



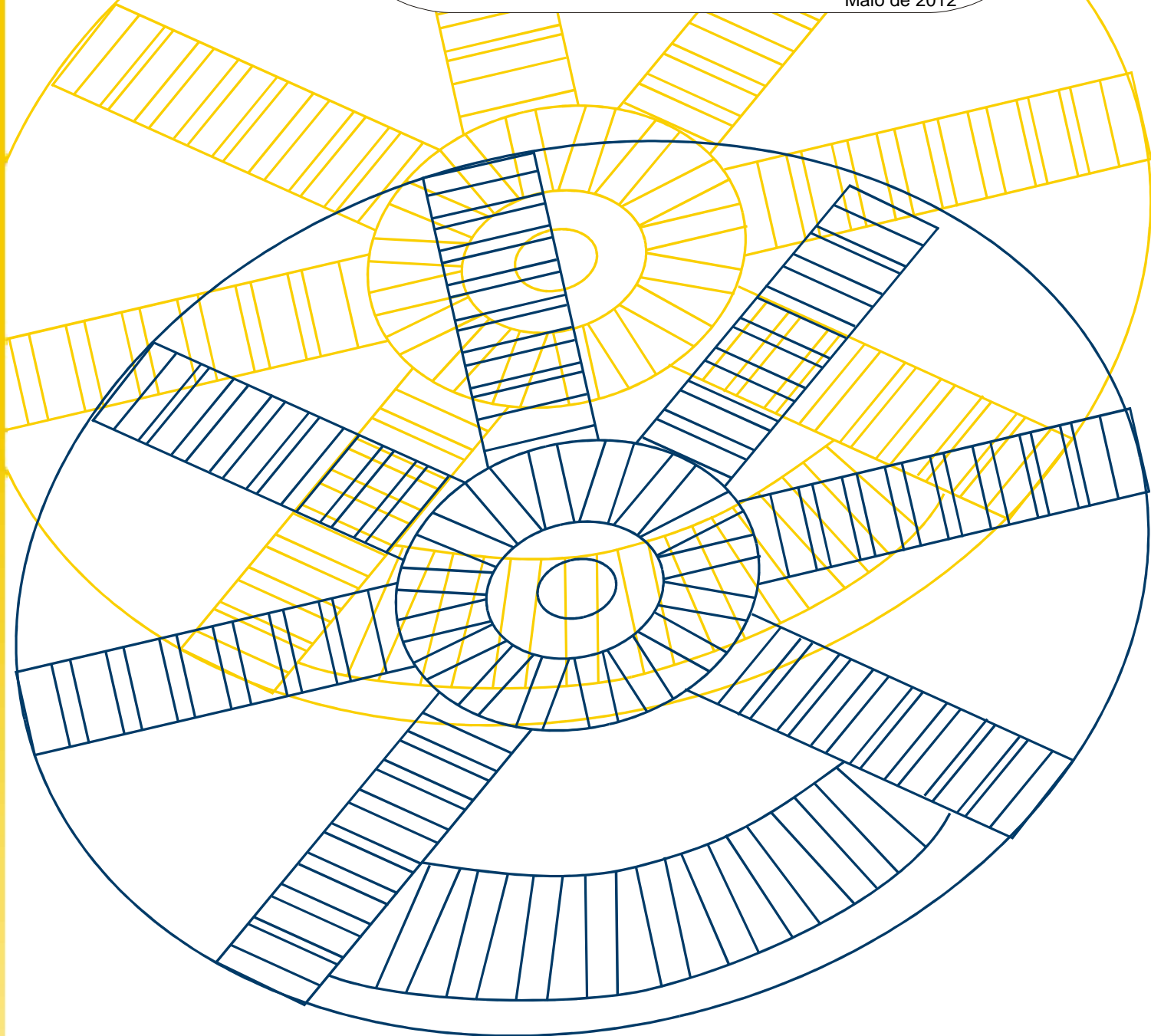
PETROBRAS

Reservado

**ANÁLISE DE ESFORÇOS EM FLANGES DE MCVs DURANTE
OPERAÇÕES DE CVDs
(Reservado)**

*CT TDUT 002/2012
VERSÃO FINAL REV. 00*

P & D EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
Tecnologia de Dutos e Risers
Maio de 2012



CENPES

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento

Leopoldo A. Miguez de Mello

CENTRO DE PESQUISAS E DESENVOLVIMENTO LEOPOLDO A. MIGUEZ DE MELLO

PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Tecnologia de Dutos e Risers

ANÁLISE DE ESFORÇOS EM FLANGES DE MCVS DURANTE OPERAÇÕES DE CVDS

CT TDUT 002/2012

(Relatório Final Rev. 00)

Relator(es)

Alyson Gomes Vaillant

Eduardo Vardaro

(CENPES/PDEP/Tecnologia de Dutos e Risers)

Rio de Janeiro

Maio de 2012

SUMÁRIO

RESUMO	III
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Objetivos.....	1
2 - DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS	1
3 - METODOLOGIA.....	7
3.1 - Casos de Carregamento.....	8
3.2 - Metodologia de Análise.....	8
3.2.1 - CASO 1 - CVD de 2ª Extremidade, MCV no PLSV	9
3.2.2 - CASO 2 - Condição de Equilíbrio em um CVD de 1ª Extremidade	10
3.2.3 - CASO 3 - Lançamento do Duto em um CVD de 1ª Extremidade.....	11
3.2.4 - CASO 4 - Teste Hidrostático	12
3.2.5 - CASO 5 - Operação	14
3.3 - Modelo Numérico.....	14
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO	15
5 – CONCLUSÕES.....	27
6 – RECOMENDAÇÕES	27
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
ANEXO A.....	29

RESUMO

O rompimento do MCV MLS-157 durante a operação de CVD e a ocorrência de dano nas chapas de reforço e na pintura dos MCVs dos poços MLS-179 e MLS-163, observado por meio de inspeções visuais efetuadas por ROVs, conduziram a um estudo para identificar as causas e sobre como mitigar tais problemas. Com base nos relatórios de esforços calculados pelo ISBM e nos relatórios de análise gerados pela AKER Solution observou-se que a atual metodologia utilizada para o cálculo das cargas nos flanges dos MCVs não é capaz de justificar as conclusões dos pareceres técnicos gerados pelo TMEC referentes à análise das falhas. Deste modo, buscou-se modificar a atual metodologia de análise descrita na CT TS 013/2010, de forma a se representar o comportamento do duto e as etapas envolvidas nas operações de CVD de maneira mais realista e consistente com as conclusões das falhas ocorridas.

1 - INTRODUÇÃO

No Campo de Marlim Sul, o rompimento do MCV do poço MLS-157 durante operação de CVD, associado a danos em chapas de reforço e em pinturas de MCVs dos poços MLS-179 e MLS-163, observados por meio de inspeções visuais efetuadas por ROVs nos MCVs conduziram a um estudo sobre as causas e sobre como mitigar tais problemas.

Um dos pontos estudados apontou que havia uma deficiência na metodologia atualmente empregada para o cálculo dos esforços no flange destes MCVs. Esta deficiência se deve a uma representação simplificada do comportamento à flexão do duto flexível em que não é considerada a histerese do duto, uma vez que apenas análises estáticas em cada etapa de instalação são especificadas na metodologia descrita na CT TS 013/2010 ⁽¹⁾.

Desta maneira, várias simulações e análises foram realizadas com o intuito de avaliar melhorias na determinação dos esforços nos flanges dos MCVs durante operações de CVD, incluindo a consideração da histerese, de modo a estabelecer uma nova metodologia que fosse capaz de justificar as quebras e os resultados exibidos pelas inspeções visuais dos MCVs.

1.1 - OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma nova metodologia para o levantamento dos esforços atuantes no flange dos MCVs durante conexão vertical direta (CVD). Para este fim foram realizados cálculos dos esforços durante as etapas de instalação, teste hidrostático e operação para os MCVs dos poços: MLS-157, MLS 179, BAZ-002 e RO-066. Também, é objetivo deste trabalho, a análise de documentos, relatórios de inspeção e de análises de falhas dos equipamentos dos poços MLS-179 e MLS-157 com o intuito de justificar a necessidade de mudança da metodologia atualmente empregada.

2 - DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS

Os poços MLS-157 e MLS-179 são poços produtores, que se encontram localizados no campo de Marlim Sul, produzindo para plataforma P-56. Estes poços se encontram em uma LDA de 1843m ⁽²⁾ e ⁽³⁾. De acordo com o documento ⁽⁴⁾ a LDA real é 1565m, todavia, manteve-se o valor anteriormente utilizado nos cálculos realizados pelo ISBM de 1843m para as análises globais e locais. As pressões de operação e teste consideradas para estes poços se encontram no documento ⁽³⁾ e são, respectivamente, 5000psi (DP) e

5500psi (1,1xDP).

O poço BAZ-002 é um poço produtor localizado no campo de Baleia Azul, pertencente ao pólo Pré-Sal, produzindo para o FPSO Espadarte. Sua LDA é de 1290m e suas pressões de operação e teste são, respectivamente, 5003psi (DP) e 5503psi (1,1xDP) ⁽⁵⁾.

Já o poço RO-066 é um poço produtor localizado no campo de Roncador, produzindo para a plataforma P-52. Sua LDA é de 1883m e suas pressões de operação e teste são, respectivamente, 3000psi (DP) e 3300psi (1,1xDP) ⁽⁶⁾.

Dados dos dutos flexíveis, MCVs, acessórios e alturas dos flanges ao solo podem ser obtidos nos relatórios de análises gerados pelo ISBM ^{(2), (3), (5) e (6)}. As principais informações se encontram tabeladas abaixo.

Por se tratar de análises de CVD para poços produtores, para todos os casos de análise os dutos foram considerados cheios com água do mar, com densidade $\gamma_w = 1025 \frac{kg}{m^3}$.

Os dados de solo utilizados se encontram na Tabela I e foram fornecidos pelo ISBM em arquivos de dados enviados para as simulações, exceto a rigidez vertical e cisalhante utilizadas que foram baseadas em experiências anteriores de simulação.

Tabela I
Dados de solo

Dados	Valores	Unidade
C.atrito lon	0,35	-
C.atrito lat	0,90	-
Rigidez vert	100	kN/m/m
Rigidez cisalh	10000	kN/m/m
Inclinação	0,00	graus

A Tabela II abaixo exhibe os dados das estruturas utilizados nas simulações. Maiores detalhes podem ser consultados nos data sheets das estruturas ^{(2), (3), (5) e (6)}.

Tabela II ^{(2), (3), (5) e (6)}

Dados das linhas de produção

Poço	MLS-157 e MLS-179	BAZ-002	RO-066
Fabricante	NKT	Technip	Technip
Estrutura	152.0011	203.50927	177.60213
Diâmetro (OD-m)	0.3912	0.3315	0.3757
Diâmetro (ID-m)	0.1524	0.2032	0.1778

CM (Morison)	2.0	2.0	2.0
CD (Morison)	1.2	1.2	1.2
M.vazio (ar-kg/m)	156.44	194.36	177.11
M.vazio (ag-kg/m)	33.26	105.89	63.48
Rig axial (kN/m)	541003.2	790763.9	464554.5
Rig flex (kN.m ²)	141.2*	267.9*	129.5*
Rig torc (kN.m ²)	654.5	-	667.0
Damp (% stif)	5.0	5.0	5.0
Periodo (s)	8.6	8.6	8.6
Raio mínimo (m)	3.18	3.50	3.66

Os dados de rigidez flexional e axial dos conectores foram calculados como descrito abaixo.

$$RigidezFlexional = E \cdot I = E \cdot \frac{\pi \cdot (OD_{\text{pescoço}}^4 - ID_{\text{conector}}^4)}{64} \quad (1)$$

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

$$RigidezTorsional = G \cdot J = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \frac{\pi \cdot (OD_{\text{pescoço}}^4 - ID_{\text{conector}}^4)}{32} \quad (3)$$

Onde E é o módulo de elasticidade e ν é o coeficiente de Poisson.

Um diâmetro externo equivalente é utilizado para representar o conector, determinado conforme a seguinte expressão:

$$m_{\text{conector,ar}} + m_{\text{duto,ar,vazio}} = m_{\text{conector,submerso}} + m_{\text{duto,submerso,vazio}} + \frac{\pi \cdot \gamma_w \cdot OD_{\text{equivalente}}^2}{4} \quad (4)$$

Onde m são os pesos lineares em kgf/m. Embora não corresponda à situação real, nesta expressão considera-se que o comprimento do duto dentro do conector é igual ao comprimento do conector. A massa do conector utilizada como entrada de dados no programa de cálculo deve levar em conta a massa linear do duto flexível passando por seu interior.

