



ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DO OLHAL NA VERTICALIZAÇÃO DE EQUIPAMENTOS MCV

Aline Esperança de Sá Freitas^a

William Steven Mendez Rodriguez^a

Bruno da Fonseca Monteiro^a

Fabrício Nogueira Correia^a

Breno Pinheiro Jacob^a

freitas.aline@lamcso.coppe.ufrj.br

WSMR125@hotmail.com

brunomonteiro@lamcso.coppe.ufrj.br

fabricao@lamcso.coppe.ufrj.br

breno@lamcso.coppe.ufrj.br

^a COPPE/UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, LAMCSO – Laboratório de Métodos Computacionais e Sistemas Offshore, Cidade Universitária - Ilha do Fundão, Avenida Pedro Calmon, S/N, CEP 21941-596, Rio de Janeiro - RJ - Brasil.

Mauro Henrique Alves de Lima Junior^b

mhaljr@ufrj.br

^b IT/UFRRJ – Instituto de Tecnologia – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rodovia BR 465, Km 07 - Zona Rural, CEP 23890-000, Seropédica – RJ - Brasil.

Resumo. *Durante a instalação de um MCV (Módulo de Conexão Vertical) é necessário que sua configuração de equilíbrio se mantenha na vertical, podendo apresentar um desalinhamento máximo de 3 (três) graus em relação ao seu eixo vertical. Essa condição é fundamental para possibilitar o assentamento do equipamento na árvore de natal e pode ser controlada através da variação do comprimento das linhas flexíveis (riser/umbilical e cabo de aço) conectados à sua extremidade, uma vez que parte do peso submerso do duto é transferido para o MCV, gerando momento em relação ao seu centro de gravidade.*

Em alguns casos, de acordo com o sistema de lançamento escolhido e as condições ambientais do local de instalação, garantir o posicionamento adequado pode requerer intervenções com

custo bastante elevado (escavação do fundo, utilização de bóias, etc.). Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo estudar a influência da modificação da posição do olhal do MCV na sua configuração de equilíbrio, como uma alternativa de baixo custo que viabiliza a procedimento de instalação de linhas flexíveis. O estudo foi desenvolvido no software SITUA/Prosim através de modelos numéricos do sistema de instalação, sob diversos casos de carregamento ambiental. Os resultados das simulações indicaram a viabilidade da solução proposta para os casos estudados.

Palavras Chave: *Olhal, Instalação, Equipamentos Submarinos, MCV, Riser Flexível.*

1 INTRODUÇÃO

Uma das etapas de instalação necessárias para a ativação de um sistema de produção de petróleo offshore é a conexão da extremidade da linha de produção a cabeça de poço, através de um equipamento MCV (Módulo de Conexão Vertical).

O procedimento de instalação consiste em descer o módulo de conexão vertical através do pagamento do cabo de aço e riser/umbilical simultaneamente, mantendo a verticalização do equipamento, como ilustrado na Fig. 1. No momento da conexão do MCV com a árvore de natal é necessário que o equipamento tenha um desalinhamento rotacional inferior a 3 (três) graus, sendo uma condição necessária ao acoplamento entre os equipamentos.

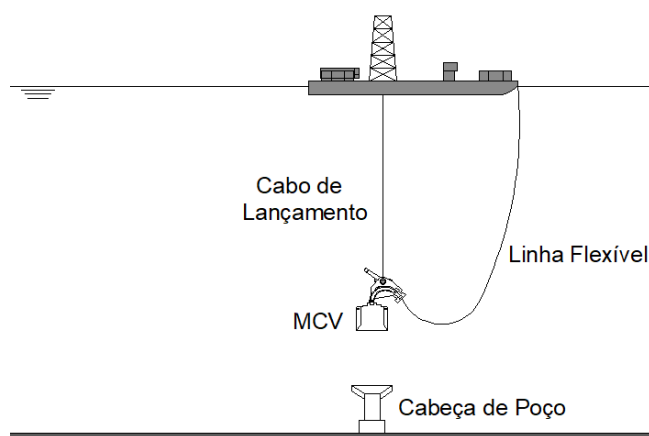


Figura 1 - Panorama do Sistema de Instalação de Linhas Flexíveis

O procedimento de descida do equipamento MCV deve ser feito de forma cautelosa, com o monitoramento constante do equipamento e das linhas flexíveis, de forma a garantir que os critérios de projeto sejam atendidos: desalinhamento do equipamento, raio de curvatura e toque da linha no leito marinho. Sendo assim, torna-se necessário a utilização de sistemas computacionais capazes de simular o comportamento do lançamento do equipamento sob a ação de carregamentos ambientais, prevendo-se situações de risco e colapso das linhas.

2 OBJETIVO

Atualmente, quando uma configuração de lançamento não atende a um dos critérios de projeto, torna-se necessário uma intervenção, muitas vezes complexa e onerosa. O estudo da arte indica, por exemplo, no caso de toque da linha no fundo marinho, a escavação do leito próximo a cabeça de poço, configurando um procedimento arriscado e oneroso. Uma alternativa é o lançamento com boia, também oneroso e complexo. Nos casos de violação do raio de curvatura ou desalinhamento superior ao limite (3°), utiliza-se também esta última alternativa.

Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo estudar a influência da modificação da posição do olhal¹ (Fig.2), na configuração final de assentamento do sistema de instalação, como alternativa de baixo custo para viabilizar o procedimento de instalação de linhas flexíveis.

