade de 0,1m/s pagar 10m de linha, durante 100s, simulando o início da condição de lançamento do duto. Este cenário está descrito abaixo na .

Figura 55 – Verificação da inclinação do MCV

Número do estágio	Duração (s)	Tempo de simulação ao final do estágio (s)	Descrição
0	1	0	-
1	2,15	2,15	<i>Heave up</i> de 2,5m na extremidade suspensa do duto através de um recolhimento do guincho.
2	50	52,15	Tempo de estabilização dos esforços no flange.
3	100	152,15	Lançamento de 10m de duto flexível, pagando guincho à velocidade de 0,1 m/s.

Fonte: do próprio autor.

Ressalta-se que as demais etapas de lançamento do duto não são modeladas, uma vez que não são verificadas as condições de Teste hidrostático e Operação, respectivamente, casos 4 e 5 de análise da Especificação Técnica. Neste trabalho somente as etapas de instalação foram contempladas.

Após terminar a simulação dinâmica, são verificadas as condições no flange do MCV e na vértebra. Os esforços obtidos são verificados e comparados com os limites admissíveis e, se reprovados, o script roda uma nova simulação dinâmica realizando abatimentos na altura do *heave up*. Os valores com os quais o script realiza os testes são: [2,5m; 2,0m; 1,8m; 1,5m].

Em seguida, um terceiro modelo é gerado para buscar duas condições viáveis de contingência. Nesta etapa, o script busca pagar linha até que se tenha, ao menos, 3m de linha apoiados no leito marinho. Isto é feito como forma de aproximar a geometria na região próxima do flange à condição de lançamento, uma vez que a ferramenta não realiza o lançamento por completo. Assim, são modelados flutuadores específicos, cujos empuxos variam de 2Te até 100kgf e são verificados em posições selecionadas pelo script em função da configuração obtida no caso 2.



5 CONCLUSÕES E RESULTADOS

O presente trabalho teve como seu objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a metodologia de análise de CVD e o desenvolvimento de uma ferramenta computacional que possibilitasse automatizar a análise desta operação, integrando a linguagem de programação python e o software de análise numérica OrcaFlex. A pesquisa realizada baseou-se na bibliografia atualizada sobre o setor offshore, e, portanto, também nas normas internacionais nas quais se baseia, e nas especificações técnicas na Petrobrás, empresa reguladora do setor no Brasil.

A solução desenvolvida automatiza a análise anteriormente realizada de forma manual, o que proporciona maior tempo disponível para dedicação a outras demandas. A validação da ferramenta foi realizada por meio de 9 casos de estudo, significativamente diferentes.

Por fim, o estudo desenvolvido demonstrou o potencial a ser explorado por meio da integração de tecnologias, como a programação, no meio da engenharia de análise. A utilização de ferramentas computacionais permitiu, neste estudo, a automação de modelagens e manipulação rápida de dados, portanto, contribuiu para a otimização de processos.

Os resultados foram compilados em tabelas conforme Seção 7.2:



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COSTA, Pedro Henrique Preza da Silveira. Análise da conexão vertical direta na instalação de linhas flexíveis e umbilicais. Rio de Janeiro. 2015. 55f. Tese (Bacharelado em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- MENDES, Mateus machado. Aplicação de métodos numéricos para análises de conexão vertical direta de 1ª extremidade. Rio de Janeiro. 2021. 63f. Tese (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- FERREIRA, Débora Paula. As principais operações das embarcações PLSV. Rio de Janeiro. 2013. 59f. Tese (Curso de aperfeiçoamento para Oficiais de Náutica) – Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Marinha do Brasil.
- FREIRE, Paulo. Pedagogia do Oprimido – 11ª ed. – Rio de Janeiro: Paz e Terra. 1996. 29 p.)
- THOMAS, José Eduardo. Fundamentos de engenharia de petróleo – Rio de Janeiro: Interciência. 2001. 278p.
- CHAKRABARTI, Subrata K. Handbook of offshore engineering – Illinois: Elsevier. 2005. Volume 1 – 669p e Volume 2 – 652p.
- MORAIS, José Mauro. Petróleo em águas profundas: Uma história da evolução tecnológica da Petrobras na exploração e produção no mar – 2ª edição – Rio de Janeiro: IPEA. 2023. 592p.
- BAI, Yong. BAI, Qiang. Subsea engineering handbook – 2th edition – Houston: Elsevier. 2019. 943p.
- BAI, Qiang. BAI, Yong. Subsea pipeline design, analysis, and installation – Houston: Elsevier. 2014. 784p.
- BAI, Yong. BAI, Qiang. Subsea pipelines and risers – Houston: Elsevier. 2005. 841p.
- FERGESTAD, Dag. LOTVEIT, Svein Are. Handbook on design and operation of flexible pipes – 6th edition – NTNU, 4subsea, SINTEF. 2017. 712p.
- PETROBRAS. Requisitos básicos para a instalação e desinstalação de MCVs. (ET-3000.00-1500-951-PMU-001) Rev F – 2019 – 28p. Rev D – 2017 – 25p. Rev C – 2015 – 25p.
- PETROBRAS. Metodologia e diretrizes para análise de carga em MCV. (ET-3000.00-1500-941-PMU-006) Rev C – 2022 – 24p. Rev B – 2020 – 23p. Rev 0 – 2016 – 18p.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



PETROBRAS. Análise de esforços em flanges de MCVs durante operações de CVDs. (CT TDUT 002/2012 Rev. 00). 2012. 41p.

TAN. Zhimin, QUIGGIN. Peter, SHELDRAKE. Terry. Time domain simulation of the 3D bending hysteresis behaviour of an unbonded flexible riser. (OMAE2007-29315 - INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARTIC ENGINEERING). 2007. 8p.

