



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



AUTOMATIZAÇÃO DA ANÁLISE DE OPERAÇÃO DE CVD
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
Francisco da Fonseca Quaranta

NITERÓI, RJ

2024



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 aos D. Sc. Francisco F. Quaranta e D. Sc. Gabriel C. Nascimento, meus orientadores. É uma grande honra poder desenvolver este projeto sob à 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 python ao OrcaFlex, software comercial de análises subsea, seguindo os critérios estabelecidos nas especificações técnicas ET-3000.00-1500-951-PMU-001 Rev F e ET-3000.00-1500-941-PMU-006 Rev C, quanto aos casos de carregamento referentes às etapas de instalação. Como proposta de melhoria, sugere-se implementar updates à aplicação, de modo que se possibilite analisar também a operação offshore CVD de 2º extremidade e os casos de análise 4 e 5 (teste hidrostático e operação) previstos nas Especificações Técnicas mencionadas.

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. As a proposed improvement, it is suggested to implement updates to the application to enable the analysis of the 2nd end offshore CVD operation and analysis cases 4 and 5 (hydrostatic test and operation) as outlined in the mentioned Technical Specifications.

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	13
A.	CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA.....	13
B.	MOTIVAÇÃO DESTE PROJETO	17
C.	ELEMENTOS DAS OPERAÇÕES OFFSHORE.....	18
	EMBARCAÇÕES (FSO E FPSO)	18
	POÇOS DE PETRÓLEO	27
	LINHAS FLEXÍVEIS, DESCRIÇÃO E COMPARATIVO	31
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	34
A.	INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE LINHAS SUBMARINAS	34
B.	CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DE PROJETO DE RISERS E FLOWLINES 38	
	CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO.....	42
	ANÁLISE DE PROJETO DE LINHAS SUBMARINAS	43
	EFEITO DE FADIGA	51
C.	ANÁLISE DE CVD, DE ACORDO COM A “ET-3000.00-1500-951-PMU-001” E A “ET-3000.00-1500-941-PMU-006”.	52
	ANÁLISE DA OPERAÇÃO.....	53
	CONDUÇÃO DA OPERAÇÃO	58
	CONSTRUÇÃO DO MODELO	59
	METODOLOGIA.....	69
	FLUTUADORES E PESO MORTO.....	74
	AÇÕES MITIGATÓRIAS	74
3	OPERAÇÃO DE CONEXÃO VERTICAL DIRETA.....	76
A.	A OPERAÇÃO DE CVD	76
B.	ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE CVD	78
	EQUILÍBRIO DO SISTEMA	78



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



CONSIDERAÇÕES SOBRE A FLEXÃO DO DUTO FLEXÍVEL (HISTERESE).....	80
4 APLICAÇÃO “CVD AUTOMÁTICO”	83
A. EXPLICANDO A APLICAÇÃO.....	83
A INTERFACE	83
PROCESSAMENTO.....	89
B. CASOS DE ESTUDO	97
CONSIDERAÇÕES INICIAIS	97
1º CASO DE ESTUDO.....	98
2º CASO DE ESTUDO.....	100
3º CASO DE ESTUDO.....	103
4º CASO DE ESTUDO.....	106
5 RESULTADOS ESPERADOS	109
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - REPRESENTAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DA OPERAÇÃO PLUTO.....	14
FIGURA 2 - CAMADAS DA LINHA FLEXÍVEL DESENVOLVIDA NA OPERAÇÃO PLUTO.....	14
FIGURA 3 - RECORDES MUNDIAIS DE EXPLORAÇÃO EM ÁGUAS PROFUNDAS E ULTRAPROFUNDAS.	16
FIGURA 4 - PLATAFORMA P-56, NO CAMPO DE MARLIM SUL	17
FIGURA 5 - EMBARCAÇÃO REALIZANDO LANÇAMENTO DE LINHAS FLEXÍVEIS	19
FIGURA 6 - EMBARCAÇÃO REALIZANDO LANÇAMENTO DE LINHAS RÍGIDAS	20
FIGURA 7 - EMBARCAÇÃO COM BOW TURRET	20
FIGURA 8 - EMBARCAÇÃO COM BOBINAS CARREGADAS NO CONVÉS.....	21
FIGURA 9 – TENSIONADOR PARA LANÇAMENTO/RECOLHIMENTO VERTICAL.....	22
FIGURA 10 - GUINDASTE OFFSHORE DE 250 TF.....	23
FIGURA 11 - GUINCHO DE LINHA	24
FIGURA 12 - CESTA DA EMBARCAÇÃO	25
FIGURA 13 - ROV DA EMBARCAÇÃO	26
FIGURA 14 - ESQUEMA ILUSTRATIVO DE LEVANTAMENTO SÍSMICO MARÍTIMO.....	28
FIGURA 15 - LEVANTAMENTO MARÍTIMO 3-D.	28
FIGURA 16 - ESQUEMA DE UMA Sonda ROTATIVA.....	29
FIGURA 17 - SEÇÃO TÍPICA DE UM DUTO FLEXÍVEL	32
FIGURA 18 – “SKETCH” DO PASSO-A-PASSO DE UMA INSTALAÇÃO SUBMARINA TÍPICA	35
FIGURA 19 – MÉTODO S-LAYING DE INSTALAÇÃO DE DUTOS PARA OPERAÇÕES SUBMARINAS ..	36
FIGURA 20 – MÉTODO J-LAYING DE INSTALAÇÃO DE DUTOS PARA OPERAÇÕES SUBMARINAS ..	37
FIGURA 21 – MÉTODO REEL-LAYING DE INSTALAÇÃO DE DUTOS PARA OPERAÇÕES SUBMARINAS	37
FIGURA 22 – MÉTODO TOWING -LAYING DE INSTALAÇÃO DE DUTOS PARA OPERAÇÕES SUBMARINAS	38
FIGURA 23 – ILUSTRAÇÃO DE DIVERSOS TIPOS DE INSTALAÇÕES DE LINHAS SUBMARINAS	39
FIGURA 24 – CATENÁRIA TÍPICA DE UM RISER DE AÇO.....	40
FIGURA 25 – CONFIGURAÇÃO DE LINHA FLEXÍVEL.....	40



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



FIGURA 26 – RISER DE TENSÃO DE TOPO, EM PLATAFORMAS	41
FIGURA 27 – CONFIGURAÇÃO DE RISER HIBRIDO	42
FIGURA 28 – DEFINIÇÃO DAS TENSÕES NAS PAREDES DO TUBO	44
FIGURA 29 – TENSÃO LONGITUDINAL DE LINHAS SUBMARINAS	46
FIGURA 30 – ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE LINHAS SUBMARINAS	48
FIGURA 31 – ANÁLISE DE VÃO LIVRE.....	49
FIGURA 32 – MODELO ESTÁTICO NO ORCAFlex.	54
FIGURA 33 – MODELO DINÂMICO NO ORCAFlex (HEAVE UP).....	55
FIGURA 34 – MODELO DINÂMICO NO ORCAFlex (TOUCH DOWN POINT).....	56
FIGURA 35 – SISTEMA DE REFERÊNCIA PARA OS ESFORÇOS SOLICITANTES	57
FIGURA 36 – DIÂMETROS INTERNO E EXTERNO DA MENOR SEÇÃO DA VÉRTEBRA	62
FIGURA 37 – GRÁFICO DE MOMENTO X CURVATURA DA VÉRTEBRA	63
FIGURA 38 – VÉRTEBRA TÍPICA, COM INDICAÇÃO DO MBR.....	64
FIGURA 39 – GRÁFICO MOMENTO X CURVATURA NÃO CONVENCIONAL.....	65
FIGURA 40 – EXEMPLO DE DATASHEET DE UM MCV	67
FIGURA 41 – INSERÇÃO DA HISTERESE E DA TORSÃO NO DUTO FLEXÍVEL NO ORCAFlex.....	70
FIGURA 42 – CURVA TÍPICA DE MOMENTO FLETOR AO LONGO DO TEMPO	73
FIGURA 43 – CONEXÃO DO DUTO COM O HUB	76
FIGURA 44 – OPERAÇÃO DE PASSAGEM.....	77
FIGURA 45 – INSTALAÇÃO DOS ACESSÓRIOS, ANTES DO OVERBOARDING.....	78
FIGURA 46 – VERTICALIZAÇÃO E CVD	78
FIGURA 47 – SISTEMA DE FORÇAS ATUANDO SOBRE O SISTEMA.....	79
FIGURA 48 - GRÁFICO DE MOMENTO X CURVATURA (HISTERESE).....	82
FIGURA 49 – PRIMEIRA SESSÃO DA INTERFACE.....	85
FIGURA 50 – SEÇÃO DE “INPUTS” DA LINHA FLEXÍVEL.	86
FIGURA 51 – SESSÃO DE “INPUTS” DA VÉRTEBRA.	86
FIGURA 52 – SESSÃO DE “INPUTS” DO CONECTOR E DO ADAPTADOR DE FLANGE.	87
FIGURA 53 – SESSÃO DE “INPUTS” DA CURVA DE RIGIDEZ À FLEXÃO DA LINHA.....	88
FIGURA 54 – SESSÃO DE “INPUTS” DO MCV E DA BATIMETRIA.	88



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



FIGURA 55 – SESSÃO DE RELAÇÃO DE FLUTUADORES.....	89
FIGURA 56 – PONTOS DE INTERESSE PARA A MODELAGEM DO MCV NO ORCAFLEX	93
FIGURA 57 - CONFIGURAÇÃO DO MOVIMENTO DE HEAVE UP	95
FIGURA 58 – ESTÁGIOS DA SIMULAÇÃO DINÂMICA.....	96



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



LISTA DE ABREVIações 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

A. CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA.

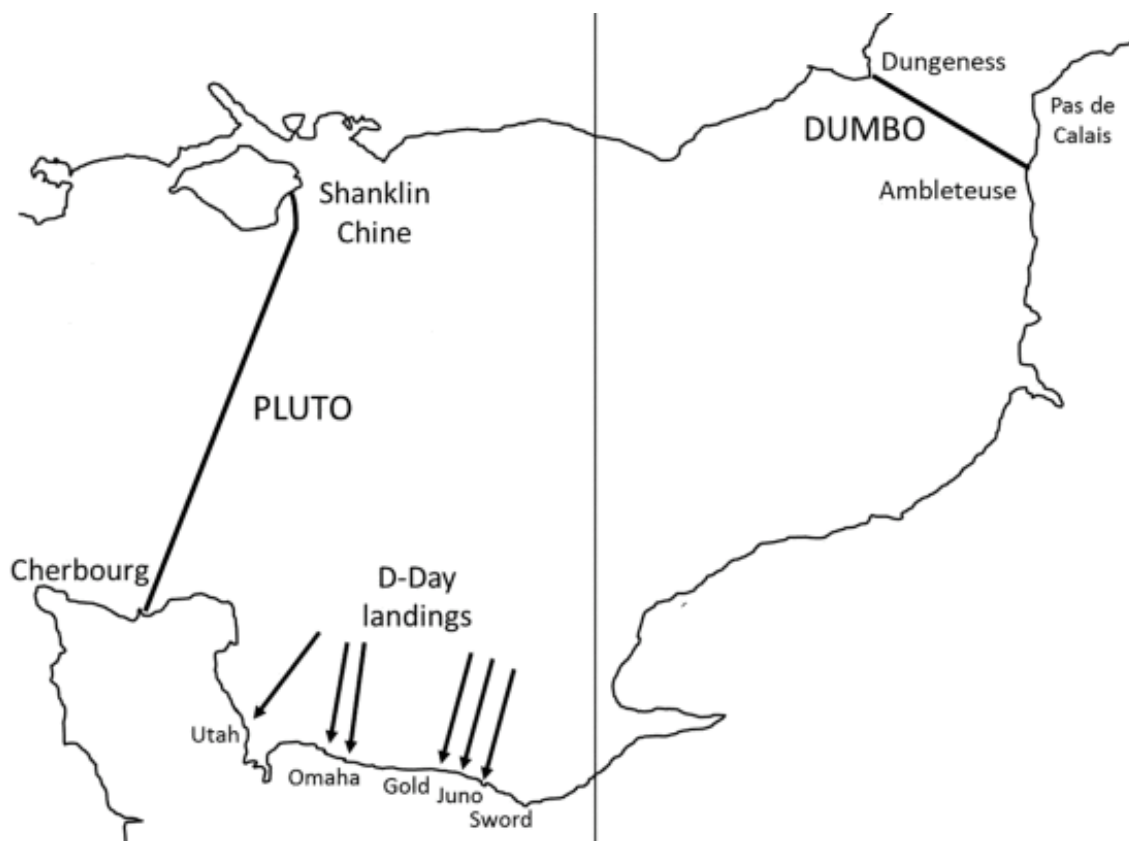
Em 1942, no contexto da segunda guerra mundial, como fruto de uma tentativa de invasão da Tríplice Aliança na Normandia, foi executada a Operação Plutão (“Pipeline Under Ocean”): O propósito era fazer com que a carga de combustíveis das tropas militares fosse transportada por meio de dutos lançados no 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 deste 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:

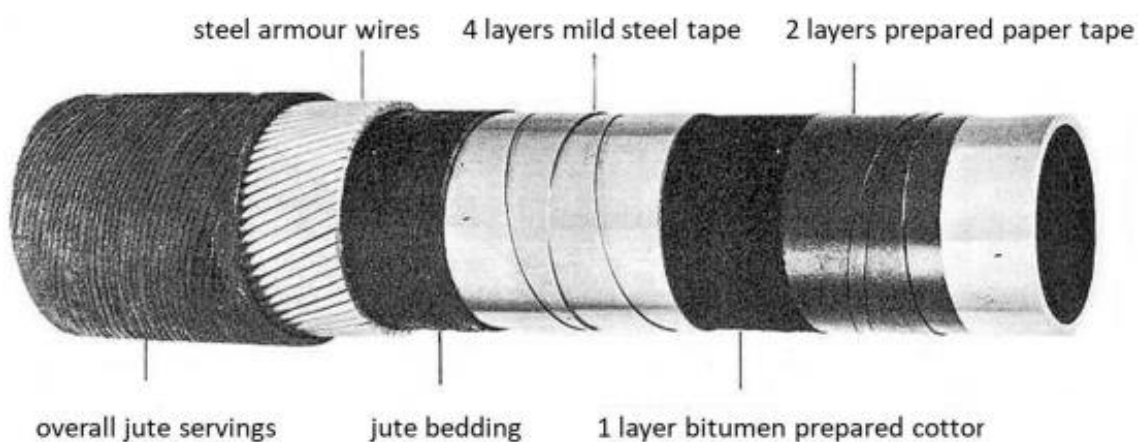
- 1) raio de atuação menor, o que possibilitava maior liberdade para instalação de equipamentos submarinos;
- 2) poderia ser reutilizado, pois possibilitava montagem e desmontagem;
- 3) maior facilidade de lançamento e instalação;
- 4) menores custos quanto aos barcos necessários para executar as operações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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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, por exemplo, linhas rígidas possuem maior proteção térmica e 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 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.

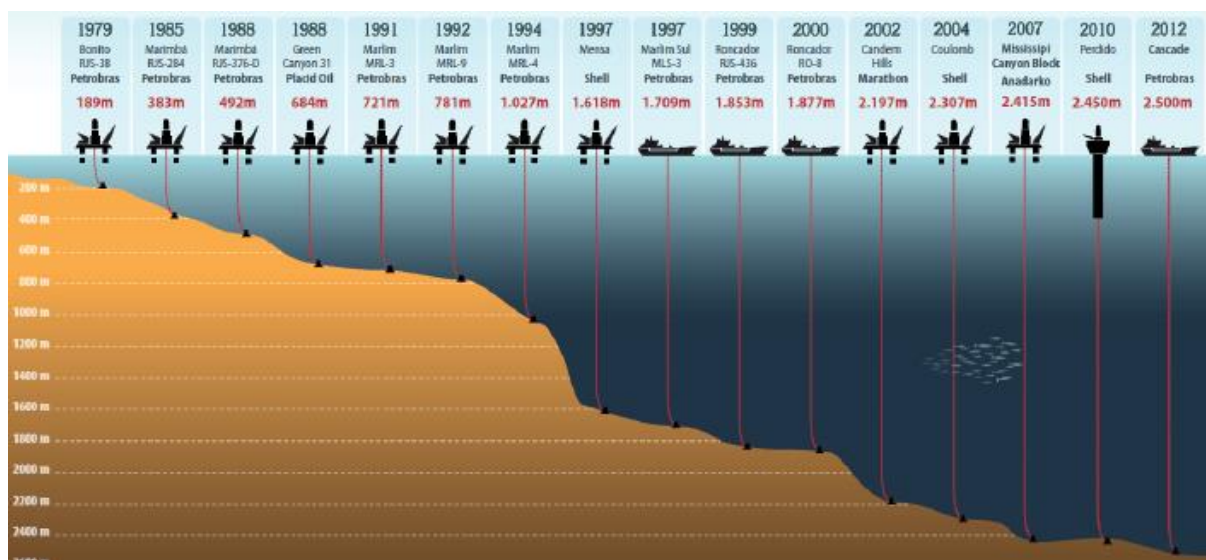
Em ‘Petróleo em águas profundas’, Morais apresenta os recordes mundiais de LDA’s transpostas até 2012, por empresas internacionais, incluindo a Petrobrás (Figura 3).



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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



Fonte: MORAIS (2023).

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. Assim, foi dado um grande passo no desenvolvimento das novas revisões da especificação técnica, vigente até hoje, em sua revisão F, denominada ET-3000.00-1500-951-PMU-001.



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



Fonte: NOGUEIRA, Marta. 2024.

B. 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 python e 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.



C. 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:

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.

- 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 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)



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 5 - Embarcação realizando lançamento de Linhas flexíveis



Fonte: FERREIRA, Débora. 2013.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 6 - Embarcação realizando lançamento de linhas rígidas



Fonte: FERREIRA, Débora. 2013.

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.