O diâmetro interno do conector é igual ao diâmetro interno do duto.

A Figura 1, exibe as principais informações necessárias para a modelagem numérica do conector. Os dados dos conectores (2), (3), (5) e (6) são apresentados na Tabela III.

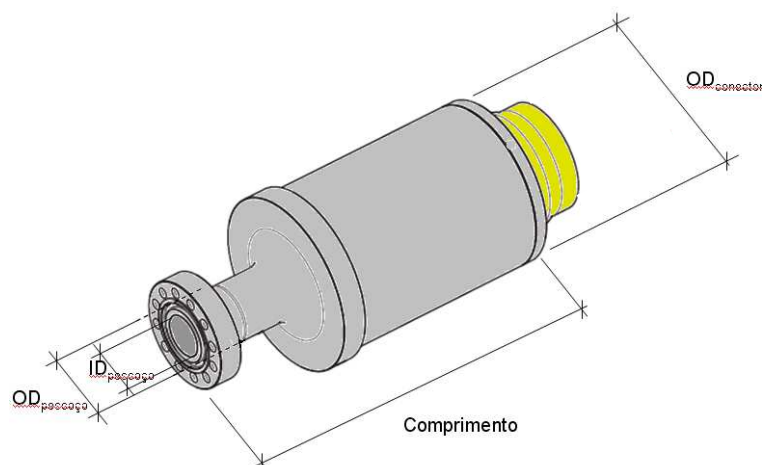


Figura 1 - Conector genérico com suas principais dimensões

Tabela III (2), (3), (5) e (6)

Dados dos Conectores

Poço	MLS-157 e MLS-179	BAZ-002	RO-066
Fabricante	NKT	Technip	Technip
ID _{conector} (m)	0.1524	0.1524	0.1778
OD _{conector} (m)	0.5940	0.4600	0.5250
OD _{pescoco} (m)	0.2080	0.2080	0.2570
OD _{equivalente} (m)	0.6394	0.4380	0.5021
Mod.young (MPa)	207000.00	207000.00	207000.00
Massa _{ar} (kg)	1700	600,7	1223
Peso _{submerso} (kgf) *	1430	521,8	1062.3
Peso _{ORCAFLEX} (kgf/m)	1453	696,2	856.6
Poisson (ν)	0,5	0,5	0.5
EI (kN.m ²)	13538	13538	34173
EA (kN)	3257765	3257765	5598542
GJ (kN.m ²)	9025	9025	22782
Comprimento (m)	1.311	1.197	1.800
CM	2.0	2.0	2.0
CD	1.2	1.2	1.2

* Quando não fornecido o peso submerso pode ser simplificado como sendo: $Peso_{submerso} = Peso_{ar} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{aço}}\right)$, onde

$$\gamma_{aço} = 7800 \frac{kg}{m^3}.$$

O modelo numérico que representa a vértebra deve possuir as seguintes características:

- Diâmetro interno (ID) igual ao do duto flexível;

- Massa (m) igual a soma das massas lineares do duto flexível e da vértebra;
- EI , EA e GJ , iguais aos do duto flexível.

A modelagem da vértebra leva em conta o cálculo de um diâmetro externo equivalente, conforme calculado para o conector na equação 4, substituindo o peso linear no ar e submerso do conector pelos pesos lineares da vértebra.

A Figura 2 mostra uma vértebra típica, onde é representado o seu comprimento e raio de travamento. Os dados das vértebras ⁽²⁾, ⁽³⁾, ⁽⁵⁾ e ⁽⁶⁾ são apresentados na Tabela IV.

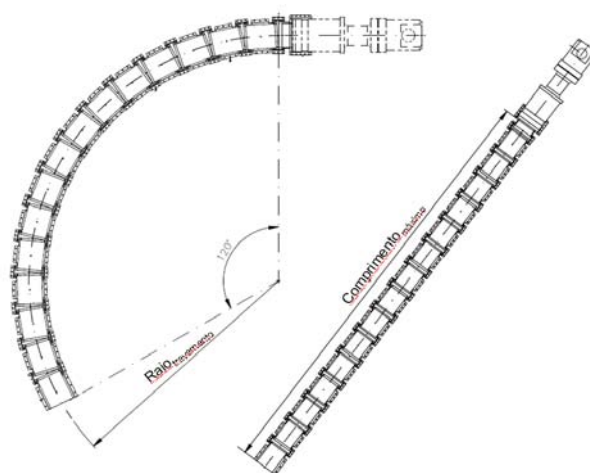


Figura 2 - Vértebra típica

Tabela IV ⁽²⁾, ⁽³⁾, ⁽⁵⁾ e ⁽⁶⁾

Dados das Vértebras

Poço	MLS-157 e MLS-179	BAZ-002	RO-066
Fabricante	NKT	Technip	Technip
ID (m)	0.1524	0.2032	0.1778
OD _{equivalente} (m)	0.6185	0.3897	0.425
Massa _{ar} (kg)	1828	2019	1985
Peso _{submerso} (kgf) *	424	1753.68	1726.95
Peso _{ORCAFLEX} (kgf/m)	397.0	451.4	423.8
Comprimento (m)	7.600	7.856	8.047
CM	2.0	2.0	2.0
CD	1.2	1.2	1.2

* Quando não fornecido o peso submerso pode ser simplificado como sendo: $Peso_{submerso} = Peso_{ar} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{aço}}\right)$, onde

$$\gamma_{aço} = 7800 \frac{kg}{m^3}.$$

Os dados dos MCVs (2), (3), (5) e (6) necessários para a modelagem são apresentados na Tabela V. As cotas mostradas na Figura 3 são encontradas na Tabela V.

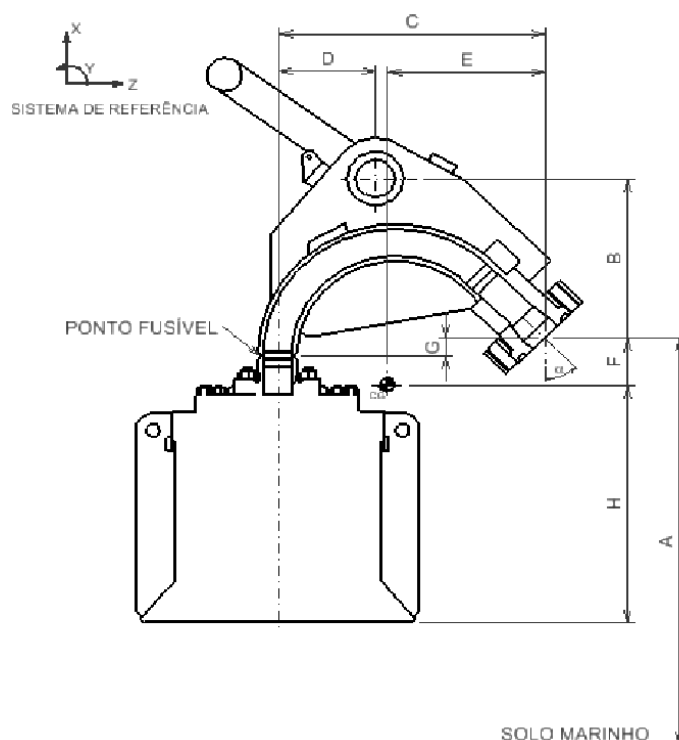


Figura 3 - Referências dimensionais para a modelagem dos MCVs

Tabela V (2), (3), (5) e (6)

Dados dos MCVs

Poço	MLS-157 e MLS-179	BAZ-002	RO-066
Fabricante	Aker (NKT)	Aker (Technip)	Aker (Technip)
B (m)	0.758	0.872	0.617
C (m)	1.518	1.814	0.973
D (m)	0.214	0.304	0.356
E (m)	1.270	1.511	0.842
F (m)	0.180	0.191	0.226
G (m)	0.372	0.247	0.157
H (m)	0.930	0.924	0.869
I (m)	0.000	0.034	0.000
Peso _{submerso} (kgf) *	2700	3683	2136
Altura flange -solo (m)	4.792/ 4.002	3.965	4.700
Ang. com vertical (°)	60	60	45

* Quando não fornecido o peso submerso pode ser simplificado como sendo: $Peso_{submerso} = Peso_{ar} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_{aço}}\right)$, onde

$$\gamma_{aço} = 7800 \frac{kg}{m^3}.$$

Foram desprezados os efeitos de força de arrasto (CD) e força de inércia (CA) na

CENPES – Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello

modelagem hidrodinâmica do MCV.

Outros dados referentes ao PLSV e aos cabos de guincho são necessários para a completa construção do modelo numérico e simulação das etapas que compõem uma operação de CVD. No modelo do navio de lançamento foi considerada uma velocidade de avanço entre 0,10m/s (0,195nós) a 0,2m/s (0,39nós).

Além destes dados há também a velocidade de lançamento de linha do PLSV que esta entre 0,10m/s (360m/h) a 0,12m/s (432m/h).

Os cabos de aço utilizados para içar o MCV e para sustentar o flexível possuem diâmetro de 1 ½" (0,038m) com massa linear de 6kg/m e rigidez axial entre 60000kN e 280000kN.

3 - METODOLOGIA

A metodologia de análise aqui utilizada difere da metodologia atualmente empregada pela Petrobras, CT TS 013/2010 ⁽¹⁾, pela inclusão da histerese do duto flexível durante as operações de CVD.

Durante as etapas de uma operação de CVD, o duto é solicitado dinamicamente, sendo a consideração da histerese importante para a correta determinação dos esforços de flexão no flange do MCV.

O fenômeno de histerese observado na curva momento versus curvatura do duto flexível está diretamente relacionado com a pressão de contato e com o atrito interno entre as camadas do duto.

Na presente metodologia assume-se que, até o momento de seu lançamento, mesmo após ter sofrido alguns ciclos de flexão durante sua fabricação, armazenamento, transferência e transporte, o duto flexível permanece em uma condição neutra Ou seja, não há momento residual quando este se encontra na bobina ou está horizontalizado ou verticalizado sem a atuação de tração ou de pressão externa ou interna.

Assim, após seu ingresso na água do mar, onde haverá a atuação da tração e pressão externa e interna, o comportamento histerético do tubo flexível passa a ser observado. Todavia, uma vez que o duto se encontra verticalizado, o momento permanecerá nulo, até que seja iniciada a busca pela verticalização do MCV, condição de equilíbrio, para a CVD, quando o duto flexível passa a sofrer curvaturas significativas próximo da conexão com o MCV.

3.1 - CASOS DE CARREGAMENTO

São mantidos todos os casos de carregamentos atualmente utilizados para o levantamento de esforços descritos na CT TS 013/2010 ⁽¹⁾. A Tabela VI exhibe um resumo dos casos de carregamentos executados.

Tabela VI

Casos de carregamento de projeto

Condição de Carregamento	Caso de Carregamento	Descrição
Instalação (Duto Cheio de Água do Mar e Capa Externa Intacta)	Caso 1	CVD de 2ª extremidade, 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 praticamente vertical
	Caso 3	MCV conectado ao HUB do equipamento submarino: (i) linha suspensa com aplicação do movimento vertical do PLSV; (ii) lançamento do duto flexível, momento em que ele toca o fundo do mar e após ter sido completamente lançado.
Teste Offshore	Caso 4	Teste hidrostático, 110% da pressão de projeto. MCV conectado ao HUB do equipamento submarino e duto flexível completamente lançado.
Operação	Caso 5	Condição de operação, 100% da pressão de operação ou de projeto. MCV conectado ao HUB do equipamento submarino e duto flexível completamente lançado.

Máxima pressão de teste offshore deverá ser considerada igual a 1,10xMáxima Pressão Interna de Projeto, a não ser que outro valor seja especificado. Este caso cobre a condição de operação.

3.2 - METODOLOGIA DE ANÁLISE

Inicialmente, após a avaliação dos dados recebidos, deve ser feita a determinação dos parâmetros necessários (e.g. diâmetro externo) para a construção do modelo dos acessórios. Utiliza-se uma planilha Excel para tal tarefa.

Posteriormente são realizadas análises estáticas e dinâmicas no ORCAFLEX ⁽⁷⁾, sem correnteza, que visam reproduzir o passo a passo da instalação de um duto flexível, desde o a saída do MCV do PLSV até o início da operação do duto, conforme apresentado na Tabela VI. Estes se encontram detalhados abaixo.