GRIFFITHS, Hugh. PLUTO – The pipeline under the ocean. (001. No. 10.1109/MAES.2021.3054639). London. IEEE. 2021. 61p.

NOGUEIRA, Marta. Plataforma da Petrobras P-56 sofre acidente e fica horas sem produzir, diz sindicato. Disponível em: < <https://www.infomoney.com.br/negocios/plataforma-da-petrobras-p-56-sofre-acidente-e-fica-horas-sem-produzir-diz-sindicato/>>. Acesso em: 19/07/2024.

MARINE DEVELOPMENTS. 75Te Portable vertical lay system. Disponível em: <<https://maritimedevlopments.com/product/75te-portable-vertical-lay-system>>. Acesso em: 19/07/2024.

ENGENHARIA COMPARTILHADA. Conheça curiosidades sobre equipamentos dos sistemas submarinos da Petrobras. Disponível em: <https://engenhariacompartilhada.com.br/noticia/exibir/741919_conheca-curiosidades-sobre-equipamentos-dos-sistemas-submarinos-da-petrobras>. Acesso em: 10/07/2024.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



7 APÊNDICE

7.1 CASOS DE ESTUDO

7.1.1 1º caso de análise – CVD em águas ultra-profundas

- Dados da linha flexível
 - Lâmina d'água: 2300 m;
 - Peso da linha flexível vazia, no ar: 106,58 kg
 - Peso da linha flexível cheia, no ar: 126,39 kg
 - Peso da linha flexível vazia, na água: 54,46 kg
 - Peso da linha flexível cheia, na água: 74,27 kg
 - Diâmetro de contato: 254,4 mm;
 - Diâmetro nominal: 6 ”;
 - Raio de curvatura mínimo de armazenamento: 1,67 m;
 - Raio de curvatura mínimo de instalação: 2,505 m;
 - Rigidez à flexão: 20,466 kN.m²;
 - Rigidez à torção: 1072 kN.m²;
 - Rigidez axial: 252293 kN;
- Curva de rigidez

Curvatura [1/m]	Momento Fletor [N.m]
0,00	0,00
0,01	411,00
0,02	755,00
0,03	1161,00
0,04	1628,00
0,05	2156,00
0,07	2746,00
0,08	3397,00
0,10	4110,00
0,12	4884,00
0,14	5720,00
0,16	6617,00
0,19	7576,00
0,21	8596,00
0,24	9677,00



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



0,27	10820,00
0,30	12025,00
0,33	13291,00
0,37	14618,00
0,40	16007,00
0,44	17457,00
0,48	18968,00
0,52	20542,00
0,56	22176,00
0,60	23872,00

- Dados da vértebra
 - Material: Aço;
 - Comprimento: 4210 mm;
 - Peso, no ar: 1178 kg;
 - Peso, na água: 1024,9 kg;
 - Diâmetro externo: 305 mm;
 - Diâmetro interno: 280 mm;
 - Diâmetro de contato: 544 mm;
 - Raio de curvatura de travamento: 2,86 m;
 - Máximo Momento Fletor admissível: 57 kN.m;
 - Máximo Cortante admissível: 43 kN.
- Dados do conector
 - Comprimento: 1791 mm;
 - Peso, no ar: 2600 kg;
 - Peso, na água: 2262 kg;
 - Diâmetro externo: 254 mm;
 - Diâmetro interno: 152,4 mm;
 - Diâmetro de contato: 480 mm.
- Dados do MCV
 - Peso, na água: 5043 kg;
 - Azimute do flange: 60 °;
 - Altura do flange: 3810 mm;
 - Altura da manilha: 502 mm;
 - Distância horizontal da manilha ao flange: 907 mm;
 - Diferença de altura entre o CG e o flange: 681 mm;
 - Distância horizontal do CG ao flange: 864 mm;
 - Diferença de altura entre a base e o flange: 2037 mm;
 - Distância horizontal da base ao flange: 839 mm;



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Distância horizontal do CG ao eixo de simetria: 0 mm.
- Batimetria
 - Terreno plano
- Conjunto de flutuadores disponíveis
 - 3 flutuadores de 1252 kg;
 - 1 flutuador de 973 kg;
 - 1 flutuador de 828 kg;
 - 3 flutuadores de 573 kg;
 - 3 flutuadores de 283 kg;
 - 4 flutuadores de 205 kg;
 - 6 flutuadores de 118 kg;
 - 1 flutuador de 100 kg.
- Sugestão inicial de configuração de flutuadores
 - 1800 kgf à 3 m do flange;
 - 1000 kgf à 6 m do flange.
- Limites estruturais do relatório

- $N = 6,90 \text{ kN}$
- Caso 2 :
 - $C = -10,47 \text{ kN}$
 - $MF = 13,11 \text{ kN.m}$
 - $N = 3,37 \text{ kN}$
- Caso 3 (I):
 - $C = -8,02 \text{ kN}$
 - $MF = 30,67 \text{ kN.m}$
 - $N = 6,68 \text{ kN}$
- Caso 3 (II):
 - $C = -10,74 \text{ kN}$
 - $MF = 11,84 \text{ kN.m}$

7.1.2 2º caso de análise – CVD em águas profundas, com flexível leve, de 4”, e batimetria variável

- Dados da linha flexível
 - Lâmina d’água: 1861 m;
 - Peso da linha flexível vazia, no ar: 55,82 kg
 - Peso da linha flexível cheia, no ar: 65,02 kg
 - Peso da linha flexível vazia, na água: 32,58 kg
 - Peso da linha flexível cheia, na água: 41,78 kg
 - Diâmetro de contato: 169,86 mm;
 - Diâmetro nominal: 4 ”;