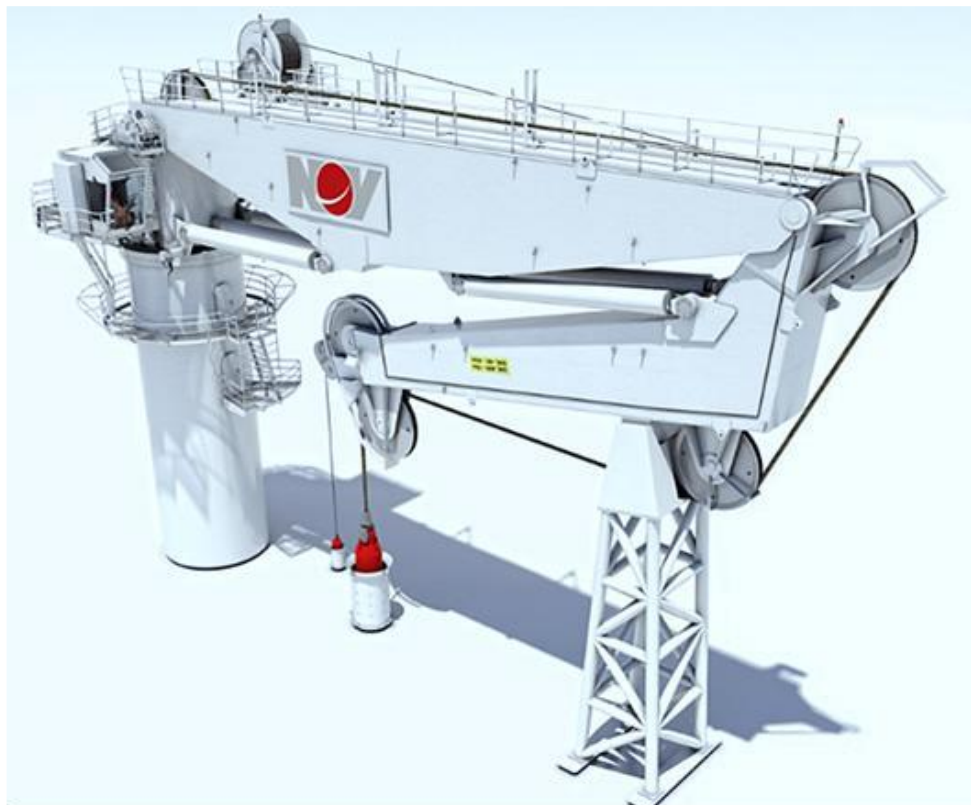
iii. GUINDASTES

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.

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.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 13 - ROV da embarcação



Fonte: FERREIRA, Débora. 2013.



POÇOS DE PETRÓLEO

Existem dois tipos principais de poços: os de produção, onde o óleo 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 a pressão e temperatura, evitando colapsos no sistema. Além disso, esses poços 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.

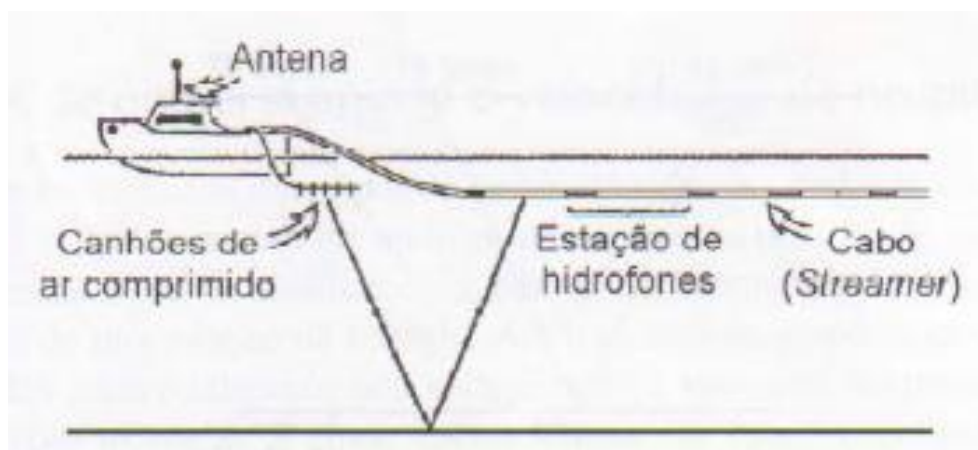
Os Método sísmico de reflexão é o mais utilizado. Nele, por meio de aeronaves, drones ou satélites, são emitidas ondas que permeiam o oceano e chegam até o leito marinho, com a capacidade de mapear um sequenciamento de rochas. Conforme as Figura 14 e Figura 15, os canhões e o cabo contendo os hidrofones 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.



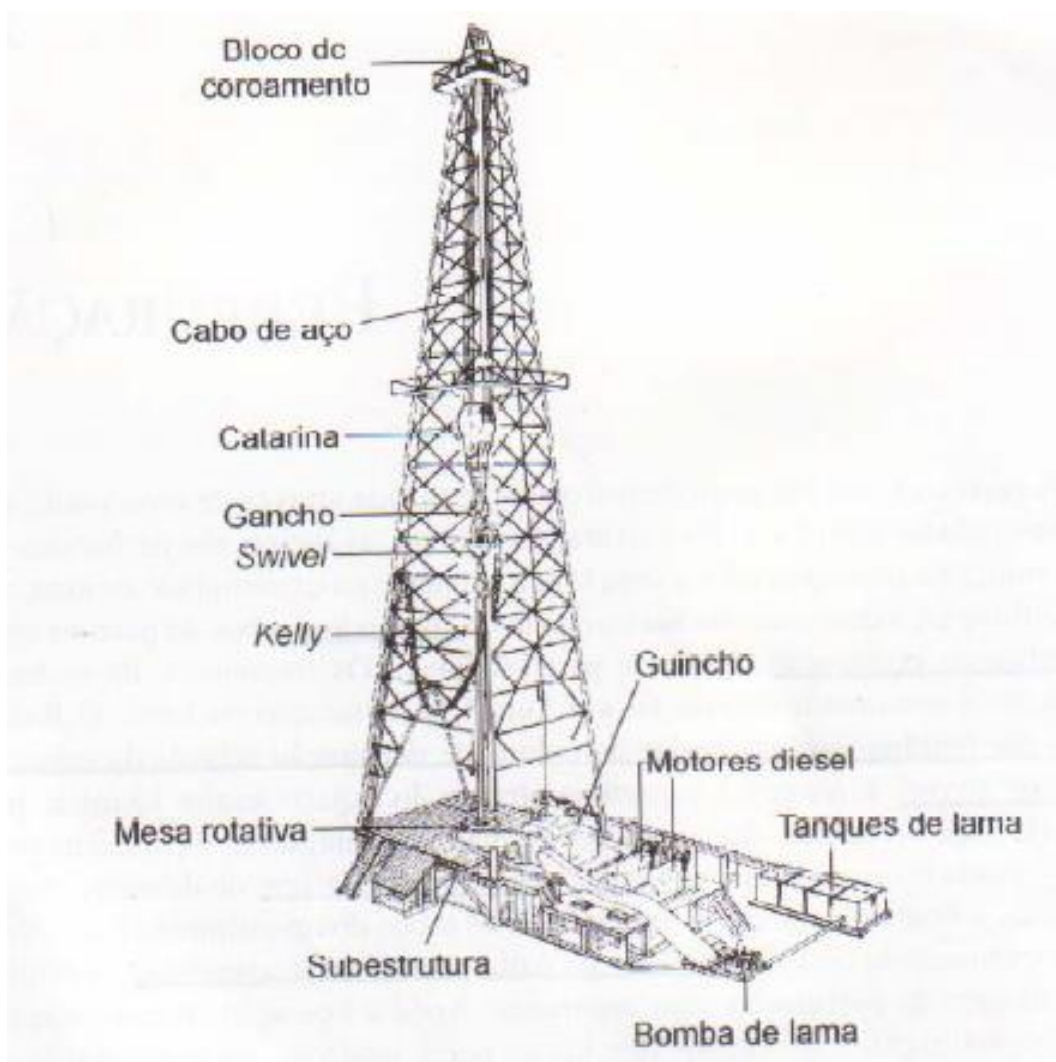
Fonte: THOMAS, José. 2001.



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 é como instalar uma válvula do tipo “abre e fecha” na rede de exploração. Esta completção 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 completção inicial do poço, visando determinar a efetividade de uma completção ou as condições de produtividade.

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.

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 gas-lift possuem vasão de gases ao longo de seu Bore. Estes necessitam de uma camada chamada Carcaça, para impedir a difusão de gás e lidar com as altas pressões parciais em seu interior. Já aqueles cuja função é injeção de água podem ter sua camada de Carcaça substituída por um tubo polimérico (Smooth Bore), pois não haverá preocupação com difusão de gases. No entanto, em casos extremos, numa linha de injeção de água pode haver as duas camadas: carcaça e Smooth bore.

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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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;



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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

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 conectados no leito marinho. 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

A. INTRODUÇÃO À ANÁLISE DE LINHAS SUBMARINAS

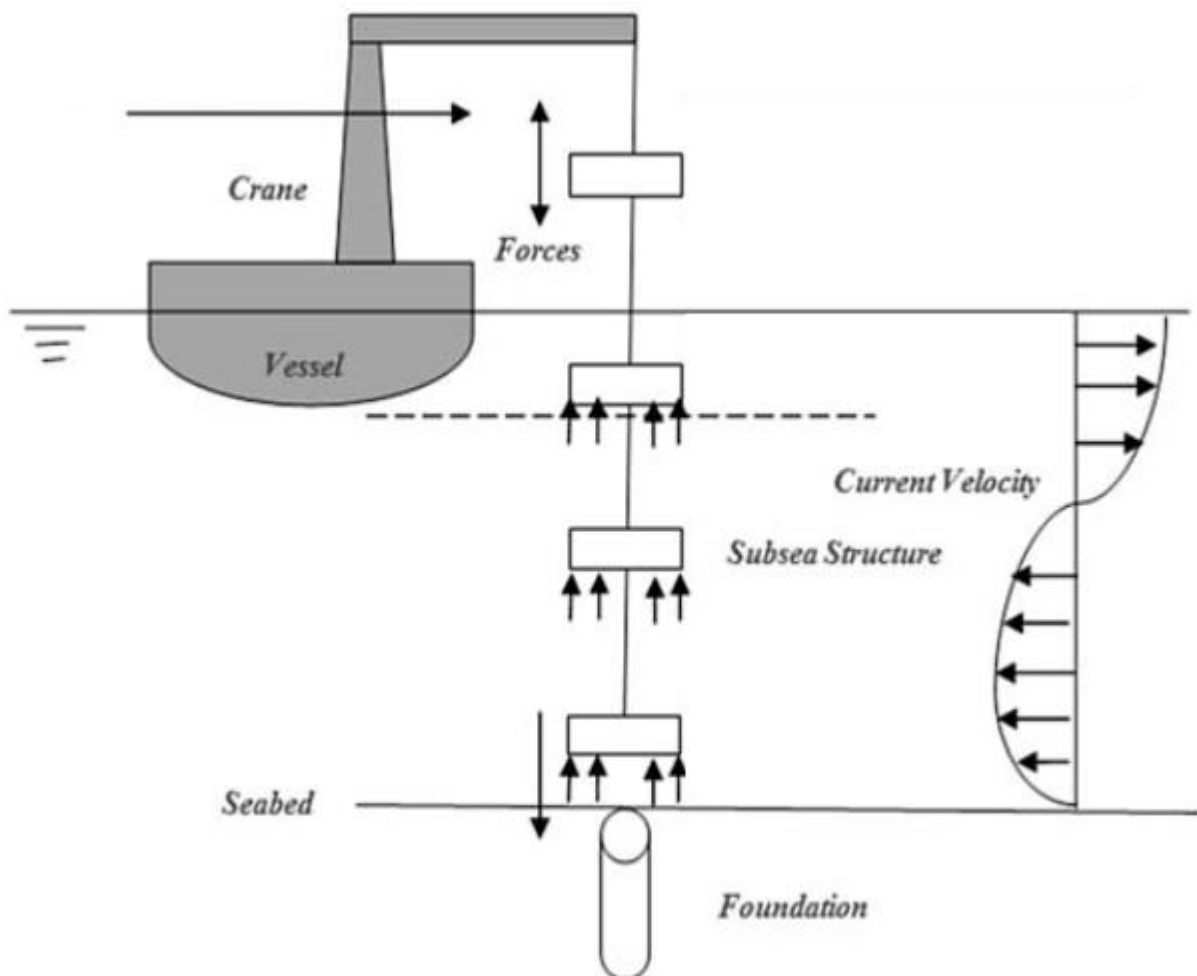
A análise de instalações é a melhor forma de validar índices de resistência dos materiais que precisam ser, garantidamente, superiores às solicitações às quais o equipamento analisado estará submetido, de modo que nenhum modo de falha do material venha ocorrer. De acordo com (FERGESTAD e LOTVEIT. 2017), 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?. 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

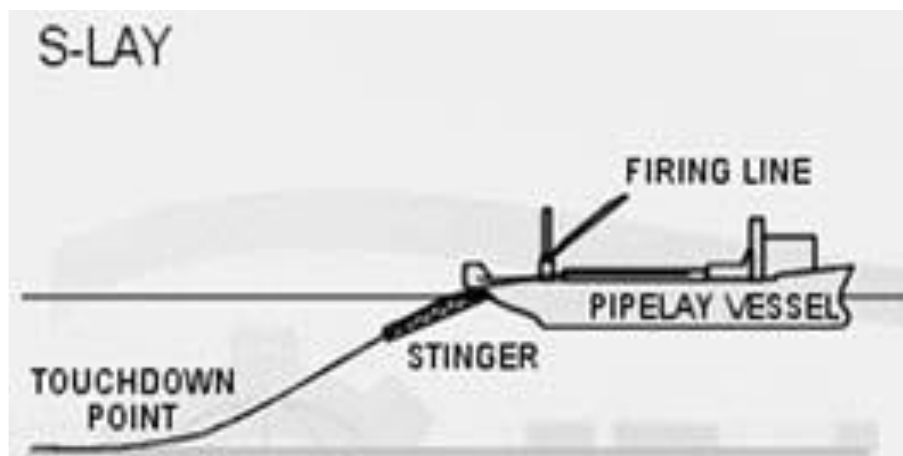


máximas e a da distribuição de tensão/deformação. Estes resultados são verificados em cada ponto crítico da instalação.

A instalação de linhas flexíveis e rígidas, atualmente, possuem quatro principais métodos ou configurações. São eles:

1. S-Laying: Neste método, o flexível é montado, lançado e instalado a partir de uma posição quase horizontal, utilizando um controlador de curvatura e controlando as tensões horizontais. (Figura 19)

Figura 19 – Método S-Laying de instalação de dutos para operações submarinas



Fonte: BAI, Yong. 2019.

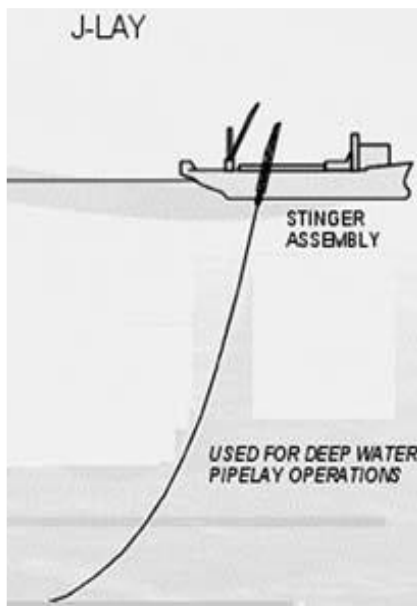
2. J- Laying: Neste método, o flexível é montado, lançado e instalado a partir da torre da embarcação, ficando suspenso na vertical. (Figura 20)



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



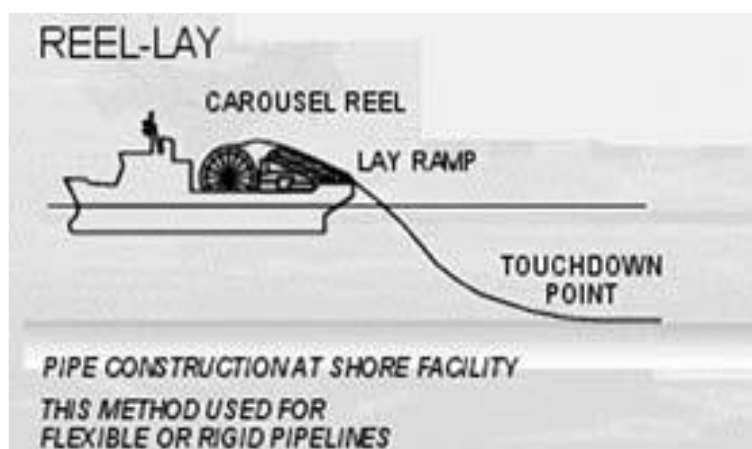
Figura 20 – Método J-Laying de instalação de dutos para operações submarinas



Fonte: BAI, Yong. 2019.

3. Reel-Laying: Neste método, o flexível é montado remotamente, enrolado em carretéis com grande raio a bordo da embarcação, lançado e instalado no leito marinho no local da instalação offshore. (Figura 21)

Figura 21 – Método Reel-Laying de instalação de dutos para operações submarinas

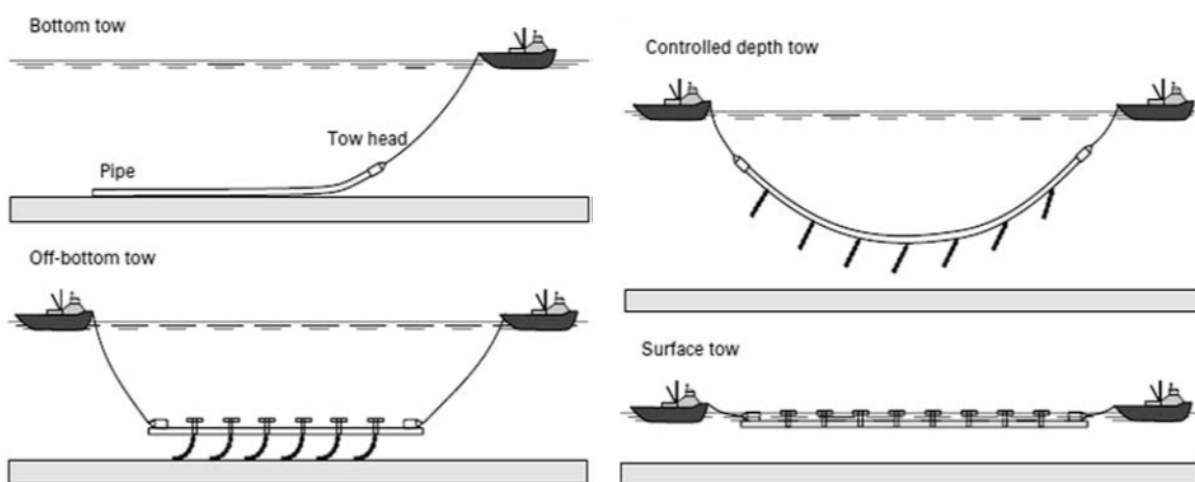


Fonte: BAI, Yong. 2019.