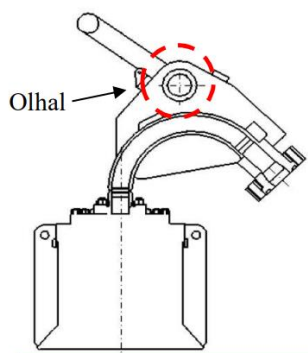


Figura 2 – Módulo de Conexão Vertical (MCV) e Olhal.

3 FERRAMENTA COMPUTACIONAL, MODELAGEM E METODOLOGIA

O estudo é desenvolvido em uma ferramenta computacional de análise denominada SITUA/Prosim, na qual é possível desenvolver simulações que consideram efeitos hidrostáticos, hidrodinâmicos e contato, associados ao método dos elementos finitos.

A metodologia de análise consiste em avaliar o comportamento estrutural das linhas sob a ação de diversas combinações de carregamento ambiental em duas fases: simulação estática e simulação dinâmica. O primeiro grupo de simulações visa determinar o comprimento de linha flexível e cabo de aço para manter o MCV na posição de projeto, no instante anterior ao seu acoplamento com a cabeça de poço. Uma vez determinada a configuração de equilíbrio estático que atenda aos critérios de projeto, prossegue-se com simulações dinâmicas desacopladas considerando condições ambientais de onda com diferentes intensidades e dois ângulos de incidência com relação a proa da embarcação.

3.1 Simulação Estática

Nesta etapa simula-se o procedimento de verticalização do MCV, considerando o acoplamento entre o equipamento MCV, a linha flexível e o cabo de aço. As resultantes das forças das linhas conectadas ao equipamento geram momento em relação ao seu centro de gravidade, fazendo com que o alinhamento do MCV seja sensível a variação dos comprimentos da linha flexível e do cabo. Deve-se considerar ainda as seguintes premissas:

- O MCV é um corpo rígido com propriedades hidrostáticas;
- A linha flexível é modelada por elementos finitos do tipo pórtico;
- O cabo de aço é modelado por elementos finitos do tipo treliça;

¹ elo que conecta o cabo de aço ao equipamento MCV

- Admite-se apenas os carregamentos de peso próprio e os carregamentos hidrostáticos.

A simulação é realizada seguindo as seguintes etapas:

- Determinação do Comprimento do Cabo de Aço: Admite-se como premissa o alinhamento entre o olhal do equipamento e a conexão do cabo na embarcação. O valor correspondente ao comprimento do cabo é calculado de forma iterativa, na qual o cabo deve manter o equipamento em sua cota Z de projeto após a configuração deformada;
- Determinação do Comprimento da Linha Flexível: o comprimento da linha é calculado de forma iterativa, devendo apresentar o mesmo ângulo de saída do *Gooseneck* do MCV, garantindo assim um desalinhamento vertical inferior ao limite de projeto (3°);

Vale ressaltar que, nesta etapa, o equipamento MCV apresenta um deslocamento horizontal devido a busca de uma configuração de equilíbrio estático, como ilustrado na Fig. 3. Ressalta-se também que deve ser avaliado os critérios de projeto, descritos na seção 4, e que somente os modelos que atenderem aos critérios serão levados para a próxima etapa (simulação dinâmica).

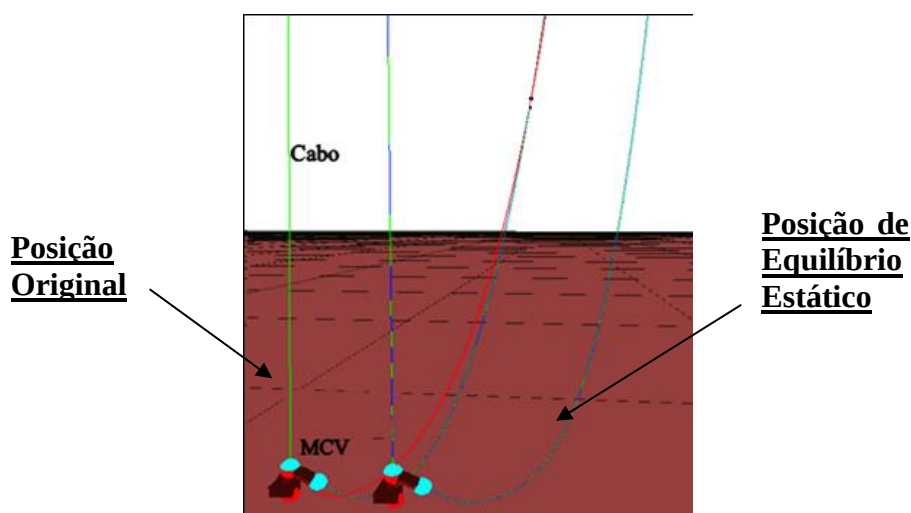


Figura 3 – Equilíbrio Estático do Equipamento MCV.

3.2 Simulação Dinâmica

Nesta etapa, admite-se que o equipamento MCV se encontra fixo, acoplado a cabeça do poço na posição de equilíbrio estático. Sendo assim é possível desconsiderar a influência do cabo de aço, considerando-se apenas o comprimento do *riser* e vértebra (restritor de curvatura) obtidos na simulação estática. Deve-se considerar ainda as seguintes premissas:

- O MCV é um corpo rígido fixo na posição de equilíbrio estático;
- A embarcação de lançamento é modelada com movimento prescrito com base nos RAO's de movimento;
- Além do peso próprio deve-se considerar ainda os carregamentos de onda na linha e no casco.

A simulação dinâmica é realizada com base na combinação dos carregamentos de onda, na qual deve-se avaliar o critério de raio mínimo na linha flexível e vértebra. As simulações que atenderam aos critérios compõem uma janela de operação.