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Raio de curvatura mínimo de armazenamento: 1,1 m;
- Raio de curvatura mínimo de instalação: 1,1 m;
- Rigidez à flexão: 39,34 kN.m²;
- Rigidez à torção: 497 kN.m²;
- Rigidez axial: 158998 kN;
- Curva de rigidez

Curvatura [1/m]	Momento Fletor [N.m]
0	0
0,0012	211
0,0026	232
0,0043	246
0,0063	261
0,0085	278
0,011	298
0,0138	319
0,0168	342
0,02	367
0,0236	394
0,0273	422
0,0314	453
0,0357	486
0,0402	521
0,045	558
0,0501	597
0,0554	638
0,061	680
0,0669	725
0,073	772
0,0793	821
0,086	871
0,0929	924
0,1	979

- Dados da vértebra
 - Material: Aço;
 - Comprimento: 3234 mm;
 - Peso, no ar: 827 kg;
 - Peso, na água: 719,5 kg;
 - Diâmetro externo: 215 mm;



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Diâmetro interno: 190 mm;
- Diâmetro de contato: 350 mm;
- Raio de curvatura de travamento: 2,35 m;
- Máximo Momento Fletor admissível: 27 kN.m;
- Máximo Cortante admissível: 23,8 kN.
- Dados do conector
 - Comprimento: 1434 mm;
 - Peso, no ar: 1125 kg;
 - Peso, na água: 978,75 kg;
 - Diâmetro externo: 190 mm;
 - Diâmetro interno: 101,6 mm;
 - Diâmetro de contato: 480 mm.
- Dados do MCV
 - Peso, na água: 6057 kg;
 - Azimute do flange: 60 °;
 - Altura do flange: 4504 mm;
 - Altura da manilha: 1156 mm;
 - Distância horizontal da manilha ao flange: 2002 mm;
 - Diferença de altura entre o CG e o flange: 194 mm;
 - Distância horizontal do CG ao flange: 1832 mm;
 - Diferença de altura entre a base e o flange: 1587 mm;
 - Distância horizontal da base ao flange: 2170 mm;
 - Distância horizontal do CG ao eixo de simetria: 0 mm.
- Batimetria
 - Terreno variável;

Distância do flange [m]	Altura do flange ao leito marinho [mm]
0	4504
4	5014
8	5264
12	5294

- Conjunto de flutuadores disponíveis
 - 5 flutuadores de 1213 kg;
 - 5 flutuadores de 576 kg;
 - 5 flutuadores de 381 kg;
 - 5 flutuadores de 100 kg;
- Sugestão inicial de configuração de flutuadores



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- 1500 kgf à 3 m do flange;
- 300 kgf à 6 m do flange.
- Limites estruturais do relatório
 - $N = 1,51 \text{ kN}$
 - Caso 2 :
 - $C = -1,42 \text{ kN}$
 - $MF = 13,55 \text{ kN.m}$
 - $N = 0,59 \text{ kN}$
 - Caso 3 (I):
 - $C = -0,64 \text{ kN}$
 - $MF = 18,14 \text{ kN.m}$
 - $N = 1,59 \text{ kN}$
 - Caso 3 (II):
 - $C = -1,61 \text{ kN}$
 - $MF = 12,47 \text{ kN.m}$

7.1.3 3º caso de análise – CVD-jumper em águas ultra-profundas, com flexível pesado, de 6”, com batimetria variável

- Dados da linha flexível
 - Lâmina d’água: 2240 m;
 - Comprimento: 850 m;
 - Peso da linha flexível vazia, no ar: 166,2 kg
 - Peso da linha flexível cheia, no ar: 186,81 kg
 - Peso da linha flexível vazia, na água: 98,14 kg
 - Peso da linha flexível cheia, na água: 118,74 kg
 - Diâmetro de contato: 291,34 mm;
 - Diâmetro nominal: 6 ”;
 - Raio de curvatura mínimo de armazenamento: 1,89 m;
 - Raio de curvatura mínimo de instalação: 2,4 m;
 - Rigidez à flexão: 40,41 kN.m²;
 - Rigidez à torção: 1685 kN.m²;
 - Rigidez axial: 563380 kN;
- Curva de rigidez

Curvatura [1/m]	Momento Fletor [N.m]
0	0
0,003	1322
0,006	1531
0,009	1775



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



0,014	2055
0,019	2382
0,024	2726
0,03	3116
0,036	3543
0,044	4007
0,051	4508
0,059	5046
0,068	5621
0,078	6232
0,087	6880
0,098	7565
0,109	8287
0,121	9046
0,133	9841
0,145	10674
0,159	11543
0,173	12449
0,187	13391
0,202	14371
0,217	15388

- Dados da vértebra
 - Material: Aço;
 - Comprimento: 5781 mm;
 - Peso, no ar: 1552 kg;
 - Peso, na água: 1350,2 kg;
 - Diâmetro externo: 472 mm;
 - Diâmetro interno: 313 mm;
 - Diâmetro de contato: 338 mm;
 - Raio de curvatura de travamento: 4,14 m;
 - Máximo Momento Fletor admissível: 70 kN.m;
 - Máximo Cortante admissível: 34 kN.
- Dados do conector
 - Comprimento: 2219 mm;
 - Peso, no ar: 2600 kg;
 - Peso, na água: 2262 kg;
 - Diâmetro externo: 301,8 mm;
 - Diâmetro interno: 152,4 mm;