4. Towing-Laying: Neste método, o flexível é montado remotamente, rebocado até o local da instalação, onde ocorre sua instalação. O reboque, quando possível, é realizado no leito marinho, para evitar efeito de fadiga gerado pela diferença de carregamento das ondas nas diferentes profundidades. (Figura 22)

Figura 22 – Método Towing -Laying de instalação de dutos para operações submarinas



Fonte: BAI, Yong. 2019.

Em função da metodologia de instalação, as linhas submarinas podem ser submetidas a diferentes carregamentos. São eles: Pressão hidrostática, Tensão axial e Flexão. Os modos de falha são flambagem local e propagação de flambagem, que ocorrem sobretudo devido à pressão externa e momentos de flexão.

B. CONSIDERAÇÕES SOBRE A ANÁLISE DE PROJETO DE RISERS E FLOWLINES

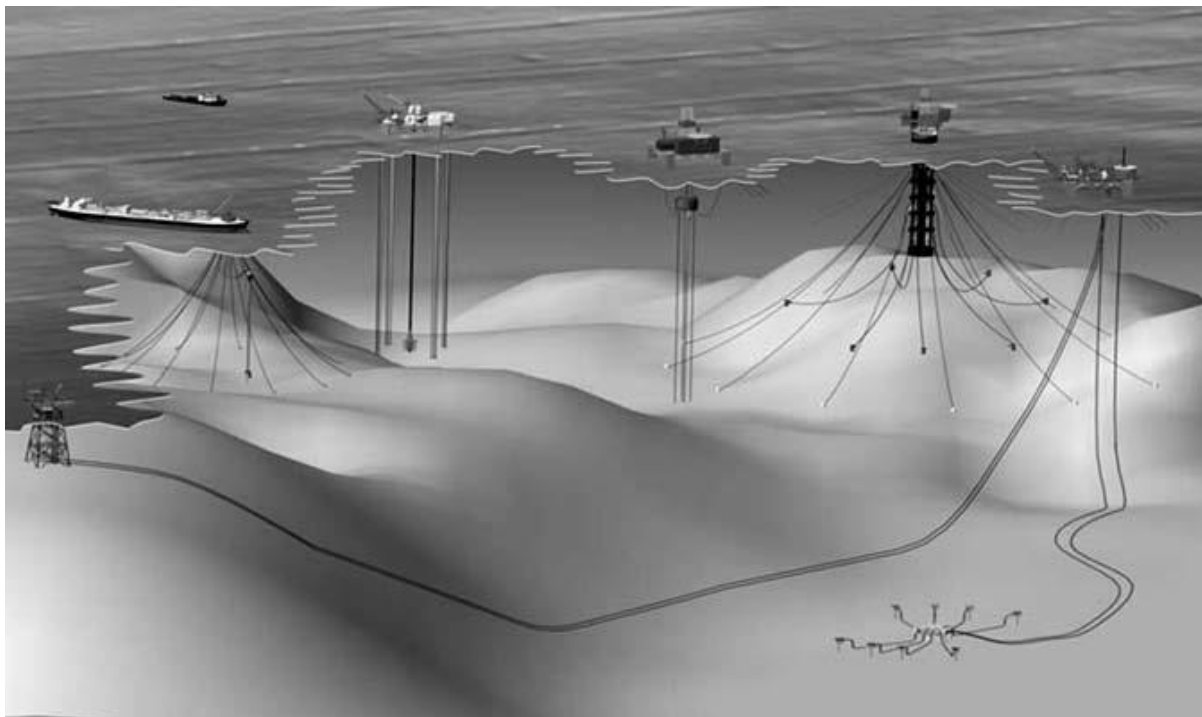
As linhas submarinas de produção se destinam a conectar plataformas ou embarcações flutuantes às instalações no leito marinho e são um dos mais complexos sistemas com os quais se pode lidar no processo de análise. Há diversos tipos de linhas submarinas do tipo risers, as mais comuns são as linhas rígidas e as linhas flexíveis. A Figura 23 ilustra bem diversos tipos de sistemas com linhas submarinas, bem como as Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 23 – Ilustração de diversos tipos de instalações de linhas submarinas

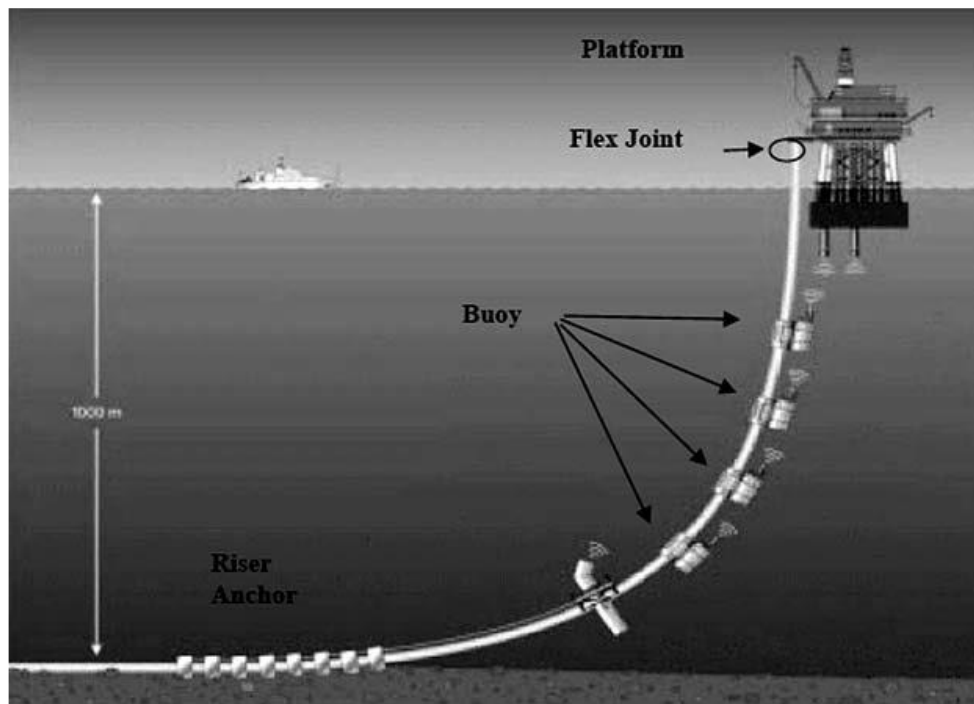


Fonte: BAI, Yong. 2014.

De modo geral, em função da arquitetura do campo da instalação e do custo, pode ser definida a adoção entre linhas flexíveis e rígidas. De modo geral, 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:

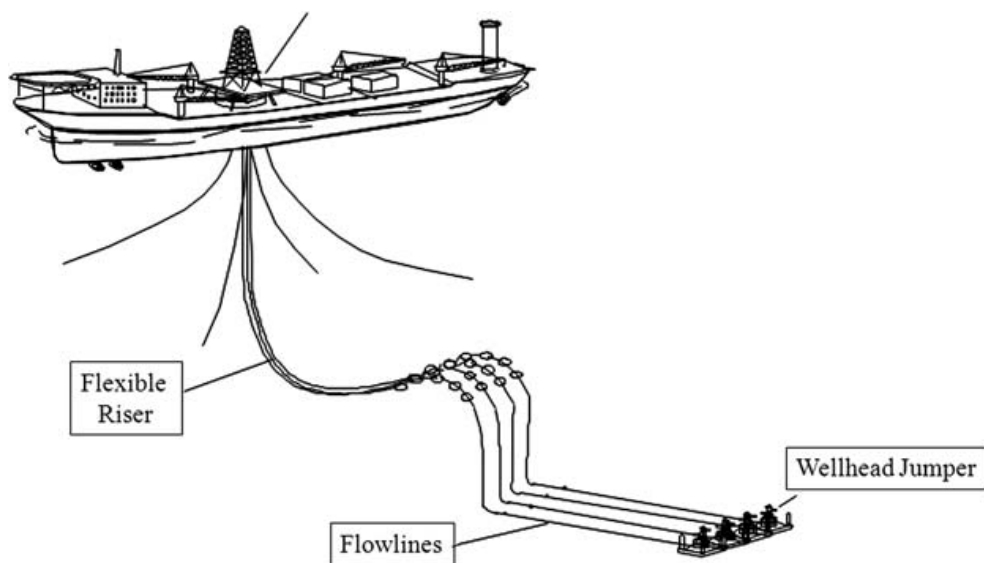
- Linhas de transporte ou exportação
- Linhas para transferir produtos entre plataformas, manifold e poços
- Linhas para transferir produtos da plataforma para as linhas de transporte
- Linhas para injeção de água ou produtos químicos

Figura 24 – Catenária típica de um riser de aço



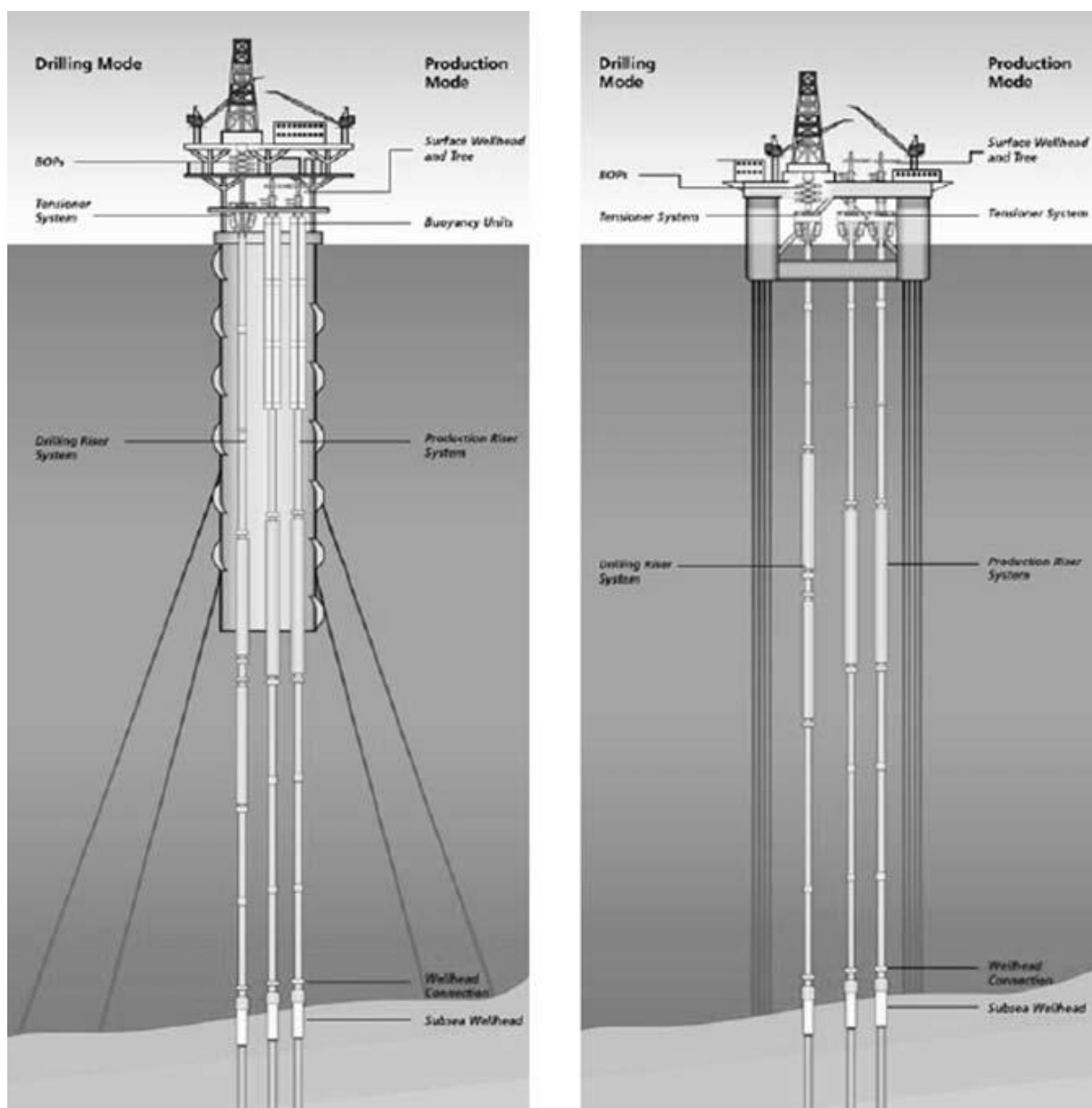
Fonte: BAI, Yong. 2014.

Figura 25 – Configuração de Linha flexível



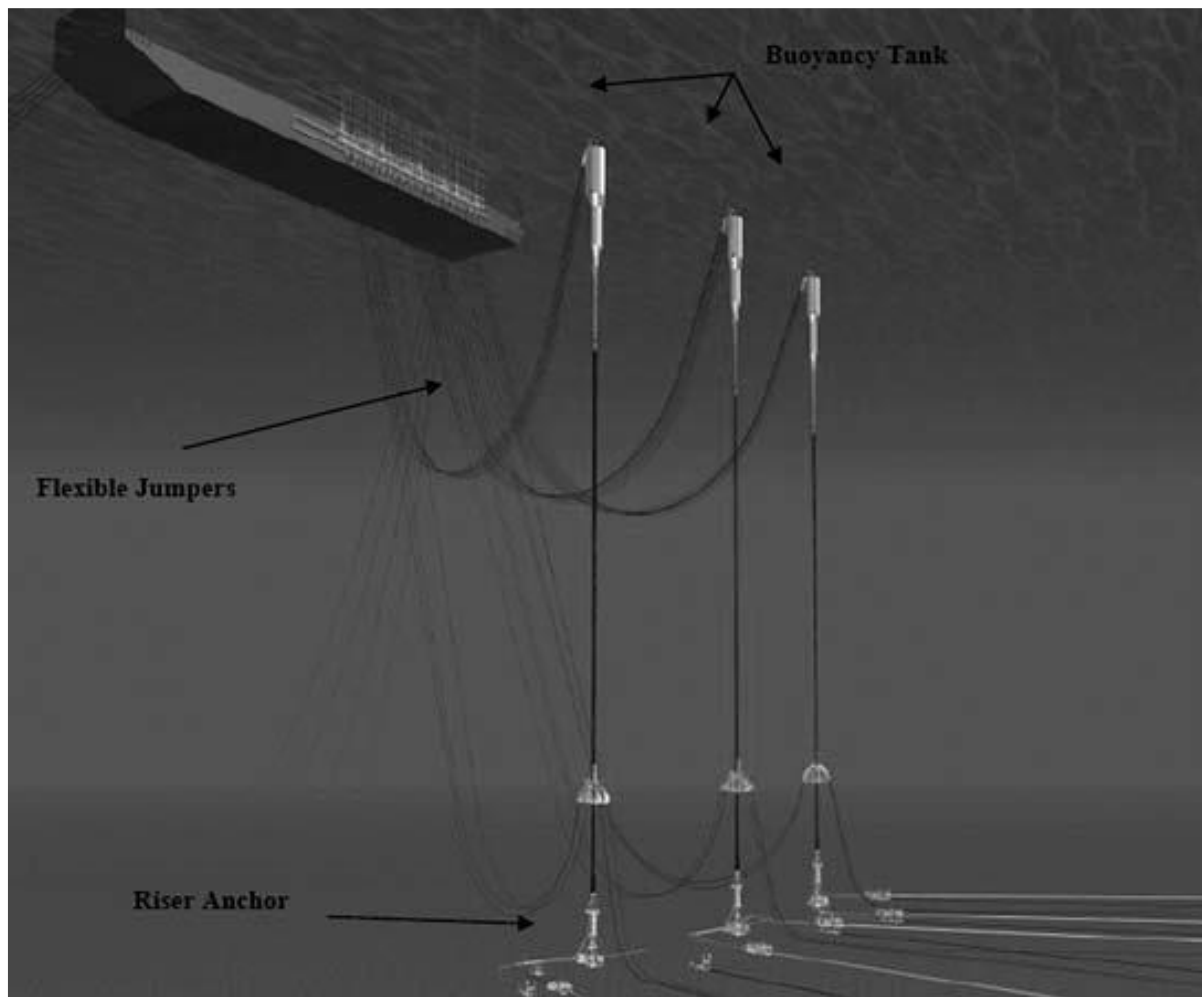
Fonte: BAI, Yong. 2014.

Figura 26 – Riser de tensão de topo, em plataformas



Fonte: BAI, Yong. 2014.

Figura 27 – Configuração de Riser híbrido



Fonte: BAI, Yong. 2014.