3.3 Estudo de Sensibilidade do Posicionamento do Olhal

Esta etapa será desenvolvida somente se os resultados da análise estática indicarem violação dos critérios de projeto. Neste caso torna-se necessário uma intervenção no procedimento de instalação, justificando assim a proposta do trabalho, que consiste em um estudo de sensibilidade da posição do olhal.

O estudo proposto baseia-se em três etapas:

1. Primeiramente é executada uma simulação estática do sistema de instalação do MCV, considerando o posicionamento original do olhal;
2. Depois de constatada a necessidade de modificação do sistema devido à violação dos critérios de projeto (seção 4), é realizado um estudo considerando modificações no posicionamento do olhal através da execução de análises estáticas no sistema de instalação do MCV;
3. Depois de obtido o posicionamento que ocasiona a melhor configuração de instalação do MCV é feita ainda uma simulação dinâmica considerando os casos ambientais apresentados na seção 5.4.

A Fig. 4 ilustra um possível arranjo de posições que o olhal pode apresentar.

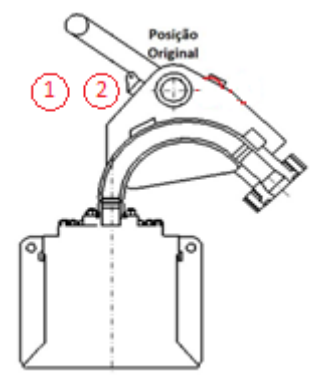


Figura 4 – Estudo do Posicionamento do Olhal no MCV.

4 CRITÉRIOS DE PROJETO

Em suma, é necessária a avaliação de diferentes critérios em cada fase da análise, de forma que seja garantida a integridade do sistema e que os critérios de instalação do MCV sejam respeitados. Os critérios de projeto referentes a cada fase da análise podem ser verificados a seguir:

- Simulações Estáticas (Verticalização do MCV): Nesta etapa, verifica-se como critério de projeto o toque da linha leito marinho, o raio de curvatura mínimo da linha flexível e da vértebra, bem como o ângulo de rotação com relação aos seus eixos horizontais do MCV, o qual não pode exceder 3°;
- Simulações Dinâmicas (MCV assentado): Nesta etapa, verifica-se somente o raio de curvatura mínimo da linha flexível e da vértebra.

5 ESTUDO DE CASO

Para o presente trabalho foram selecionados dois estudos de caso: *riser* flexível e umbilical, instalados pela mesma embarcação, onde considerou-se ainda dois pontos para a conexão do cabo de aço (30m e 60m).

5.1 Dados da Embarcação

Para a execução das análises dinâmicas dos estudos de caso que compõe o escopo deste trabalho foi utilizada uma embarcação de lançamento, cuja posição do centro de movimento e as características geométricas são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1 – Posição do Centro de Movimento.

X [m]	Y [m]	Z [m]
-3,015	0,000	11,57

Tabela 2 – Características Geométricas.

Dimensões da Embarcação	Valor [m]
Comprimento Total	129,9
Comprimento entre perpendiculares	112,9
Boca	27,8
Calado de Referência	6,77

A Tabela 3 apresenta as coordenadas da posição do sistema de lançamento vertical e a Tabela 4 os pontos de conexão da linha flexível e do cabo na embarcação.

Tabela 3 – Posição do Sistema de Lançamento Vertical (VLS).

X _{VLS} [m]	Y _{VLS} [m]	Z _{VLS} [m]
-7,870	18,400	12,150

Tabela 4 – Pontos de Conexão.

Distância entre Conexões	Elemento	X [m]	Y [m]	Z [m]
30m	<i>Riser</i>	-7.87	18.40	25.40
	Cabo	-37.87	18.40	25.40
60m	<i>Riser</i>	-7.87	18.40	25.40
	Cabo	-67.87	18.40	25.40

Pode-se observar que o ponto de conexão do cabo vertical de lançamento do MCV foi estimado de modo a se distanciar de 30m e 60m da posição de topo do *riser*/umbilical, para o presente trabalho serão estudados ambos os casos de posicionamento para cada um dos modelos de lançamento a fim de obter resultados com maior abrangência.

5.2 Dados do MCV

A Tabela 5 apresenta as propriedades dos MCV's que serão utilizados em cada um dos estudos de caso. Além da massa do MCV, a tabela apresenta também o ângulo do *Gooseneck*, a cota do flange em relação ao leito marinho (cota Z) e as coordenadas dos pontos de conexão das linhas: olhal (cabo) e flange (*riser*/umbilical), em relação aos eixos locais do MCV (com origem na base do equipamento e alinhada com o olhal).

Tabela 5 – Características do Equipamento MCV.

Linha Flexível	Ponto de Conexão	Coordenadas dos Pontos de Conexão			Ângulo do Gooseneck [°]	Cota Z do Flange [m]	Peso Submerso [kgf]
		x [m]	y [m]	z [m]			
Riser	Olhal (Cabo)	0.000	0.028	1.615	60	3.890	4176
	Flange (<i>Riser</i>)	1.325	0.028	0.863			
Umbilical	Olhal (Cabo)	0.000	0.009	1.956	45	1.70	3242
	Flange (Umbilical)	0.563	0.009	1.390			

5.3 Dados da Linha Flexível

5.3.1 *Riser* Flexível

Os *risers* tem a função de transportar óleo e/ou gás do poço a unidade produtora. A Tabela 6 apresenta as propriedades físicas e geométricas do *riser* flexível que será utilizado no estudo de caso. O *riser* possui diâmetro de 2.5", sua tubulação deve ser considerada alagada e a lâmina d'água em que está inserido é de 942m.