3.2.1 - CASO 1 - CVD DE 2ª EXTREMIDADE, MCV NO PLSV

Caso de carregamento que visa obter o máximo carregamento axial no flange do MCV, que ocorre em dois momentos distintos: (i) durante o overboarding do MCV em um CVD de 2ª extremidade e; (ii) durante uma operação de desconexão do MCV de 1ª extremidade, após o seu recolhimento, no momento em que o equipamento chega à embarcação.

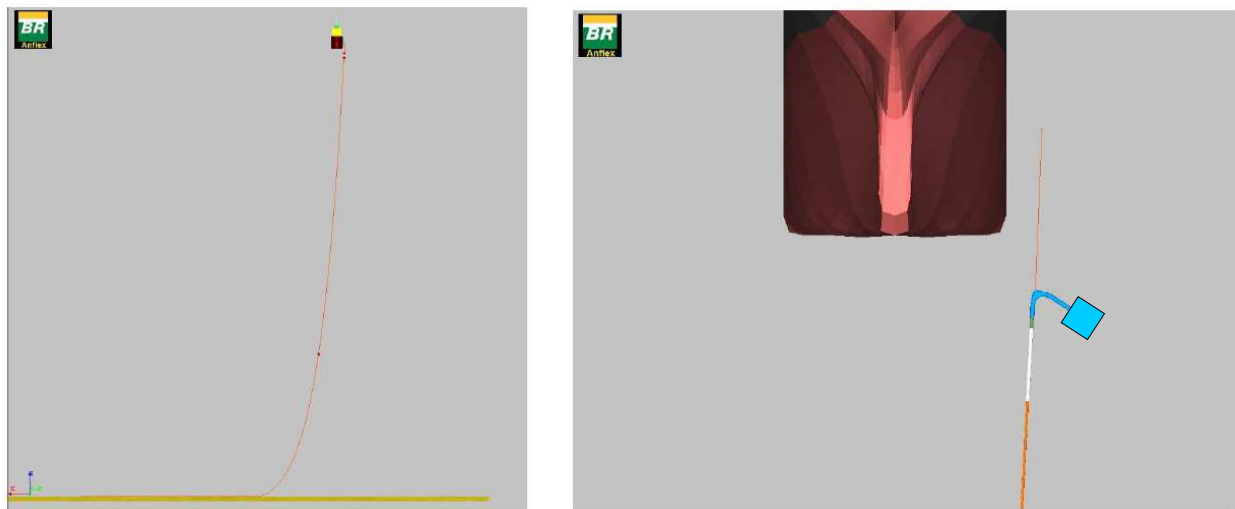


Figura 4 - CVD de 2ª extremidade

Para este caso é feita uma análise simplificada que considera a *ELT* (Estimated Laying Tension) ^(nota 1) para definir a máxima carga de tração que atua no flange do MCV:

$$ELT = (LDA + 10m) \cdot FC \cdot FAD \cdot w \quad (5)$$

Onde:

LDA = Lâmina d'água;

FC = Fator de catenária;

FAD = Fator de amplificação dinâmica;

w = Peso linear submerso do duto flexível, cheio de água do mar.

Nota 1: foi considerado um ângulo de topo da catenária durante o lançamento de 3° para a definição desta equação.

3.2.2 - CASO 2 - CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO EM UM CVD DE 1ª EXTREMIDADE

Esse caso representa a situação de conexão vertical de primeira extremidade em que o MCV está bem próximo do HUB no instante de ser assentado. Deve ser criada uma configuração em que o ângulo de inclinação do MCV seja igual ou próximo de zero. O MCV é considerado verticalizado desde que possua um desalinhamento máximo de $\pm 3^\circ$, situação que possibilita o seu assentamento.

A altura final do flange do MCV ao solo marinho deve ser a especificada nas premissas de análises.

Para este caso de análise deve ser utilizada a consideração de histerese do duto flexível no modelo de simulação.

A distância horizontal considerada entre o anel de içamento do MCV e da roda do PLSV foi de 30m ^(nota 2), ver Figura 5. Esta distância horizontal depende do PLSV a ser utilizado na instalação e do diâmetro do duto a ser instalado.

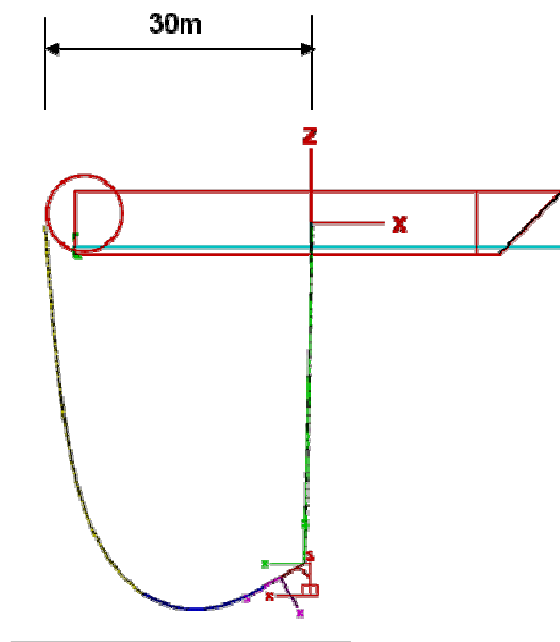


Figure 5 - Esquemático representando a distância horizontal entre o anel de içamento do MCV e a roda de lançamento do PLSV

Ao término da execução deste caso de carregamento, a configuração final obtida é utilizada para se proceder com a simulação para as outras condições de carregamento.

Nota 2: para PLSVs capazes de lançar com distâncias inferiores a esta, estes valores deverão ser levados em conta

3.2.3 - CASO 3 - LANÇAMENTO DO DUTO EM UM CVD DE 1ª EXTREMIDADE

A partir da configuração final obtida para a situação de equilíbrio, deve-se efetuar uma análise com um modelo completo, sem interrupção, até que no mínimo, 40m de duto flexível se encontre assentado no fundo do mar.

Este caso de carregamento foi dividido em três momentos:

- (i) 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;
- (ii) 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;
- (iii) Completo assentamento do duto no fundo do mar. Simula o instante em que há a estabilização dos esforços no flange do MCV após ser lançado um determinado comprimento de linha no fundo (~ 40 m). O conjunto de esforços advindos deste instante receberão a denominação “0”, por exemplo, M0 para o momento fletor, uma vez que a configuração e os esforços serão considerados pontos de partida para a fase seguinte, que é a de teste hidrostático.

O movimento vertical imposto na extremidade do duto flexível conectada ao PLSV considerado nas análises foi determinado com base no estudo de movimentos efetuado na CT TS 013/2010 ⁽¹⁾ para o Sunrise. Com base neste estudo, foi obtida uma amplitude de movimento vertical máxima de 2.467 m e uma amplitude de aceleração vertical máxima de 1.321 m/s². Portanto, o período do movimento imposto na extremidade da linha deve ser de 8.6 s para manter as amplitudes de movimento e aceleração obtidas.

A fim de que os resultados obtidos considerem a dinâmica do duto durante o deslocamento vertical aplicado, foi feita uma análise transiente em que a amplitude do movimento vertical na extremidade da linha é aplicada em um tempo igual a ¼ do período do movimento imposto (T = 8.6s), neste caso 2,15s.

Outra característica para este caso de carregamento é que deve ser considerada a velocidade de lançamento de linha entre 0,10m/s (360m/h) a 0,12m/s (432m/h) e uma velocidade de avanço do PLSV com velocidade entre 0,10m/s (0,195nós) a 0,2m/s (0,39nós).

Além disso, considerando que os dados batimétricos podem não condizer exatamente

com as condições encontradas para o lançamento do duto flexível no leito marinho, este mesmo caso deverá ser executado duas vezes: (a) altura do flange ao solo marinho nominal +52cm e (b) altura do flange ao solo marinho nominal -52cm. O valor de 52cm foi obtido para uma inclinação média do solo de 3° com um TDP a 10m do equipamento submarino. Estas variações não foram aplicadas aos casos aqui analisados.

O Gráfico 1 mostra um exemplo do comportamento do momento no plano vertical no flange do MCV ao longo do tempo, onde são mostrados os três instantes mais importantes para coleta de resultados.

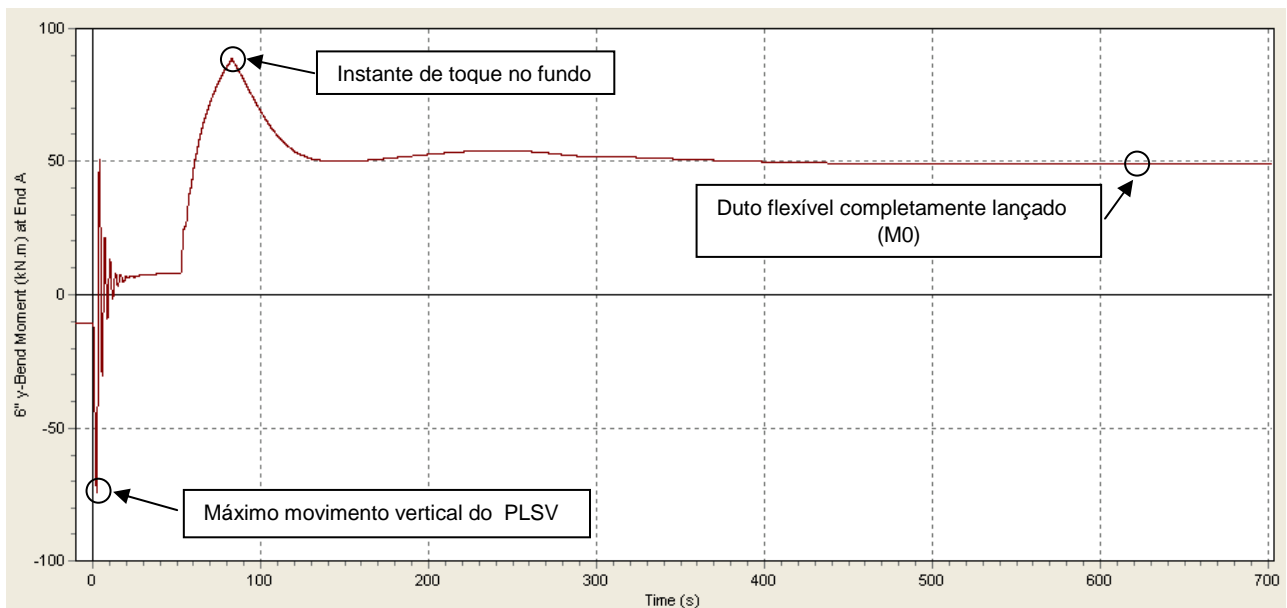


Gráfico 1 - Curva típica de momento x tempo

Após a obtenção dos resultados, o modelo é congelado a fim de que sua configuração final sirva de base para execução dos próximos casos de carregamento.

3.2.4 - CASO 4 - TESTE HIDROSTÁTICO

Esta análise simula a condição de teste hidrostático com o MCV travado e a linha assentada no fundo do mar. Para obtenção dos resultados desta etapa duas simulações são executadas, cada uma considerando uma curva de rigidez para o duto distinta: (i) curva Momento x Curvatura de lançamento (CASO 3), sem consideração da histerese; e (ii) curva Momento x Curvatura de teste hidrostático, sem consideração da histerese.

Ambas as análises devem ser executadas partindo da configuração final obtida da etapa de lançamento executada para o CASO 3.

O resultado considerando a curva de rigidez a flexão de lançamento (pressão e

temperatura para instalação), sem a consideração da histerese do duto, deve receber a legenda “1”, por exemplo, M1 para o momento obtido no flange do goose neck.

Em seguida, efetua-se nova análise a partir da configuração final do duto obtida no CASO 3 considerando a curva de rigidez a flexão de teste hidrostático (pressão e temperatura para a condição de teste), sem a consideração da histerese do duto. Os resultados obtidos desta análise devem receber a legenda “2”, por exemplo, M2 para o momento obtido no flange do goose neck.

Levando em conta os esforços de flexão como exemplo, a diferença entre M2 e M1 deve ser somada ao resultado de momento, M0, obtido ao final da fase de lançamento, Caso 3. O momento fletor obtido desta soma é o esforço de flexão no flange do goose neck após o teste hidrostático.

$$M_{\text{TesteHidrostático}} = M2 - M1 + M0 \quad (6)$$

Os esforços cortante e de tração no flange do goose neck são obtidos do mesmo modo que o momento fletor apresentado acima, considerando a diferença dos esforços e somando ao valor obtido ao final da análise do CASO 3.

A fim de ilustrar melhor, a Figura 6 mostra 3 curvas momento versus curvatura: (i) curva azul marinho, que representa a curva utilizada para as simulações de lançamento do duto (CASO 3); (ii) curva rosa utilizada para as simulações de operação do duto e; (iii) curva verde utilizada para as simulações de teste hidrostático do duto.