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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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

ANÁLISE DE PROJETO DE LINHAS SUBMARINAS

A espessura das paredes dos tubos deve garantir a superação das solicitações geradas pelos efeitos de pressão. Em casos especiais, deve ser feito um estudo de tensões específico para determinação da espessura das camadas.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL

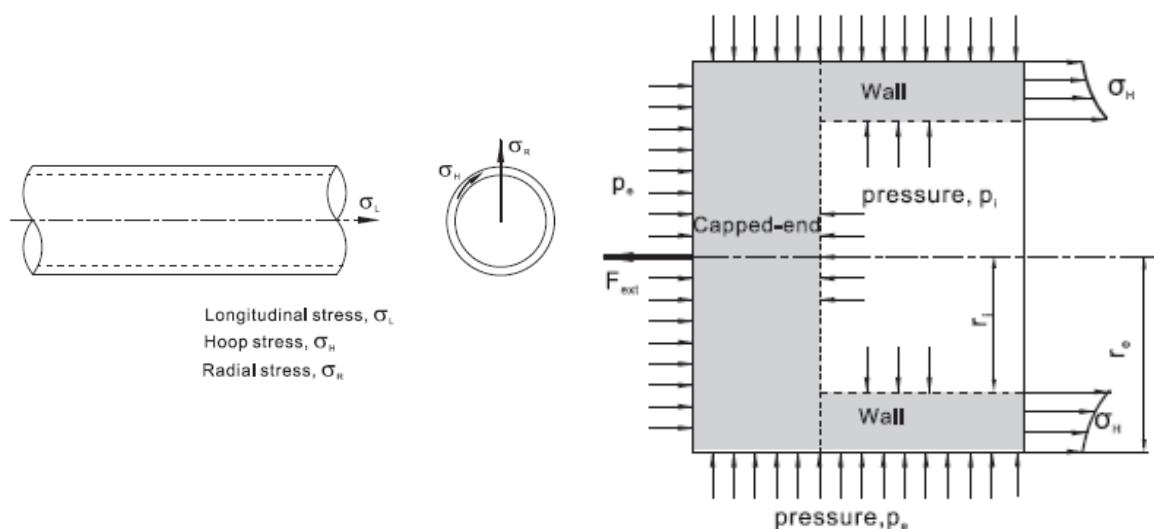


Os diferentes tipos de tensões experimentados pelo tubo durante a sua vida útil em atividade estão ilustrados na Figura 28. São elas:

- Tensão radial: $\sigma_R = \frac{p_i r_i^2 - p_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} - \frac{r_i^2 r_e^2}{r^2 (r_e^2 - r_i^2)} (p_i - p_e)$
- Tensão de aro: $\sigma_H = \frac{p_i r_i^2 - p_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} + \frac{r_i^2 r_e^2}{r^2 (r_e^2 - r_i^2)} (p_i - p_e)$
- Tensão longitudinal: $\sigma_L = \frac{p_i r_i^2 - p_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} + \frac{F_{ext}}{\pi (r_e^2 - r_i^2)} = constante$

Obs.: $\sigma_H + \sigma_R = 2 \frac{p_i r_i^2 - p_e r_e^2}{r_e^2 - r_i^2} = constante$

Figura 28 – Definição das tensões nas paredes do tubo



Fonte: BAI, Yong. 2019.

As tensões de aro variam ao longo da espessura das paredes do tubo, do seu mínimo valor na superfície externa até o seu máximo, na superfície interna do tubo. As tensões de aro podem ser calculadas pela equação de Lamé, conforme a seguir:

$$\sigma_H = \frac{p_i D_i^2 - p_e D_e^2}{D_e^2 - D_i^2} + \frac{(p_i - p_e) D_i^2 D_e^2}{(D_e^2 - D_i^2) D^2}$$

Onde,

σ_H : Tensão de aro de Lamé



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



D : Diâmetro na qual a tensão é calculada

D_e : Diâmetro externo do tubo

D_i : Diâmetro interno do tubo

p_e : Pressão externa do tubo

p_i : Pressão interna do tubo

Para tubos com paredes finas ($D/t < 30$), a Tensão de aro pode ser calculada mediante a equação simplificada abaixo, assumindo-a constante ao longo de toda a espessura:

$$\sigma_H = \frac{p_i D_i - p_e D_e}{2t}$$

Onde,

t é a mínima espessura da parede do tubo.

Por meio do ASME B31.8 (2010), a tensão de aro pode ser expressa pela equação a seguir:

$$\sigma_H = \begin{cases} (p_i - p_e) \frac{D_e}{2t} \text{ para } \frac{D}{t} > 30 \\ (p_i - p_e) \frac{D_e - t}{2t} \text{ para } \frac{D}{t} < 30 \end{cases}$$

A tensão radial σ_R varia ao longo da espessura da parede do tubo de um valor igual à pressão interna, p_i , na parte interna do tubo, até um valor igual à pressão externa, p_e , na parte externa do tubo. A magnitude da tensão radial é, geralmente, inferior à das tensões de aro e longitudinal, consequentemente não costuma ser limitada por códigos de projeto.

A tensão longitudinal σ_L é resultado do esforço axial ao qual o tubo está submetido. Estes esforços consistem na envoltória resultante das tensões descritas abaixo:

- Tensões de flexão (σ_{lb})
- Tensões de aro (σ_{lh})
- Tensões térmicas (σ_{lt})
- Tensões induzidas pelas forças de tampão. (σ_{lc})

A tensão longitudinal (Figura 29) pode ser expressa pela equação abaixo, em função das tensões citadas acima:

$$\sigma_L = \nu \sigma_{lh} + \sigma_{lb} + \sigma_{lt} + \sigma_{lc}$$



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



No caso de dutos restringidos, que são aqueles nos quais a deformação longitudinal é controlada ou restringida, a tensão longitudinal pode ser expressa por:

$$\sigma_{L,R} = \frac{2 \nu (p_i A_i - p_e A_e)}{A_s} + E \alpha (T_p - T_a)$$

Onde,

A_i : área interna do bore

A_e : área externa da linha submarina

A_s : área da seção da armadura de aço

E : módulo de Young

α : coeficiente de expansão térmica do material

T_p : temperatura da parede do tubo

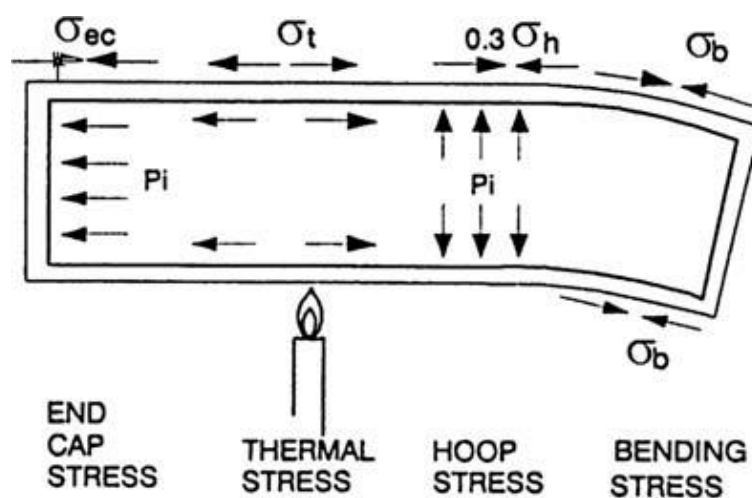
T_a : temperatura ambiente

No caso de dutos não restringidos a expressão da tensão longitudinal é:

$$\sigma_{L,U} = \frac{(1 - 2\nu) (p_i A_i - p_e A_e)}{A_s}$$

É importante observar que a correta aplicação das formulações de tensão longitudinal depende da adoção da convenção de sinais.

Figura 29 – Tensão longitudinal de linhas submarinas



Fonte: BAI, Yong. 2019.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



A combinação de tensões pode ser calculada na forma de uma tensão equivalente. A combinação deve ser realizada de acordo com o código ou padrão utilizado para o projeto. No entanto, para tubos de paredes finas, é possível expressar a tensão equivalente conforme a equação abaixo:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_H^2 + \sigma_L^2 - \sigma_H \sigma_L + 3\tau_{LH}^2}$$

Onde,

τ_{LH} : Tensão tangencial

Além disso, para tubos de alta pressão, com relação $D/t < 20$ e considerando desprezível a tensão tangencial, a fórmula da tensão equivalente pode ser descrita como:

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_H - \sigma_L)^2 + (\sigma_L - \sigma_R)^2 + (\sigma_H - \sigma_R)^2]}$$

De modo geral, dutos submarinos assentados no leito marinho ficam sujeitos carregamentos de ondas e correntes. Conservadoramente, projeta-se dutos cujo peso próprio seja suficientemente elevado para garantir estabilidade sob as piores condições ambientais possíveis, mesmo nas regiões nas quais os carregamentos externos possam provocar movimentos laterais e verticais. Em muitos casos adota-se um revestimento de concreto no duto, conforme a Fig. 2.13. Além disso, em algumas circunstâncias, pode-se permitir a movimentação do duto, desde que os limites de tensão não sejam excedidos.

i. ESTABILIDADE EM CONTATO COM O SOLO

A análise da estabilidade é baseada no equilíbrio simples de forças ou na análise por meio de Método dos Elementos Finitos. Os carregamentos que atuam no duto, devido à ação das ondas e correntes, são:

- Força de arrasto
- Força de elevação
- Forças de inércia flutuantes

O atrito resultante do peso efetivo do duto no leito marinho é o que se impõe contra estas forças. Este atrito resultante depende de um coeficiente de atrito lateral, que varia de 0,1 a 10 dependendo dos tipos de superfície e de solo. Quando esta força de atrito ou o uso de rochas é insuficiente para se contrapor aos esforços de ondas e correntes, o projeto deve prever a



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



aplicação do revestimento necessário. O equilíbrio de forças pode ser observado pela equação e pela figura (Figura 30) a seguir

$$\gamma (F_D - F_1) < \mu (W_{sub} - F_L)$$

Onde,

γ : fator de segurança, normalmente maior ou igual a 1,1

F_D : força hidrodinâmica de arrasto por unidade de comprimento

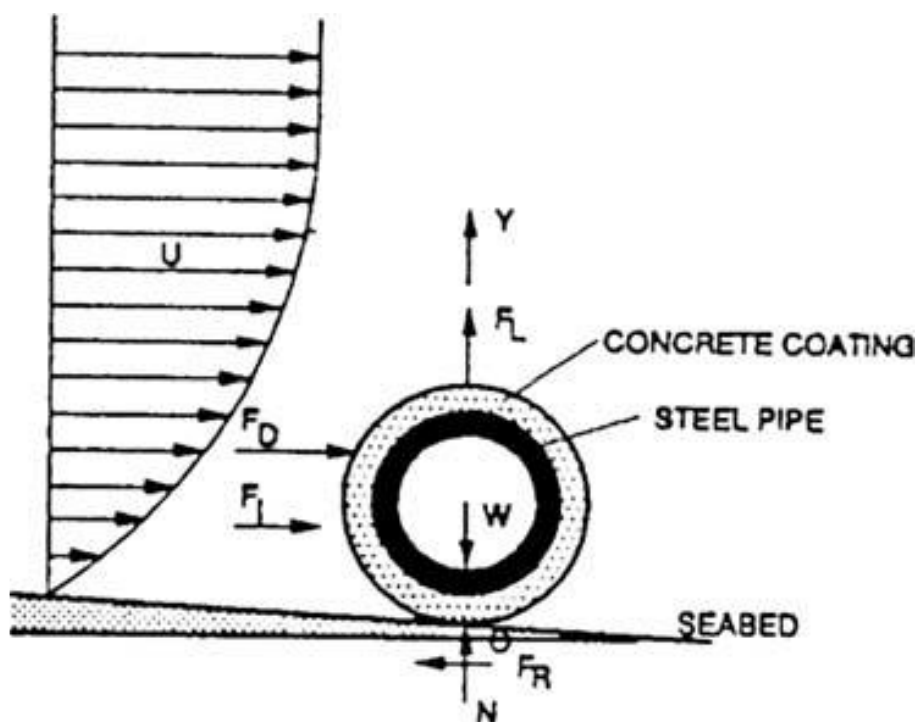
F_1 : força hidrodinâmica de inércia por unidade de comprimento

μ : coeficiente de atrito lateral do solo

W_{sub} : peso submerso do duto por unidade de comprimento

F_L : força hidrodinâmica de elevação por unidade de comprimento

Figura 30 – Análise de estabilidade de linhas submarinas



Fonte: BAI, Yong. 2019.

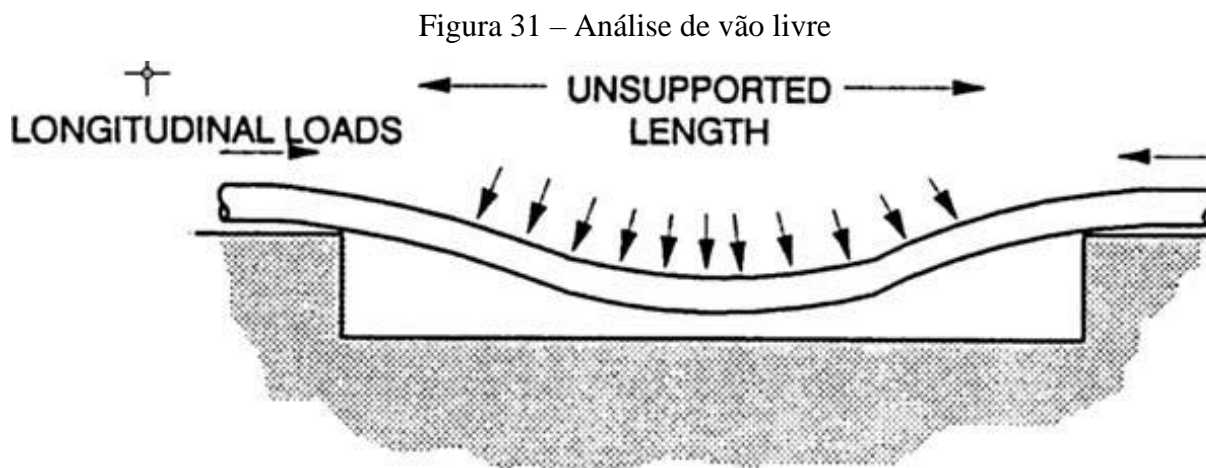


Quando necessário, pode-se remover do duto parte das forças de correntes por meio da escavação de trincheiras ou fornecer resistência adicional por meio do uso de “âncoras” ou pesos adicionais no duto.

ii. ANÁLISE DE VÃO LIVRE

Em casos de um leito marinho irregular ou sujeito a erosão, deve-se prever a possibilidade de o duto ficar sujeito a condição de vão livre (Figura 31), perdendo o contato com o leito marinho. Nestes casos, é necessário garantir a não ocorrência de deformações excessivas e de fadiga devido à vibrações induzidas por vórtices.

O resultado desta análise consiste em estabelecer um comprimento de vão livre admissível. Esta análise é muito rigorosa, haja visto que os custos de intervenções no leito marinho são muito elevados, no caso de uma necessidade, caso verifique-se que os comprimentos reais de vão livre são superiores aos admissíveis.



Fonte: BAI, Yong. 2019.

iii. ANÁLISE DE FLAMBAGEM GLOBAL

O fenômeno de flambagem global ocorre em linhas submarinas quando os esforços de compressão na linha se tornam elevados o suficiente para provocar deflexão na linha. Sabe-se que os efeitos de temperatura de operação dos dutos de produção, que muitas vezes, nas



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



proximidades do leito marinho, transportam fluidos em temperaturas acima de 100 °C, provocam maior propensão à flambagem.

A análise de flambagem é realizada no sentido de se identificar a probabilidade de ocorrência da flambagem, para que assim se possa prevenir ou acomodar a ocorrência do fenômeno.

Uma forma comum de se evitar a ocorrência de flambagem é elevar o peso por comprimento do duto por meio da adição de peso morto. No entanto, se não feito de forma adequada, pode provocar flambagem localizada. Outra forma consiste na acomodação do problema, permitindo a deflexão do duto, usando uma disposição em ziguezague ou usando travessas ou uma disposição bem distribuída de flutuadores.

iv. INSTALAÇÕES EM ÁGUAS PROFUNDAS

Um dos grandes desafios para os engenheiros que realizam análises de estruturas submarinas são as particularidades das instalações realizadas em águas profundas. Por definição, são consideradas instalações em alta profundidade aquelas que são realizadas em mais de 2000m de profundidade. Em 2010, foi realizada a instalação do umbilical “Perdido 1 TOB”, no Golfo do México, a 2,9km de profundidade, a instalação mais profunda já realizada até então. Nestes casos, as linhas são submetidas a pressões externas e cargas de tensões axiais muito elevadas. Além disso, o peso próprio da estrutura também causa grandes problemas, pois as linhas devem possuir grandes comprimentos e, conseqüentemente uma maior quantidade de cabos e, portanto, são mais pesadas. Segundo (BAI, Yong. 2014), a análise para dutos em águas profundas deve ter dedicação especial em realizar corretamente a modelagem dos efeitos de tensão, deformação e fricção entre camadas da linha e entre a estrutura da linha e seus acessórios.

v. INSTALAÇÕES SUJEITAS A ONDAS EXTREMAS

Este caso particular de condição ambiental severa exige da análise condições especiais, fora do escopo tradicional de análises. Em geral, instalações são analisadas para condições



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



estatisticamente prevalentes na região, condições habituais de movimentação das embarcações, ondas e correntes.

Análises destes casos, segundo (BAI, Yong. 2014), devem considerar os efeitos de um furacão, dos últimos 100 anos no local, e devem ser aplicados efeitos de correntes em diversas direções e localidades do sítio de instalação. O enrijecedor de topo é adotado a partir da análise da tensão de topo e dos ângulos de “Hang off”, para limitar a movimentação do conjunto e propor maior vida útil contra os efeitos de fadiga dos materiais.

Alguns fatores relevantes nestas análises são:

- No momento do “touchdown point” (TDP) são analisados especialmente o raio mínimo de curvatura da linha e as tensões, a fim de garantir que não ocorra flambagem;
- A vértebra, nestes casos, é adotada a partir de uma análise dinâmica utilizando um modelo baseado e método dos elementos finitos;
- A tensão máxima deve ser encontrada no caso de a embarcação estar na sua posição mais distante possível (geralmente limitada pelo braço do seu guindaste) e sujeita a efeito de vento de um furacão.
- A tensão mínima deve ser encontrada na região do TDP, com a embarcação mais próxima o possível do local de instalação.

EFEITO DE FADIGA

Segundo FERGESTAD e LOTVEIT (2017), deve ser realizada uma análise preliminar para confirmação dos seguintes tópicos:

- A resposta extrema que atende aos critérios de tensão e a rotação extrema nas juntas flexíveis
- A viga útil por fadiga devido à vibração de vórtice induzido
- O comprimento necessário de carenagem
- A vida útil por fadiga devido às ondas
- A interferência entre risers e o casco da plataforma flutuante



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Estes são os critérios de análise de fadiga mais relevantes para o dimensionamento das linhas flexíveis.