Tabela 6 – Propriedades do Riser de 2.5".

Característica Geométrica	Valor
Diâmetro Externo [m]	0.1124
Diâmetro Interno [m]	0.0625
Característica Física	Valor
Poisson	0.300
Rigidez Axial [kN]	90909.091
Rigidez a Flexão [kN.m ²]	3.142
Rigidez a Torção [kN.m ²]	34.72406
Peso no Ar Vazio [kN/m]	0.25958
Peso no Ar Alagado [kN/m]	0.2941
Peso na Água Vazio [kN/m]	0.15985
Peso na Água Alagado [kN/m]	0.19437
Característica Hidrodinâmica	Valor
Coeficiente de Inércia	2.000
Coeficiente de Arrasto Normal	1.200
Coeficiente de Arrasto Longitudinal	0.000
Coeficiente de Massa Adicional	1.000

5.3.2 Umbilical

Os umbilicais têm a função de fazer a ligação entre um arranjo de produção submarino e uma unidade de produção fornecendo serviços de controle, energia, comunicação e injeção de produtos químicos. Tais estruturas são constituídas por uma combinação de camadas para garantir proteção, resistência e flexibilidade.

A Tabela 7 apresenta as propriedades físicas e geométricas do umbilical que será utilizado no estudo de caso. A linha possui diâmetro de 5", sua tubulação deve ser considerada alagada e a lâmina d'água em que está inserido é de 1846m.

Tabela 7 – Propriedades do Umbilical de 5".

Característica Geométrica	Valor
Diâmetro Externo [m]	0.132
Característica Física	Valor
Poisson	0.300
Rigidez Axial [kN]	422000.000
Rigidez a Flexão [kN.m ²]	5.01
Rigidez a Torção [kN.m ²]	243.5
Peso no Ar Vazio [kN/m]	0.3295
Peso no Ar Alagado [kN/m]	0.34029
Peso na Água Vazio [kN/m]	0.21575
Peso na Água Alagado [kN/m]	0.22653
Característica Hidrodinâmica	Valor
Coeficiente de Inércia	2.000
Coeficiente de Arrasto Normal	1.200
Coeficiente de Arrasto Longitudinal	0.000
Coeficiente de Massa Adicional	1.000

5.3.3 Dados da Vértebra e Conector

A conexão da linha flexível com o MCV se dá através do elemento acessório conector de extremidade, ilustrado na Fig. 5(a). Tal elemento também deve ser incluído no modelo de análise, por apresentar dimensões, rijeza e massa não desprezíveis.

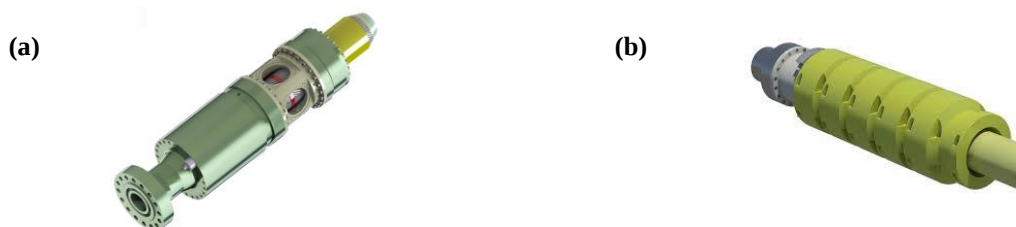


Figura 5 - Conector de Extremidade

Outro acessório que deve ser utilizado na conexão da linha flexível com o MCV é o restritor de curvatura, que possui a função de aumentar a rigidez a flexão da linha flexível,

preservando sua integridade. A Fig. 5(b) ilustra um sistema linha flexível, vértebra e conector de extremidade.

As Tabelas 8 e 9 fornecem as propriedades geométricas, físicas e hidrodinâmicas das vértebras e de cada um dos trechos do conector utilizados nas análises do *riser* flexível e do umbilical, respectivamente. Vale ressaltar que a rigidez à flexão fornecida na tabela se refere à situação da vértebra destravada, já que o estudo visa apenas verificar se haverá violação do seu raio mínimo, sendo assim a rigidez a flexão na configuração travada não foi considerada no modelo numérico.

Tabela 8 – Propriedades da Vértebra de 4”, conectada ao Riser Flexível.

Característica Geométrica	Vértebra + Riser	Conector Trecho 1	Conector Trecho 2
Comprimento [m]	2.545	0.240	0.490
Diâmetro Externo [m]	0.142	0.130	0.200
Diâmetro Interno [m]	0.063	0.102	0.102
Raio de Curvatura Mínimo [m]	1.215	-	-
Ângulo com o Gooseneck [°]	60	60	60
Característica Física	Vértebra + Riser	Conector Trecho 1	Conector Trecho 2
Poisson	0.300	0.300	0.300
Rigidez Axial [kN]	90909.090	1084840.952	1084840.952
Rigidez a Flexão [kN.m ²]	3.142	1845.759	1845.759
Rigidez a Torção [kN.m ²]	34.724	2636.799	2636.799
Peso no Ar Vazio [kN/m]	1.385	1.169	1.169
Peso na Água Vazio [kN/m]	1.112	1.035	0.853
Característica Hidrodinâmica	Vértebra + Riser	Conector Trecho 1	Conector Trecho 2
Coefficiente de Inércia	2.000	2.000	2.000
Coefficiente de Arrasto Normal	1.200	1.200	1.200
Coefficiente de Arrasto Longitudinal	0.000	0.000	0.000
Coefficiente de Massa Adicional	1.000	1.000	1.000
Diâmetro Hidrodinâmico	0.186	0.130	0.200

Tabela 9 - Propriedades da Vértebra de 5”, conectada ao Umbilical.