O ponto azul claro com momento M0, exibido na Figura 6, representa o momento obtido ao término da análise de lançamento, CASO 3 (curva azul marinho). O ponto vermelho com momento M1 representa o momento para o CASO 4, considerando a curva momento x curvatura de lançamento sem histerese. E o ponto verde, com momento M2, obtido para a curva de rigidez de teste hidrostático sem histerese, também para o CASO 4.

Finalmente, o ponto rosa com contorno azul é o resultado final de momento para o teste hidrostático conforme equação 6.

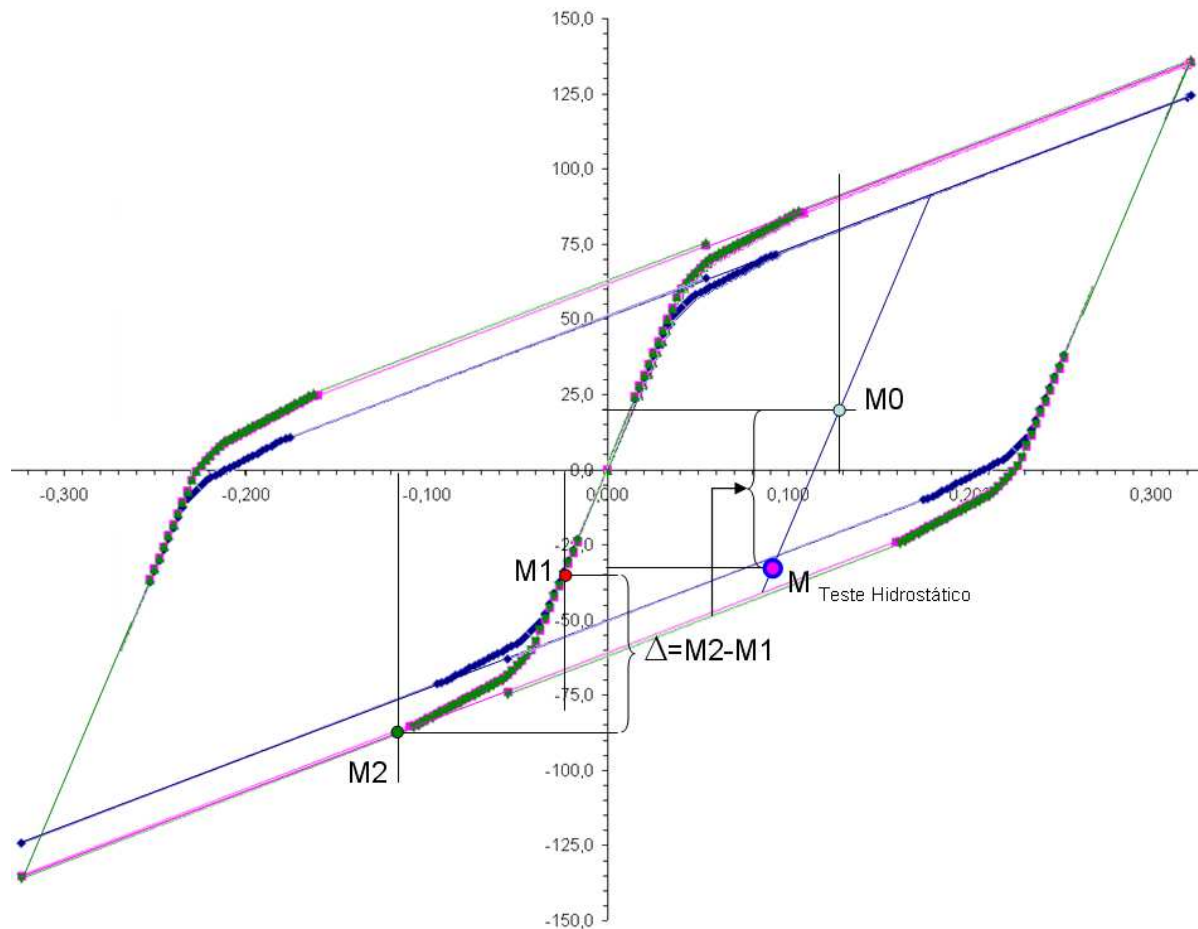


Figura 6 - Valores de momento no flange do goose neck para análise de teste

3.2.5 - CASO 5 - OPERAÇÃO

Esta análise simula a condição de operação com o MCV travado e a linha assentada no fundo do mar e é executada do mesmo modo que o caso de teste hidrostático, substituindo a curva momento x curvatura para as condições de teste hidrostático pela curva para as condições de operação.

3.3 - MODELO NUMÉRICO

Os modelos foram construídos no programa ORCAFLEX ⁽⁷⁾.

O solo marinho é considerado plano. A incerteza na inclinação do solo é considerada variando a altura do flange-solo, de forma a representar uma inclinação de +/- 3°.

As análises globais foram realizadas no domínio do tempo sem a consideração de condições ambientais, corrente e onda. Foi utilizado um método de integração implícita

sem variação do time step.

O congelamento da configuração do duto a fim de manter a configuração final obtida para um determinado caso de carregamento como a configuração inicial para o próximo caso inalterada é feito utilizando a opção “Specified Starting Shapes for Lines” do programa ORCAFLEX ⁽⁷⁾, associada ao método de análise estática “Separate Buoy and Line Statics”.

Para haver estabilidade dos carregamentos após o lançamento do duto, sugere-se que a rigidez ao cisalhamento lateral do solo seja considerada como sendo aproximadamente 100 vezes a rigidez normal do solo, de modo que o deslocamento (D_{crit}) apresentado na Figura 7 seja a menor possível e o modelo de atrito de Coulomb que estabelece uma força μR , onde μ é o coeficiente de atrito e R a reação do solo seja melhor representada.

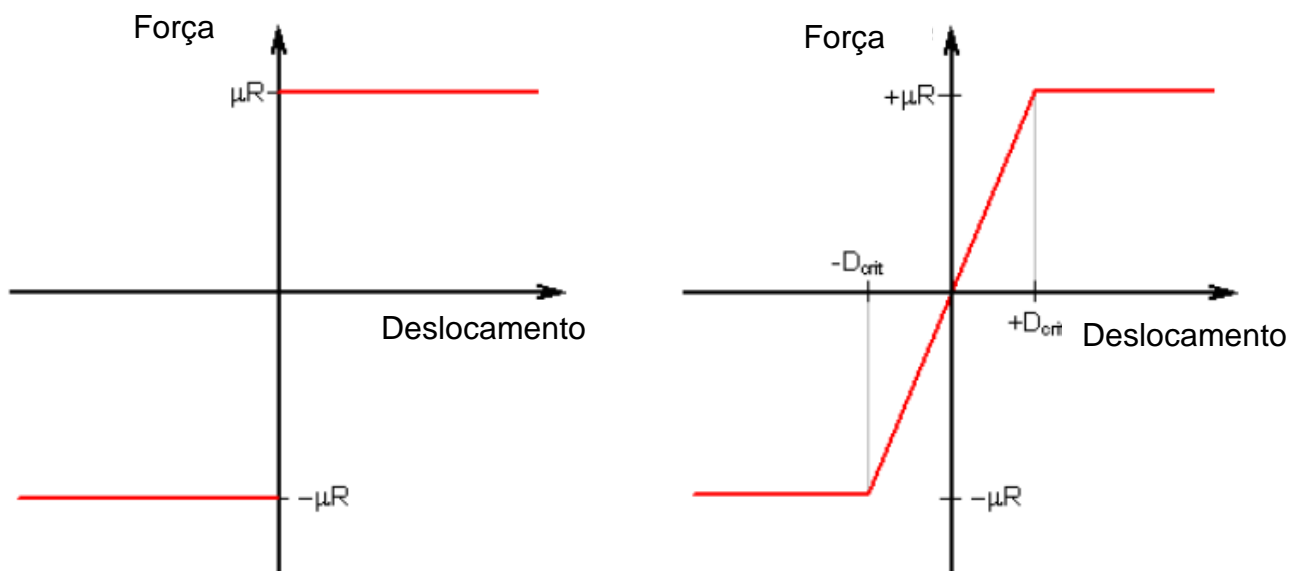


Figura 7 - Modelo de atrito do solo. Fonte: ORCAFLEX ⁽⁷⁾

O modelo de vértebra considera a mesma rigidez flexional do duto flexível, incluindo os efeitos de histerese, não sendo representado o seu travamento, que deve ser avaliado a partir da análise dos resultados de curvatura ao longo do comprimento do duto. Curvaturas superiores à curvatura máxima de travamento significa travamento da vértebra e devem ser analisados caso a caso.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os esforços mostrados na Tabela VII e VIII para os MCVs dos poços MLS-157 e MLS-179, respectivamente, foram obtidos dos relatórios de carga apresentados pelo ISBM ⁽²⁾ e ⁽³⁾ e pelas simulações realizadas pela CENPES/PDEP/TDUT utilizando a metodologia

proposta. Os esforços foram calculados no flange do MCV seguindo a convenção mostrada na Figura 8.

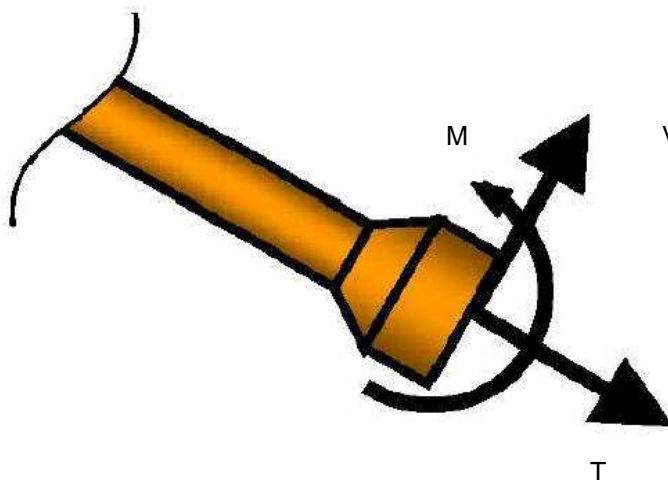


Figura 8 - Convenção de esforços atuantes no flange do MCV

São apresentados nas Tabelas VII e VIII abaixo, apenas os resultados para os casos de carregamento: 3 [(i) movimento vertical do PLSV e (ii) instante de toque no leito marinho]; 4 e; 5.

Tabela VII

Esforços no flange do MCV (MLS-157)

Condição	Esforços				
	Tipo de força	Rev B	Rev C	Nova metod	un
CASO 3i (Movimento vertical)	Cortante (Ex)	-9,24	-17,59	-1,00	kN
	Tração (Ez)	6,96	10,90	15,90	kN
	Momento (Ey)	59,58	46,32	108,20	kN.m
	Mequivalente	41,63	14,68	89,88	kN.m
CASO 3ii (Toque do duto no fundo)	Cortante (Ex)	-21,32	-22,78	-27,00	kN
	Tração (Ez)	12,33	12,68	14,10	kN
	Momento (Ey)	-37,88	-15,76	-94,20	kN.m
	Mequivalente	-75,27	-55,18	-139,92	kN.m
CASO 5 (Operação)	Cortante (Ex)	-20,01	-14,06	-20,70	kN
	Tração (Ez)	6,01	20,81	9,10	kN
	Momento (Ey)	-31,90	39,84	-58,80	kN.m
	Mequivalente	-60,98	1,47	-92,00	kN.m
CASO 4 (Teste)	Cortante (Ex)	-20,01	-14,05	-20,70	kN
	Tração (Ez)	6,01	20,80	9,10	kN
	Momento (Ey)	-31,90	40,01	-59,00	kN.m
	Mequivalente	-60,98	1,66	-92,20	kN.m

Notas:

i) Rev B significa que ainda não se utilizava uma curva de rigidez para o duto flexível, apenas os dados fornecidos no data sheet;

ii) Rev C significa o uso da curva de rigidez do duto flexível, todavia, sem considerar histerese;

iii) Nova metod, significa a nova metodologia proposta com o uso de uma curva de histerese para representar o comportamento do duto flexível.

Os resultados encontrados para o MLS-157 mostram uma grande divergência nos valores obtidos para os diferentes métodos. Contudo, para os casos de instalação (3i e 3ii), os esforços têm mesmo sentido, seguindo o mesmo padrão de resposta.

É possível notar também um aumento considerável nos resultados obtidos, principalmente, para os momentos fletores, quando se compara a nova metodologia proposta com os esforços calculados utilizando a Rev. C (atual) e com a Rev. B. Os resultados para os casos de teste hidrostático e operação que consideram variação de pressão não seguiram um mesmo padrão de resposta, sendo o momento calculado pela Rev. C com sentido contrário ao obtido pela Rev. B e pela metodologia proposta.