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Diâmetro de contato: 590 mm.
- Dados do MCV
 - Peso, na água: 5043 kg;
 - Azimute do flange: 60°;
 - Altura do flange: 3810 mm;
 - Altura da manilha: 502 mm;
 - Distância horizontal da manilha ao flange: 907 mm;
 - Diferença de altura entre o CG e o flange: 681 mm;
 - Distância horizontal do CG ao flange: 864 mm;
 - Diferença de altura entre a base e o flange: 2037 mm;
 - Distância horizontal da base ao flange: 839 mm;
 - Distância horizontal do CG ao eixo de simetria: 0 mm.
- Batimetria
 - Terreno variável;

Distância do flange [m]	Altura do flange ao leito marinho [mm]
0	3810
6	3810
9	4310
14	4310
18	3810

- Conjunto de flutuadores disponíveis
 - 1 flutuador de 1416 kgf
 - 1 flutuador de 1376 kgf
 - 1 flutuador de 1345 kgf
 - 1 flutuador de 1323 kgf
 - 1 flutuador de 1320 kgf
 - 1 flutuador de 871 kgf
 - 2 flutuadores de 741 kgf
 - 1 flutuador de 660 kgf
 - 1 flutuador de 647 kgf
 - 1 flutuador de 381 kgf
 - 1 flutuador de 377 kgf
 - 1 flutuador de 155 kgf
 - 1 flutuador de 104 kgf
 - 1 flutuador de 101 kgf



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- 1 flutuador de 100 kgf
- Sugestão inicial de configuração de flutuadores
 - 1800 kgf à 3m do flange;
 - 1300 kgf à 6m do flange;
 - 700 kgf à 9m do flange.

- Limites estruturais do relatório

$$\begin{aligned} N &= 7,44 \text{ kN} \\ \text{– Caso 2 :} \quad C &= -11,13 \text{ kN} \\ MF &= 13,72 \text{ kN.m} \\ N &= 3,38 \text{ kN} \\ \text{– Caso 3 (I):} \quad C &= -8,37 \text{ kN} \\ MF &= 32,16 \text{ kN.m} \\ N &= 7,53 \text{ kN} \\ \text{– Caso 3 (II):} \quad C &= -11,93 \text{ kN} \\ MF &= 6,83 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

7.1.4 4º caso de análise – CVD-jumper em águas ultra-profundas, com batimetria variável

- Dados da linha flexível
 - Lâmina d'água: 2240 m;
 - Comprimento: 1335 m;
 - Peso da linha flexível vazia, no ar: 146,52 kg
 - Peso da linha flexível cheia, no ar: 167,7 kg
 - Peso da linha flexível vazia, na água: 72,14 kg
 - Peso da linha flexível cheia, na água: 93,32 kg
 - Diâmetro de contato: 306,22 mm;
 - Diâmetro nominal: 6 ”;
 - Raio de curvatura mínimo de armazenamento: 2,09 m;
 - Raio de curvatura mínimo de instalação: 2,4 m;
 - Rigidez à flexão: 38,98 kN.m²;
 - Rigidez à torção: 1204 kN.m²;
 - Rigidez axial: 310730 kN;
- Curva de rigidez

Curvatura [1/m]	Momento Fletor [N.m]
0	0



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



0,0057	1931
0,0126	2657
0,0208	3509
0,0302	4489
0,0409	5599
0,0528	6838
0,0659	8205
0,0802	9701
0,0958	11327
0,1127	13081
0,1308	14964
0,1501	16977
0,1706	19118
0,1924	21388
0,2155	23787
0,2397	26316
0,2652	28973
0,292	31759
0,32	34674
0,3492	37719
0,3797	40892
0,4114	44194
0,4443	47625
0,4785	51186

- Dados da vértebra
 - Material: Aço;
 - Comprimento: 5639 mm;
 - Peso, no ar: 1394 kg;
 - Peso, na água: 1212,78 kg;
 - Diâmetro externo: 455 mm;
 - Diâmetro interno: 330 mm;
 - Diâmetro de contato: 668 mm;
 - Raio de curvatura de travamento: 4,14 m;
 - Máximo Momento Fletor admissível: 77 kN.m;
- Dados do conector
 - Comprimento: 1374 mm;
 - Peso, no ar: 890 kg;
 - Peso, na água: 774,3 kg;



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Diâmetro externo: 254 mm;
- Diâmetro interno: 152,4 mm;
- Diâmetro de contato: 535 mm.
- Dados do MCV
 - Peso, na água: 5043 kg;
 - Azimute do flange: 60°;
 - Altura do flange: 3810 mm;
 - Altura da manilha: 502 mm;
 - Distância horizontal da manilha ao flange: 907 mm;
 - Diferença de altura entre o CG e o flange: 681 mm;
 - Distância horizontal do CG ao flange: 864 mm;
 - Diferença de altura entre a base e o flange: 2037 mm;
 - Distância horizontal da base ao flange: 839 mm;
 - Distância horizontal do CG ao eixo de simetria: 0 mm.
- Batimetria
 - Terreno variável;

Distância do flange [m]	Altura do flange ao leito marinho [mm]
0	3810
5	3810
7	4610
15	4610
18	3810

- Conjunto de flutuadores disponíveis
 - 5 flutuadores de 1213 kg;
 - 5 flutuadores de 576 kg;
 - 5 flutuadores de 381 kg;
 - 5 flutuadores de 100 kg;
- Sugestão inicial de configuração de flutuadores
 - 2000 kgf à 3m do flange;
 - 400 kgf à 6m do flange;
- Limites estruturais do relatório
 - $N = 3,55 \text{ kN}$
 - Caso 2 : $C = -4,27 \text{ kN}$
 $MF = 6,13 \text{ kN.m}$