Característica Geométrica	Vértebra + Umbilical	Conector Trecho 1	Conector Trecho 2	Conector Trecho 3
Comprimento [m]	3.28	0.05	0.28	0.12
Diâmetro Externo [m]	0.170	0.419	0.27	0.202
Diâmetro Interno [m]	0.0979	0.245	0.189	0.172
Raio de Curvatura Mínimo [m]	1.8	-	-	-
Ângulo com o Gooseneck[°]	45	45	45	45

Característica Física	Vértebra + Umbilical	Conector Trecho 1	Conector Trecho 2	Conector Trecho 3
Poisson	0.300	0.300	0.300	0.300
Rigidez Axial [kN]	422000.000	1850555.153	1850555.153	1850555.153
Rigidez a Flexão [kN.m ²]	5.010	8141.1	8141.1	8141.1
Rigidez a Torção [kN.m ²]	243.500	11630.1	11630.1	11630.1
Peso no Ar Vazio [kN/m]	1.34007	6.31984	6.31984	6.31984
Peso na Água Vazio [kN/m]	0.89663	4.93384	5.74432	5.99771
Característica Hidrodinâmica	Vértebra + Umbilical	Conector Trecho 1	Conector Trecho 2	Conector Trecho 3
Coeficiente de Inércia	2	2	2	2
Coeficiente de Arrasto Normal	1.2	1.2	1.2	1.2
Coeficiente de Arrasto Longitudinal	0	0	0	0
Coeficiente de Massa Adicional	1	1	1	1
Diâmetro Hidrodinâmico	0.237	0.419	0.27	0.202

5.4 Carregamentos Ambientais

Na fase de análise estática, durante o procedimento de verticalização do MCV, serão desconsiderados os carregamentos de correnteza, sendo avaliado somente o acoplamento do MCV com as linhas (cabo de aço e linha flexível/vértebra), resultando em uma posição final de equilíbrio estático.

Na verificação do comportamento dinâmico do riser/umbilical, serão considerados somente carregamentos de onda para dois sentidos de incidência com o navio. As características de cada caso de carregamento podem ser verificadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Casos de Carregamento Ambiental

Onda	Período de Pico (Tp) [s]	Altura Significativa (Hs) [m]	Sentido de Ataque ⁽¹⁾ (Proa-Popa) [°]
1	6	2	180
2	8	2	180
3	10	2	180
4	12	2	180
5	6	2	210
6	8	2	210
7	10	2	210
8	12	2	210

⁽¹⁾ Ângulo de ataque a partir do eixo X global no sentido anti-horário

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

Como mencionado na Seção 3 o estudo será feito em dois modelos de instalação: um considerando a utilização de um *riser* flexível e o outro considerando a utilização de um umbilical, ambos conectados ao flange do MCV. Sendo assim serão obtidos resultados para quatro modelos de lançamento: *riser* flexível com olhal na posição original, *riser* flexível com olhal na posição modificada, umbilical com olhal na posição original e umbilical com olhal na posição modificada.

Vale ressaltar que nos modelos que serão apresentados a rigidez a flexão do trecho do *riser* com vértebra foi adotada linear. O travamento da vértebra foi ignorado nestas simulações, uma vez que um dos critérios de projeto é evitar que a vértebra atinja seu raio mínimo (de travamento), sem interesse na avaliação dos esforços. Ou seja, caso as simulações dinâmicas do *riser* ou do umbilical apresentem valores de raio de curvatura menores do que os limites estabelecidos para a vértebra (Seção 5.3.3), a configuração da vértebra deve ser considerada inapropriada.

Ressalta-se então que este tipo de modelagem, considerando rigidez linear (sem travamento da vértebra) consequentemente, irá gerar resultados de raios de curvatura espúrios caso o raio mínimo de curvatura da vértebra seja violado.

6.1 *Riser* Flexível

6.1.1 Posição Original do Olhal

A Tabela 11 apresenta comprimentos do cabo de aço e do *riser* flexível que foram utilizados na análise. A Tabela 12 apresenta os deslocamentos do equipamento MCV obtidos após o equilíbrio estático para cada situação analisada, atendendo os critérios de verticalização apresentados na Seção 3.

Tabela 11 – Comprimento do Cabo e Riser.

Distância entre Conexões [m]	Comprimento do Cabo de Aço [m]	Comprimento do Riser [m]
30	956.0	968.9
60	956.5	973.6

Tabela 12 – Deslocamentos do MCV após o Equilíbrio Estático – Riser Flexível.

Distância entre Conexões [m]	Deslocamento do MCV após o Equilíbrio Estático					
	Surge [m]	Sway [m]	Heave [m]	Roll [°]	Pitch [°]	Yaw [°]
30	6.227	0.000	-0.056	0.000	1.746	0.000
60	-14.247	0.000	-0.057	0.000	0.836	0.000

Os valores dos raios de curvatura mínimos para os casos em que as conexões do cabo e do *riser* se distanciam de 30 e 60 metros estão apresentados na Tabela 13, na qual nota-se que o critério de raio mínimo do *riser* foi atendido, entretanto nota-se também que o raio de curvatura mínimo ocorreu na conexão *riser*/vértebra e conector MCV, nas duas situações analisadas. Deste modo, mostra-se necessária a execução do estudo do posicionamento do olhal, visando uma melhor configuração para o procedimento de instalação.