Em casos de análise de vão livre, a geração de vórtices entre o leito marinho e o vão livre da linha provoca condições de vibrações induzidas no duto. É necessário atentar para a frequência de geração de vórtices, pois há a possibilidade de ocorrência de ressonância, o que pode gerar falha por fadiga no duto submarino. Ainda segundo Y. Bai, o cálculo da frequência de geração de vórtices é realizado usando mecânica tradicional com modelos simplificados, no entanto, estudos mais recentes apontam que esta prática é demasiadamente simples e a adoção de modelos mais complexos, com uso de método dos elementos finitos, está se tornando mais comum.

C. 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.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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).

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.

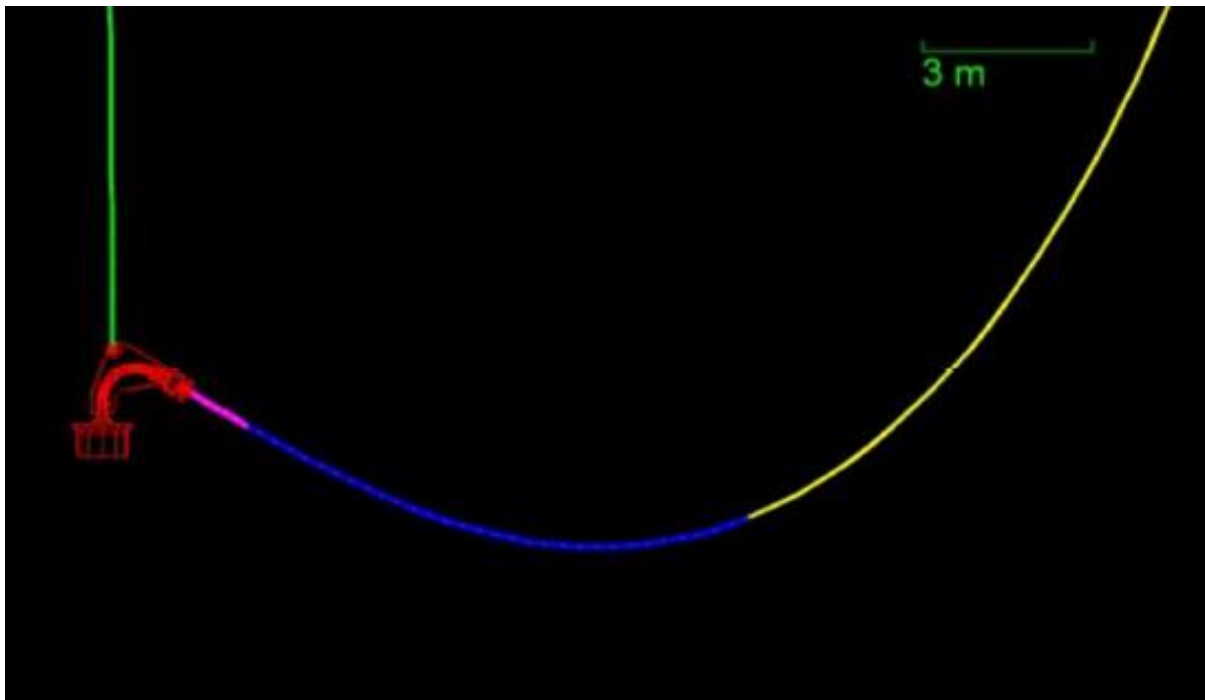
Os pontos mínimos ou fundamentais de aceitação da análise são:

- **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 32).



Figura 32 – Modelo estático no OrcaFlex.



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

- **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 33).

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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL

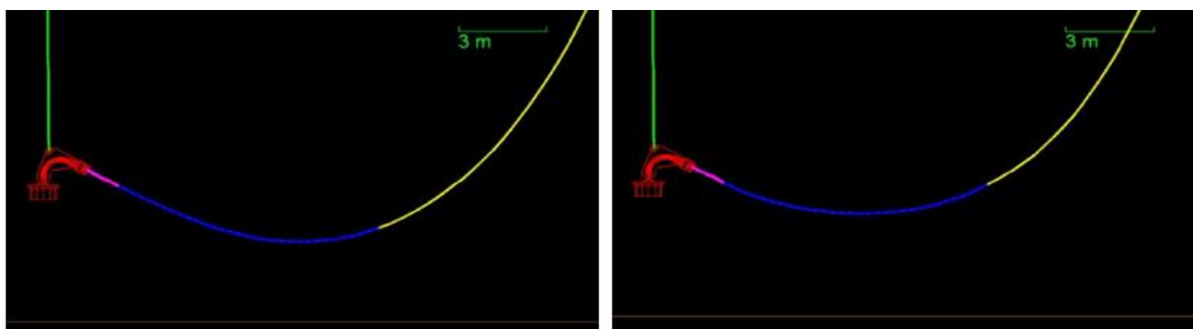


vertical deverá ser utilizado com período e intensidade baseados no comportamento dinâmico do barco que fará a instalação, levando sempre em conta a possibilidade de correção do aproamento para evitar picos de ressonância”.

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 Petrobrás, 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 Petrobrás;

Figura 33 – Modelo dinâmico no OrcaFlex (Heave up).



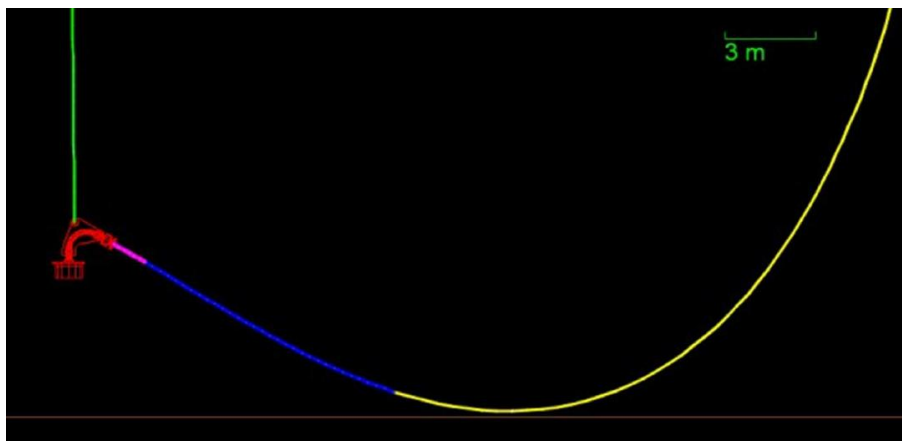
Fonte: ET-3000.00-1500-951-PMU-001 (2019)

• **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 34).



Figura 34 – 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.

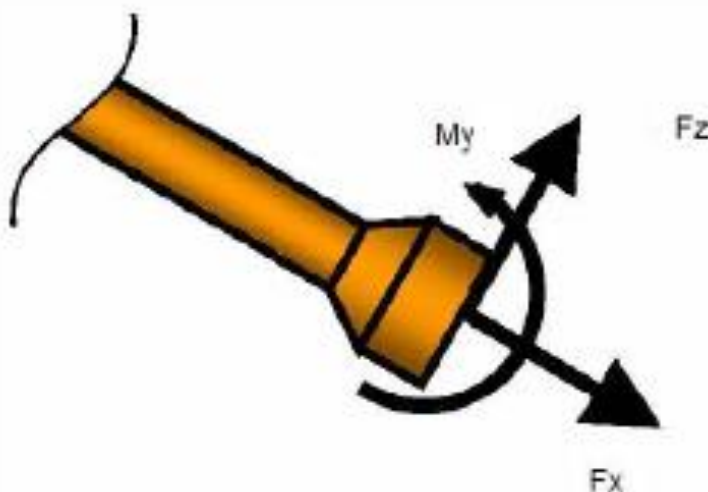
ii. LIMITE ESTRUTURAL DO MCV

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 35:



Figura 35 – 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 estrutural para o caso de Equilíbrio em condição estática e adiciona o seguinte dizer em seu conteúdo: “A comparação não precisa ser 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.



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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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.

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

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

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

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

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:

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

Onde,

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

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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- 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:

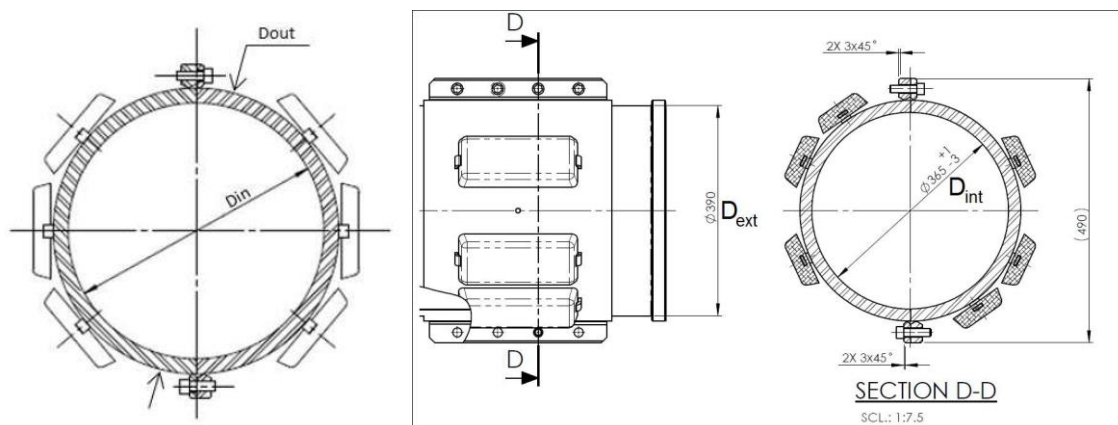
$$I_{vértebra} = \frac{\pi}{4} \left(\left(\frac{D_{ext}}{2} \right)^4 - \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^4 \right)$$

Onde,

D_{ext} : Diâmetro externo da vértebra, na menor seção transversal. (Figura 36)

D_{int} : Diâmetro interno da vértebra, na menor seção transversal. (Figura 36)

Figura 36 – 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
$1 + \frac{1}{MBR_{vértebra}}$	$0,01 + \left[\left(1 + \frac{1}{MBR_{vértebra}} \right) - \left(\frac{1}{MBR_{vértebra}} \right) \right] + EI$



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL

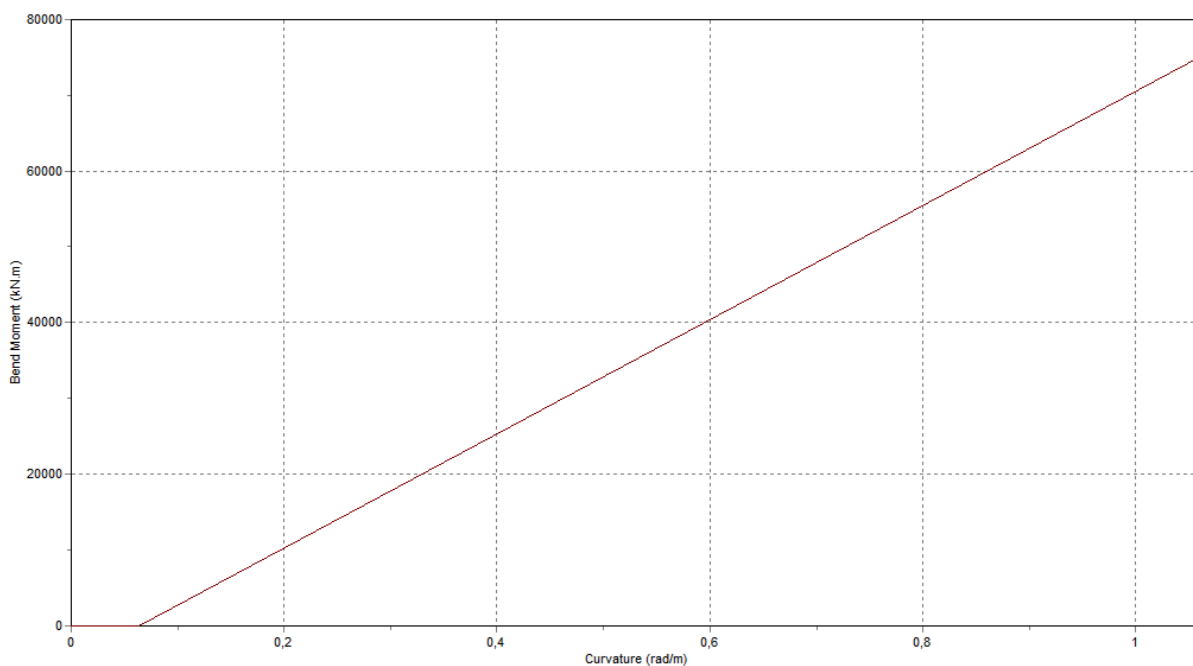


Na Revisão B (2020), o cálculo passou a ser feito da seguinte forma:

Curvatura [1/m]	Momento Fletor [kN/m]
0	0
$\frac{1}{MBR_{v\acute{e}rtebra}}$	0,01
$1 + \frac{1}{MBR_{v\acute{e}rtebra}}$	$0,01 + EI$

A modelagem da rigidez da vértebra resulta em uma curva semelhante à da Figura 37 abaixo:

Figura 37 – 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.

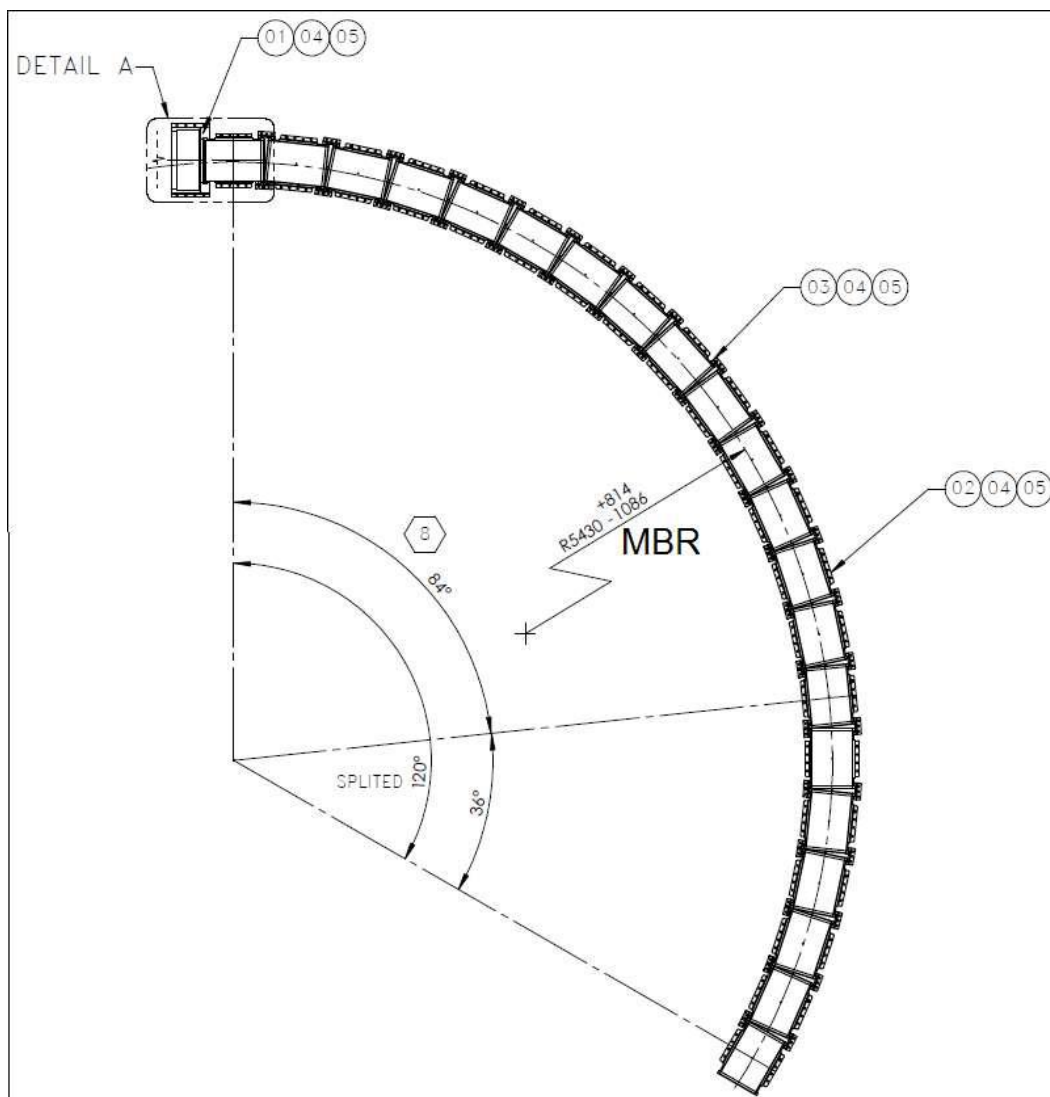


UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Além disso, também é especificado que, nos documentos recebidos pelo time de análise, o MBR é informado com certa tolerância (Figura 38) 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 (attachment), no Orcaflex, ao trecho de linha correspondente.

Figura 38 – Vértebra típica, com indicação do MBR.



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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



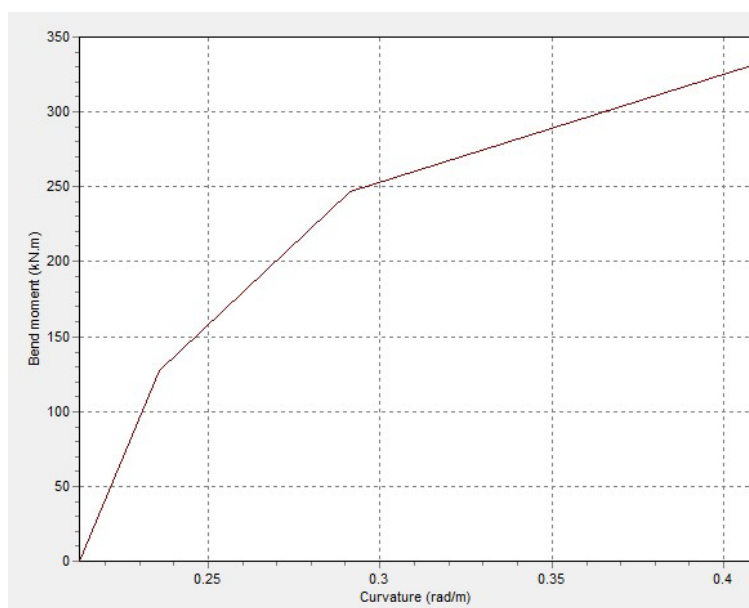
Observações:

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

Figura 39 – Gráfico momento x curvatura não convencional



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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- 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:

- **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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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

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 40).