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Caso 3 (I):
 $N = 0,89 \text{ kN}$
 $C = 0,38 \text{ kN}$
 $MF = 31,32 \text{ kN.m}$
 $N = 4,46 \text{ kN}$
- Caso 3 (II):
 $C = -6,30 \text{ kN}$
 $MF = -10,05 \text{ kN.m}$

7.1.5 5º caso de análise – CVD-jumper em águas ultra-profundas, com flexível pesado, de 6". MCV pesado e batimetria variável

- Dados da linha flexível
 - Lâmina d'água: 2176 m;
 - Comprimento: 330 m;
 - Peso da linha flexível vazia, no ar: 166,2 kg
 - Peso da linha flexível cheia, no ar: 186,81 kg
 - Peso da linha flexível vazia, na água: 98,14 kg
 - Peso da linha flexível cheia, na água: 118,74 kg
 - Diâmetro de contato: 291,34 mm;
 - Diâmetro nominal: 6 ";
 - Raio de curvatura mínimo de armazenamento: 1,89 m;
 - Raio de curvatura mínimo de instalação: 2,4 m;
 - Rigidez à flexão: 40,41 kN.m²;
 - Rigidez à torção: 1685 kN.m²;
 - Rigidez axial: 563380 kN;
- Curva de rigidez

Curvatura [1/m]	Momento Fletor [N.m]
0	0
0,003	1322
0,006	1531
0,009	1775
0,014	2055
0,019	2372
0,024	2726
0,03	3116
0,036	3543
0,044	4007



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



0,051	4508
0,059	5046
0,068	5621
0,078	6232
0,087	6880
0,098	7565
0,109	8287
0,121	9046
0,133	9841
0,145	10674
0,159	11543
0,173	12449
0,187	13391
0,202	14371
0,217	15388

- Dados da vértebra
 - Material: Aço;
 - Comprimento: 5781 mm;
 - Peso, no ar: 1552 kg;
 - Peso, na água: 1350,2 kg;
 - Diâmetro externo: 438 mm;
 - Diâmetro interno: 313 mm;
 - Diâmetro de contato: 725 mm;
 - Raio de curvatura de travamento: 4,14 m;
 - Máximo Momento Fletor admissível: 70 kN.m;
 - Máximo Cortante admissível: 34 kN.
- Dados do conector
 - Comprimento: 2219 mm;
 - Peso, no ar: 2600 kg;
 - Peso, na água: 2262 kg;
 - Diâmetro externo: 254 mm;
 - Diâmetro interno: 152,4 mm;
 - Diâmetro de contato: 590 mm.
- Dados do MCV
 - Peso, na água: 11035 kg;
 - Azimute do flange: 60°;
 - Altura do flange: 4498 mm;
 - Altura da manilha: 1005 mm;



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Distância horizontal da manilha ao flange: 1786 mm;
- Diferença de altura entre o CG e o flange: 823 mm;
- Distância horizontal do CG ao flange: 1893 mm;
- Diferença de altura entre a base e o flange: 2656 mm;
- Distância horizontal da base ao flange: 2163 mm;
- Distância horizontal do CG ao eixo de simetria: 0 mm.
- Batimetria
 - Terreno variável;

Distância do flange [m]	Altura do flange ao leito marinho [mm]
0	4498
11	4498
12	4698
15	4698
16	4498

- Conjunto de flutuadores disponíveis
 - 1 flutuador de 1416 kgf
 - 1 flutuador de 1376 kgf
 - 1 flutuador de 1345 kgf
 - 1 flutuador de 1323 kgf
 - 1 flutuador de 1320 kgf
 - 1 flutuador de 871 kgf
 - 2 flutuadores de 741 kgf
 - 1 flutuador de 660 kgf
 - 1 flutuador de 647 kgf
 - 1 flutuador de 381 kgf
 - 1 flutuador de 377 kgf
 - 1 flutuador de 155 kgf
 - 1 flutuador de 104 kgf
 - 1 flutuador de 101 kgf
 - 1 flutuador de 100 kgf
- Sugestão inicial de configuração de flutuadores
 - 1900 kgf à 3m do flange;
 - 1000 kgf à 6m do flange;
 - 1000 kgf à 9m do flange.
- Limites estruturais do relatório



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Caso 2 :
 - $N = 7,62 \text{ kN}$
 - $C = -11,3 \text{ kN}$
 - $MF = 10,72 \text{ kN.m}$
 - $N = 4,87 \text{ kN}$
- Caso 3 (I):
 - $C = -8,51 \text{ kN}$
 - $MF = 26,68 \text{ kN.m}$
 - $N = 7,58 \text{ kN}$
- Caso 3 (II):
 - $C = -11,73 \text{ kN}$
 - $MF = 6,60 \text{ kN.m}$

7.1.6 6º caso de análise – CVD igual à do 5º caso de análise, mas com outra embarcação

- Conjunto de flutuadores disponíveis
 - 1 flutuador de 1508 kgf
 - 1 flutuador de 1451 kgf
 - 1 flutuador de 1428 kgf
 - 1 flutuador de 1425 kgf
 - 1 flutuador de 1416 kgf
 - 1 flutuador de 1320 kgf
 - 1 flutuador de 760 kgf
 - 1 flutuador de 726 kgf
 - 1 flutuador de 708 kgf
 - 1 flutuador de 385 kgf

7.1.7 7º caso de análise – CVD em águas rasas, com flexível leve, de 4”, vértebra polimérica, adaptador de flange e batimetria variável.