Com o intuito de justificar o emprego da nova metodologia foi efetuada uma análise utilizando: (i) os resultados numéricos apresentados na Tabela VII; (ii) os resultados da inspeção realizada após a falha ⁽⁸⁾; (iii) as informações do relatório de análise de falhas ⁽⁹⁾; (iv) e os limites estabelecidos pela AKER para este MCV ⁽¹⁾.

O MCV do poço MLS-157 que rompeu é um MCV AKER com 45° de ângulo de inclinação do goose neck com a vertical, sem reforço estrutural. Sua instalação foi com uma CVD de 1ª extremidade. A Figura 9 mostra um modelo gráfico do goose neck deste MCV.

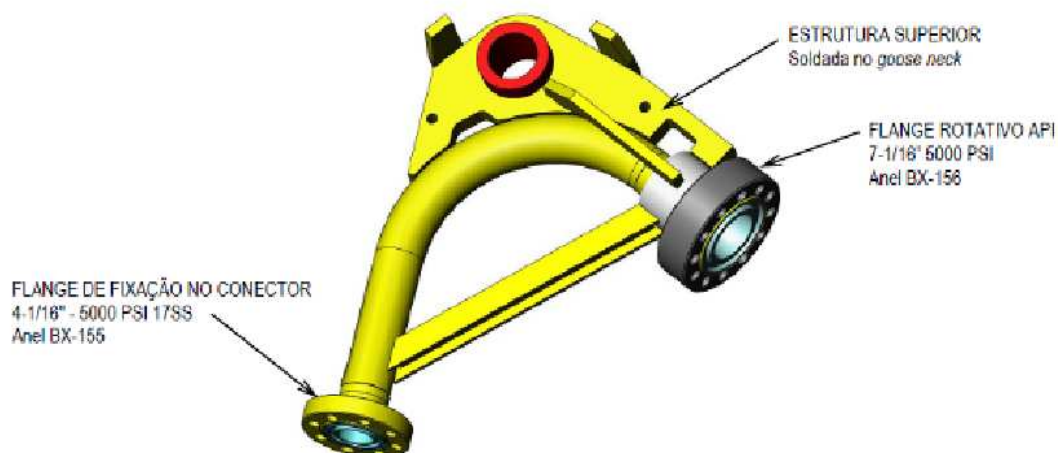


Figura 9 - Goose neck MCV do poço MLS-157

Segundo o relatório de interligação/ inspeção do MLS-157 ⁽⁸⁾, houve a falha do MCV durante sua fase de instalação, imediatamente após o assentamento do MCV ao HUB. A Figura 10 mostra fotos obtidas pelo ROV durante inspeção do MLS-157 ⁽⁸⁾.



Figura 10 - Dano no MCV do poço MLS-157 ⁽⁸⁾

Pelas características da falha, descritas no relatório de análise de falhas ⁽⁹⁾, em conjunto com a descrição fornecida no relatório de inspeção ⁽⁸⁾, é possível emitir parecer sobre as causas primárias dos danos sofridos pelo mesmo MCV, visto que o documento ⁽⁹⁾ informa que houve plastificação excessiva da seção transversal do groove no sentido de fechar o goose neck, além de ruptura devido a carregamento no sentido de abrir o goose neck. As características da falha do MCV do poço MLS-157 ⁽⁹⁾ podem ser visualizadas nas Figuras 11 e 12.



Figura 11 - Superfícies de fratura na região do groove do MCV do poço MLS-157 ⁽⁹⁾



(a) Trecho contendo a solda flange-tubo com deformação plástica

(b) Superfície de fratura

Figura 12 - Danos do MCV do poço MLS-157 ⁽⁹⁾

Com as informações dos documentos ⁽²⁾, ⁽⁸⁾ e ⁽⁹⁾ e com os resultados da Tabela VII, observa-se que a metodologia de análise para o cálculo dos esforços da Rev. C atualmente empregada, bem como a Rev. B anteriormente empregada, não são capazes de reproduzir os danos mostrados pelos relatórios ⁽⁸⁾ e ⁽⁹⁾, visto que os limites máximos de esforços estabelecidos pela AKER para o instante de acoplamento do MCV no HUB representados pelo CASO 3 não são infringidos.

Por outro lado, a nova metodologia proposta apresenta resultados de esforços, que ultrapassam os limites definidos pela AKER, logo, são consistentes com os danos exibidos pela inspeção efetuada ⁽⁸⁾ e pelos modos e mecanismos de falha presentes no relatório gerado pelo TMEC ⁽⁹⁾.

A Figura 13 exibe a configuração final obtida para a condição de equilíbrio (CASO 2) para o MLS-157. Observar que a inclinação do MCV se encontra próxima de zero e a altura do flange ao solo é a altura indicada nas premissas de análise, 4,792m.

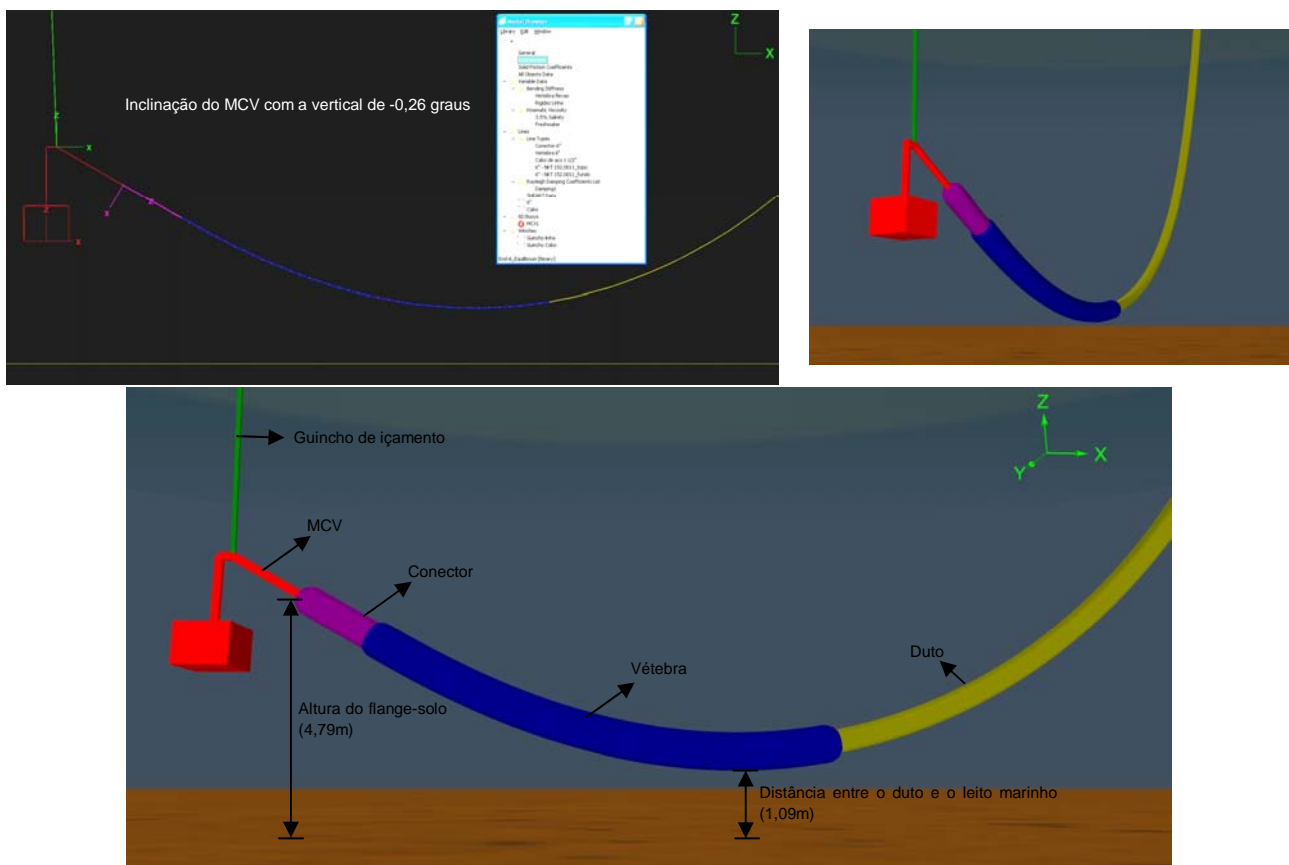


Figura 13 - Configuração de equilíbrio obtida para o MLS-157

Para o poço MLS-179, os resultados obtidos para os esforços no flange do MCV, apresentados na Tabela VIII, mostraram também grande divergência entre as metodologias. Diferente do ocorrido para o MLS-157, não houve o mesmo padrão de resposta para os casos de instalação, tendo havido alteração no sentido dos esforços.

Tabela VIII

Esforços no flange do MCV (MLS-179)

Condição	Esforços				
	Tipo de força	Rev B	Rev C	Nova metod	un
CASO 3i (Movimento vertical)	Cortante (Ex)	-9,24	-17,59	2,60	kN
	Tração (Ez)	6,96	10,90	19,70	kN
	Momento (Ey)	59,58	46,32	120,40	kN.m
	Mequivalente	41,63	14,68	102,04	kN.m
CASO 3i (Toque do duto no fundo)	Cortante (Ex)	-20,82	-21,61	-26,50	kN
	Tração (Ez)	11,91	12,18	14,80	kN
	Momento (Ey)	-32,04	2,22	-84,00	kN.m
	Mequivalente	-68,41	-35,34	-129,91	kN.m
CASO 5 (Operação)	Cortante (Ex)	-19,30	-11,68	-19,10	kN
	Tração (Ez)	6,18	20,44	8,70	kN
	Momento (Ey)	-24,98	59,10	-41,00	kN.m
	Mequivalente	-53,44	23,82	-71,96	kN.m
CASO 4 (Teste)	Cortante (Ex)	-19,30	-11,64	-19,20	kN
	Tração (Ez)	6,18	20,43	8,70	kN
	Momento (Ey)	-24,98	59,81	-41,70	kN.m
	Mequivalente	-53,44	24,58	-72,78	kN.m

Notas:

i) Rev B significa que ainda não se utilizava uma curva de rigidez para o duto flexível, apenas os dados fornecidos no data sheet;

ii) Rev C significa o uso da curva de rigidez do duto flexível, todavia, sem considerar histerese;

iii) Nova metod, significa a nova metodologia proposta com o uso de uma curva de histerese para representar o comportamento do duto flexível.

Da mesma maneira que para o MLS-157, os esforços obtidos para o MLS-179 aplicando a nova metodologia de cálculo são significativamente maiores que os esforços obtidos com a metodologia da Rev. C e da Rev. B, principalmente, para os momentos fletores. Assim como para o MLS-157, os resultados para os CASOS 4 e 5 não seguiram um mesmo padrão de resposta.

O MCV do poço MLS-179 danificado é um MCV AKER com 60° de ângulo de inclinação do goose neck com a vertical e com reforço estrutural nível 1. Sua instalação foi feita com uma CVD de 1ª extremidade. A Figura 14 mostra um modelo gráfico do goose neck deste MCV.

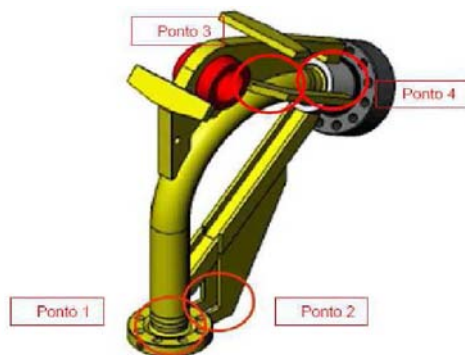


Figura 14 - Goose neck reforçado do MCV do poço MLS-179

De acordo com os relatórios de inspeção ⁽¹⁰⁾ e ⁽¹¹⁾ foram identificados os seguintes danos nos pontos 1 e 2 mostrados na Figura 14: (i) flambagem lateral das chapas de reforço e (ii) descascamento da pintura na região da solda do reforço ao flange. As Figuras 15 e 16 mostram fotos tiradas pelo ROV durante inspeção do MLS-179 ⁽¹¹⁾.

Estes danos foram identificados durante a inspeção realizada pelo ROV após algum tempo de operação do poço. Portanto, não é possível identificar se o dano ocorreu durante a fase de instalação, teste ou operação. Deste modo, os relatórios de inspeção ⁽¹⁰⁾ e ⁽¹¹⁾ não permitem consolidar um parecer sobre as causas primárias dos danos sofridos pelo MCV do poço MLS-179.