Tabela 13 – Raio de Curvatura – Análise Estática – Riser Flexível.

Distância entre Conexões [m]	Critérios de Raio de Curvatura Mínimo [m]		Raio de Curvatura Mínimo [m]	Posição em Relação ao Conector [m]
	Riser	Vértebra		
30	0.73	1.22	1.492	0.000
60			1.755	0.000

6.1.2 Estudo de Sensibilidade da Posição do Olhal no MCV/Riser

Para verificar a influência da posição do olhal (ponto de conexão do cabo de aço com o MCV) na verticalização do equipamento MCV, são gerados e analisados modelos em que a posição horizontal do olhal varia de forma a afastá-lo do centro de movimento do MCV. Para o estudo foi utilizado o modelo com distância de 30m entre conexões.

6.1.2.1 Posicionamento do Olhal

A Tabela 14 apresenta as coordenadas dos pontos de conexão do cabo de aço no equipamento MCV utilizadas para averiguação da influência deste parâmetro no raio de curvatura do conjunto *riser*/vértebra.

Tabela 14 – Coordenadas do Ponto de Conexão do MCV com o Cabo de Aço.

Posição	Coordenadas do Posicionamento do Olhal		
	X [m]	Y [m]	Z [m]
ORIGINAL	0.000	0.0280	1.6150
1	-0.247	0.0280	1.6150
2	-0.124	0.0280	1.6150

6.1.2.2 Resultados da Simulação Estática

A Tabela 15 apresenta o raio de curvatura mínimo obtido para cada uma das posições do olhal. Pode-se observar que a **posição 2** alcança o maior raio de curvatura mínimo, estando localizado distante da conexão *riser*/vértebra e conector MCV. Tal posição será utilizada na retro análise do *riser*, desenvolvida na seção 6.1.3, a fim de verificar o atendimento simultâneo aos critérios de verticalização e raios de curvatura mínimos.

Tabela 15 – Raio de Curvatura Mínimo – Riser Flexível.

Posição do Olhal	Critério de Raio de Curvatura Mínimo [m]		Raio de Curvatura Mínimo [m]	Posição em Relação ao Conector [m]
	Riser	Vértebra		
ORIGINAL	0.73	1.22	1.492	0.000
1			1.20	1.402
2			1.934	1.526

6.1.3 Retro Análise do Riser Flexível (Posição do Olhal Modificada)

Nesta seção serão apresentados os resultados estáticos e dinâmicos do sistema de instalação do equipamento MCV conectado ao *riser* flexível de 2.5”, cujo ponto de conexão do cabo de aço no MCV é alterado para a **posição 2**, conforme estudo do olhal desenvolvido na seção 6.1.2.

6.1.3.1 Simulação Estática

As Tabelas 16 e 17 apresentam respectivamente os comprimentos do cabo de aço e do *riser*, e os deslocamentos do equipamento MCV obtidos após o equilíbrio estático para cada situação analisada (30m e 60m), atendendo aos critérios de verticalização apresentados na seção 3.

Tabela 16 – Comprimento do Cabo e Riser Flexível.

Distância Entre Conexões [m]	Comprimento Do Cabo De Aço [m]	Comprimento Do Riser [m]
30	956.0	960.6
60	956.5	964.2

Tabela 17 – Deslocamentos do MCV após o Equilíbrio Estático.

Distância entre Conexões [m]	Deslocamento do MCV após o Equilíbrio Estático					
	Surge [m]	Sway [m]	Heave [m]	Roll [°]	Pitch [°]	Yaw [°]
30	8.664	0.000	-0.018	0.000	-0.046	0.000
60	-11.042	0.000	-0.066	0.000	0.148	0.000

Já os raios de curvatura mínimos obtidos ao longo do *riser* são apresentados na Tabela 18, na qual nota-se que o critério de raio mínimo foi atendido para todas as situações analisadas, estando localizado ao longo do comprimento do restritor de curvatura distante da conexão *riser*/vértebra e conector MCV, indicando um comportamento apropriado do sistema. Deste modo, pode-se afirmar que todas as configurações analisadas são viáveis e, portanto, podem ser levadas para a próxima fase (simulação dinâmica).

Tabela 18 – Raio de Curvatura – Análise Estática – Riser Flexível.

Distância entre Conexões [m]	Critérios de Raio de Curvatura Mínimo [m]		Raio de Curvatura Mínimo [m]	Posição em Relação ao Conector [m]
	Riser	Vértebra		
30	0.73	1.22	1.934	1.526
60			2.609	1.629

6.1.3.2 Simulação Dinâmica

A Tabela 19 apresenta os resultados referentes ao menor raio de curvatura obtido ao longo do *riser* para as diversas configurações analisadas. Observa-se nos modelos com distância 30m entre conexões, que somente os casos de carregamento de onda com período 12s (C4 e C8) infringiram o critério de raio de curvatura mínimo da vértebra, todos os demais casos analisados atenderam aos critérios de projeto. Observa-se também que os menores raios de curvatura observados ocorrem ao longo da vértebra, indicando um comportamento adequado do sistema.

Tabela 19 - Raio de Curvatura Mínimo – Análise Dinâmica.