- Dados da linha flexível
 - Lâmina d’água: 735 m;
 - Peso da linha flexível vazia, no ar: 45,97 kg
 - Peso da linha flexível cheia, no ar: 55,30 kg
 - Peso da linha flexível vazia, na água: 23,90 kg
 - Peso da linha flexível cheia, na água: 33,20 kg
 - Diâmetro de contato: 165,64 mm;



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Diâmetro nominal: 4 ”;
- Raio de curvatura mínimo de armazenamento: 1,15 m;
- Raio de curvatura mínimo de instalação: 2,43 m;
- Rigidez à flexão: 16,42 kN.m²;
- Rigidez à torção: 396,49 kN.m²;
- Rigidez axial: 331736 kN;
- Curva de rigidez

Curvatura [1/m]	Momento Fletor [N.m]
0,00	0,00
0,00	2590,53
0,00	4789,99
0,01	6989,45
0,01	9188,92
0,01	11388,38
0,01	13587,85
0,02	15787,31
0,02	17986,77
0,02	20075,38
0,02	21688,43
0,03	22749,71
0,03	23465,48
0,03	24000,82
0,03	24421,11
0,04	24762,49
0,04	25047,26
0,04	25290,05
0,04	25500,93
0,05	25687,05
0,05	25853,63
0,05	26004,54
0,05	26142,74
0,06	26270,52
0,06	26389,65
0,06	26501,55
0,06	26607,37
0,07	26708,00
0,07	26804,22
0,07	26896,63



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



0,08	27098,41
0,16	29344,59
0,23	31351,69
0,31	33325,73
0,39	35290,42
0,47	37251,47
0,55	39210,81
0,63	41169,25
0,71	43127,17
0,79	45084,76

- Dados da vértebra
 - Material: Polimérica;
 - Comprimento: 4191 mm;
 - Peso, no ar: 485,4 kg;
 - Peso, na água: 72 kg;
 - Diâmetro externo: 302 mm;
 - Diâmetro interno: 192 mm;
 - Diâmetro de contato: 490 mm;
 - Raio de curvatura de travamento: 2,69 m;
 - Máximo Momento Fletor admissível: 30 kN.m;
 - Máximo Cortante admissível: 30 kN.
- Zona rígida da vértebra
 - Comprimento: 480 mm;
 - Peso, no ar: 96,65 kg;
 - Peso, na água: 84 kg;
 - Diâmetro externo: 302 mm;
 - Diâmetro interno: 272 mm;
 - Diâmetro de contato: 396 mm.
- Dados do conector
 - Comprimento: 1193 mm;
 - Peso, no ar: 920 kg;
 - Peso, na água: 800 kg;
 - Diâmetro externo: 450 mm;
 - Diâmetro interno: 133 mm;
 - Diâmetro de contato: 450 mm.
- Dados do adaptador de flange
 - Comprimento: 482 mm;
 - Peso, no ar: 107 kg;
 - Peso, na água: 93,09 kg;



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Diâmetro externo: 131 mm;
- Diâmetro interno: 101,6 mm;
- Diâmetro de contato: 395 mm.
- Dados do MCV
 - Peso, na água: 3590 kg;
 - Azimute do flange: 60°;
 - Altura do flange: 4598 mm;
 - Altura da manilha: 862 mm;
 - Distância horizontal da manilha ao flange: 1510 mm;
 - Diferença de altura entre o CG e o flange: 211 mm;
 - Distância horizontal do CG ao flange: 1556 mm;
 - Diferença de altura entre a base e o flange: 1122 mm;
 - Distância horizontal da base ao flange: 1814 mm;
 - Distância horizontal do CG ao eixo de simetria: 0 mm.
- Batimetria
 - Terreno variável;

Distância do flange [m]	Altura do flange ao leito marinho [mm]
0	4598
4	4678
8	4588
12	4598

- Conjunto de flutuadores disponíveis
 - 5 flutuadores de 1000 kgf
 - 3 flutuadores de 500 kgf
 - 2 flutuadores de 250 kgf
 - 5 flutuadores de 100 kgf
- Sugestão inicial de configuração de flutuadores
 - 300 kgf à 3m do flange.
- Limites estruturais do relatório
 - $N = 5,20 \text{ kN}$
 - Caso 2 :
 - $C = -8,12 \text{ kN}$
 - $MF = 12,55 \text{ kN.m}$
 - $N = 5,66 \text{ kN}$
 - Caso 3 (I):
 - $C = -4,1 \text{ kN}$
 - $MF = 31,43 \text{ kN.m}$



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



– Caso 3 (II):

$$\begin{aligned} N &= 6,59 \text{ kN} \\ C &= -11,66 \text{ kN} \\ MF &= -44,93 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

7.1.8 8º caso de análise – CVD igual à do 7º caso de análise, mas considerando o anular da linha alagado.

- Curva de rigidez

Curvatura [1/m]	Momento Fletor [N.m]
0	0
0,02167646	5.339,26
0,04335292	1.067,85
0,06502939	1.601,78
0,08670585	2.135,70
0,1083823	2.669,63
0,1300588	3.203,56
0,1517352	3.737,48
0,1734117	4.271,41
0,1950882	4.805,33
0,2167646	5.339,26
0,2384411	5.873,18
0,2601175	6.407,11
0,281794	6.941,04
0,3034705	7.474,96
0,3251469	8.008,89
0,3468234	8.542,81
0,3684999	9.076,74
0,3901763	9.610,67
0,4118528	10.144,59
0,4335292	10.678,52
0,4552057	11.212,44
0,4768822	11.746,37
0,4985586	12.280,29
0,5202351	12.814,22
0,5419116	13.348,15
0,563588	13.882,07



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



0,5852645	14416
0,6069409	14949,92
0,6286174	15483,85
0,6502939	16017,78
0,6719703	16551,7
0,6936468	17085,63
0,7153233	17619,55
0,7369997	18153,48
0,7586762	18687,41
0,7803526	19221,33
0,8020291	19755,26
0,8237056	20289,18
0,845382	20823,11

7.1.9 9º caso de análise – CVD-jumper em águas ultra-profundas, com flexível pesado, de 6”, e MCV pesado.