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 40 – Exemplo de datasheet de um MCV

DADOS PARA ANÁLISE DE CARGAS DOS MCVs - FASE DE INSTALAÇÃO				
COTA (mm)	DESCRIÇÃO	INFORMAÇÃO		
		MCVP	MCVA	MCV
CI	Ângulo do gooseneck	60°	60°	45°
A (0m) *	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	4807	4114	344
A (4m) *	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	4547	4374	373
A (8m) *	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	4797	4614	405
A (12m) *	Distância vertical do flange do MCV ao solo marinho	5027	4894	415
B	Distância vertical do eixo ao flange	833	833	98
C	Distância horizontal do eixo ao flange	1491	1491	105
D	Distância vertical do flange ao centro de gravidade	601	615	30
E	Distância horizontal do flange ao centro de gravidade	1564	1679	114
F	Distância vertical do flange à base do MCV	1964	1956	119
G	Distância horizontal do flange ao centro do eixo do MCV	1866	1851	124
H	Posição do centro de gravidade em relação ao Eixo Y	50	50	7
	Peso do MCV submerso [kg]	5648	6752	327

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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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 informados conforme abaixo:

- 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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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

- $OD = 0,09$
- $ID = 0$
- $W = 31 \text{ kgf/m}$
- Rigidez à flexão (EI) = 50 kN.m^2
- Rigidez axial (EA) = 500.000 kN
- Rigidez torcional (GJ) = 200 kN.m^2
- Coeficiente de Poisson = $0,3$

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.

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: <ul style="list-style-type: none">i. Linha suspensa com aplicação de movimento vertical do PLSV.ii. Lançamento do duto flexível, momento em que ele toca o fundo do mar.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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 41):

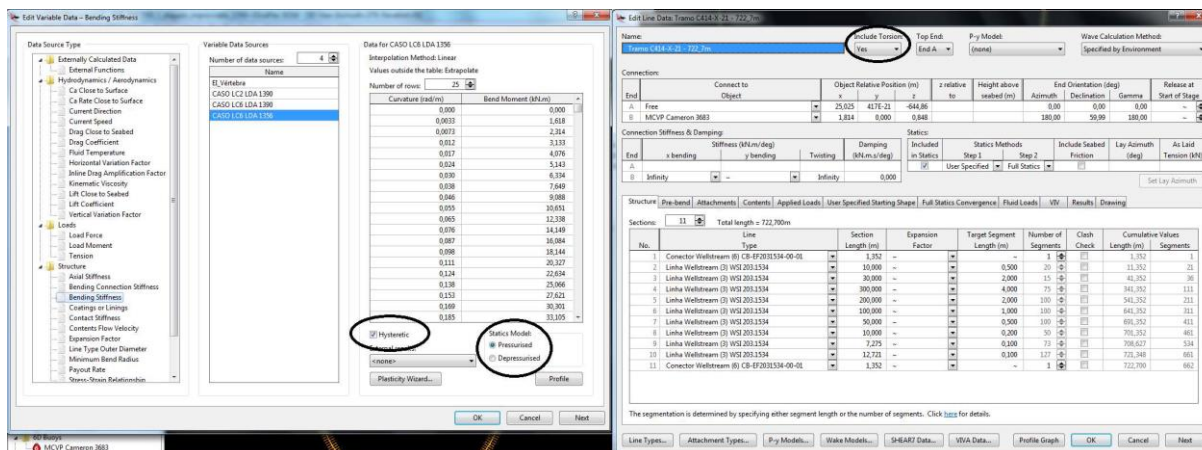
Model Browser > Variable Data > Bending stiffness

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

Model Browser > Line data

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

Figura 41 – Inserção da histerese e da torção 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.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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.

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.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



4	500	652,15	Lançamento de 50m de duto flexível e movimentação do PLSV ao longo do azimuth 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.
 - 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 $\frac{1}{4}$ 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.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL

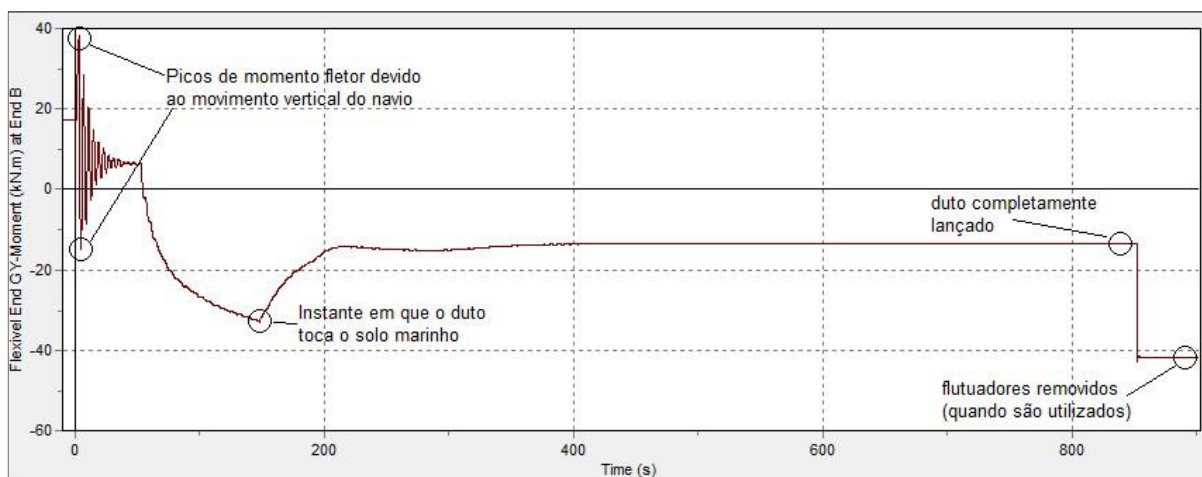


- Altura do flange ao solo marinho nominal + 52 cm.
- Altura do flange ao solo marinho nominal – 52 cm.

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 42:

Figura 42 – Curva típica de momento fletor ao longo do tempo



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

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.



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 por 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.

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-3000.00-1500-941-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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- 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.

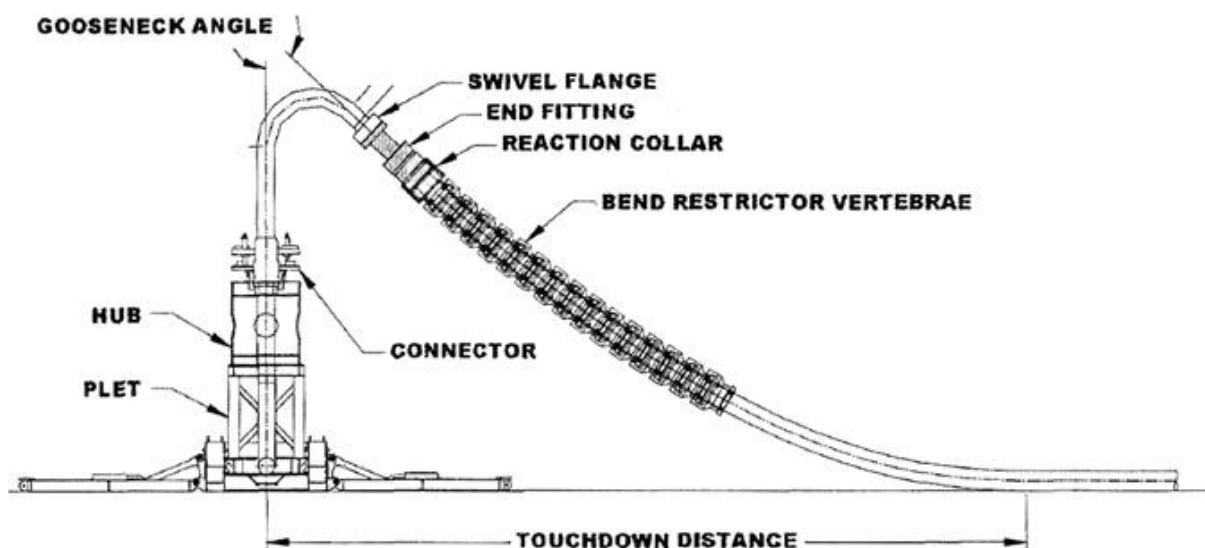
Na sua versão de Emissão inicial (2016), a ET determinava que só era permitido travamento de vértebra, como medida mitigatória, caso o heave up já tivesse sido reduzido para seu valor mínimo (que naquela época correspondia a 1,5m) e, ainda assim, não tivesse sido obtida uma configuração aceitável. Já 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

A. 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 43). 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 43 – Conexão do duto com o HUB



Fonte: BAI, Yong. 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;



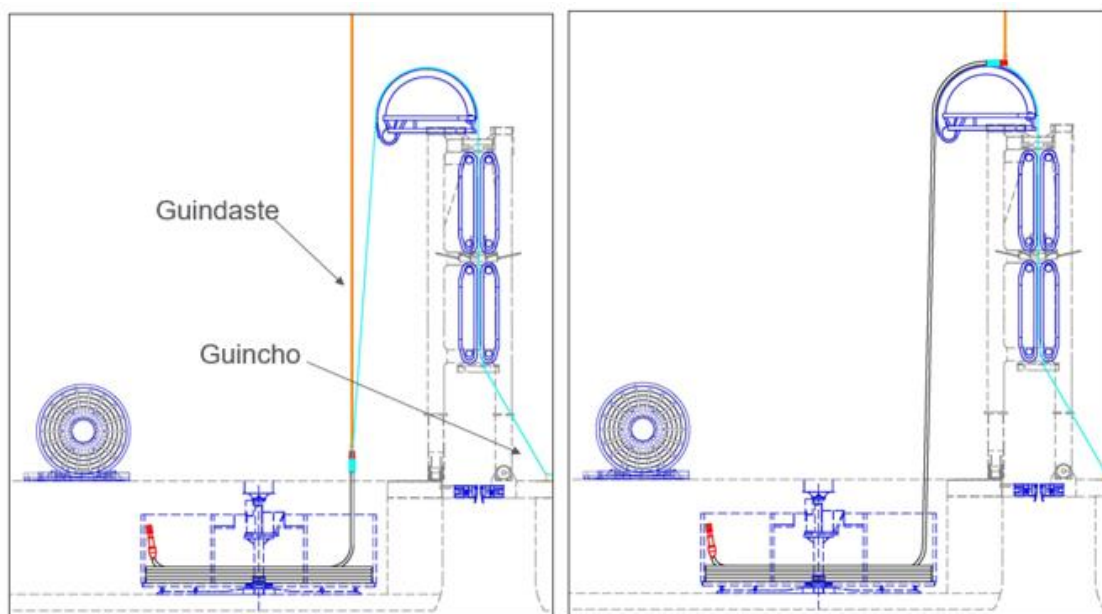
– **Overboarding e verticalização**

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.

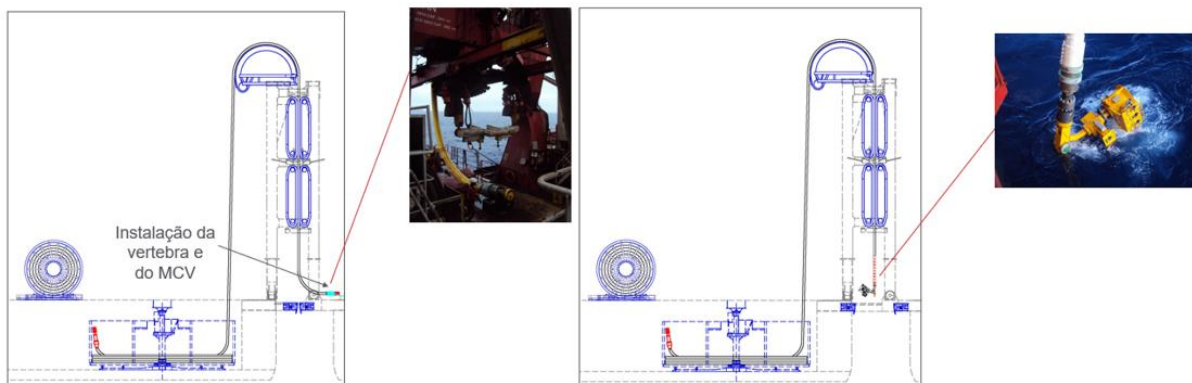
A seguir, está representado, pelas Figura 44, Figura 45 e Figura 46, o passo-a-passo de uma operação de CVD de 1º extremidade, desde seu overboarding até a efetiva conexão com a ANM, para facilitar a compreensão das atividades:

Figura 44 – Operação de Passagem



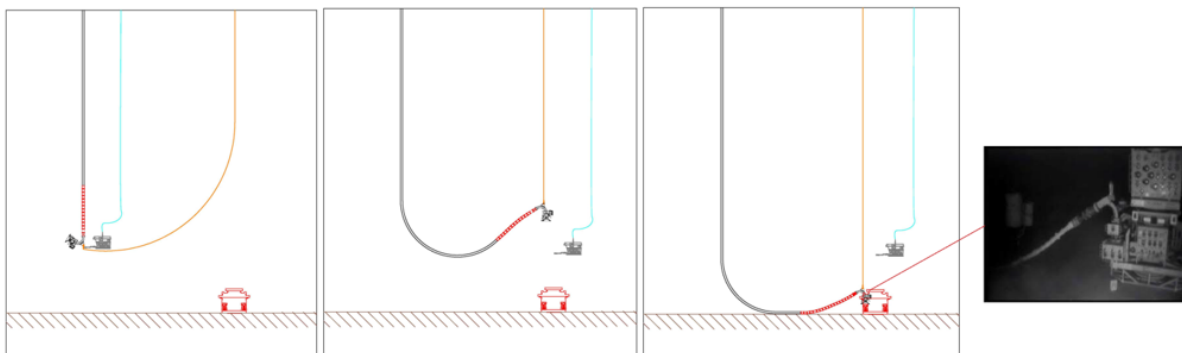
Fonte: do próprio autor.

Figura 45 – Instalação dos acessórios, antes do Overboarding



Fonte: do próprio autor

Figura 46 – Verticalização e CVD



Fonte: do próprio autor

B. ANÁLISE DA OPERAÇÃO DE CVD

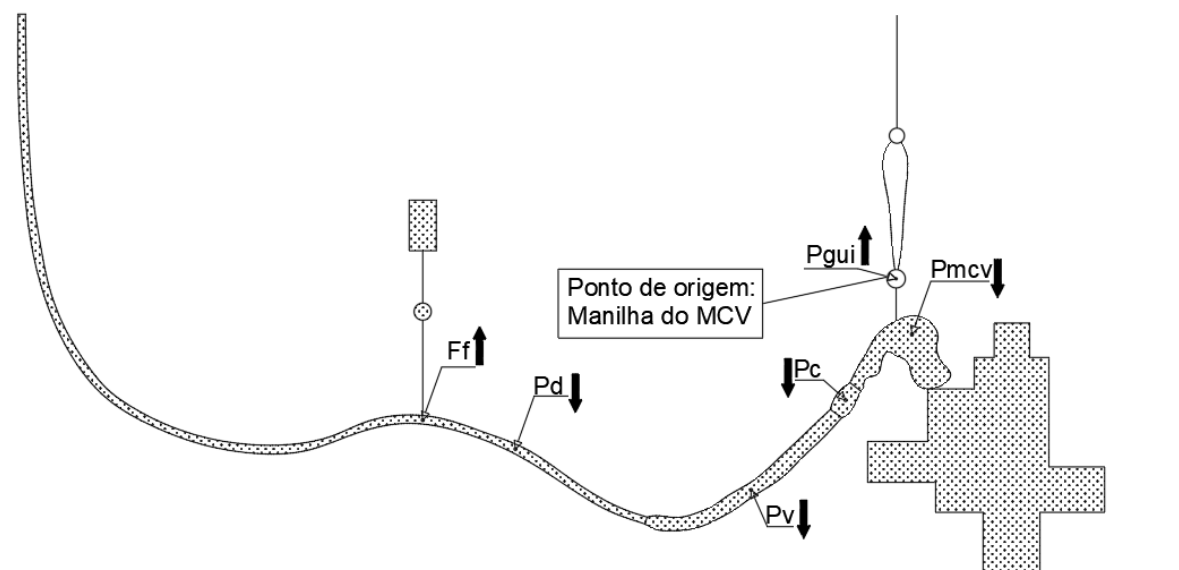
EQUILÍBRIO DO SISTEMA

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 47. 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.

Figura 47 – 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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



$\overrightarrow{D_D}$ = 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.
- 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.

CONSIDERAÇÕES SOBRE A FLEXÃO DO DUTO FLEXÍVEL (HISTERESE)

Segundo a referência OMAE2007-29315, 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.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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.

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 $\delta.C$ possibilita escrever o momento da seguinte forma:

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

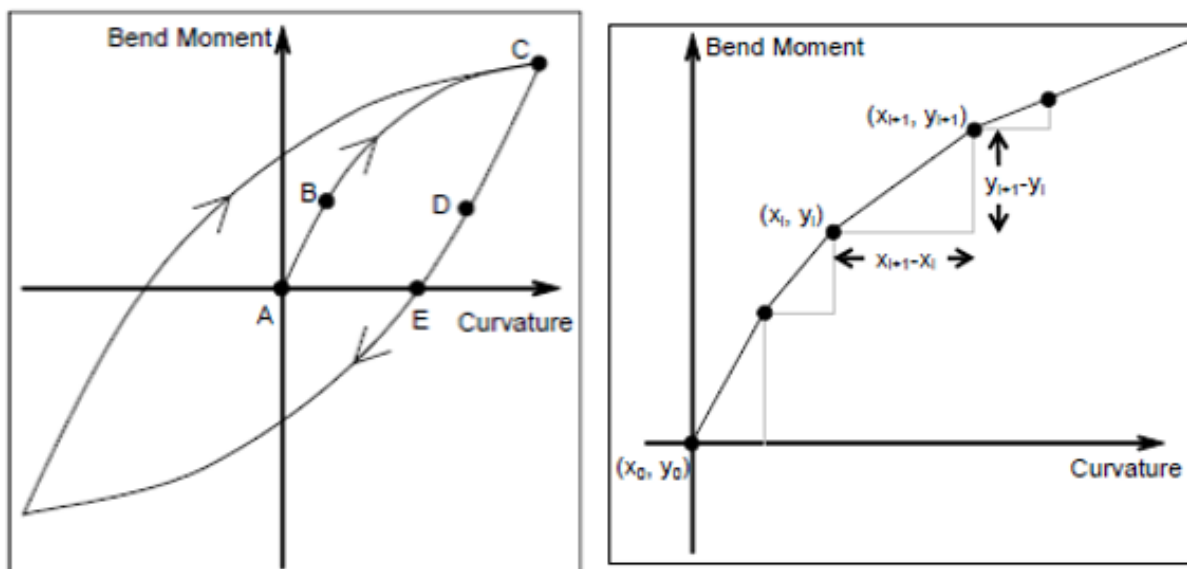
O comportamento de histerese do modelo depende totalmente da forma como a curvatura C é composta pelos seus incrementos δC . Inicialmente o vetor C (curvatura total) e seus incrementos são tomados como nulos, correspondendo a um estado de repouso.