Distância entre Conexões	Caso de Carregamento	Critério de Raio de Curvatura Mínimo [m]		Raio de Curvatura Mínimo [m]	Posição em Relação ao Conector [m]
		Riser	Vértebra		
30	C1	0.73	1.22	1.86	1.42
	C2			1.81	1.22
	C3			1.37	0.10
	C4			1.18	0.10
	C5			1.85	1.32
	C6			1.80	1.22
	C7			1.22	0.10
	C8			1.06	0.10
60	C1	0.73	1.22	2.53	1.63
	C2			2.49	1.53
	C3			2.23	0.71
	C4			1.96	0.10
	C5			2.52	1.63
	C6			2.49	1.63
	C7			2.09	0.10
	C8			1.83	0.10

6.2 Umbilical

6.2.1 Posição Original do Olhal

6.2.1.1 Simulação Estática

As Tabelas 20 e 21 apresentam respectivamente os comprimentos do cabo de aço e do umbilical, e os deslocamentos do equipamento MCV obtidos após o equilíbrio estático para cada situação analisada, os resultados que não atenderam aos critérios de verticalização apresentados na seção 3, decorrem da linha ter encostado no fundo, impedindo a verticalização do MCV.

Tabela 20 – Comprimento do Cabo e Umbilical.

Distância entre Conexões [m]	Comprimento do Cabo de Aço [m]	Comprimento do Umbilical [m]
30	1861.0	1872.1
60	1861.3	1872.1

Tabela 21 – Deslocamentos do MCV após o Equilíbrio Estático – Umbilical.

Distância entre Conexões [m]	Deslocamento do MCV após o Equilíbrio Estático					
	Surge [m]	Sway [m]	Heave [m]	Roll [°]	Pitch [°]	Yaw [°]
30	9.5	0.000	-0.056	0.000	-1.5	0.000
60	-6.4	0.000	-0.057	0.000	-4.1	0.000

Já os raios de curvatura mínimos obtidos ao longo do umbilical são apresentados na Tabela 22, na qual nota-se que os critérios de raio mínimo foram satisfeitos para todas as situações analisadas. Observa-se ainda, no modelo com distância entre conexões igual a 30m, que o raio de curvatura mínimo ocorreu na conexão umbilical/vértebra e conector, indicando um comportamento inapropriado do sistema. Vale ressaltar que os modelos apresentam um comprimento de linha que se aproximam do leito marinho, chegando a tocar no fundo, deste modo mostra-se necessária a execução do estudo do posicionamento do olhal, visando evitar intervenções mais onerosas e complexas, como a utilização de boia no lançamento ou escavação do solo próximo a cabeça de poço.

Tabela 22 - Raio de Curvatura – Análise Estática.

Distância entre Conexões [m]	Critérios de Raio de Curvatura Mínimo [m]		Raio de Curvatura Mínimo [m]	Posição em Relação ao Conector [m]
	Umbilicar	Vértebra		
30	1.4	1.80	3.23	0.00
60			3.58	2.88

6.2.2 Estudo da Sensibilidade da Posição do Olhal no MCV/Umbilical

6.2.2.1 Posicionamento do Olhal

A Tabela 23 apresenta as coordenadas dos pontos de conexão do cabo de aço no equipamento MCV utilizadas para averiguação da influência deste parâmetro no raio de curvatura do conjunto umbilical/vértebra.

Tabela 23 – Coordenadas do Ponto de Conexão do MCV com o Cabo de Aço.

Posição	Coordenadas do Posicionamento do Olhal		
	X [m]	Y [m]	Z [m]
ORIGINAL	0.000	0.009	1.950
1	-0.153	0.009	1.950
2	-0.100	0.009	1.950

6.2.2.2 Resultados da Simulação Estática

A Tabela 24 apresenta o raio de curvatura mínimo obtido para cada uma das posições do olhal. Pode-se observar que a **posição 2** alcança o maior raio de curvatura mínimo, estando localizado distante da conexão umbilical/vértebra e conector MCV. Tal posição será utilizada no retro análise do *umbilical*, desenvolvida na seção 6.2.3, a fim de verificar o atendimento simultâneo aos critérios de verticalização e raios de curvatura mínimos.

Tabela 24 – Raio de Curvatura Mínimo – Umbilical.

Posição do Olhal	Critérios de Raio de Curvatura Mínimo [m]		Raio de Curvatura Mínimo [m]	Posição em Relação ao Conector [m]
	Umbilical	Vértebra		
ORIGINAL	1.40	1.80	3.230	0.000
1			2.259	2.783
2			2.403	2.584

6.2.3 Retro Análise do Umbilical (Posição do Olhal Modificada)

Nesta seção serão apresentados os resultados estáticos e dinâmicos do sistema de instalação do equipamento MCV conectado ao umbilical 5”, cujo ponto de conexão do cabo de aço no MCV é alterado para a **posição 2**, conforme estudo do olhal desenvolvido na seção 6.2.2.

6.2.3.1 Simulação Estática

As Tabelas 25 e 26 apresentam respectivamente os comprimentos do cabo de aço e do umbilical, e os deslocamentos do equipamento MCV obtidos após o equilíbrio estático para cada situação analisada, atendendo os critérios de verticalização apresentados na seção 3.

Já os raios de curvatura mínimos obtidos ao longo do umbilical são apresentados na Tabela 27, na qual nota-se que o critério de raio mínimo foi atendido para todas as situações

analisadas, estando localizado ao longo do comprimento do restritor de curvatura distante da conexão umbilical/vértebra e conector MCV, indicando um comportamento apropriado do sistema. Deste modo, pode-se afirmar que todas as configurações analisadas são viáveis e, portanto, podem ser levadas para a próxima fase (simulação dinâmica).

Tabela 25 – Comprimento do Cabo e Umbilical.