- Dados da linha flexível
 - Lâmina d’água: 2240 m;
 - Comprimento: 850 m;
 - Peso da linha flexível vazia, no ar: 166,2 kg
 - Peso da linha flexível cheia, no ar: 186,81 kg
 - Peso da linha flexível vazia, na água: 98,14 kg
 - Peso da linha flexível cheia, na água: 118,74 kg
 - Diâmetro de contato: 291,34 mm;
 - Diâmetro nominal: 6 ”;
 - Raio de curvatura mínimo de armazenamento: 1,89 m;
 - Raio de curvatura mínimo de instalação: 2,4 m;
 - Rigidez à flexão: 40,41 kN.m²;
 - Rigidez à torção: 1685 kN.m²;
 - Rigidez axial: 563380 kN;
- Curva de rigidez

Curvatura [1/m]	Momento Fletor [N.m]
0	0
0,0026	8676



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



0,0057	10835
0,0095	11399
0,0137	11866
0,0186	12349
0,024	12871
0,0299	13442
0,0365	14064
0,0435	14739
0,0512	15466
0,0594	16246
0,0682	17079
0,0775	17965
0,0874	18904
0,0979	19896
0,1089	20941
0,1205	22040
0,1327	23191
0,1454	24396
0,1587	25654
0,1725	26965
0,1869	28330
0,2019	29748
0,2174	31219

- Dados da vértebra
 - Material: Aço;
 - Comprimento: 5781 mm;
 - Peso, no ar: 1552 kg;
 - Peso, na água: 1350,2 kg;
 - Diâmetro externo: 472 mm;
 - Diâmetro interno: 313 mm;
 - Diâmetro de contato: 725 mm;
 - Raio de curvatura de travamento: 4,14 m;
 - Máximo Momento Fletor admissível: 70 kN.m;
 - Máximo Cortante admissível: 34 kN.
- Dados do conector
 - Comprimento: 2219 mm;
 - Peso, no ar: 2600 kg;
 - Peso, na água: 2262 kg;



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Diâmetro externo: 254 mm;
- Diâmetro interno: 152,4 mm;
- Diâmetro de contato: 590 mm.
- Dados do MCV
 - Peso, na água: 11035 kg;
 - Azimute do flange: 60°;
 - Altura do flange: 4498 mm;
 - Altura da manilha: 1005 mm;
 - Distância horizontal da manilha ao flange: 1786 mm;
 - Diferença de altura entre o CG e o flange: 823 mm;
 - Distância horizontal do CG ao flange: 1893 mm;
 - Diferença de altura entre a base e o flange: 2656 mm;
 - Distância horizontal da base ao flange: 2163 mm;
 - Distância horizontal do CG ao eixo de simetria: 0 mm.
- Batimetria
 - Terreno plano;
- Conjunto de flutuadores disponíveis
 - 3 flutuadores de 1252 kgf
 - 1 flutuador de 973 kgf
 - 1 flutuador de 828 kgf
 - 3 flutuadores de 573 kgf
 - 3 flutuadores de 283 kgf
 - 4 flutuadores de 205 kgf
 - 6 flutuadores de 118 kgf
 - 1 flutuador de 100 kgf
- Sugestão inicial de configuração de flutuadores
 - 2000 kgf à 3m do flange;
 - 1400 kgf à 6m do flange.
- Limites estruturais do relatório
 - $N = 8,27 \text{ kN}$
 - Caso 2 :
 - $C = -12,21 \text{ kN}$
 - $MF = 13,65 \text{ kN.m}$
 - $N = 2,69 \text{ kN}$
 - Caso 3 (I):
 - $C = -4,57 \text{ kN}$
 - $MF = 52,03 \text{ kN.m}$
 - $N = 9,28 \text{ kN}$
 - Caso 3 (II):
 - $C = -15,19 \text{ kN}$
 - $MF = -23,11 \text{ kN.m}$



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



7.2 RESULTADOS FINAIS

Figura 56 – Resultados obtidos para o caso 2 de análise

Caso 2 (Equilíbrio estático)														
Análise	N _{iterações}	T _{execução} [min]	T _{total} [min]	% T _{util}	Inclinação MCV [°]	Proximidade linha, solo [m]	Configuração RL (Sugestão inicial)	Configuração encontrada	Vértebra travada?	C _{vértebra} / Limite	MF _{vértebra} / Limite	N _{range, MCV} / Limite	C _{range, MCV} / Limite	MF _{range, MCV} / Limite
1	18	4,9	11	44,5%	0,143	0,569	1800 kgf a 3m 1000 kgf a 6m	1825 kgf a 3m 946 kgf a 6m 100 kgf a 9m	Não	0	0	6,09 / 6,9	10,12 / 10,47	12,58 / 13,11
2	10	3,8	3,8	100,0%	-0,087	0,543	1500 kgf a 3m 300 kgf a 6m	1313 kgf a 3m 576 kgf a 6m	Sim	9,57 / 23,8	9,81 / 27	1,60 / 1,51	2,42 / 1,42	15,82 / 13,55
3	4	1,7	15	11,3%	0,19	0,589	1800 kgf a 3m 1700 kgf a 6m 700 kgf a 9m	1797 kgf a 3m 1252 kgf a 6m 748 kgf a 9m	Não	0	0	5,83 / 7,44	9,67 / 11,13	12,06 / 13,72
4	18	6,7	6,7	100,0%	0,137	0,53	2000 kgf a 3m 400 kgf a 6m	1694 kgf a 3m 862 kgf a 6m	Não	0	0	2,08 / 3,55	3,25 / 4,27	5,39 / 6,13
5	5	1,7	1,7	100,0%	0,019	0,526	1900 kgf a 3m 1000 kgf a 6m 1000 kgf a 9m	1797 kgf a 3m 1041 kgf a 6m 975 kgf a 9m	Não	0	0	6,17 / 7,62	10,23 / 11,3	9,45 / 10,72
6	6	3,1	3,1	100,0%	0,335	0,579	1900 kgf a 3m 1000 kgf a 6m 1000 kgf a 9m	1893 kgf a 3m 1093 kgf a 6m 726 kgf a 9m	Não	0	0	2,08 / 7,62	3,25 / 11,3	5,39 / 10,72
7	8	2,4	3,4	70,6%	-0,195	0,543	300 kgf a 3m	500 kgf a 3m	Não	0	0	4,33 / 5,2	7,37 / 8,12	11,35 / 12,55
8	20	6,4	6,4	100,0%	0,417	0,599	300 kgf a 3m	600 kgf a 3m 300 kgf a 6m	Não	0	0	2,53 / 5,2	3,85 / 8,12	4,83 / 12,55
9	6	2,6	2,6	100,0%	0,07	0,548	2000 kgf a 3m 1400 kgf a 6m	1925 kgf a 3m 1370 kgf a 6m	Não	0	0	6,91 / 8,27	11,27 / 12,21	11,42 / 13,65