Figura 15 - Deformação da chapa de reforço e descontinuidade da pintura do MCV do poço MLS-179 ⁽¹¹⁾



Figura 16 - Fendimento da pintura na região do groove do MCV do poço MLS-179 ⁽¹¹⁾

Já o relatório de análise de falhas ⁽⁹⁾ mostrou danos na região do groove do goose neck, trincas, lado oposto a conexão com o duto flexível, trincas na região da solda da chapa de reforço com o flange. Também, que houve deformação plástica excessiva, tanto no reforço, quanto no goose neck, no lado oposto ao flange de conexão com o duto. A Figura 17 exibe as imagens das falhas presentes no MCV do poço MLS-179 ⁽⁹⁾.



Figura 17 - Presença de trincas na região do groove e da solda do reforço, MCV do poço MLS-179 ⁽⁹⁾

Porém, o relatório de análise de falhas ⁽⁹⁾ também não contribuiu para que fosse possível consolidar um parecer sobre as causas primárias dos danos sofridos pelo MCV do poço do MLS-179.

A partir da análise conjunta dos resultados das análises numéricas, dos resultados das inspeções ⁽¹⁰⁾ e ⁽¹¹⁾, da análise de falha ⁽⁹⁾ e dos resultados de momentos fletores equivalentes limites apresentados pela AKER no documento ⁽²⁾, nota-se que a metodologia atualmente empregada para o cálculo dos esforços não é capaz de reproduzir os danos mostrados pelos relatórios ⁽⁹⁾ a ⁽¹¹⁾, uma vez que os limites estabelecidos pela AKER não são infringidos.

Por outro lado, a nova metodologia proposta apresenta resultados de esforços, que ultrapassam os limites definidos pela AKER, logo, são consistentes com os danos exibidos pelas inspeções efetuadas ⁽¹⁰⁾ e ⁽¹¹⁾ e pelos modos e mecanismos de falha presentes no relatório gerado pelo TMEC ⁽⁹⁾.

O Gráfico 2 mostra a comparação entre o comportamento do duto quanto a flexão quando submetido aos carregamentos de instalação para os três métodos de análise comparados na Tabela VIII.

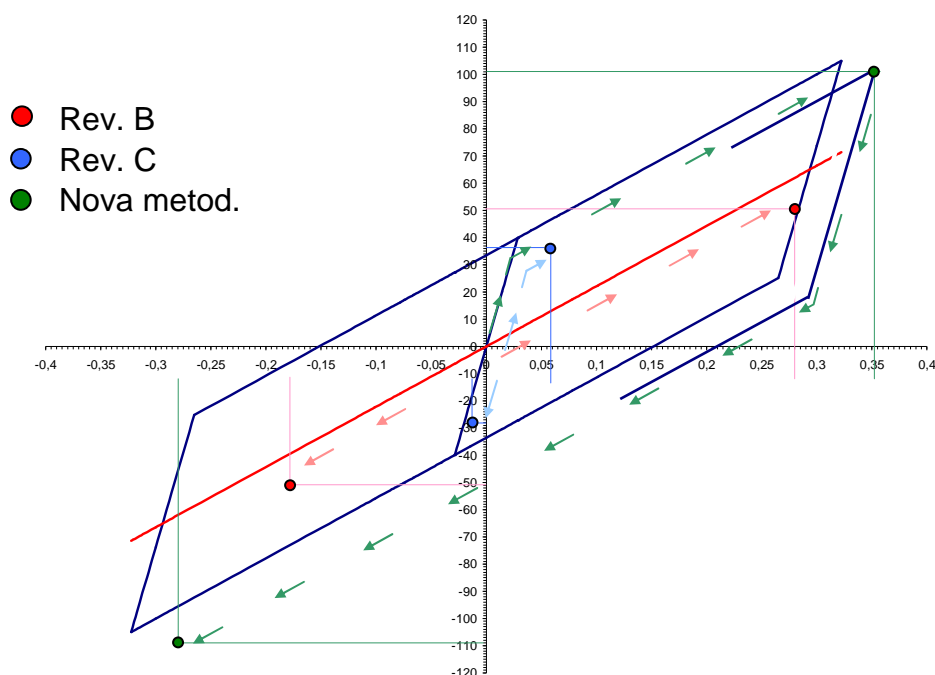


Gráfico 2 - Comportamento do duto a flexão para cargas de instalação para os três métodos de análise

Na Tabela IX são mostrados os esforços obtidos das simulações numéricas para o poço RO-066 de acordo com o relatório de cargas do ISBM ⁽⁶⁾ e pelas simulações realizadas pelo CENPES/PDEP/TDUT. A convenção de sinais é a exibida pela Figura 8.

Tabela IX

Esforços no flange do MCV (RO-066)

Condição	Esforços			
	Tipo de força	Rev 0	Nova metod	un
CASO 3i⁽ⁱⁱⁱ⁾ (Movimento vertical)	Cortante (Ex)	1,80	9,50	kN
	Tração (Ez)	7,50	4,70	kN
	Momento (Ey)	120,00	140,60	kN.m
	Mequivalente	115,05	142,33	kN.m
CASO 3ii (Toque do duto no fundo)	Cortante (Ex)	-20,66	-25,07	kN
	Tração (Ez)	20,80	24,70	kN
	Momento (Ey)	-9,44	-80,60	kN.m
	Mequivalente	-37,98	-114,80	kN.m
CASO 5 (Operação)	Cortante (Ex)	-1,79	-14,74	kN
	Tração (Ez)	31,81	6,29	kN
	Momento (Ey)	140,92	61,32	kN.m
	Mequivalente	114,47	47,79	kN.m
CASO 4 (Teste)	Cortante (Ex)	2,87	-14,44	kN
	Tração (Ez)	37,78	5,39	kN
	Momento (Ey)	167,69	75,72	kN.m
	Mequivalente	139,16	63,08	kN.m

Notas:

i) Rev 0 significa o uso da curva de rigidez do duto flexível, todavia, sem considerar histerese;

ii) Nova metod, significa a nova metodologia proposta com o uso de uma curva de histerese para representar o comportamento do duto flexível.

iii) Houve travamento da vértebra durante o CASO 3 para ambas as metodologias. Essas cargas não levam em conta a vértebra travada, ou seja, foram obtidas para mesma função de flexão do duto, sem considerar travamento.

Do mesmo modo que para os poços MLS-157 e MLS-179, os resultados das análises mostraram grande divergência entre as metodologias. O mesmo padrão de resposta em relação ao sentido dos esforços ocorreu para os casos de instalação, teste e operação.

Para o poço RO-066, os resultados obtidos com a nova metodologia proposta apresentou aumento significativo em relação aos resultados obtidos com o procedimento utilizado na Rev. 0, principalmente, para os momentos fletores, da mesma maneira que para os poços MLS-157 e MLS-179.

Houve travamento da vértebra nas simulações numéricas para ambos os modelos, o que indica a necessidade de medidas preventivas operacionais durante a instalação, tais como: a instalação de flutuadores, alteração do tipo de CVD de primeira para segunda extremidade, etc. O objetivo destas medidas é evitar danos ao duto e aos equipamentos submarinos, como deformação plástica excessiva e/ou quebra do gosse neck durante instalação.

O MCV do poço RO-066 é um MCV AKER com 45° de ângulo de inclinação do goose neck com a vertical e sem reforço estrutural. Sua instalação se deu a partir de uma CVD de 1ª extremidade.

De acordo com o relatório de inspeção ⁽¹³⁾ foi identificado fendimento da pintura nas regiões da solda do flange ao goose neck e no groove do MCV, que se estendem por aproximadamente metade da circunferência do goose neck. Estes danos se encontram visíveis na face oposta ao flange de conexão com o duto flexível.

Ainda conforme ⁽¹³⁾, não foi possível identificar se o dano ocorreu durante a fase de instalação, teste ou operação, visto que os danos identificados com a inspeção realizada pelo ROV foram observados somente após o poço se encontrar produzindo desde 2009.

Deste modo, o relatório de inspeção ⁽¹³⁾ não permite a consolidação de parecer sobre as causas primárias dos danos sofridos pelo MCV do poço RO-066.

As Figuras 18 e 19 mostram fotos tiradas pelo ROV durante inspeção do RO-066 ⁽¹³⁾.

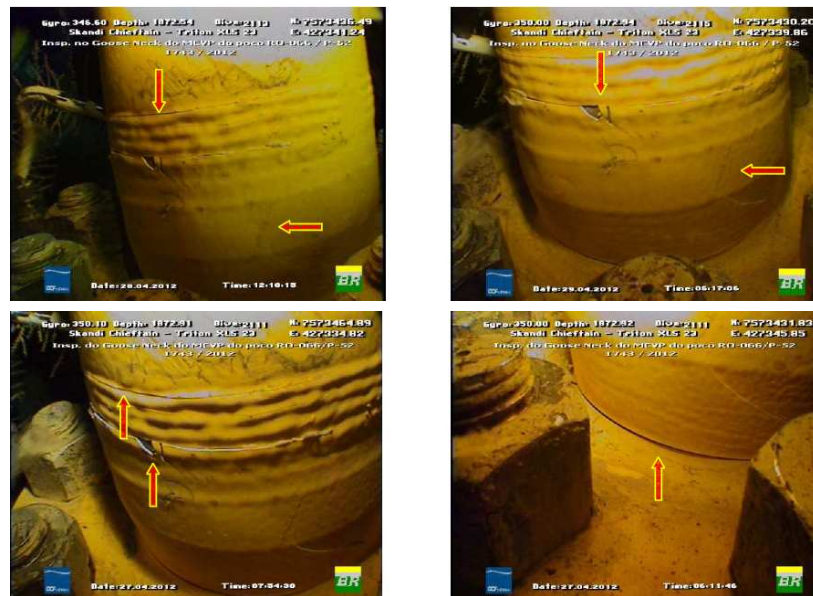


Figura 18 - Presença de fendimento da pintura na região do groove e da solda do flange-goose neck, MCV do poço RO-066 ⁽¹³⁾. Fotos Tiradas pelo quadrante direito do MCV, observador atrás do MCV



Figura 19 - Presença de fendimento da pintura na região do groove, MCV do poço RO-066 ⁽¹³⁾. Fotos Tiradas pelo quadrante esquerdo do MCV, observador atrás do MCV

A partir da comparação entre os resultados das análises apresentados na Tabela IX com os resultados das inspeções ⁽¹³⁾, é possível verificar que os fendimentos na pintura podem representar plastificação do goose neck do MCV, que somente pode ter ocorrido durante a instalação do MCV, uma vez que o CASO 3ii é o que apresenta momento equivalente no ponto fraco no sentido de “fechar” o goose neck.

Os esforços mostrados na Tabela X foram obtidos das simulações numéricas para o poço BAZ-002, conforme o relatório de carga elaborado pelo ISBM ⁽⁵⁾, e pelas simulações realizadas pelo CENPES/PDEP/TDUT. A convenção de sinais é apresentada na Figura 8.

O MCV do poço BAZ-002 é um MCV AKER com 60° de ângulo de inclinação do goose neck com a vertical, sem reforço estrutural e sua instalação foi através de uma CVD de 1ª extremidade.

Este poço foi considerado como um dos pilotos para avaliação dos impactos nos esforços quando consideramos a metodologia nova proposta. Logo, não foi objetivo justificar a mudança de metodologia, como para os poços MLS-157, MLS-179 e RO-066, mas apenas apresentar as diferenças nos resultados pelo uso de uma ou outra metodologia de análise.

Conforme efetuado para os outros poços, foi efetuada uma inspeção por ROV neste MCV após a instalação e não houve indicativos de dano ⁽¹²⁾.

As análises para o BAZ-002 não foram efetuadas com a metodologia antiga, que considerava apenas a rigidez constante fornecida nos data sheets dos tubos, visto que a análise do MCV ocorreu após esta metodologia ter caído em desuso.