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 48). Assim, garante-se que para cada instante, o esforço será calculado pela curvatura temporal correspondente e seus incrementos.



Figura 48 - Gráfico de Momento x Curvatura (Histerese)



Fonte: OMAE2007-29315



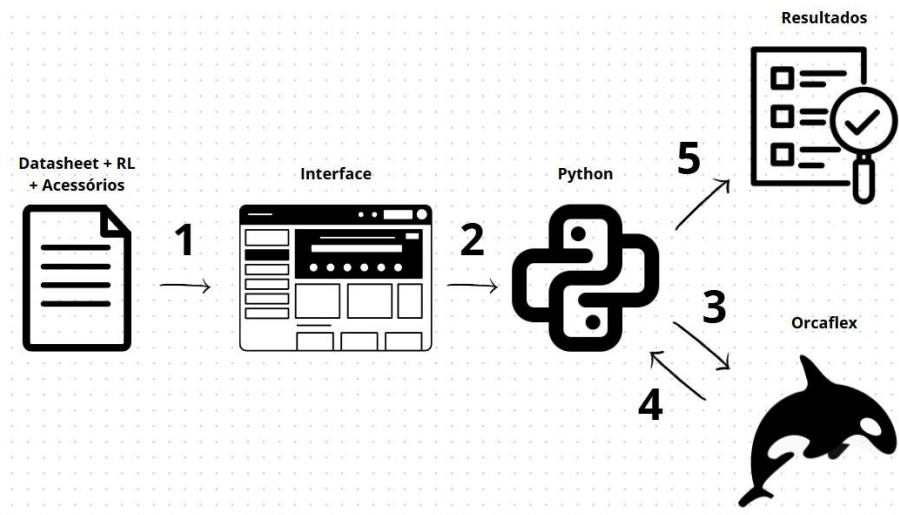
4 APLICAÇÃO “CVD AUTOMÁTICO”

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

A. EXPLICANDO A APLICAÇÃO

A aplicação possui seu funcionamento descrito conforme o fluxograma abaixo:



A INTERFACE

Foi tomada a decisão de elaborar a interface da aplicação por meio de Front-End e o Back-End devido ao grande poder de manipulação dos elementos constitutivos da interface que estas tecnologias possibilitam ao desenvolvedor. O HTML (HyperText Markup Language) consiste numa linguagem de marcação utilizada pelos softwares navegadores de internet para a construção e estruturação de páginas web. O CSS (Cascading Style Sheets) consiste em um



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



arquivo de estilização dos elementos constitutivos de páginas web. O Javascript é uma linguagem de programação de alto nível e dinâmica, por meio da qual se pode estabelecer comandos e manipulações em páginas web. Embora o desenvolvimento da interface seja feito com tecnologias voltadas para o seguimento do Desenvolvimento para Web, a aplicação tem propósito de ser uma aplicação utilizada localmente.

Para construção da interface (Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52, Figura 53, Figura 54 e Figura 55), foram utilizadas tecnologias e bibliotecas externas em integração com o Javascript, a saber:

1. Papaparse: uma biblioteca para manipulação e análise de dados .csv;
2. Chart: uma biblioteca para construção de gráficos dinâmicos;
3. Csv-Writer: uma biblioteca para criar arquivos CSV de forma fácil e programática em ambientes Node.js;

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 para a sessão referente ao título presente em cada botão, a saber:

- a. Linha flexível
- b. Vértebra
- c. Conector
- d. Adaptador de Flange
- e. Histerese
- f. MCV
- g. Relatório

Há ainda botões de comando cujos títulos são: Modelar e Revisar.

O botão de comando “Modelar”, tem como princípio realizar o agrupamento de todas as entradas fornecidas pelo usuário em um arquivo de formato “.csv” e chamar o script python para o processamento destes dados e, em seguida, realizar a modelagem no OrcaFlex com a automação.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Enquanto isto, o botão de comando “Revisar” foi previsto para situações nas quais o usuário forneceu algum dado equivocado em suas entradas e, conseqüentemente, deseja corrigi-lo. Para que não haja necessidade de um preenchimento novo de todos os campos, o usuário pode, ao clicar no botão “Revisar”, preencher automaticamente todos os campos com os dados que já haviam sido preenchidos anteriormente, incluindo aquele que estava equivocado. Assim, facilita-se a revisão ou correção de dados de entrada. Este comando, no entanto, ainda não está ativo.

Figura 49 – Primeira sessão da interface.



Fonte: do próprio autor

As sessões seguintes são dotadas de campos de preenchimento. Cada uma direcionada a um elemento da operação, conforme as figuras a seguir:



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 50 – Seção de “inputs” da Linha Flexível.

Linha flexível		
ID da linha: <input type="text"/>	LDA [m]: <input type="text"/>	Bending Stiffness [kN.m ²]: <input type="text"/>
Revisão: <input type="text"/>		Torsional Stiffness [kN.m ²]: <input type="text"/>
Peso vazio no ar [kg/m]: <input type="text"/>	Diâmetro de contato [mm]: <input type="text"/>	Axial Stiffness [kN]: <input type="text"/>
Peso cheio no ar [kg/m]: <input type="text"/>	Diâmetro nominal [°]: <input type="text"/>	
Peso vazio na água [kg/m]: <input type="text"/>	MBR storage [m]: <input type="text"/>	Rel. Elong. (%) for 100kN: <input type="text"/>
Peso cheio na água [kg/m]: <input type="text"/>	MBR installation [m]: <input type="text"/>	

Fonte: do próprio autor.

Figura 51 – Sessão de “inputs” da Vértebra.

Vértebra		
Id da Vértebra: <input type="text"/>	Peso vazio no ar [kg]: <input type="text"/>	MBR travamento [m]: <input type="text"/>
Revisão: <input type="text"/>	Peso vazio na água [kg]: <input type="text"/>	
Material da vértebra: <input type="radio"/> Aço <input type="radio"/> PU	OD [mm]: <input type="text"/>	MF Admissível [kN.m]: <input type="text"/>
Comprimento [mm]: <input type="text"/>	ID [mm]: <input type="text"/>	Cortante Adm. [kN]: <input type="text"/>
	Diâmetro de contato [mm]: <input type="text"/>	

Zona Rígida da Vértebra (Em caso de vértebra de PU)	
Identificação: <input type="text"/>	Comprimento [mm]: <input type="text"/>
Revisão: <input type="text"/>	
Peso vazio no ar [kg]: <input type="text"/>	OD [mm]: <input type="text"/>
Peso vazio na água [kg]: <input type="text"/>	ID [mm]: <input type="text"/>
	Diâmetro de contato [mm]: <input type="text"/>

Fonte: do próprio autor



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 52 – Sessão de “inputs” do Conector e do Adaptador de Flange.

Conector	
ID do conector:	<input type="text"/>
Revisão:	<input type="text"/>
Peso vazio no ar [kg]:	<input type="text"/>
Peso vazio na água [kg]:	<input type="text"/>
Comprimento [mm]:	<input type="text"/>
OD [mm]:	<input type="text"/>
ID [mm]:	<input type="text"/>
Diâmetro de contato [mm]:	<input type="text"/>

Adaptador de flange	
ID do adaptador:	<input type="text"/>
Revisão:	<input type="text"/>
Peso vazio no ar [kg]:	<input type="text"/>
Peso vazio na água [kg]:	<input type="text"/>
Comprimento [mm]:	<input type="text"/>
OD [mm]:	<input type="text"/>
ID [mm]:	<input type="text"/>
Diâmetro de contato [mm]:	<input type="text"/>

Fonte: do próprio autor

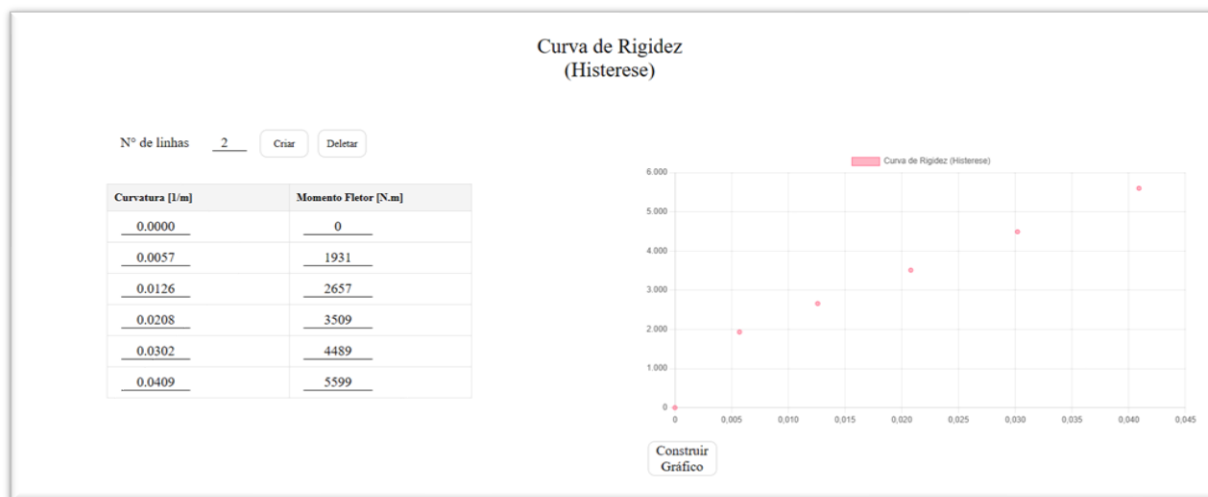
As sessões referentes às entradas referentes à curva de rigidez e à batimetria possuem formatação de tabela. Nelas, o usuário definirá quantos pontos irá adicionar, conforme a Figura 53. A curva de rigidez é construída num gráfico para que o usuário possa ver a formação dela já nesta etapa do procedimento de análise. Isto pode ser feito mediante um clique no botão com a inscrição “Construir Gráfico”.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 53 – Sessão de “inputs” da Curva de Rigidez à Flexão da Linha.



Fonte: do próprio autor.

Figura 54 – Sessão de “inputs” do MCV e da batimetria.

MCV - Relatório

Equipamento submarino:

Revisão:

Fornecedor:

ID do Projeto:

Tipo de Equipamento:

Peso submerso [kgf]:

Ângulo de inclinação [°]:

A [mm]:

B [mm]:

C [mm]:

D [mm]:

E [mm]:

F [mm]:

G [mm]:

Batimetria

Nº de linhas 4

Distância a partir do flange, ao longo do azimuth da linha [m]	Altura em relação ao solo [mm]
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>

Fonte: do próprio autor.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Figura 55 – Sessão de relação de flutuadores.

Embarcação x Flutuadores

Nº de linhas

Posição dos flutuadores, a partir do flange[m]	Empuxo total [kg]
<input checked="" type="radio"/> CDA	<input type="radio"/> SKN
<input type="radio"/> SKA	<input type="radio"/> SKR
<input type="radio"/> SKB	<input type="radio"/> SKV

3	x 1252 kg
1	x 973 kg
1	x 828 kg
3	x 573 kg
3	x 283 kg
4	x 205 kg
6	x 118 kg
1	x 100 kg

Fonte: do próprio autor.

Após preenchimento dos dados, o usuário pressiona o botão modelar e a aplicação realiza, por meio do navegador, o download de dois arquivos de extensão ‘. json’, um com as informações dos inputs e outro com as atualizações referentes à embarcação e seus flutuadores. A partir desta etapa, o usuário pode fechar a interface e rodar o script python “run.py”.

PROCESSAMENTO

Para simplificar as etapas de modelagem, optou-se por utilizar um arquivo modelo “.dat” para iniciar a . O script “run.py” realiza 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.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- 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,



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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.

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.

iv. SCRIPT “simulation_static.py”

Este script python possui as seguintes características:

- Há uma função que faz com que, com base no conjunto de flutuadores disponíveis, o script calcula as combinações possíveis para somas de três e de dois flutuadores num mesmo ponto, até o empuxo máximo de 2 tf. Tais somas são utilizadas para definir os melhores flutuadores a serem adicionados, em função dos dados de entrada fornecidos pelo usuário.
- Há uma função que realiza acréscimos e decréscimos de 0,5m de linha flexível. Isto é utilizado para realização de ajustes na configuração da catenária.
- Há uma função que verifica a altura do flange do MCV e realiza ajustes no guindaste a fim de corrigir a altura, caso haja divergência com o valor informado.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



- Há uma função que verifica se, em algum ponto, a linha torna-se menos de 52cm distante do solo. Em caso positivo, são realizados ajustes na configuração.

A partir do modelo criado no (iii. Script “simulation_statics.py”), a simulação é rodada uma sequência de vezes com variações, regidas pelos critérios descritos acima, na busca por atender ao caso de carregamento de equilíbrio em condição estática.

v. SCRIPT “simulation_dynamic.py”

A partir do modelo anterior, feito pelo (iv. Script “simulation_statics.py”), o modelo terá o MCV fixado (engastado). Após isto, será iniciada a simulação dinâmica. Terminada a simulação, será feita a verificação dos esforços, no flange do gooseneck e na vértebra. Em caso de não aprovação, será verificada a redução do heave up, como forma mitigatória de obter a validação da análise.

Os dados gerados pela interface são reservados em arquivos de formatação ‘json’. Para leitura destes dados foram utilizadas as bibliotecas internas do python:

- json: Usada para codificar e decodificar dados no formato JSON;
- os: Permite interagir com o sistema operacional para manipular sistemas de arquivos e variáveis de ambiente;
- shutil: Facilita a manipulação de arquivos e diretórios;

Para realização dos cálculos do processamento, foram utilizadas as bibliotecas do Python:

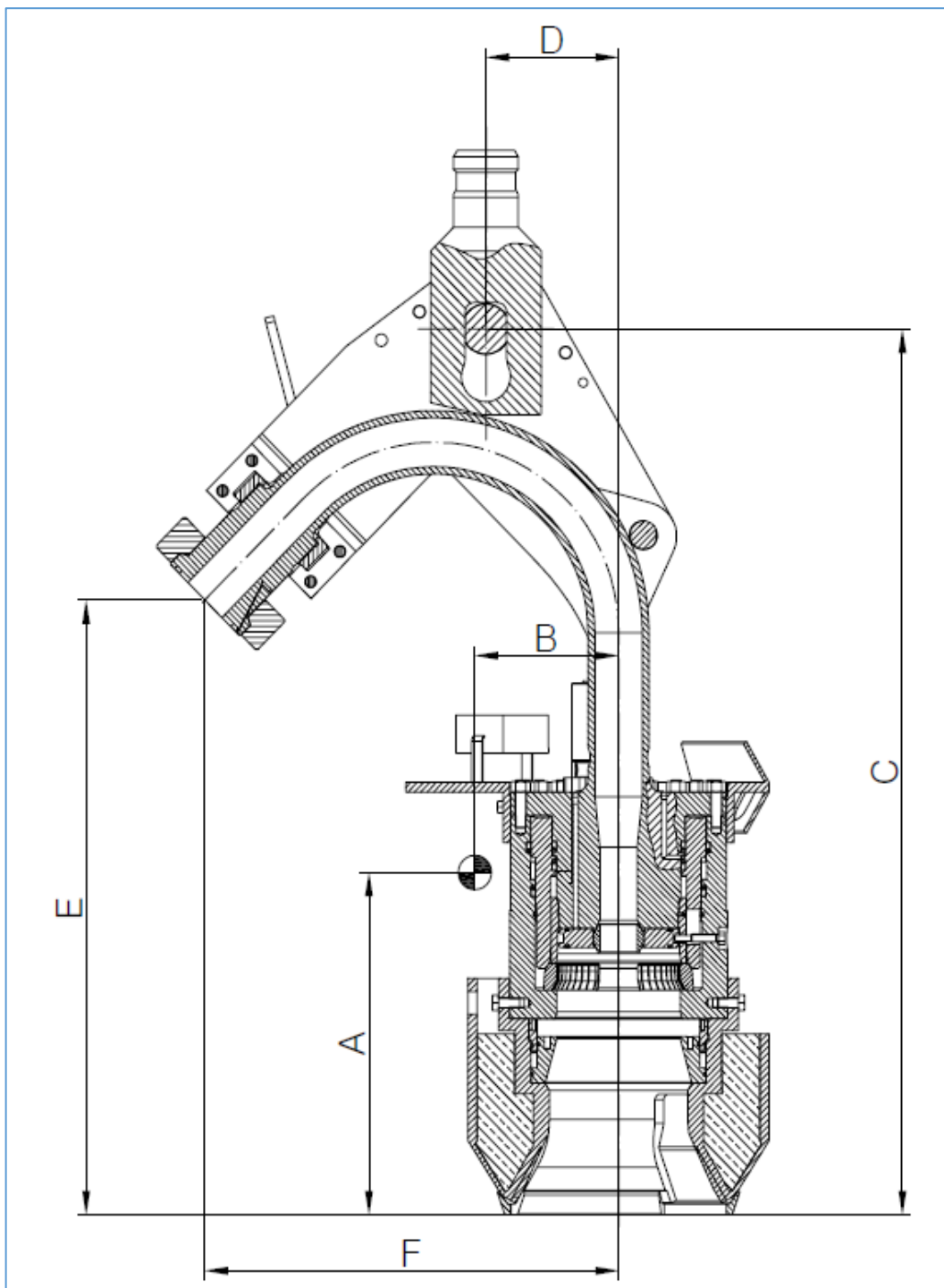
- math: Fornece diversos tipos de ferramenta para cálculo matemático;
- Numpy: Permite a manipulação matemática de elementos em matrizes;

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, conforme está descrito abaixo:

Também são calculados, nesta etapa, alguns pontos de interesse no MCV, a partir dos dados fornecidos pelo usuário, conforme descrito abaixo (Figura 56):

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

Figura 56 – Pontos de interesse para a modelagem do MCV no OrcaFlex



Fonte: do próprio autor.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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. O script “simulation_static.py” procura, então, por um flutuador ou par de flutuadores, dentre os que estão disponíveis na embarcação, para atender ao valor de empuxo indicado pelo usuário como sugestão inicial de configuração em cada ponto da linha no qual o usuário informou o empuxo total.