Fonte: do próprio autor.

Figura 57 – Resultados obtidos para o caso 3 de análise

Caso 3 (Heave up e Touch Down Point)													
Análise	Heave up	Esforços _{range}			Limites RL _{range}				Vértebra travada?	Esforços _{vértebra} / Limite		Uso do Ábaco?	Esforços aprovados?
		Normal [kN]	Cortante [kN]	Momento fletor [kN.m]	Heave up	Normal [kN]	Cortante [kN]	Momento fletor [kN.m]		Cortante [kN]	Momento fletor [kN.m]		
1	2,5	10,81	13,91	34,04	2,5	3,37	8,02	30,67	Sim	14,18 / 43	10,03 / 57	(Sim)	(Sim)
	2	8,9	13,3	29,16									
	1,8	8,34	13,04	26,31									
2	2,5	2,67	3,39	23,01	1,8	0,59	0,64	18,14	Sim	11,39 / 23,8	13,89 / 27	(Sim)	(Sim)
	2	2,32	3,03	21,96									
	1,8	2,1	2,94	21,41									
3	2,5	10,72	13,33	31,94	1,8	3,38	8,37	32,16	Sim	14,70 / 34	5,89 / 70	(Sim)	(Sim)
	2	8,87	12,7	29,18									
	1,8	8,29	12,41	27,86									
4	2,5	6,58	9,89	42,37	1,8	0,89	0,38	31,32	Não	0	0	(Sim)	(Sim)
	2	4,73	8,78	34,83									
	1,8	4,17	8,32	32,16									
5	2,5	11,74	15,04	32,73	1,8	4,87	8,51	26,68	Sim	13,12 / 34	3,19 / 70	(Sim)	(Sim)
	2	9,79	13,95	28,15									
	1,8	9,19	13,48	26,25									
6	2,5	10,54	13,31	27,12	1,8	4,87	8,51	26,68	Sim	6,47 / 34	1,23 / 70	(Sim)	(Sim)
	2	9,26	12,71	24,69									
	1,8	8,83	12,49	23,63									
7	2,5	6,96	13,88	39,19	2,5	6,59	11,66	44,93	Não	0	0	(Não)	(Sim)
	2	6,34	12,34	34,24									
	1,8	6,12	11,72	32,12									
8	2,5	4,47	5,56	16,4	2,5	6,59	11,66	44,93	Não	0	0	(Não)	(Sim)
	2												
	1,8												
9	2,5	10,41	16,84	63,96	1,8	2,69	4,57	52,03	Sim	14,98 / 34	2,78 / 70	(Não)	(Não)
	2	9,01	15,97	53,96									
	1,8	8,59	15,69	48,43									

Fonte: do próprio autor.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 58 – Resultados obtidos para o caso contingencial de análise

Análise	Contingências	Casos Contingenciais					
		Esforços _{flange}			Vértebra travada?	Esforços _{vértebra}	
		Normal [kN]	Cortante [kN]	Momento fletor [kN.m]		Cortante [kN]	Momento fletor [kN.m]
1	500 kgf a 4m	2,79	5,76	30	Sim	16,12	9,2
	500 kgf a 8m	3,2	7,3	30,42	Sim	15,54	12,38
2	X						
	X						
3	600 kgf a 4m	1,46	4,55	31,27	Sim	15,15	3,05
	500 kgf a 7m	1,38	6,49	30,36	Sim	14,28	6,45
4	300 kgf a 4m	0,72	0,12	16,72	Não		
	X						
5	400 kgf a 4m	3,13	6,31	25,41	Sim	5,22	1,05
	300 kgf a 7m	3,78	7,71	23,3	Sim	10,21	2,05
6	500 kgf a 4m	2,26	5,5	25,95	Não		
	400 kgf a 7m	3,42	7,01	23,87	Sim	5,76	1,16
7	1100 kgf a 4m	1,51	1,77	43,46	Não		
	1100 kgf a 5m	1,37	1,15	44,4	Não		
8	1200 kgf a 4m	3,83	6,08	43,51	Sim	15,84	12,04
	900 kgf a 7m	1,97	2,41	42,4	Sim	12,33	18,81
9	1300 kgf a 4m	0,57	0,04	49,94	Não		
	1400 kgf a 7m	0,27	2,43	50,49	Sim	5,3	1,07

Fonte: do próprio autor.