Tabela X

Esforços no flange do MCV (BAZ-002)

Condição	Esforços			
	Tipo de força	Rev 0	Nova metod	un
CASO 3i (Movimento vertical)	Cortante (Ex)	-11,97	10,40	kN
	Tração (Ez)	9,39	12,60	kN
	Momento (Ey)	87,21	155,40	kN.m
	Mequivalente	59,36	156,33	kN.m
CASO 3ii (Toque do duto no fundo)	Cortante (Ex)	-30,42	-35,60	kN
	Tração (Ez)	17,36	22,40	kN
	Momento (Ey)	-60,54	-131,60	kN.m
	Mequivalente	-124,03	-208,24	kN.m
CASO 5 (Operação)	Cortante (Ex)	-14,98	-17,70	kN
	Tração (Ez)	25,25	10,60	kN
	Momento (Ey)	132,00	77,30	kN.m
	Mequivalente	82,01	39,80	kN.m
CASO 4 (Teste)	Cortante (Ex)	-14,40	-17,20	kN
	Tração (Ez)	25,00	10,50	kN
	Momento (Ey)	145,92	90,20	kN.m
	Mequivalente	97,05	53,53	kN.m

Notas:

i) Rev 0 significa o uso da curva de rigidez do duto flexível, todavia, sem considerar histerese;

ii) Nova metod, significa a nova metodologia proposta com o uso de uma curva de histerese para representar o comportamento do duto flexível.

Conforme pode ser observado, assim como para os poços MLS-157, MLS-179 e RO-066, os resultados mostrados na Tabela X exibem grande discrepância de valores entre as metodologias de cálculo e, de um modo geral, seguem o mesmo padrão de resposta em relação ao sentido dos esforços.

Nota-se um aumento considerável nos resultados obtidos para os momentos fletores, quando se compara a nova metodologia proposta com a metodologia atual utilizada nas simulações (Rev. 0). Há também grande variação nos resultados quando são comparados os casos que consideram variação de pressão, ficando a metodologia nova com resultados inferiores aos que foram obtidos com a metodologia atual.

De acordo com os limites de carga estabelecidos pela AKER para o ponto fraco do goose neck ⁽⁵⁾, observa-se que, para ambas as metodologias, haveria danos ao MCV: (i) CASOS 3ii e 4 para metodologia atual e (ii) CASO 3ii para a metodologia nova. Todavia, a inspeção visual realizada pelo ROV ⁽¹³⁾ não exibiu qualquer sinal de dano.

5 – CONCLUSÕES

Os resultados obtidos das análises estáticas e dinâmicas apresentadas no capítulo anterior permitem concluir que a metodologia atual de análise não foi capaz de reproduzir os eventos ocorridos durante as operações de CVD dos poços MLS-157, MLS -179 e RO-066, uma vez que os momentos equivalentes obtidos no ponto fraco do goose neck estão abaixo dos limites estabelecidos pelos fabricantes dos MCVs.

Além disso, é possível perceber que a nova metodologia de análise proposta que considera a histerese do duto flexível é capaz de explicar os danos apresentados pelos relatórios de inspeção dos poços MLS-157, MLS -179 e RO-066 ^{(8) a (11) e (13)}.

Pela análise dos resultados, nota-se que a metodologia proposta fornece esforços mais elevados para os casos de instalação (CASO 3) que a metodologia atual, que não considera a histerese do duto. Entretanto, para os casos de teste e operação (CASOS 4 e 5), os esforços para os poços BAZ-002 e RO-066 obtidos com a nova metodologia proposta forneceram resultados menos severos do que a metodologia atual.

6 – RECOMENDAÇÕES

Por representar de modo mais realista o comportamento à flexão do duto flexível durante a operação de CVD, recomenda-se que a nova metodologia de análise proposta neste relatório seja utilizada nas análises de instalação de MCV.

Um descritivo de como as análises foram efetuadas pelo CENPES/PDEP/TDUT se encontra no ANEXO A. Entretanto, compete ao analista definir a forma mais adequada de efetuar as simulações, buscando sempre representar de modo mais realista possível as

condições que ocorrem efetivamente no campo.

Os esforços obtidos para a condição de teste hidrostático (CASO 4) foram maiores que os esforços obtidos para a condição de operação (CASO 5). Em razão das incertezas na metodologia, recomenda-se utilizar os esforços obtidos para a condição de teste para representar também a condição de operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (¹) CT TS 013/2010, Metodologia para Avaliação de Cargas em Módulo de Conexão Vertical, 2010;
- (²) RL-3912.00-1500-942-PMU-066 Rev B, Análise de Esforços em Equipamentos Submarinos (MCV) – Dutos de Produção (6") de Marlim Sul - P-56, 2011;
- (³) RL-3912.00-1500-942-PMU-066 Rev C, Análise de Esforços em Equipamentos Submarinos (MCV) - Dutos de Produção (6") de Marlim Sul - P-56, 2012;
- (⁴) Emails recebidos do Raphael Beppler, dias 14 e 15-12-2011;
- (⁵) RL-3674.00-1500-942-PMU-008 Rev 0, Análise de Esforços em Equipamentos Submarinos (MCVP) - Duto de Produção (8") de 7-BAZ-002 (BAZPS-P03) de Baleia Azul - FPSO Espadarte, 2012;
- (⁶) RL-3915.00-1500-942-PMU-064 Rev 0, Análise de Esforços em Equipamentos Submarinos (MCV) - Linha de Produção (7") do poço RO-066 - Roncador - P-52, 2012;
- (⁷) ORCAFLEX, versão 9.5b, 2011;
- (⁸) Smls11-030, Relatório de Serviço, Interligação da Linha de Produção entre o Poço MLS-157 e a P-56, 2011;
- (⁹) CT TMEC nº 15/2012, Análise de Falha dos Goose Necks do MCV-142/ MLS-157 e MCV-172/ MLS-179, 2012;
- (¹⁰) ISmls11-314, Relatório de Serviço, Inspeção no Goose Neck e no Contraventamento do MCV de Produção do Poço Mls-179 / P-56, 2011;
- (¹¹) COMmls11-321, Relatório de Serviço, Inspeção no MCVP do MLS-179/P-56, 2011;
- (¹²) N7Baz12-023, Relatório de Serviço, Pré-lançamento da Linha de Produção entre o poço BAZ-002 (BAZ PS-P03) e o FPSO Cidade de Anchieta, 2012;
- (¹³) SCro12-147, Relatório de Serviço, Inspeção no Goose Neck do MCV-P do Poço RO-066/P-52, 2012;

ANEXO A

(Passo a Passo de Análise Utilizada pelo TDUT)

ANEXO A.1 - Construção dos Modelos dos Equipamentos e Acessórios

Após a coleta das informações necessárias para o início das análises, dados de conectores, MCVs, vértebras, swíveis, etc, deve-se efetuar a construção do modelo matemático destes acessórios.

Os modelos dos equipamentos e acessórios foram construídos com o auxílio de uma planilha Excel seguindo as diretrizes informadas no Capítulo 2 e repetidas a seguir. Também seguem abaixo algumas especificidades, encontradas no Capítulo 2, utilizadas nas simulações realizadas nos poços MLS-157, MLS-179, RO-066 e BAZ-002.

- Rigidez cisalhante do solo de $100 \times k_{normal}$;
- Uma vez que as análises de CVD foram realizadas para poços produtores, para todos os casos de análise os dutos foram considerados cheios com água do mar, com densidade $\gamma_w = 1025 \frac{kg}{m^3}$;

Os dados de rigidez flexional e axial dos conectores foram calculados como descrito abaixo.

$$RigidezFlexional = E \cdot I = E \cdot \frac{\pi \cdot (OD_{pescoço}^4 - ID_{conector}^4)}{64} \quad (A1)$$

$$RigidezAxial = E \cdot A = E \cdot \frac{\pi \cdot (OD_{pescoço}^2 - ID_{conector}^2)}{4} \quad (A2)$$

$$RigidezTorsional = G \cdot J = \frac{E}{2(1+\nu)} \cdot \frac{\pi \cdot (OD_{pescoço}^4 - ID_{conector}^4)}{32} \quad (A3)$$

Onde E é o módulo de elasticidade e ν é o coeficiente de Poisson.

Um diâmetro externo equivalente é utilizado para representar o conector, determinado conforme a seguinte expressão:

$$m_{conector,ar} + m_{duto,ar,vazio} = m_{conector,submerso} + m_{duto,submerso,vazio} + \frac{\pi \cdot \gamma_w \cdot OD_{equivalente}^2}{4} \quad (A4)$$

Onde m são os pesos lineares em kgf/m. Embora não corresponda à situação real, nesta expressão considera-se que o comprimento do duto dentro do conector é igual ao

comprimento do conector. A massa do conector utilizada como entrada de dados no programa de cálculo deve levar em conta a massa linear do duto flexível passando por seu interior.

O diâmetro interno do conector é igual ao diâmetro interno do duto.

A Figura A1, abaixo, exibe as principais informações necessárias para a modelagem numérica do conector.

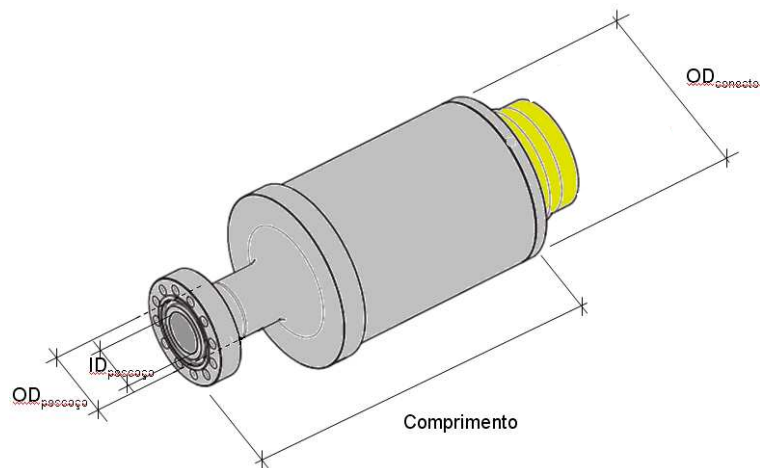


Figura A1 - Conector genérico com suas principais dimensões

O modelo numérico que representa a vértebra deve possuir as seguintes características:

- Diâmetro interno (*ID*) igual ao do duto flexível;
- Massa (*m*) igual a soma das massas lineares do duto flexível e da vértebra;
- *EI*, *EA* e *GJ*, iguais aos do duto flexível.

A modelagem da vértebra leva em conta o cálculo de um diâmetro externo equivalente, conforme calculado para o conector na equação A4, substituindo o peso linear no ar e submerso do conector pelos pesos lineares da vértebra.

Foi utilizado o software ORCAFLEX ⁽⁷⁾ para execução das análises estáticas e dinâmicas.

Os dutos flexíveis, conectores, vértebras e cabos foram modelados como elementos de linha, já o MCV foi modelado como um elemento de bóia 6D. Foram também utilizados elementos de guincho a fim de efetuar o pagamento e recolhimento dos dutos e dos cabos.

Os cabos de aço utilizados para içar o MCV e para sustentar o flexível possuem diâmetro de 1 ½" (0,038m) com massa linear de 6kg/m e rigidez axial entre 60000kN e 280000kN.

O PLSV é representado no modelo utilizando o elemento “Vessel” do programa ORCAFLEX ⁽⁷⁾, aplicando uma velocidade de avanço entre 0,10m/s (0,195nós) a 0,2m/s (0,39nós), quando necessário.

Além destes dados há também a velocidade de lançamento do duto pelo PLSV que deverá estar entre 0,10m/s (360m/h) a 0,12m/s (432m/h).

ANEXO A.2 - Metodologia

A metodologia de análise proposta utilizada para o cálculo dos esforços nos flanges dos MCVs dos poços MLS-157, MLS-179, RO-066 e BAZ-002 é diferente da atual metodologia principalmente pela inclusão da histerese do duto flexível nas simulações das operações de CVD.

São mantidos todos os casos de carregamentos atualmente utilizados para o cálculo de esforços. A Tabela A1 exibe um resumo dos casos de carregamentos executados.

Tabela A1

Casos de carregamento de projeto

Condição de Carregamento	Caso de Carregamento	Descrição
Instalação (Duto Cheio de Água do Mar e Capa Externa Intacta)	Caso 1	CVD de 2ª extremidade, 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 praticamente vertical
	Caso 3	MCV conectado ao HUB do equipamento submarino: (i) linha suspensa com aplicação do movimento vertical do PLSV; (ii) lançamento do duto flexível, momento em que ele toca o fundo do mar e após ter sido completamente lançado.
Teste Offshore	Caso 4	Teste hidrostático, 110% da pressão de projeto. MCV conectado ao HUB do equipamento submarino e duto flexível completamente lançado.
Operação	Caso 5	Condição de operação, 100% da pressão de operação ou de projeto. MCV conectado ao HUB do equipamento submarino e duto flexível completamente lançado.

Máxima pressão de teste offshore deverá ser considerada igual a 1,10xMáxima Pressão Interna de Projeto, a não ser que outro valor seja especificado. Este caso cobre a condição de operação.