Após isto, a fim de obter a convergência inicial do modelo, aumenta-se os valores de damping do modelo, retira-se a vértebra e não são colocados os flutuadores. A convergência do modelo, desta forma, é facilitada. Isto configura uma etapa crítica do processo, haja visto que em condições nas quais o modelo não converge, o usuário não terá acesso à informação, pois o script permanece em execução continuamente. O aumento do damping faz com que o OrcaFlex busque a convergência estática do modelo à passos mais largos a cada estágio de cálculo, na busca pela posição ideal de equilíbrio do sistema, enquanto a retirada da vértebra e não colocação dos flutuadores faz com que o modelo, ao menos no início, seja um sistema mais simples de calcular, o que torna mais fácil a convergência. Portanto, toda análise segue este passo a passo inicial de convergência:

1. Convergência com fator de damping = [10, 100], sem vértebra e sem flutuadores;
2. Convergência com fator de damping = [5, 50], com vértebra e sem flutuadores;
3. Convergência com fator de damping = [1, 10], com vértebra e com flutuadores;

Em seguida, o script extrai o resultado referente a rotação do MCV, a fim de verificar o cumprimento do critério de análise Estática, conforme descrito em 2.C.a.: “... estabelecer uma



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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...”.

Em caso de se verificar o desalinhamento do MCV, a configuração está reprovada. Assim, o modelo deve ser revisado por meio de dois mecanismos principais, a saber: 1) a quantidade de linha paga ou recolhida e 2) a configuração de flutuadores. Estes dois mecanismos, na CVD de 1° extremidade, são os principais meios de se buscar o equilíbrio estático da configuração com o alinhamento necessário do MCV, pois por meio destes é possível aumentar ou reduzir a relação de peso e empuxo do sistema em seus diferentes pontos distantes do flange do MCV.

A precisão para qual a aplicação desenvolvida está programada, aprova configurações que possuam convergência com MCV apresentando desalinhamento máximo de $[-0,25^\circ; +0,25^\circ]$, com a linha e leito marinho distantes entre si, no mínimo, 50cm. O arquivo “RTXXXX - Estatico.sim” é salvo na pasta “..\analises” e, em seguida, é gerado o novo arquivo para análise das etapas seguintes.

O script “simulation – dynamic.py” busca automatizar a análise dos critérios descritos em “2.C.b” e “2.C.c”, que consistem em verificações dos esforços máximos obtidos na região do flange do MCV, em diferentes estágios da análise do movimento de heave up.

Inicialmente, o MCV horizontalizado é colocado como fixo ou engastado, para representar o caso de encaixe no hub da ANM.

Por padrão, o movimento de heave up é configurado na forma de uma “puxada” no topo da linha, para simular a passagem de uma onda sob a embarcação. Para modelar este cenário, prende-se o topo da linha a um objeto do tipo guincho, de comprimento desprezível e com as configurações presentes da Figura 57 a seguir:

Figura 57 - Configuração do movimento de heave up

ESTÁGIO	DURAÇÃO (s)	TEMPORIZAÇÃO (s)		DESCRIÇÃO
		INÍCIO	FINAL	
0	8	-8	0	-
1	2,15	0	2,15	Heave up de 2,5m na extremidade suspensa do duto através de um recolhimento do guincho.
2	30	2,15	32,15	Tempo de estabilização dos esforços no flange.
3	40	32,15	72,15	Lançamento de 8m de duto flexível, pagando guincho à velocidade de 0,1m/s

Fonte: do próprio autor.



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Portanto, como pode se verificar, o movimento de heave up consiste em um deslocamento de -2,5m no topo da linha, em um intervalo de 2,15s, seguido por 30 segundos nos quais se deixará que a linha retorne ao seu estado de repouso, seguido por um intervalo de 40 segundos, nos quais serão pagos 8m de linha. Neste último intervalo, ocorre o TDP (“Touch down point”), que consiste no toque da linha no solo marinho.

Cabe aqui ressaltar que a metodologia adotada quanto aos estágios da simulação dinâmica é conservadora em relação aos critérios previstos na ET-3000.00-1500-941-PMU-006 Rev. C, conforme abaixo, na Figura 58. Outro ponto relevante é o fato de que a ET permite, como ação mitigatória para aprovação da análise, a redução da puxada até o valor mínimo de 1,8m.

Figura 58 – Estágios da simulação dinâmica

Número do estágio	Duração (s)	Tempo de simulação ao final do estágio (s)	Descrição
0	1	0	-
1	2,15	2,15	Heave up 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.
4	500	652,15	Lançamento de 50m de duto flexível e movimentação do PLSV ao longo do azimuth da linha. Ambos os movimentos são executados à velocidade de 0,1 m/s
5	50	702,15	Tempo para estabilização dos esforços no flange.
6	50	752,15	Liberação dos flutuadores e/ou pesos mortos (se houver), e tempo para estabilização dos esforços no flange.

Fonte: ET-3000.00-1500-941-PMU-006 Rev. C

O modelo é aprovado em caso de não ruptura da vértebra nem do flange do MCV. Isto é verificado por comparação com os dados referentes aos esforços admissíveis, fornecidos pelo usuário no preenchimento da interface. Após a aprovação, o modelo “RTXXX – Dinamico.sim” é salvo na pasta “..\analise” e são realizadas as análises dos contingenciamentos, que consistem em verificar empuxos máximos que podem ser adicionados em 2 pontos da linha diferentes dos pontos de empuxo dos flutuadores, sem infringir qualquer critério limite.



B. CASOS DE ESTUDO

CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Foram tomados 4 casos de estudo diferentes, sendo todos eles exemplos de análises realizadas em operações reais e bem-sucedidas de CVD. O propósito consistiu em, ao rodar a aplicação, alcançar um resultado semelhante ao encontrado na respectiva etapa de análise para cada caso.

Cabe aqui ressaltar que para todos os casos de estudos, a batimetria do leito marinho era constante e o MCV possuía as seguintes características:

i. DADOS DO MCV

A: 3810 mm

B: 502 mm

C: 907 mm

D: 681 mm

E: 864 mm

F: 2037 mm

G: 839 mm

Peso submerso: 5043 kgf

Ângulo do flange: 60°

Sendo,

A = Altura entre a extremidade do flange e o leito marinho;

B = Altura entre a extremidade do flange e o topo do flange;

C = Distância horizontal entre o topo do flange e a extremidade do flange;

D = Altura entre o centro de massa do MCV e a extremidade do flange;

E = Distância horizontal entre o centro de massa do MCV e a extremidade do flange;

F = Altura entre a extremidade do flange e a base do MCV;

G = Distância horizontal entre o centro da base do MCV e a extremidade do flange



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



1º CASO DE ESTUDO

i. DADOS DA LINHA FLEXÍVEL

LDA: 2301 m

Peso vazio no ar: 106,58 kg/m

Peso cheio do ar: 126,39 kg/m

Peso vazio na água: 54,46 kg/m

Peso cheio na água: 74,27 kg/m

Diâmetro de contato: 254,40 mm

Diâmetro nominal: 6 “

MBR de armazenamento: 1,67 m

MBR de instalação: 2,51 m

Rigidez à flexão: 20,47 kN.m²

Rigidez à torção: 1072,00 kN.m²

Rigidez axial: 252293 kN

Deformação relativa (p/ 100 kN): 0,039636 %

ii. DADOS DA VÉRTEBRA

Comprimento: 4210 mm

Peso vazio no ar: 1178 kg

Peso vazio na água: 1024,9 kg

Diâm. Ext. da menor seção: 305mm

Diâm. Int. da menor seção: 280mm

Diâm. Da maior seção: 544mm

MBR de travamento: 2,86 m

M. fletor admissível: 57 kN.m

Força cortante admissível: 43 kN



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



iii. DADOS DO CONECTOR

Comprimento: 1791 mm

Peso vazio no ar: 2600 kg

Peso vazio na água: 2262 kg

Diâmetro ext. do pescoço: 254 mm

Diâmetro int.: 152,4 mm

Diâmetro da maior seção: 480 mm

iv. DADOS DA CURVA DE RIGIDEZ

Curvatura [1/m]	MF [N.m]
0,0072	411
0,0159	755
0,0262	1161
0,038	1628
0,0514	2156
0,0664	2746
0,0829	3397
0,101	4110
0,1207	4884
0,1419	5720
0,1646	6617
0,2148	8596
0,2423	9677
0,2713	10820
0,3018	12025
0,3339	13291
0,3676	14618
0,4029	16007



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



0,4396	17457
0,478	18968
0,5179	20542
0,5594	22176
0,6024	23872
0,5881	23050
0,5706	22362

v. ESFORÇOS LIMITES

CVD 1° - MCV no HUB com linha suspensa (Caso 3i – Flutuador/peso morto) – A

Tração: 15,49 kN

Cortante: 1,04 kN

Momento fletor: 53,54 kN.m

CVD 1° - MCV no HUB com linha suspensa (Caso 3i – Flutuador/peso morto) – B

Tração: 16,23 kN

Cortante: -8,54 kN

Momento fletor: 16,85 kN.m

CVD 1° - MCV no HUB (Caso 3ii – Flutuador/peso morto) – A

Tração: 16,27 kN

Cortante: -19,29 kN

Momento fletor: 3,44 kN.m

2° CASO DE ESTUDO

i. DADOS DA LINHA FLEXÍVEL

LDA: 2240 m

Peso vazio no ar: 146,52 kg/m

Peso cheio do ar: 167,70 kg/m

Peso vazio na água: 72,14 kg/m



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Peso cheio na água: 93,32 kg/m
Diâmetro de contato: 306,22 mm
Diâmetro nominal: 6 “
MBR de armazenamento: 2,09 m
MBR de instalação: 2,40 m
Rigidez à flexão: 38,98 kN.m²
Rigidez à torção: 1204,00 kN.m²
Rigidez axial: 310730,00 kN

ii. DADOS DA VÉRTEBRA

Comprimento: 8852 mm
Peso vazio no ar: 2385 kg
Peso vazio na água: 2075 kg
Diâm. ext. da menor seção: 455mm
Diâm. int. da menor seção: 330mm
Diâmetro da maior seção: 668 mm
MBR de travamento: 4,14 m
M. fletor admissível: 77 kN.m

iii. DADOS DO CONECTOR

Comprimento: 1374 mm
Peso vazio no ar: 890 kg
Peso vazio na água: 774,3 kg
Diâmetro ext. do pescoço: 254 mm
Diâmetro int.: 152,4 mm
Diâmetro da maior seção: 535 mm



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



iv. DADOS DA CURVA DE RIGIDEZ

Curvatura [1/m]	MF [N.m]
0	0
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



v. ESFORÇOS LIMITES

CVD 1° - MCV no HUB com linha suspensa (Caso 3i – Flutuador/peso morto) – A

Tração: -8,06 kN

Cortante: 11,12 kN

Momento fletor: 75,57 kN.m

CVD 1° - MCV no HUB com linha suspensa (Caso 3i – Flutuador/peso morto) – B

Tração: 2,99 kN

Cortante: -13,23 kN

Momento fletor: -18,97 kN.m

CVD 1° - MCV no HUB (Caso 3ii – Flutuador/peso morto) – A

Tração: 4,65 kN

Cortante: -6,26 kN

Momento fletor: -2,97 kN.m

3° CASO DE ESTUDO

i. DADOS DA LINHA FLEXÍVEL

LDA: 2240 m

Peso vazio no ar: 166,2 kg/m

Peso cheio do ar: 186,81 kg/m

Peso vazio na água: 98,14 kg/m

Peso cheio na água: 118,74 kg/m

Diâmetro de contato: 291,34 mm

Diâmetro nominal: 6 “

MBR de armazenamento: 1,89 m

MBR de instalação: 2,40 m

Rigidez à flexão: 40,41 kN.m²

Rigidez à torção: 1685 kN.m²

Rigidez axial: 563380 kN



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



ii. DADOS DA VÉRTEBRA

Comprimento: 5781 mm

Peso vazio no ar: 1552 kg

Peso vazio na água: 1350,2 kg

Diâm. ext. da menor seção: 472mm

Diâm. int. da menor seção: 313 mm

Diâmetro da maior seção: 338 mm

MBR de travamento: 4,14 m

M. fletor admissível: 70 kN.m

Força cortante admissível: 34 kN

iii. DADOS DO CONECTOR

Comprimento: 2219 mm

Peso vazio no ar: 2600 kg

Peso vazio na água: 2262 kg

Diâm. ext. do pescoço: 301,8mm

Diâmetro int.: 152,4 mm

Diâmetro da maior seção: 590 mm

iv. DADOS DA CURVA DE RIGIDEZ

Curvatura [1/m]	MF [N.m]
0	0
0,003	1322
0,006	1531
0,009	1775
0,014	2055
0,019	2382
0,024	2726
0,03	3116



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



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

v. ESFORÇOS LIMITES

CVD 1° - MCV no HUB com linha suspensa (Caso 3i – Flutuador/peso morto) – A

Tração: 4,80 kN

Cortante: -3,70 kN

Momento fletor: 43,29 kN.m

CVD 1° - MCV no HUB com linha suspensa (Caso 3i – Flutuador/peso morto) – B

Tração: 6,36 kN

Cortante: -11,57 kN

Momento fletor: 1,40 kN.m

CVD 1° - MCV no HUB (Caso 3ii – Flutuador/peso morto) – A

Tração: 6,00 kN



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



Cortante: -10,94 kN

Momento fletor: 0,75 kN.m

4º CASO DE ESTUDO

i. DADOS DA LINHA FLEXÍVEL

LDA: 2240 m

Peso vazio no ar: 146,52 kg/m

Peso cheio do ar: 167,70 kg/m

Peso vazio na água: 72,14 kg/m

Peso cheio na água: 93,32 kg/m

Diâmetro de contato: 306,22 mm

Diâmetro nominal: 6 “

MBR de armazenamento: 2,09 m

MBR de instalação: 2,40 m

Rigidez à flexão: 38,98 kN.m²

Rigidez à torção: 1204 kN.m²

Rigidez axial: 310730 kN

ii. DADOS DA VÉRTEBRA

Comprimento: 5639 mm

Peso vazio no ar: 1394 kg

Peso vazio na água: 1212,78 kg

Diâm. ext. da menor seção: 455mm

Diâm. int. da menor seção: 330mm

Diâmetro da maior seção: 668 mm

MBR de travamento: 4,14 m

M. fletor admissível: 77 kN.m



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



iii. DADOS DO CONECTOR

Comprimento: 1374 mm

Peso vazio no ar: 890 kg

Peso vazio na água: 774,3 kg

Diâmetro ext. do pescoço: 254 mm

Diâmetro int.: 152,4 mm

Diâmetro da maior seção: 535 mm

iv. DADOS DA CURVA DE RIGIDEZ

Curvatura [1/m]	MF [N.m]
0	0
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



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



0,292	31759
0,32	34674
0,3492	37719
0,3797	40892
0,4114	44194
0,4443	47625
0,4785	51186

v. ESFORÇOS LIMITES

CVD 1° - MCV no HUB com linha suspensa (Caso 3i – Flutuador/peso morto) – A

Tração: 0,89 kN

Cortante: 0,38 kN

Momento fletor: 31,32 kN.m

CVD 1° - MCV no HUB com linha suspensa (Caso 3i – Flutuador/peso morto) – B

Tração: 4,28 kN

Cortante: -5,55 kN

Momento fletor: 0,08 kN.m

CVD 1° - MCV no HUB (Caso 3ii – Flutuador/peso morto) – A

Tração: 4,46 kN

Cortante: -6,30 kN

Momento fletor: -10,05 kN.m



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL



5 RESULTADOS ESPERADOS

O desenvolvimento da automatização da análise de CVD busca, em primeiro lugar, trazer produtividade e eficiência nas atividades de análise, auxiliando a busca por uma configuração que cumpra todos os requisitos estabelecidos na Especificação Técnica: ET-3000.00-1500-951-PMU-001-Rev.F. Para garantir e verificar a funcionalidade da automação, serão realizadas 4 análises com auxílio da aplicação “CVD Automático”. Espera-se, com isto, obter resultados próximos dos que foram obtidos quando estas análises foram realizadas manualmente outrora.

Também se espera que os scripts desenvolvidos sejam bem documentados, de modo que, futuramente, será possível a ampliação do mesmo, possibilitando abarcar análises de CVD de 2º extremidade e CVD's com condições especiais, como, por exemplo, os casos de CVD com linha sem vértebra. Outro objetivo esperado é de que a interface desenvolvida seja intuitiva para facilitar o uso da aplicação, de modo que até pessoas em treinamento consigam realizar o seu uso e consigam também interpretar os resultados gerados pela automação.

Em resumo, espera-se que a aplicação desenvolvida traga uma significativa melhoria na eficiência e precisão das análises estruturais de operações offshore de CVD. A automação do processo permitirá uma melhor utilização dos recursos humanos e tecnológicos, reduzindo erros e tempo de processamento, facilitando a tomada de decisões



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, Yong. BAI, Qiang. 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. 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.

INTERNATIONAL CONFERENCE ON OFFSHORE MECHANICS AND ARTIC ENGINEERING. Time domain simulation of the 3D bending hysteresis behaviour of an unbonded flexible riser. (OMAE2007-29315). 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://maritimedevelopments.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.