Distância Entre Conexões [m]	Comprimento Do Cabo De Aço [m]	Comprimento Do Umbilical [m]
30	1861.0	1868.0
60	1861.3	1871.4

Tabela 26 – Deslocamentos do MCV após o Equilíbrio Estático.

Distância entre Conexões [m]	Deslocamento do MCV após o Equilíbrio Estático					
	Surge [m]	Sway [m]	Heave [m]	Roll [°]	Pitch [°]	Yaw [°]
30	10.81	0.000	-0.04	0.000	-0.04	0.000
60	-5.96	0.000	-0.01	0.000	-0.01	0.000

Tabela 27 - Raio de Curvatura – Análise Estática.

Distância entre Conexões [m]	Critérios de Raio de Curvatura Mínimo [m]		Raio de Curvatura Mínimo [m]	Posição em Relação ao Conector [m]
	Umbilical	Vértebra		
30	1.4	1.80	2.40	2.58
60			3.26	2.68

6.2.3.2 Simulação Dinâmica

A Tabela 28 apresenta os resultados referentes ao menor raio de curvatura obtido ao longo do umbilical para as diversas configurações analisadas. Observa-se que todos os casos analisados atenderam os critérios de raio de curvatura. Nota-se ainda que os menores raios de curvatura foram observados ao longo do comprimento do restritor de curvatura, afastada da conexão umbilical/vértebra e conector MCV, indicando um comportamento adequado do sistema.

Tabela 28 - Raio de Curvatura Mínimo – Análise Dinâmica.

Distância entre Conexões	Caso de Carregamento	Critérios de Raio de Curvatura Mínimo [m]		Raio de Curvatura Mínimo [m]	Posição em Relação ao Conector [m]
		Umbilical	Vértebra		
30	C1	1.40	1.80	2.36	2.58
	C2			2.35	2.48
	C3			2.27	2.29
	C4			2.25	2.19
	C5			2.37	2.58
	C6			2.34	2.48
	C7			2.25	2.19
	C8			2.23	2.09
60	C1	1.40	1.80	3.20	2.68
	C2			3.17	2.58
	C3			3.05	2.49
	C4			3.02	2.39
	C5			3.20	2.68
	C6			3.16	2.58
	C7			3.02	2.49
	C8			2.99	2.39

7 CONCLUSÕES

O trabalho tem por objetivo estudar a influência da modificação da posição do olhal na configuração final de assentamento do sistema de instalação, como uma alternativa de baixo custo para viabilizar o procedimento de instalação de linhas flexíveis.

Os resultados estáticos do *riser*, com o olhal em sua posição original, mostraram que apesar do critério de raio mínimo ter sido atendido, o valor mínimo ocorreu na conexão *riser*/vértebra e conector, indicando um comportamento inadequado do sistema. Sendo assim mostra-se necessário o estudo de sensibilidade para o posicionamento do olhal, como uma alternativa para viabilizar o procedimento de instalação.

O desenvolvimento do estudo de sensibilidade da posição do olhal, considerando simulações estáticas, mostrou uma melhora do comportamento do sistema, evidenciado pelo aumento do raio de curvatura e sua localização ao longo do restritor e distante da conexão *riser*/vértebra e conector. Já os resultados das simulações dinâmicas mostraram que um pequeno grupo de análises dinâmicas infringiu os critérios de projeto, mais precisamente os modelos com distância 30m entre conexões, somente os casos de carregamento de onda com período 12s (C4 e C8), todos os demais casos analisados atenderam aos critérios de projeto.

Os resultados estáticos do umbilical, com o olhal em sua posição original, evidenciaram o toque da linha no leito marinho. O estudo da arte indica que a solução atual para este problema seria a execução de intervenções, como o uso de boia para instalação e a escavação do fundo marinho, porém este procedimento requer grandes investimentos financeiros, corroborando para que a alteração da posição do olhal seja uma alternativa viável técnica e economicamente. O desenvolvimento do estudo de sensibilidade da posição do olhal, considerando simulações

estáticas, mostrou uma melhora do comportamento do sistema, evidenciado pelo aumento do raio de curvatura e sua localização ao longo do restritor e distante da conexão *riser*/vértebra e conector.

Já os resultados das simulações dinâmicas mostraram em todos os casos analisados o pleno atendimento aos critérios de projeto. Notou-se ainda que os menores raios de curvatura foram observados ao longo do comprimento do restritor de curvatura, afastada da conexão umbilical/vértebra e conector MCV, indicando um comportamento adequado do sistema.

Face ao exposto podemos afirmar que o estudo desenvolvido cumpriu o seu objetivo, sendo verificado nos casos analisados que o posicionamento do olhal no MCV pode trazer grandes benefícios ao projeto de instalação de linhas flexíveis, reduzindo os riscos relacionados ao colapso da linha e possibilitando a redução de custos no procedimento de instalação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Engenheiro Allan Carré pela contribuição na revisão do texto.

REFERÊNCIAS

TAVARES, José C. V.; CABELINO, Karina; QUINTAES, Marcelo e BARAÚNA, Leonardo - Apostila de Equipamentos Submarinos, 2008.

Disponível em: <http://subseaworldnews.com/2014/04/21/reportsnreports-provides-global-umbilical-market-analysis-2013-2017>. Acessado em: Abril de 2017.

Disponível em: <http://www.trelleborg.com/offshore/~media/offshore/images--and--product--sheets/about--us/subsea-bend-restrictor-2-trelleborg-offshore.jpg?w=1024>. Acessado em: Setembro de 2016.

Disponível: <http://www.lamef.demet.ufrgs.br/noticias/noticias.html>. Acessado em: Setembro de 2016.