ANEXO A.2.1 – DESCRIÇÃO DOS CASOS DE CARREGAMENTO**CASO 1 - CVD DE 2ª EXTREMIDADE - MCV NO PLSV**

Os esforços para este caso são determinados por meio de uma análise analítica simplificada que considera a *ELT* (Estimated Laying Tension) ^(nota 1) para definir a máxima carga de tração que atua no flange do MCV:

$$ELT = (LDA + 10m) \cdot FC \cdot FAD \cdot w \quad (A5)$$

Onde:

LDA = Lâmina d'água;

FC = Fator de catenária;

FAD = Fator de amplificação dinâmica;

w = Peso linear submerso do duto flexível cheio de água do mar

CASO 2 - CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO EM UM CVD DE 1ª EXTREMIDADE

Esse caso visa representar a situação de conexão vertical de primeira extremidade em que o MCV está bem próximo do HUB no instante de ser assentado. Deve ser criada uma configuração em que o ângulo de inclinação do MCV seja igual a zero ou próximo disso (o MCV é considerado verticalizado desde que possua um desalinhamento máximo de $\pm 3^\circ$, situação que possibilita o seu assentamento).

A partir deste caso de análise é necessária a consideração da histerese no comportamento do duto flexível. No ORCAFLEX ⁽⁷⁾, dada a curva momento versus curvatura, o comportamento histerético do duto flexível é inserido na caixa de diálogo aberta através do seguinte caminho: Modelo Browser> Variable data> Bending stiffness, e marcando na opção “histeretic”.

Posteriormente, é também necessária a consideração da torção do duto flexível. Esta deve ser inserida por meio da caixa de diálogo aberta seguindo: Model browser> Line data. Nesta caixa, marcar “yes” na opção “Include torsion” e modificar a rigidez a torção para infinita na extremidade da linha conectada ao MCV.

Nota 1: foi considerado um ângulo de topo da catenária durante o lançamento de 3° para a definição desta equação.

A Figura A2 exibe as modificações mencionadas acima.

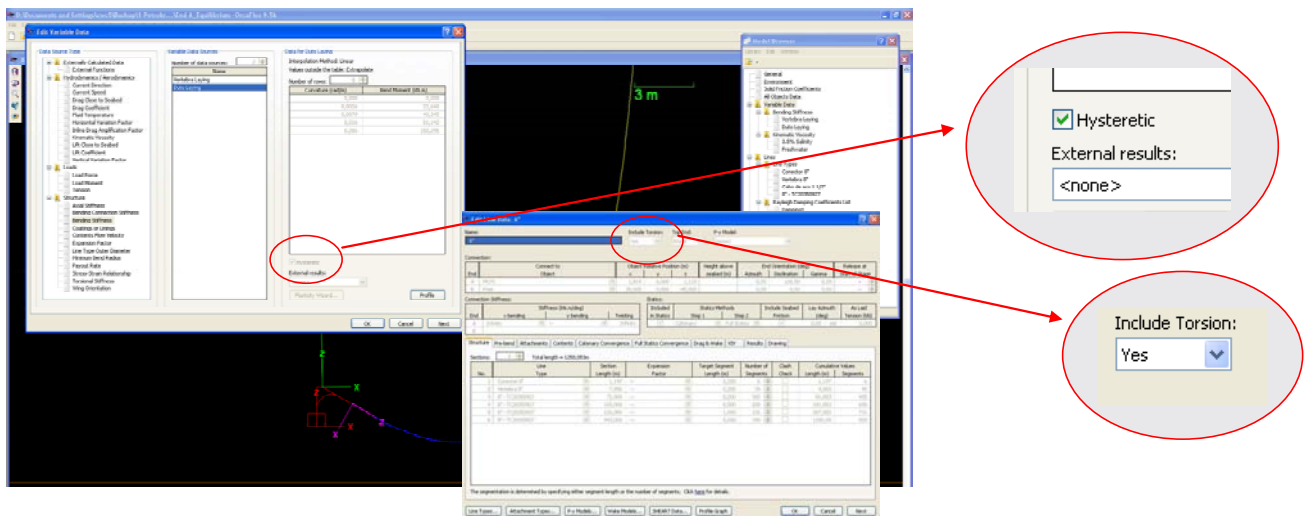


Figura A2 - Inserção da histerese no comportamento dos dutos flexíveis no ORCAFLEX ⁽⁷⁾

Outra especificidade do modelo que deve ficar a cargo do analista é a distância horizontal considerada entre o anel de içamento do MCV e da roda do PLSV, que pode variar de 13m a 70m. Os atuais modelos utilizaram a distância de 30m ^(nota 2), ver Figura A3.

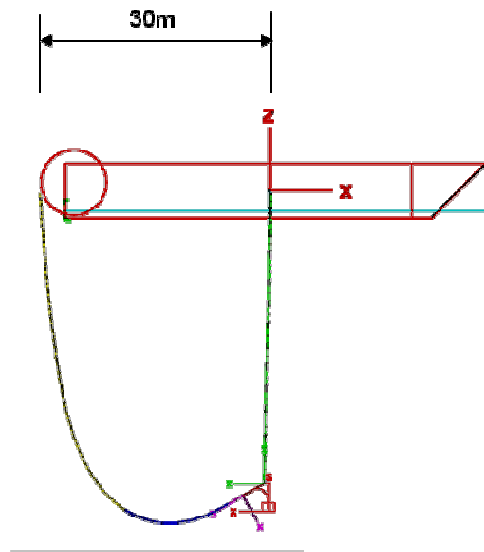


Figure A3 - Esquemático representando a distância horizontal entre o anel de içamento do MCV e a roda de lançamento do PLSV

Ao término da execução deste caso de carregamento, a configuração final obtida é utilizada para se proceder com a simulação para as outras condições de carregamento. O congelamento da configuração é feito com o uso da opção Menu model> Use specified starting shape for lines do programa ORCAFLEX ⁽⁷⁾.

Nota 2: para PLSVs capazes de lançar com distâncias inferiores a esta, estes valores deverão ser levados em conta

CASO 3 - LANÇAMENTO DO DUTO EM UM CVD DE 1ª EXTREMIDADE

Levando em conta a configuração final obtida para a situação de equilíbrio, deve-se efetuar uma análise com um modelo completo, sem interrupção, até que 40m de duto flexível, no mínimo, se encontre assentado no fundo do mar.

Algumas modificações no modelo congelado do caso anterior são necessárias antes do início da simulação deste caso de análise.

Modificar no Model browser> General> Statics> o método de análise estática para, "Separate buoy and line statics" e trocar a tolerância para 1,0. Na aba, Dynamics, são modificados os tempos de simulação. Exceto para o tempo de aplicação do movimento vertical (estágio 1), a definição destes tempos fica a critério do analista, de modo a se obter estabilidade dos resultados dos esforços. Em geral, sugerem-se os tempos apresentados na Tabela A2 abaixo.

Tabela A2

Estágios para aplicação dos carregamentos

Número do estágio	Duração (s)	Tempo de simulação ao final do estágio considerado (s)	Descrição
0	10	0	Obtenção das condições de equilíbrio iniciais
1	2,15	2,15	Tempo para aplicação do movimento vertical do PLSV
2	50	52,15	Tempo de estabilização dos esforços no flange
3	450	502,15	Lançamento do duto flexível e deslocamento horizontal do PLSV
4	100	602,15	Tempo de estabilização dos esforços no flange

Este caso de carregamento foi dividido em três momentos:

- (i) 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;
- (ii) 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;

- (iii) Completo assentamento do duto no fundo do mar. Simula o instante em que há a estabilização dos esforços no flange do MCV após ser lançado um determinado comprimento de linha no fundo (~ 40 m). O conjunto de esforços advindos deste instante recebe a denominação “0”, por exemplo, M0 para o momento fletor, uma vez que a configuração e os esforços serão considerados pontos de partida para a fase seguinte, que é a de teste hidrostático.

A fim de que os resultados obtidos considerem a dinâmica do duto durante o deslocamento vertical aplicado, foi feita uma análise transiente em que a amplitude do movimento vertical na extremidade da linha é aplicada em um tempo igual a $\frac{1}{4}$ do período do movimento imposto ($T = 8.6s$), neste caso 2,15s.

Outra característica para este caso de carregamento é que deve ser considerada a velocidade de lançamento de linha entre 0,10m/s (360m/h) a 0,12m/s (432m/h) e uma velocidade de avanço do PLSV com velocidade entre 0,10m/s (0,195nós) a 0,2m/s (0,39nós).

Além disso, considerando que os dados batimétricos podem não condizer exatamente com as condições encontradas para o lançamento do duto flexível no leito marinho, este mesmo caso deverá ser executado duas vezes: (a) altura do flange ao solo marinho nominal +52cm e (b) altura do flange ao solo marinho nominal -52cm. O valor de 52cm foi obtido para uma inclinação média do solo de 3° com um TDP a 10m do equipamento submarino.

O Gráfico A1 mostra um exemplo do comportamento do momento no plano vertical no flange do MCV ao longo do tempo, onde são mostrados os três instantes mais importantes para coleta de resultados.

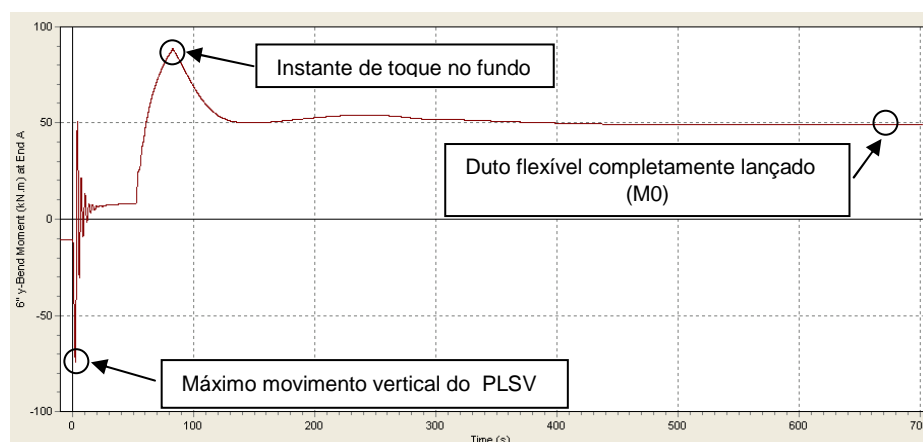


Gráfico A1 - Curva regular de momento x tempo

Após a obtenção dos resultados o modelo é congelado utilizando novamente a opção Menu model> Use specified starting shape for lines, a fim de que a configuração final do

duto nesta etapa sirva de base para execução dos próximos casos de carregamento.

3.2.6 - CASO 4 - TESTE HIDROSTÁTICO

Levando em conta a configuração final obtida para a situação de lançamento, deve-se simular a condição de teste hidrostático com o MCV travado e a linha assentada no fundo do mar. Para obtenção dos resultados desta etapa duas simulações são executadas, cada uma considerando uma curva de rigidez para o duto distinta: (i) curva Momento x Curvatura de lançamento (CASO 3), sem consideração da histerese; e (ii) curva Momento x Curvatura de teste hidrostático, sem consideração da histerese.

Ambas as análises devem ser executadas partindo da configuração final obtida da etapa de lançamento executada para o CASO 3.

O resultado considerando a curva de rigidez a flexão de lançamento (pressão e temperatura para instalação), sem a consideração da histerese do duto, deve receber a legenda “1”, por exemplo, M1 para o momento obtido no flange do goose neck.

Em seguida, efetua-se nova análise a partir da configuração final do duto obtida no CASO 3 considerando a curva de rigidez a flexão de teste hidrostático (pressão e temperatura para a condição de teste), sem a consideração da histerese do duto. Os resultados obtidos desta análise devem receber a legenda “2”, por exemplo, M2 para o momento obtido no flange do goose neck.

Levando em conta os esforços de flexão como exemplo, a diferença entre M2 e M1 deve ser somada ao resultado de momento, M0, obtido ao final da fase de lançamento, CASO 3. O momento fletor obtido desta soma é o esforço de flexão no flange do goose neck após o teste hidrostático.

$$M_{\text{TesteHidrostático}} = M2 - M1 + M0 \quad (\text{A6})$$

O esforço cortante e de tração no flange do goose neck são obtidos do mesmo modo que o momento fletor apresentado acima, considerando a diferença dos esforços e somando ao valor obtido ao final da análise do CASO 3.

3.2.7 - CASO 5 - OPERAÇÃO

Esta análise simula a condição de operação com o MCV travado e a linha assentada no fundo do mar e deve ser executada do mesmo modo que o caso de teste hidrostático, todavia, substituindo a curva momento x curvatura de teste pela de operação.